

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Unified reference model for smart manufacturing

Modèle de référence unifié pour la fabrication intelligente

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63339:2024



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2024 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 Secretariat
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
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 corrigendum or an amendment might have been published.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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 once a month by email.

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: sales@iec.ch.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews, graphical symbols and the glossary. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 500 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 25 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

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.

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

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 une fois par mois par email.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications, symboles graphiques et le glossaire. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 500 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 25 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.



IEC 63339

Edition 1.0 2024-10

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Unified reference model for smart manufacturing

Modèle de référence unifié pour la fabrication intelligente

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 25.040

ISBN 978-2-8322-9683-7

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
INTRODUCTION.....	8
1 Scope.....	12
2 Normative references	12
3 Terms, definitions, abbreviated terms, acronyms and conventions.....	12
3.1 Terms and definitions.....	12
3.2 Abbreviated terms and acronyms	17
3.3 Conventions.....	18
4 Conformance.....	18
4.1 Intended usage	18
4.2 Full conformance	18
4.3 Partial conformance	18
4.3.1 Conformance to purpose and context requirements	18
4.3.2 Conformance to dimensions and coherence.....	18
4.3.3 Conformance to semantic modelling of aspects	19
4.3.4 Conformance to facets and frameworks	19
5 The URMSM in smart manufacturing concepts.....	19
6 Reference model concepts	20
6.1 SM modelling	20
6.2 Modelling purpose.....	21
6.3 Modelling dimensions.....	22
6.4 Dimension coherence	23
6.5 Stakeholders.....	24
6.6 Concerns	24
6.7 Use case.....	24
6.8 Viewpoints and views.....	25
6.9 Perspectives	25
6.9.1 Use of perspective	25
6.9.2 Stakeholder perspectives.....	26
6.9.3 Analytical framework.....	26
6.10 Aspects.....	26
6.11 Life cycle modelling	27
6.12 SM semantic modelling	28
6.12.1 Semantic modelling overview.....	28
6.12.2 Forms of semantic representation.....	30
6.12.3 Granularity of semantic models.....	31
7 Dimensions of URMSM.....	31
7.1 Identifying aspect interactions of smart manufacturing	31
7.2 Specifying modelling dimensions	32
7.2.1 Collections of aspects as dimensions of smart manufacturing	32
7.2.2 Collections of dimensions as an analytical framework for smart manufacturing.....	33
7.2.3 Collections of life cycle phases as dimensions of smart manufacturing	34
7.3 Using a semantic model for analytical reasoning in smart manufacturing	34
7.4 Selecting facet dimensions based upon concerns	35
7.5 Identify meaningful dimension interactions.....	37

7.6	Frameworks as visualizations of interactions.....	38
8	Using the URMSM	41
8.1	Utility of a reference model for smart manufacturing	41
8.2	Industry specific application of the URMSM	41
8.3	Specializing URMSM	42
8.3.1	Specific utilization of the URMSM and rules for derivatives of SMRMs.....	42
8.3.2	Manipulating reference models to match purpose	43
9	Use cases of the URMSM.....	44
9.1	Analysis use case	44
9.1.1	Examining interactions at intersections of aspects	44
9.1.2	Examining interactions near intersections of aspects	45
9.1.3	Inserting new capabilities to analyse.....	45
9.2	Synthesis use case	45
9.2.1	Identifying necessary coverage of aspect interactions	45
9.2.2	Sequencing activities based upon dependencies	46
9.3	Simulation in SMRM.....	46
9.4	Implementation use case	47
10	Family of reference models based upon the URMSM	48
10.1	A base of essential SM modelling dimensions	48
10.2	Re-arranging framework dimensions	50
10.3	Complementary frameworks for same situation	50
10.4	Using multiple SMRMs to achieve purpose.....	51
Annex A (informative)	Concept areas of SM.....	52
A.1	Aspects of production and products.....	52
A.2	Perspectives of production and products stakeholders	52
A.3	Lifecycle considerations.....	53
A.4	Modelling of products and production using semantic models	53
A.5	Semantic models	55
Annex B (informative)	Formal Foundation for URMSM	57
B.1	Modelling framework for URMSM	57
B.1.1	Formalism caveat	57
B.1.2	Modelling framework formalism.....	57
B.1.3	Using a URMSM framework	60
B.1.4	Semantic models of dimensions composed of aspects	62
Annex C (informative)	Positioning URMSM among reference models	65
C.1	Positioning URMSM among reference models.....	65
Annex D (informative)	Meta-model for reference model analysis	66
D.1	Meta-model analysis	66
D.2	Using a meta-model.....	66
D.2.1	General	66
D.2.2	Assumptions, constraints and guidance	66
D.2.3	Concepts	67
Annex E (informative)	Principles of semantic modelling	73
E.1	Top level conceptual model.....	73
E.2	Semiotic conceptual model	75
E.3	Top level model domains	78
Annex F (informative)	Practitioner's modelling activity in a systematic usage of URMSM	80

F.1	Use case derivation of concerns, aspects, and perspectives	80
F.2	Relationship between aspects on a dimension and model contents	82
F.2.1	General	82
F.2.2	Implication of the dimension of lifecycle	83
F.2.3	Implication of the dimension of smart technology	83
F.2.4	Implication of the dimension of enterprise hierarchy	84
F.2.5	Implication of the dimension of capability level	84
F.3	Concept of step-by-step approach.....	84
F.3.1	Formalism caveat	84
F.3.2	Practical procedure.....	85
Annex G (informative)	Use case: Value stream	87
G.1	Overview.....	87
G.2	Conveyor system project.....	87
G.3	SM use case	88
G.4	Dimensions	90
G.4.1	Information in context	90
G.4.2	Dimension coherence using semantic models	90
G.4.3	Interactions between dimensions	90
G.4.4	Dimension S – The supply chain.....	91
G.4.5	Dimension C – Product/production system design.....	91
G.4.6	Dimension D – Production system	91
G.4.7	Dimension H – Operations management (shown within the production systems dimension D).....	91
G.4.8	Dimension I – Control/process level 1 (shown within Dimension D).....	92
G.5	Project flow and interaction	93
G.5.1	Product concept (Ctx) quotation.....	93
G.5.2	Product order process.....	94
G.5.3	New product concept(Ctx) quotation	95
G.5.4	Interaction matrix.....	95
Bibliography		96
Figure 1	– Using URMSM	9
Figure 2	– SM standard developer perspective of facet reuse	36
Figure 3	– Projection steps for standards developers.....	37
Figure 4	– A one dimensional framework representation	39
Figure 5	– A two dimensional framework representation	39
Figure 6	– Nested processes (centre oval) and user members (right).....	40
Figure 7	– URMSM abstraction stack	42
Figure 8	– Example of a model for use case #1.....	47
Figure 9	– Diversified smart manufacturing systems expected from different stakeholders	48
Figure 10	– Basic structure for a family of SMRM with alternative 3D representations.....	51
Figure A.1	– SM contextual relationships	54
Figure A.2	– Semiotic Triangle with 3 semiotic domains and 3 morphisms (relations between pairs of semiotic domain artefacts)	55
Figure A.3	– Product standards catalogue concept model	56
Figure B.1	– Semantic model scenario dimensions	62

Figure B.2 – Semantic model scenario as relationship graph	63
Figure C.1 – Example of cascading reference models	65
Figure D.1 – Meta-model for SMRM	72
Figure E.1 – Top level conceptual model "The Semiotic Triangle"	73
Figure E.2 – Knowledge Ontology (K-Pyramid) explained by the three coloured corners of the Semiotic Triangle (Concept Symbol Phenomenon)	74
Figure E.3 – I4.0 Methodology / Theory of Data: Flattening the knowledge/data pyramid.....	75
Figure E.4 – Cyclic semiotic relationships (morphisms).....	76
Figure E.5 – A first high level consolidation of interactions (I) – including IIoT Control Structure.....	76
Figure E.6 – Composition of SM knowledge from different SM domains	77
Figure E.7 – Top level concept model for model domain	78
Figure E.8 – Natural aspect concept model – dynamics	79
Figure F.1 – Utilization of the URMSM through a modelling activity of SM-practitioners.....	80
Figure F.2 – Projection steps for SM practitioners.....	81
Figure F.3 – Relationship between aspects on a dimension and model contents	83
Figure F.4 – Potential problem of the modelling activity by SM practitioners	84
Figure F.5 – Step-by-step approach.....	86
Figure G.1 – Product model interactions	89
Figure G.2 – Production System Dimension D.....	92
Table B.1 – Semantic model scenario	62
Table B.2 – Semantic model scenario as N-squared diagram.....	63
Table B.3 – Semantic model scenario Direct Intersections	64
Table B.4 – Semantic model scenario Indirect Interactions	64
Table G.1 – Interaction matrix.....	95

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

UNIFIED REFERENCE MODEL FOR SMART MANUFACTURING

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) IEC draws attention to the possibility that the implementation of this document may involve the use of (a) patent(s). IEC takes no position concerning the evidence, validity or applicability of any claimed patent rights in respect thereof. As of the date of publication of this document, IEC had not received notice of (a) patent(s), which may be required to implement this document. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information, which may be obtained from the patent database available at <https://patents.iec.ch>. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

IEC 63339 has been prepared by IEC technical committee 65: Industrial-process measurement, control and automation in cooperation with ISO technical committee 184: Automation systems and integration. It is an International Standard.

It is published as a double logo standard.

The text of this International Standard is based on the following documents:

Draft	Report on voting
65/1020/FDIS	65/1094/RVD

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

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/publications.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under webstore.iec.ch in the data related to the specific document. At this date, the document will be

- reconfirmed,
- withdrawn, or
- revised.

IMPORTANT – The "colour inside" logo on the cover page of this document 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 63339:2024

INTRODUCTION

“Manufacturing” refers to a range of human activities, from handicraft to high tech, and is commonly applied to industrial production, where raw materials and parts are transformed into finished goods on small to large scale by a series of interconnected processes. Smart manufacturing (SM) is an emergent characteristic of manufacturing achieved by digital technologies, gradually built up through digital transformation, combining diversity and uniformity, demonstrating continuous value delivery by a highly complicated collection of processes interacting on different time scales. In today’s manufacturing landscape, manufacturing is no longer characterized as a set of serial processes, but instead as a highly interconnected set of distributed processes that are able to cooperate on different time scales. A set of supervisory processes achieve coordination of these distributed processes using links that enable dynamic response to changing conditions in demands, supply, environment, energy and, other human or naturally caused probabilistic events. Since these probabilistic events are not known before occurrence, they often are disruptive and result in changing conditions.

The purpose of smart manufacturing is to accommodate those disruptive events, while supporting the introduction of new technologies and methods in a coordinated manner across the variety of customers, suppliers and stakeholders at various stages in the value chain.

Building upon the common knowledge and results found in IEC TR 63319 [9]¹ – A meta-modelling analysis approach to smart manufacturing reference models, as depicted in Figure 1 – this document specifies the unified reference model for smart manufacturing (URMSM) to create purpose-specific domain and application reference models for smart manufacturing initiatives by specifying the necessary structure and terminology for expressing such models. The URMSM is applicable across the many domains and applications found within a manufacturing enterprise.

Smart manufacturing reference models (SMRM), which conform to the requirements of this document, provide SM standards developers and SM practitioners with better opportunities for implementing models of production systems and products that take full advantage of technological innovations. These innovations occur during:

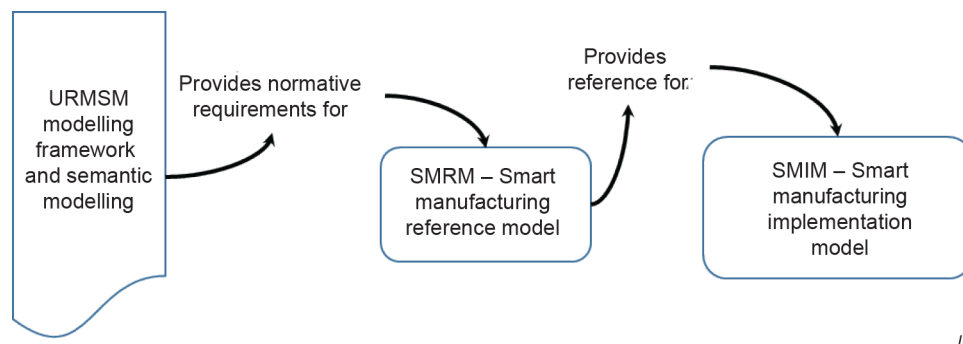
- analysis and synthesis using models of manufacturing,
- application of new materials, processes and facilities for manufacturing,
- understanding the emergence of digital twin concepts and other smart manufacturing technologies.

The URMSM is not one model or one model visualization. The URMSM is the specification for a family of reference models that share structural and behavioural properties intended to promote interoperability.

NOTE Subclause 8.2 provides more information regarding relationships among models and derivation relations.

The URMSM brings together concepts from existing works, both standards and practice, to support the variety of existing reference models, the adaptation of existing reference models for new uses, and the emergence of new reference models, all of which take advantage of the evolution in manufacturing technologies.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.



IEC

Figure 1 – Using URMSM

The model-based approach of the URMSM has two major structural components. The first is a modelling framework to support various arrangements of manufacturing elements into conceptual configurations deemed pertinent to domains of manufacturing enterprises. The second is the conceptualization of semantic models that reside within the modelling framework. A concise URMSM terminology supports both the modelling framework and the conceptual semantic models.

Since smart manufacturing is essentially a human conception of improved manufacturing technologies and practices, differences in interpretation of that concept can lead some practitioners to over-simplify the complicated nature of perspective and property interactions in today's manufacturing systems. Objectifying the notion of 'smart' for manufacturing is a challenge since developers and practitioners have been getting smarter about manufacturing for over 200 years already.

For IEC work in a domain of similar complexity, the author of [48] summarizes "smartness" in the domain of Smart Cities as follows:

Smartness is an emergent characteristic of a system

- achieved by digital technologies,
- explicitly architected and engineered to reduce complexity,
- gradually built up through digital transformation,
- permanently demonstrating value delivery,
- combining diversity and uniformity,
- coordinating and cooperating between all the stakeholders.

Considering this characterization, the URMSM provides the means for creating reference models for smart manufacturing that enable emergence of more digitally oriented, engineered solutions for delivering additional value from manufacturing operations. The result is improved performance aspects with integrated and intelligent use of processes and resources in cyber, physical and human spheres to create and deliver products and services, which also collaborate with other domains within enterprises' value chains [16].

This document identifies a collection of criteria for arranging aspects of the smart manufacturing domain as reference models. The important relationships among manufacturing elements enable useful examination and derivation of practical designs in order to fulfil a defined purpose, and to maintain and improve the resulting system through methods for analysis and synthesis.

The URMSM provides insight into the modelling of aspects of manufacturing elements to consider when developing new elements. Smart support methods for conducting that development or modification can require an evolution from existing practice to a more unified model-based approach.

This document can be used to support the development processes of smart manufacturing, and to assure coherence and compatibility during the development of standards.

This document identifies ways to apply those aspects of manufacturing and the acumen essential to developing a smart manufacturing model for a particular industrial enterprise.

The URMSM goes beyond the representational features of manufacturing elements to enable examination of interactions among those elements through the use of models to address issues arising in the course of smart manufacturing initiatives.

Expectations regarding the outcome of a satisfactory URMSM are:

- enabling the examination of value within a value creation network;
- enabling a range of appropriate libraries such as use cases, interface definitions, models for semantics, information and data, and international standards as modelled views relative to modelling purposes for particular smart manufacturing situations;
- enabling representation as a multi-dimensional space composed from various collections of aspects to accommodate particular modelling purposes, such as aspects of production, aspects of product, aspects of smart technology, and their relationships over their respective life cycles;
- enabling assurance that information is consistently structured using standards for information, data and modelling languages, without ambiguous meaning, by applying semantic models and techniques;
- enabling efficient usability for the creation of tailored smart manufacturing models that address a stakeholder's particular concerns.

The URMSM supports all three modalities of interoperation (unified, integrated, and federated) that can co-exist within a modelling framework albeit with varying extents of effectiveness and efficiency (see ISO 11354 [17]). Having a formal understanding of modelling frameworks enables more effective and efficient utilization of frameworks.

Clause 4 specifies extents of conformance to URMSM based upon meeting the requirements and recommendations in their entirety, as full conformance, or for particular subclauses, as partial conformance.

Clause 5 presents aspects of manufacturing commonly associated with 'smart manufacturing'.

Clause 6 presents modelling concepts essential for constructing suitable reference models in the domain of smart manufacturing.

Clause 7 establishes examination and derivation criteria for interoperation of aspects in manufacturing.

Clause 8 presents ways to use the URMSM to create purpose-specific reference models.

Clause 9 presents use cases for the URMSM and a progression of capability markers that indicate maturity in the application of the URMSM.

Clause 10 discusses ways to manipulate and use reference frameworks for extended analysis and synthesis for systems used in smart manufacturing.

Annex A presents concept areas of smart manufacturing.

Annex B provides a formal foundation for the URMSM approach including a modelling framework for URMSM.

Annex C provides an example figure of cascading reference models.

Annex D provides a summary of the meta-model for reference model analysis from IEC TR 63319 [9].

Annex E provides an introduction to the principles underlying semantic modelling.

Annex F provides a practitioner's modelling activity in a systematic usage of URMSM.

Annex G provides an extended example of the URMSM applied to a multi-dimensional manufacturing scenario.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63339:2024

UNIFIED REFERENCE MODEL FOR SMART MANUFACTURING

1 Scope

This international standard specifies the unified reference model for smart manufacturing (URMSM) using a terminology and structure, and establishes criteria for creating reference models, as specializations, that support smart manufacturing. The terminology and structure comprise a set of common modelling elements, their associations, and conformance criteria. These common modelling elements address aspects and perspectives of products and production and their lifecycle considerations.

The URMSM enables an approach for creating multiple models based upon a reference model that is sufficient for understanding significant relationships among entities involved in smart manufacturing (SM) and for the development of standards and other specifications.

The URMSM specifications in this document accommodate consistent, coherent, compatible specializations for relevant aspects of manufacturing systems consisting of equipment, products, and services within the domain of manufacturing. Provisions of this document are applicable for a new smart manufacturing reference model (SMRM) or elaboration of existing SMRM capabilities, for example, improving capabilities for analysis of opportunities and synthesis of technological advances, and improving interoperability of new and existing systems.

This document is not intended to prescribe interoperability considerations or data schemas of models. Standardization of content relative to models will be the subject of other standards and texts specific to those model domains.

2 Normative references

There are no normative references in this document.

3 Terms, definitions, abbreviated terms, acronyms and conventions

3.1 Terms and definitions

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

ISO and IEC maintain terminology databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <https://www.iso.org/obp/ui>

3.1.1 aspect

labelled designation for a collection of concepts in a particular context

EXAMPLE functional, structural, information, security, availability, customer.

Note 1 to entry: An aspect is often expressed as a view across one or more model for a manufacturing system.

Note 2 to entry: Elements of an aspect can have functional, non-functional or other kinds of descriptors.

Note 3 to entry: The identification of an aspect is often the result of prior knowledge, experience and practice in the domain to which the aspect applies.

3.1.2**aspect interaction**

relationship between two or more *aspects* (3.1.1) where one aspect influences or is influenced by the presence of another aspect

Note 1 to entry: Influence includes but is not limited to dependence and control.

3.1.3**business**

series of processes, each having a clearly understood purpose, involving one or more person, realised through the exchange of information and directed towards some mutually agreed upon goal, extending over a period of time

[SOURCE: ISO/IEC 15944-20:2015, 2.2]

3.1.4**complex****<context>**

decision situation characterised by unordered decision variables, and ill-defined categories, criteria and dependencies

3.1.5**complicated****<context>**

decision situation characterised by enumerated decision variables, and well-defined categories, criteria and dependencies

3.1.6**concern**

matter of relevance or importance to a *stakeholder* (3.1.20) regarding a manufacturing system or element thereof

Note 1 to entry: Stated concerns are useful when relevant to the purpose of the modelling effort and refer to specific rather than categorical difficulties, problems, or requirements.

Note 2 to entry: Concern expression takes many forms, including among others: as questions about features or characteristics, as a keyword label for many related matters, and as expected quality attributes of the manufacturing system or its products and services.

[SOURCE: ISO/IEC/IEEE 42010:2022, 3.10, modified – added "regarding a manufacturing system or element thereof"]

3.1.7**dimension**

coherent collection of *aspects* (3.1.1) relevant to a *manufacturing domain* (3.1.12)

Note 1 to entry: The coherence requirement of the dimension can result in a collection of aspects that are unordered, partially ordered, fully ordered, or related in some other manner, or not ordered in any way (see 6.4 on dimensional coherence for further information).

3.1.8**element**

tangible or intangible constituent of a manufacturing system or of a product

Note 1 to entry: A constituent can range from atoms of raw material or logical constructs or items of information through manufacturing models or equipment and entire factories, plants or supply chains and added value networks to finished goods, and software and services.

Note 2 to entry: While the term as defined has broad meaning, designation of a specific meaning for an element of manufacturing or manufactured product includes an adjective to constrain the meaning appropriate to that particular manufacturing element.

3.1.9

facet

framework composed of one or more dimension(s) (3.1.7)

Note 1 to entry: Composition rules for coherent dimensions distinguish facets from other modelling frameworks.

Note 2 to entry: The location at which dimension aspects intersect are containers for models representing each of the intersecting aspects.

3.1.10

granularity

extent of detail or specificity

Note 1 to entry: The possible extent ranges from coarse to fine.

3.1.11

life cycle

lifecycle

life-cycle

set of distinguishable phases and steps within phases that an entity goes through from its creation until it ceases to exist

Note 1 to entry: The phases of a nested enterprise can be steps within the life cycle of the containing enterprise.

Note 2 to entry: The use of the terms 'phase' and 'step' does not imply any prescribed temporal ordering of activity types. The term 'life history' chronicles instance occurrence of activities.

[SOURCE: ISO 15704:2019, 3.12, modified – addition of lifecycle and life-cycle alternatives, and Note 2 to entry]

3.1.12

manufacture

any or all of the activities in the design, procurement, construction, commissioning, deployment, screening, testing, production, storage, labelling, packaging or distribution of products and production systems

3.1.13

manufacturing domain

portion of a *business* (3.1.3) dealing with the *manufacture* (3.1.11) of products

3.1.14

meta-model

description of modelling elements for use in constructing *models* (3.1.15) pertaining to a domain

Note 1 to entry: A meta-model is always relative to the model in which its modelling elements appear.

[SOURCE: ISO 19440:2020, 3.47]

3.1.15

model

simplified, purposeful representation of certain entities and their characteristics and relationships either (a) using a formalism, or (b) using an established or ad hoc modelling paradigm, approach, or technique

Note 1 to entry: An ad hoc model is more difficult to implement using an established design technique.

Note 2 to entry: A model can be a subset of a broader model.

[SOURCE: ISO 15704:2019, 3.15, modified – addition of "simplified, purposeful" and "and relationships"]

3.1.16**model kind**

category of *model* (3.1.15) distinguished by its key characteristics and modelling conventions

EXAMPLE Functional models, activity models, structural models, use case models, geopolitical models, analytic models and economic models.

[SOURCE: ISO/IEC/IEEE 42010:2022, 3.15]

3.1.17**perspective**

way of thinking about an entity of interest, especially as it relates to concerns

Note 1 to entry: The way one thinks about an entity can be influenced by one's beliefs, training, experience, etc.

[SOURCE: ISO/IEC/IEEE 42010:2022, 3.18, modified – removal of "stakeholder" and EXAMPLE]

3.1.18**reference architecture**

set of common architectural elements for a particular domain and their general relationships usable to derive a specific architecture from it in order to fulfil a defined purpose within that domain

3.1.19**reference model**

abstract description or domain-specific ontology consisting of an interlinked set of clearly defined concepts produced by an expert or body of experts in order to encourage clear communication

Note 1 to entry: A reference model can represent the component parts of any consistent idea, from business functions to system components, as long as it represents a complete set. This frame of reference can then be used to communicate ideas clearly among members of the same community.

[SOURCE: ISO 22549-1:2020, 3.11, modified – replacement of "framework" with "description"]

3.1.20**semantic model**

model kind (3.1.16) which conveys meaning with respect to the elements of the *model* (3.1.15) or to the model as a whole

3.1.21**stakeholder**

role, position, individual, organization or classes thereof, having an interest, right, share, or claim, in an entity

EXAMPLE End users, operators, acquirers, owners, suppliers, architects, developers, builders, maintainers, regulators, taxpayers, certifying agencies, and markets.

Note 1 to entry: A modeller, that is someone who conceives, constructs and utilizes models of various kinds as part of their customary program of work, is often considered a stakeholder in the project or product with which they are engaging.

[SOURCE: ISO/IEC/IEEE 42010:2022, 3.17, modified – replacement of "entity of interest (3.12)" with "entity" and addition of Note 1 to entry.]

3.1.22

supply chain

set of organizations with linked set of resources and processes, each of which acts as an acquirer, supplier, or both to form successive supplier relationships established upon placement of a purchase order, agreement, or other formal sourcing agreement

[SOURCE: ISO/IEC 27036-1:2021, 3.10]

3.1.23

system

combination of interacting elements organized to achieve one or more stated purposes

[SOURCE: ISO/IEC/IEEE 15939:2017, 3.38]

3.1.24

use case

technique for capturing potential functional requirements

Note 1 to entry: This technique employs the use of one or more scenarios to convey how the system interacts with the end user or another system to achieve one or more specific objective.

Note 2 to entry: Typically use cases treat the system as a black box, and the interactions with the system, including system responses, are as perceived from the outside of the system. Use cases are popular because they simplify the description of requirements, and avoid the problem of making assumptions about how the functionality will be accomplished.

[SOURCE: IEC TS 62443-1-1:2009, 3.2.132, modified – part of definition moved to Note 1 to entry]

3.1.25

value chain

entire sequence of activities or parties that provide or receive value in the form of products or services

[SOURCE: ISO 27917:2017, 3.1.4]

3.1.26

view

work product expressing a selective perception or representation of a *model* (3.1.15), which emphasizes some specific feature or characteristic and disregards others

[SOURCE: ISO 19439:2006, 3.25, modified – addition of 'work product expressing a' before 'selective', replacement of 'an enterprise model that' with 'a model (3.1.15), which', replacement of 'aspect' with 'specific feature or characteristic'.]

3.1.27

viewpoint

identification of one or more kind of *model* (3.1.15) useful for addressing a collection of related *stakeholder* (3.1.21) *concerns* (3.1.6)

Note 1 to entry: When the term viewpoint is used without any qualifier it refers to the general case. When the term viewpoint is used with a qualifier, the viewpoint applies to a specific collection of concerns, e.g. operational viewpoint, capability viewpoint, services viewpoint.

Note 2 to entry: A viewpoint identifies one or more models necessary and sufficient for expressing one or more enterprise model views that address the specific collection of related stakeholder concerns.

[SOURCE: ISO 15704:2019, 3.24]

3.2 Abbreviated terms and acronyms

ADT	Abstract data type
ALEI	Authoritative Legal Entity Identifier
AM	Additive Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
EBNF	Extended Bachus-Naur Form
EDI	Electronic Data Interchange
IDEF0	Integration DEFinition for Function modelling
IIC	The Industry IoT Consortium
IoT	Internet of Things
GERA	Generalized Enterprise Reference Architecture
GUI	Graphical User Interface
IT	Information Technology
IVRA	Industrial Value chain Reference Architecture
KGI	Key Goal Indicator
KPI	Key Performance Indicator
MES	Manufacturing Execution System
ML	Machine Learning
MOM	Manufacturing Operation Management
NC	Numerical Control
NIST	National Institute of Standards and Technology
NLP	Natural Language Processing
OMG	Object Management Group
OT	Operation Technology
OWL	Web Ontology Language
QC	Quality Control
QCD	Quality, Cost, Delivery
RA	Resource Authority
RAMI4.0	Reference Architecture Model Industrie 4.0
RDFS	Resource Description Framework Schema
SM	Smart Manufacturing
SM2	Smart Manufacturing Standards Map
SME	Small and medium enterprise
SMIM	Smart Manufacturing Implementation Model
SMRM	Smart Manufacturing Reference Model
SMU	Smart Manufacturing Units (IVRA)
SSIF	Scandinavian Smart Industry Framework
SysML	System Modelling Language
UML	Universal Modelling Language
URI	Universal Resource Identifier
URL	Uniform Resource Locator
URMSM	Unified Reference Model for Smart Manufacturing
UUID	Universally Unique Identifier
XML	eXtensible Markup Language

3.3 Conventions

The phrase 'one or more' is interpreted as 'one or more than one', and therefore needs a singular verb form.

An abbreviation given in 3.2 stands for singular as well as plural form.

Annex A and Annex E use coloration in figures to signify distinct corners of the semiotic triangle. Blue indicates the concept corner, green indicates the symbol corner, and grey indicates the phenomenon corner in Figure A.2, Figure E.1, Figure E.2, Figure E.4, Figure E.5, Figure E.6, Figure E.7 and Figure E.8.

Annex B includes a set of symbols that use an alphabet in **AR HERMANN script bold** lower case with subscripts and superscripts, and *French Script MS* for uppercase bold as elements of logical expressions to characterize the modelling framework foundation for URMSM.

Annex D includes a set of symbols comprised of a "*" followed by a word or word phrase in italics, for example "**aspect*", that signify a concept within the meta-model extracted from IEC TR 63319 [9].

4 Conformance

4.1 Intended usage

The requirements specified in this document as URMSM are always with respect to an SMRM (or SMIM). The user of this document is someone who applies the stated requirements of URMSM to produce an SMRM or perhaps an SMIM. Conformance to this document only occurs by applying URMSM requirements to an SMRM or SMIM. There is only one URMSM – as specified in this document. No other URMSM can exist.

Requirements of this document are marked by the use of the verb "shall." Recommendations are marked by the use of the verb "should." Permissions are marked by the use of the verb "may".

This document is designed such that "tailoring" is neither required nor permitted for its use when making claims of conformance.

4.2 Full conformance

An SMRM can claim full conformance to URMSM when the SMRM demonstrates that the specification of the SMRM conforms to URMSM requirements of Clauses 6, 7, 8, 9 and 10.

This document also identifies four situations in which a claim of partial conformance with the provisions of URMSM are possible.

4.3 Partial conformance

4.3.1 Conformance to purpose and context requirements

When conformance is claimed for SMRM purpose and context, the claim shall demonstrate that the specification of the SMRM meets the requirements of 6.2, 6.9, 7.1, 8 and 9.1.1.

4.3.2 Conformance to dimensions and coherence

When conformance is claimed for SMRM dimensions and coherence, the claim shall demonstrate that the specification of the SMRM meets the requirements of 6.3, 6.4, 7.2, 7.5 and 10.1.

4.3.3 Conformance to semantic modelling of aspects

When conformance is claimed for SMRM semantic modelling of aspects, the claim shall demonstrate that the specification of the SMRM meets the requirements of 6.10, 6.12, 7.4 and 9.2.

4.3.4 Conformance to facets and frameworks

When conformance is claimed for facets and frameworks, the claim shall demonstrate that the specification of the SMRM meets the requirements of 7.6 and 10.3.

5 The URMSM in smart manufacturing concepts

Using a family of models approach where many purpose appropriate models can be derived from the same overarching paradigm, the URMSM qualifies methodologies for examining the impact of smart technologies in the context of SM initiatives and enables identification of many of the concerns practitioners need to address as they implement SM programs. Moreover, the URMSM becomes a set of principles and practices regarding:

- construction of representational frameworks for SM;
- guidelines for implementing SM reference models;
- suggestions or examples of existing or potential representations of SM reference models; and
- criteria for capturing the modelling elements necessary for decision-making in an SM context.

To enhance the representation and subsequent examination of SM initiatives, this document identifies three useful categories common to all manufacturing situations and that can cover the entire life cycle of manufacturing and its supply chain. These fundamental categories for understanding SM opportunities and achievement of positive outcomes are:

- the elements that comprise production and products from raw materials to finished goods in service;
- the relationships among those elements that capture the dynamic interactions of elements of production and of products; and
- production and product life cycles in a manufacturing environment.

These fundamental categories combine in a wide variety of ways to characterize SM initiatives. The focus of this document is a reference model that offers a unified way to represent the variety and uses of models to examine the interactions of manufacturing elements within the context of SM.

From the perspective of standards developers, a modelling framework, including the kind of framework envisioned for reference use in smart manufacturing domains (see Annex B), possesses two primary qualities related to the purposeful interoperation of manufacturing elements: 1) analytic, for identifying elements of manufacturing and their relationships that form a whole for the manufacturing enterprise with regard to a target operational system; and 2) synthetic, for identifying elements and relationships within the manufacturing enterprise that must interoperate to achieve a new whole or portion thereof as an operational system.

The analytic quality offers a decomposition approach while the synthetic quality offers a composition approach. For smart manufacturing, the analytic quality enables examination of the potentially disruptive impacts that come when new technology and new methodology are inserted into an established operational system. The synthetic quality enables the creation of new configurations of manufacturing elements and relationships that include smart manufacturing technologies and methodologies after any disruptive impacts are resolved and new interoperation opportunities are clear.

Exploitation of analytic and synthetic qualities provides the basis for the primary use cases for reference model use in smart manufacturing. For both analytic and synthetic qualities, an understanding of a firm foundation for modelling, the utility such a foundation provides, and the fitness of that foundation to achieve the modelling purpose are essential for efficient and effective use of the framework [57].

This document identifies four concept areas associated with SM (see Annex A):

- aspects of production and products that identify the manufacturing elements within a specific domain of SM,
- perspectives of production and products that identify the characteristics of importance to stakeholders within that domain,
- lifecycle considerations impacting these aspects and perspectives, and
- modelling of manufacturing elements using semantic models.

NOTE 1 Aspects are related to characteristics of the product or production system (the item to be modelled); perspectives are related to the stakeholder considerations (the user of the item).

This document identifies the semantic modelling concept as the means for expressing modelling content for the other three concept areas associated with SM. Various extents of semantic modelling allow sufficient elaboration of SM aspects that enable the analysis of opportunities, synthesis of advanced technologies and improved interoperability related to these concept areas of SM.

NOTE 2 Annex A provides additional information about the concepts areas and the use of semantic modelling.

NOTE 3 Clause A.2 provides user perspective for URMSM.

6 Reference model concepts

6.1 SM modelling

Modelling is a very effective approach to systematize system development and operation activities by use of advanced information technology. The digital transformation of modelling activities over the past 30 years now offers processing power and breadth of repository functions necessary to manage representation of very complicated systems in ways not previously possible. However, to reduce the unnecessary duplication of effort and assure the interoperability of components and systems, identification of and understanding of the commonalities within the many models of SM is necessary.

A reference model provides insight into the aspects of a system to consider when developing a new system or modifying an existing system and can provide mechanisms for conducting that development or modification. Reference models based upon the URMSM provide a common basis for the development of individual systems and enable their interpretation as a whole system by reuse of the common characteristic of the individual systems.

NOTE 1 Figure 7 and Figure C.1 illustrate ways in which reference models provide content from generic through more specific to particular models of SM initiatives.

NOTE 2 Annex B provides details regarding the structure of URMSM conforming SMRM.

This document recognizes that not all SMRM conform to URMSM requirements and recommendations: however, the intent of this document is to enable the creation of URMSM conforming SMRM as either new models or by elaboration of existing SMRM, usually by articulating the associated semantic models and establishment of coherence criteria.

The use of the term SMRM in this document always refers to SMRM that conform to URMSM requirements and recommendations. Many existing SMRM do at least partially conform to URMSM.

An SMRM conforming to URMSM specifies its intended use in a relevant manufacturing domain, with appropriate abstractions, including activities, processes, resources and information, and their relationships. Starting from the specification of a unifying reference meta-model (see IEC TR 63319 [9]), models that are more specific with respect to purpose can be derived in a systematic manner for achieving the target system configuration and implementation.

NOTE 3 Annex D provides an overview of the meta-model used in IEC TR 63319 [9] for analysing commonalities of several different reference models for SM.

EXAMPLE 1 The principles embodied in the URMSM underpin the structure of ISO/IEC TR 63306-1 [8].

URMSM specifies that relevant aspects of manufacturing with appropriate abstractions include their constituent activities, processes, resources and information, and their relationships. Starting from an SMRM, models that are more specific can be derived in a systematic manner for achieving the target system configuration and implementation.

Clarification and standardization of the URMSM at various extents of abstraction in SMRM are necessary to improve the efficiency of development processes by reusing constituent resources in system development and operations. This document can also be used as a guide for effective use of existing standards, and in finding gaps for missing standards.

NOTE 4 Annex D provides an overview of the meta-model used in IEC TR 63319 [9] for analysing commonalities of several different reference models for SM.

To improve coherence of semantic models and clarify the relevant relationships between production, product and the externalities of both, an SMRM should accommodate a wide variety of perspectives and offer ways to filter out those perspectives of little or no relevance for a particular purpose (see 6.9).

Much of the text in Clause 6 and Clause 7 paraphrases text from ISO/IEC/IEEE 42010 [15] and ISO 15704 [18]. Knowledge of these two standards can help users of this document better understand the conceptual basis for URMSM as a specification for SMRM. Annex D is also based upon these two standards.

6.2 Modelling purpose

A precursor for any activity that includes the generation of a model is the clear understanding of the purpose for undertaking the modelling activity. Further, since every model is an abstraction, either physically or logically, of an identifiable artefact, that purpose needs clear association to one or more aspects of that artefact.

Great care is necessary to clearly distinguish between the model of the artefact and the instantiated artefact itself. This distinction is often morphed from correspondence to merged identity, i.e. the model is treated as if it were the artefact rather than a representation of the artefact. This distinction is very important in the context of analysis and synthesis regarding the purpose of reference models where the artefact is usually another model rather than real-world instantiation. An aspect specified in a reference model likely refers to properties of an instance that is twice or more removed from its domain specific logical, physical or descriptive identification. The bundle of properties for the aspect appear in successive models associated with the life cycle phases, or appear in modelling elements in implementation models.

EXAMPLE 1 In the pharmaceutical industry, the notion of a vaccine (the instance) is a real world implementation. However, when considering the concept of a new vaccine, the steps of moving the vaccine from the laboratory to large scale production is very complicated. The "model" of making the vaccine requires careful supply chain integration from sourcing (glass vials, substrate for vaccine, etc.), reactors for vaccine production, filling and packaging of vials, tracking and tracing of vaccine ensuring proper environmental controls, and distribution through to the delivery to the public.

The artefact of an implementation model is the actual operational manufacturing system. Since that system has many aspects, many implementation models for the same manufacturing system can exist. Each implementation model relates to one or more aspect of the artefact that is the manufacturing system.

Because of the limited cognitive capacity of those generating models and of those using generated models, each modelling activity shall begin with a well-defined purpose that specifies the context, objectives of the modelling effort and focuses the modelling activity.

NOTE Objectives can be expressed in a number of ways, for example requirements, goals, opportunities as well as desired effects. Achieving objectives is more difficult when use cases are not available to elaborate objectives and shape viewpoints.

While a reference model can sometimes be used in the same manner as an implementation model, in most situations a reference model provides the basis for the generation of more specific implementation models. Thus a reference model can serve more than one possible implementation model purpose. Therefore, within this document the purpose of a reference model is to enable the creation and comprehension of implementation models within the domain of SM.

EXAMPLE 2 See Annex C for a description of the position the URMSM occupies in a hierarchy of specifications relevant to SM practitioners.

As a consequence of the extremely wide variety that today's manufacturing systems exhibit, many domain specific reference models are in use today. Some of these domain specific reference models are the subject of International Standards and consortia specifications [62]. The purpose of the URMSM is to establish criteria to guide in development of future domain specific reference models, whether for reference or implementation, across the entirety of manufacturing with particular attention for the incorporation of and evolution to the SM paradigm.

6.3 Modelling dimensions

Manufacturing enterprises are a complicated and often complex assortment of resources, people, processes and products, each composed of many distinct variables. To operate effectively and efficiently within the manufacturing context that applies knowledge of design and management of production to add value to products, goods and services, an understanding of the extent and relationships among these variables is necessary.

These variables should be captured in models that can represent the extent and relationships between the variables. The modeller applies existing knowledge to craft one or more model to represent approaches to address the concerns of stakeholders using appropriate modelling techniques. These models are used to generate model views aligned with viewpoints determined by the modeller to best elaborate one or more than one concern and possible ways to satisfy the concern.

These model views, perhaps as partitions or extracts of a larger model, comprise a collection of concepts in a particular context and thus meet the definition of aspect. Some aspects result from the aggregation or composition of views from more than one model. The multitude of possible aspects constitute a solution space corresponding to the problem space identified by the concerns. However, most often not all stakeholder concerns nor all aspects incorporating views are relevant to the purpose of the modelling effort.

To best analyse and utilize the knowledge present in aspects of manufacturing, the aspects shall be arranged into collections of aspects partitioned from all identified aspects such that the collection of aspects is characterized by coherence among the model views that distinguish the aspects. A coherent collection of aspects composed of model views is a modelling dimension of manufacturing. Many such dimensions of manufacturing are found in standards.

EXAMPLE The ISO/IEC 62264 series of standards [3] identifies several dimensions, i.e. functional hierarchy, role-base equipment hierarchy, and physical asset equipment hierarchy. ISO 15704 identifies in the generalized enterprise reference architecture of its Annex B various dimensions of an industrial enterprise, e. g. life cycle phases, modelling viewpoints, and genericity (instantiation).

As understanding of SM matures, and new technologies bear significant opportunities, and manufacturing systems evolve, modelling dimensions are likely to change in response. The URMSM accommodates both existing modelling dimensions, evolution of existing modelling dimensions, and ways for new dimensions to become available.

6.4 Dimension coherence

For a dimension to exhibit coherence, the dimension shall exhibit two primary criteria: 1) each aspect of the dimension has a well-defined context; and, 2) the contexts of the dimension's aspects have a well-defined common contextual relationship. The aspect and dimension context criteria can impose an ordering among the aspects although that ordering need not imply sequence, dependence or hierarchy among the aspects. The ordering of aspects can be as independent aspects of equal worthiness with respect to the modelling purpose arranged for that purpose and thus subject to rearrangement for a different purpose (see 7.2.1).

NOTE 1 The two primary criteria for context definition can occur without regard to order or sequence of achievement. Sometimes each aspect has a well-defined context and from that collection of contexts the dimension context is derived. At other times, the dimension context gets well-defined and individual aspects within that dimension context are identified with selection of that portion of their individual aspect context that fits the dimension context.

Models of aspect can range from very abstract graphical information models or textual descriptions to highly detailed data models or activity models. These kinds of models are among a wide variety of modelling and descriptive techniques that modellers can employ. Often different modelling techniques for the same context are necessary to effectively communicate with different groups of stakeholders and designers of manufacturing elements.

Common contextual relationships among aspect contexts can be as simple as identical model artefacts appearing in each aspect context, thus giving them a common element or relationship, or as complicated as a single semantic model that spans all of the dimension's aspects.

To serve the needs of SM practitioners and those developing SM standards, a well-defined context and associated detail are necessary at a modelling purpose appropriate extent of granularity and fidelity within that context. SM practitioners often are given a context that is ambiguous or overly broad, for example highly generalized, and at the same time are given detail without a proper context for its application. The result is that they get information without proper context and then assume a context that was not intended. This situation can arise using multiple standards that are not harmonized for interoperation, i.e. there is no condition under which the standards pertain to the same context.

NOTE 2 Sometimes the segments of a dimension can be adapted or rearranged to help align standards to a context.

EXAMPLE 1 Using the NIST AM model [42] the dimensions of machine, material, and product interoperate in the context of operations to produce a part, but are otherwise almost disjoint.

NOTE 3 Subclause 7.2.1 specifies requirements related to context more formally as common type, defined inter-relationships, and relevance to purpose.

The utility of the modelling dimension for analysis and synthesis in the domain of SM is directly related to the granularity and fidelity of the semantic models that provide the descriptions of aspect context and common contextual relationships among the aspects of the dimension. In addition, as the granularity and fidelity of the semantic models become more closely aligned with the actual manufacturing reality, the sensitivity of the models to detect and identify the consequences of disruptive change in the manufacturing environment increases.

EXAMPLE 2 Marketing needs a different dimension of granularity than fabrication, or, they can use the same dimension but at different extents of granularity. If the purpose of the modelling effort is to serve both of those stakeholders, then the semantic model needs to support both uses by enabling specific views extracted from one or more model that spans the concerns of both.

EXAMPLE 3 In pharmaceutical manufacturing, the production of the vaccine (the product) requires a detailed model for reactor design and operation; changes to the recipe for the vaccine can result in detailed reactor model changes, or a simpler set of operational recipe steps; changes to reactor design, can also affect the manufacturing line that fill and package the vaccine into vials.

NOTE 4 The emphasis and effort to construct 'digital twins' is a direct result of comprehending the utility of high granularity and high fidelity digital semantic models for extant manufacturing elements of the physical world.

6.5 Stakeholders

Among the many stakeholders with concerns relevant in an SM context, two kinds of stakeholders, SM standards developers and SM practitioners, are primarily involved in the use of this document, which serves as a reference for more detailed activities that do impact all kinds of stakeholders of a manufacturing enterprise and its supply and value chains.

SM standards developers are those individuals and organizations charged with specifying requirements related to conducting SM system activities. Their work ranges from reference models for enterprise and system architecture description through use case scenario development to techniques for the semantic modelling of manufacturing elements. SM standards developers should provide enabling resources, for example, tools and model documentation, for downstream SM initiatives.

SM practitioners are those individuals and organizations that participate in the application of tools, technology and methods, anywhere in the supply or value chain, for implementation of SM initiatives. Where gaps exist in existing standards or methodologies, SM practitioners should work with SM standards developers to define new SM requirements to address identified SM concerns.

Both SM standards developers and SM practitioners can conceive, construct or utilize models of various kinds.

6.6 Concerns

A concern is a substantive, focused expression of interest about one or more element of a manufacturing system from the perspective of one or more stakeholder. The primary focus of SM standards developers should be to accommodate the needs of SM practitioners by providing the means and methods for specifying a coherent viewpoint relative to those concerns.

The concerns of SM practitioners generally relate to domain specific and purpose specific information, methods and expectations for modelling outcomes they can apply directly to support SM initiatives. Because SM practitioner concerns result from highly focused practical application perspectives, SM standard developers should provide a comprehensive reference model with a broad range of capabilities for expressing, examining, and enabling SM practitioner activities.

The expression of a concern can take many forms. Most useful are concerns stated as questions about features or characteristics, as a keyword label for many related matters, and as expected quality attributes of the manufacturing system or its products and services. Concerns also arise from detailed use cases that can elaborate many distinct concerns related to an SM scenario.

6.7 Use case

An effective way for SM practitioners to document their concerns is to prepare a use case that employs one or more scenario(s) to convey how a manufacturing element interacts with the end users or other manufacturing elements to achieve a specific goal. A use case offers the opportunity to elaborate one or more concern(s) to provide guidance to the SM modellers, whether standards developers or practitioners, as they identify viewpoints and create views meaningful to a variety of stakeholders. A use case is particularly effective for identifying and presenting behaviour for innovative new technologies or novel application of existing technologies.

To aid the SM standards developer, SM practitioners should prepare use cases that detail to an appropriate extent a manufacturing scenario and expected outcomes to serve as a source of SM practitioner perspective concerns.

Multi-scenario and multi-concern use cases often use more viewpoints to address the use case. These more complicated use cases can provide modellers with additional information relative to the fit of viewpoints into a satisfactory modelling paradigm for the purpose of the SM modelling effort.

NOTE 1 The use case is most relevant when the scope of the use case falls completely within the purpose of the SM modelling effort for which it is submitted, and the outcomes described in the use case are unambiguous.

A use case can take one of several forms depending upon the granularity and fidelity of the purpose for which it is generated. A use case can cover abstract situations or very specific situations. Business use cases tend to be more abstract with a common set of terms from the business sector and can exist at different layers of an organization; however, as use cases add detail, the terminology and methodology starts to diverge and linkage to a business case becomes less clear.

While use case application scenarios can be across industry, a repository of use cases is often most useful across enterprises within an industrial sector.

NOTE 2 The topic of use case repository is not covered in the URMSM explicitly.

Several use case templates and a growing number of use case repositories are available, for example IEC 62559 [5]. Use case templates and repositories can be resources for adaptation to specific domain concerns.

Manufacturing facilities include a range of different stakeholders and different use case perspectives and requirements, some of which can often be shared or overlap. IEC TR 63283-1 [7] discusses this overlap as it pertains to terminology.

NOTE 3 Since an aspect is related to the view derived by application of a viewpoint, and a viewpoint draws upon use case content, a use case is conceptually a basis for an aspect of SM.

SM standard developers and SM practitioners should utilize use case techniques to verify concerns and validate proposed model views with stakeholders.

6.8 Viewpoints and views

A modelling viewpoint serves to collect subject matter in the form of clearly stated stakeholder concerns, and to establish conventions for the creation, interpretation, analysis and use of model views with respect to the collected concerns. That viewpoint should capture relevant practitioner concerns and accommodate known modelling concerns to assure a well-defined opportunity for enabling the creation of models and modelling views that address those particular concerns. Viewpoint conventions can specify one or more modelling paradigm or model kind to use when constructing a relevant model, usually in some form of engineering model. The conventions can also include less formal descriptors to guide view expression.

The model views, either as an entire model or portions of one or more model, should provide stakeholders with the outcome information necessary to make informed decisions about further modelling activities or implementation activities.

NOTE See ISO/IEC/IEEE 42010 [15] for more information about viewpoints, model kind, model and view as applied to enterprise and system architecture description.

6.9 Perspectives

6.9.1 Use of perspective

The URMSM provides ways to arrange or examine the semantic model(s) from several perspectives relative to a particular modelling purpose. The term 'stakeholder perspective' signifies the way in which a stakeholder conceptually thinks about the SM system of interest.

A semantic model of an SM system of interest shall include consideration of the elements of each aspect of manufacturing that are important to the purpose of the modelling activity as expressed by the stakeholder concerns relative to that purpose.

To present the many aspects of the system of interest relative to modelling purpose, and to satisfy the concerns of stakeholders, a modeller groups the representation of manufacturing elements into models relating those elements to each other. From these models the modeller projects views to articulate aspects of the system of interest that comprises the manufacturing elements, and are consistent with the specified modelling purpose. Often highly related aspects are collected into modelling dimensions to aid comprehension of those relationships by stakeholders. The term 'analytic perspective' signifies the way in which the modeller groups manufacturing elements into aspects of manufacturing.

NOTE 1 Often the relevant aspects of a model are arranged into a descriptive framework to satisfy a stakeholder perspective for decision support. A modelling framework typically arranges relevant aspects to satisfy a modelling purpose, which can provide several stakeholder perspectives by projecting relevant aspects of interest to the stakeholder, or can provide the analytic frameworks necessary for particular analytic techniques and methodologies.

Stakeholder perspectives are usually external or at the boundary of an SM system because perspectives are ways of thinking about the system. The analytical framework usually has internal considerations resulting from modelling activities driven by those external perspectives.

NOTE 2 The stakeholder perspective can be thought of as input to the modelling activity while the analytical framework can be thought of as the output of the modelling activity. During the modelling activity, modelling viewpoints specify the manner in which stakeholder perspectives result in the creation of the analytical framework.

6.9.2 Stakeholder perspectives

Stakeholder perspectives of SM initiatives are the result of their responsibilities, authorities, training and experience in manufacturing. These stakeholder perspectives drive the development of use cases and concerns from which viewpoints are derived that capture those drivers.

6.9.3 Analytical framework

An analytical framework deals with the creation and arrangement of aspects into collections identified as dimensions of SM. Each dimension or intersection of dimensions forms an analytical orientation that complements the stakeholder perspectives. An analytical framework arranges the results of viewpoint modelling to enable examination of aspects in relation to modelling purpose.

6.10 Aspects

An aspect is a way of characterizing the structure, quality or behaviour of a manufacturing element as a single conceptualization potentially composed of many concepts. A label or name identifies the aspect conceptualization that usually includes many more particular concepts. That characterization usually applies to the manufacturing element with respect to a particular context and the characterization can change when the context changes. Therefore, most often aspects are given broad characterizations that can apply in many contexts while retaining focus on those features or properties that distinguish the aspect. Well-specified aspects offer a way to categorize features and properties of elements so they can be referenced collectively and assessed in different situations, which are different views of the same aspect but in different contexts.

Each aspect within an SMRM shall be expressed by a semantic model that specifies the context and any constituents of that context applicable for the aspect as used in the SMRM. The semantic model should be sufficient to enable inclusion of the aspect into a coherent collection of aspects.

Because aspects are applicable in different situations, they are often identified as 'cross-cutting concerns', i.e. they are embedded into many different concerns of stakeholders with the same basic characterization but elaborated for concern context. A viewpoint can make use of this embedding to specify aspects for inclusion when constructing a model to produce one or more view(s). Conversely, a viewpoint can specify one or more view(s) to characterize an aspect. An aspect can be characterized by views from more than one distinct viewpoint.

NOTE In some situations an aspect can be considered to be the view according to a viewpoint.

Aspects are often labelled by reference to a context using a succinct term, for example, security, safety, element features. Aspects are usually decomposable into sub-context for specific domains, for example physical safety. The context associated with an aspect can be functional or more often non-functional as with the –ilities for various attributes of quality, such as sustainability and compatibility. Aspects are the primary discriminants in modelling frameworks, for example the OMG Unified Architecture Framework [30].

EXAMPLE The aspects of the product specification for a part (manufacturing element) can have a set of features and a material specification. Features based on a product design context are considered in the production system context. Market requirements drive product design specifications, such as materials and features for the part. A change in the material and features will change the manufacturing processes needed to make the part; a material change could affect the speeds and feeds of a machining process. Tooling, fixturing, energy consuming, scraping, and material handling are processes related to the primary machining process. Requirements for the volume and throughput for the part could allow for other considerations, such as additive manufacturing. A one-off manufacturing lot versus a large lot size or specific material properties affects those considerations, as well as the size, weight, whether multiple machines and processes are required for the product features. For a high-volume product, a specialized machine can be considered. Modelling of the part based on those specifications, as well as the production systems, can enable tradeoffs to be made more expediently if the product model and the production model have corresponding semantic models.

Identifying and characterizing aspects of a manufacturing element in the proper context, whether that element is an entire manufacturing enterprise or the capability of a component, is essential to configuring and utilizing URMSM to create an SMRM or implementation model.

To maximize the potential for semantic models of aspects to enable the analysis and synthesis of aspect interactions in the context of SM, models of aspects should use the most semantically expressive digital representation available.

6.11 Life cycle modelling

The notion of life cycle is taken from biology where every living thing experiences the same pattern – birth, growth, maturity, decline and death – the cycle of life. This pattern dominates all living things and can be extended by abstraction to conceptual things, e.g. systems. By extension, the notion of life cycle applies to SM enterprises, services and products where each instance thereof exhibits the life cycle pattern during its lifetime. The same basic life cycle pattern articulates in many different ways for different purposes and situations. Since many different things comprise every enterprise or system, there are many life cycles occurring, one for each thing. Every project, every component, every artefact and every product have a life cycle and because some are constituents of others, life cycle activities appear in repetition and are almost always overlapping.

SM recognizes that the characterization of life cycle is a segmentation into life cycle phases with respect to mutual dependencies and similarity of model content rather than a presumed chronological sequence. Different life cycle phases can have different models and different models can exist at an individual life cycle phase. Life cycle phase models can be concurrent, repeated, or empty as the modelling situation necessitates.

A SMRM should clearly delineate the life cycle phases, as identified by the using organization, pertaining to the particular SMRM.

NOTE 1 Feeding model information forward and backward in life cycle phase activities enables value added iteration of processes that improves quality. A phase activity can modify or extend the model of a previous phase activity to the evolving needs of a subsequent phase activity.

The notion of life history captures the chronology of life cycle phase activities as they occur during a lifetime. The life history is often segmented into stages. While a reference model most often specifies static model representations, understanding the consequences of change can require knowledge of chronological sequence of activities experienced by a particular entity during its entire lifetime. ISO 15704 [18] presents an extended explanation of life cycle and life history concepts.

NOTE 2 Other standards, particularly those aligned with ISO/IEC/IEEE 15288, use the term life cycle stage instead of life history stage.

6.12 SM semantic modelling

6.12.1 Semantic modelling overview

To understand what it means for aspects to interact, some common form of expression is necessary for use to compare and contrast their respective properties and behaviour. Digital models provide syntactic forms of expression that enable human examination to occur more quickly over a broader range of situations. To take full advantage of digital technologies to supplement or go beyond human examination of aspect interactions, the form of expression needs to be suitable for machine computation. With very few exceptions, digital modelling languages only provide the semantic, or meaningfulness, complementary form terminology, but not the axioms necessary for inference processing based on these models that enables automation of analysis and synthesis.

For most models that are based upon graphic images, the meaning of model elements and their relationships is limited to syntactic expressions, which are suitable for interaction when the semantics is unambiguously stated as text but not suitable for analysis and synthesis when the meaning is only revealed through implication or inference. Model meaning then depends upon interpretation by a human observer, often resulting in different interpretations.

NOTE 1 Many graphical modelling tools provide a non-graphical expression of the model as well, but most often without explicit semantically informative content and complete specification of semantics.

Different representations like textual descriptions, abstract information models and data or activity models can model aspects that comprise functional or non-functional features of products or production. In the case of SM, the basic modelling artefacts are information, data and activity to be identifiable in aspect characteristics.

A unified semantic model, based on graph and data type algebras, should support the representation, analysis and synthesis of an interoperating SM network dealing with information, data and activities in the context of SM.

Models and their tools that use graph and data type algebras are semantic models that are symbolically executable and thus form the foundation for a semantic analysis and predictive maintenance.

NOTE 2 By applying the GUI of tools with underlying graph and data type algebras, a kind of language support for writing semantic expressions enables tool-supported analysis beyond the structural analysis provided by XML or OWL [36].

Several articles and white papers [50] [61] provide a thorough discussion of the issues involved in conceiving and using models with semantic content sufficient to support the interoperability of digital system representations. In particular, two modelling formalisms enable the exchange of information to support automated interoperation – XML Schema [32] and the OWL [33] modelling language, where the former is "intended to characterize syntactic structure and the latter is intended to characterize semantic structure (or meaning)" [66].

NOTE 3 OWL makes use of the RDFS (Resource Description Framework Schema) to represent knowledge about things, groups of things, and relations between things in a computational logic-based language. Knowledge expressed in OWL can be exploited by computer programs, e.g. to verify the consistency of that knowledge or to make implicit knowledge explicit [33].

EXAMPLE 1 In this simple example, which is concerned with a part of a design by itself, the class that is the impeller within pump model “WBX-456A” can be defined using an OWL Restriction as follows:

```
ex -des:ImpellerInWBX-456A

owl:equivalentClass [
    owl:intersectionOf (
        ex-rdl:Impeller
        [ owl:onProperty lci:partOf;
          owl:allValuesFrom ex-des:WBX-456A ]
    )
];

rdfs:subClassOf ex-des: WI-57SS .
```

From this restriction, it can be inferred that an impeller that is part of a pump of type “WBX-456A” is of type “WI-57SS” [19].

Modelling tools intended to support SM shall provide the means for exchanging model content in both human readable and machine interpretable forms for use by other modellers and models. At a minimum the syntax should be well-formed using an established standard.

EXAMPLE 2 Modelling paradigms that support XML Schema forms of expression are generally suitable for schema matching processes, whether through human examination or machine automation.

NOTE 4 Models that are or contain images with undifferentiated content, while useful for some applications involving aspects, are not well suited for analysis or synthesis automation. Image tagging or a means to 'parse' the image for encapsulated digital content related to one or more other aspect can add differentiated content to the image, which makes at least that portion of the image amenable to computation.

Moving beyond the simple syntactic representation requirement, modelling paradigms with a formal syntax, for example those defined using an EBNF specification of their modelling language syntax [10], can provide opportunities for identifying semantic relationships between aspects from the modelling patterns provided by the EBNF specification [22] [21]. Some model schema matching techniques take advantage of this feature.

The next step up in providing aspect semantic models involves the use of meta-models for a particular domain where the scope of the domain can be quite large. ISO 19440 [21] (in the domain context of model based control) specifies constructs for enterprise modelling using the UML modelling language [11], which has an XML Schema conforming representation feature, and then provides meta-models for both manufacturing-oriented and service-oriented enterprises as configurations of those constructs.

At the top of the semantic modelling hierarchy are ontological theories that give meaning to concepts in relation to other concepts. Unfortunately, general ontological theories are of marginal utility for large bodies of knowledge because such knowledge bases are networks of interrelated concepts. However, these theories do form the basis for very useful domain specific ontology of the kind implemented using the OWL specifications [37].

EXAMPLE 3 Digital representations can span from the use of formal languages like OWL, a combination of logic, and algebraic graph theoretical technologies.

A good understanding of the relationship of semiotic concepts with modelling concepts is necessary to achieve digital models that provide the semantic, or meaningfulness, complementary form necessary for inference processing, which enables automation of analysis and synthesis. Further, semantic models of modelling languages are themselves models and as such have a life history where meanings can change over time.

When aspects are related within a semantic model, the model usually identifies relationships that serve as the basis for interactions. Depending upon the syntactic formalism utilized, the interactions can be explicit or implicit where the former are named or labelled interactions and the latter can be inferred from the context.

To avoid missing or misinterpreted interactions, aspects appearing in a semantic model shall, to the extent possible within the purpose of that model, make explicit the interactions with other aspects (see Annex F and Annex G).

6.12.2 Forms of semantic representation

A further critical consideration when creating a semantic model for an aspect intended for use in understanding interactions with other aspects is the distinction between static objects and the dynamics that create, change and eliminate them. Since the majority of semantic models take the form of information models of one kind or another, these forms become the focal point for specifying appropriate semantic content. Information models tend to identify either static things, as objects that endure with relationships among those things, or dynamic things, as processes that occur with relationships as process inputs and outputs [12].

The information model form employed shall allow the representation of the constraining relationships among two or more aspects and can allow that representation to specify the processes maintaining that relationship, as a self-reference to the entity that is architecting- and designing the manufacturing entity.

NOTE 1 All available tools supporting the graph and data type algebras comprise two important components for performing symbolically represented specifications of things. The first one is the GUI that indeed applies symbols to represent sub-specifications e.g. of the aspects of windmills or sun paddles in an overall smart grid system. The second tool component is the rule-based graph and data manipulator which performs all specified aspect rules that get true or false in a certain context and in a certain situation which is called a simulation. The advances of a simulation are represented by changing graphical objects at the GUI showing the changed condition of the system simulated.

When the purpose of modelling aspects is related to aspect interaction, the relationships among static objects should be the processes that create, change or eliminate them, usually using a noun – verb – noun syntactic form. The reification of the processes, i.e. transposing relationships into objects, then results in a consistent model of the verb – noun – verb syntactic form.

NOTE 2 Not all relationships among static things can be expressed as process mediated transformations.

In almost every situation only a portion of the model for an aspect participates in the semantic model that relates that aspect to one or more other aspect(s). However, in some situations, the extent of interaction can have more effects occurring on the normally non-participating parts of the model.

NOTE 3 The use of open technical dictionaries, such as ISO 22745 [23] and IEC 61360 [1] provide methods for describing terms and definitions, some in context, and others which allow reference to new contexts.

EXAMPLE 1 For an interacting machining aspect the spindle speed and cutter can be ignored in some uses of the aspect but can need to change when a new feed stock material is introduced.

The semantic model representing the interaction of aspects should have enough detail to both sustain the interaction and accommodate change in participants.

One obvious difficulty is the variation of term usage within a domain, which makes cross domain knowledge exchange at least ambiguous. Clear specification of the syntax and semantics of the domain language in context should precede attempts for meaningful information exchange for that context.

EXAMPLE 2 The semantic gaps between information technology and operational technology are often the source of discord between departments.

EXAMPLE 3 In ship building, the pumps use different engineering professions working together for installation of the complete pump and each profession has their own language.

All elements of a semantic model that interact with other entities outside of that semantic model shall be uniquely identified and defined, whether that semantic model is an entire manufacturing enterprise or the capability of a component.

6.12.3 Granularity of semantic models

To maximize the utility of aspect related semantic models for understanding aspect interactions, the extent of granularity of the constituent semantic models shall be similar so that elements of one semantic model can be identified in another related semantic model. Sometimes a translation of semantic model vocabulary is necessary to recognize common modelled elements.

While the emergence of UUID [31] and URI [63] methods for referencing model elements presents opportunities for concise models built by referencing other artefacts, these referencing methods also present many potential difficulties for extending a coherent semantic model by including referenced elements.

When the reference model specifies elements by reference, that reference model shall state known potential for deviance from semantic model integrity, either because of difference in granularity or disruption to established coherence criteria. This deviance information is necessary to enable establishment of boundary conditions for analysis and to indicate possible useful opportunities for improved performance through synthesis of new capabilities.

When using a reference model for a specific purpose, the elaboration often yields a specialization of the portion of the reference model that pertains to that purpose, resulting in a semantic model with different extents of granularity for constituent elements.

A semantic model shall identify differences in granularity of modelled elements by annotating either their removal from the purpose specific semantic model or labelling the elaborated model elements with a context descriptor to indicate the elaboration at a more detailed granularity.

7 Dimensions of URMSM

7.1 Identifying aspect interactions of smart manufacturing

Some aspects of SM systems, whether at the scale of a complicated supply chain or at the scale of a machine tool, can be clearly specified and bounded such that little if any overlapping of functionality or structure with another SM system exists. The relationship to the other SM systems or SM system components is through well-defined interfaces. For many other aspects of SM systems, particularly those of a more qualitative nature, well-defined interfaces are not evident and indeed sometimes the notion of interface is not relevant. However, for both of these situations the aspects do interact with each other, sometimes through well-defined interfaces and sometimes in ways that are neither well known nor even obvious.

To enable SM, aspect interactions should be identified that are expected to impact the effectiveness and efficiency of manufacturing.

EXAMPLE 2 A machine tool interfaces with material handling systems that bring work in process, new tooling and fixtures. The part programs are dynamic based on the production operation's requirements for the work cell. In this situation the aspects related to the part have interactions with the machine producing the part. The model of the part and the machine each have boundaries that are affected by changes in part specifications such as scrap, energy consumption, material handling. Some of these aspects can be collected into a dimension such as workflow energy consumption, as well as relationship to the life cycle.

IEC TR 63319 [9] identifies dozens of aspects pertaining to SM. Most of those aspects have an underlying model representation but different models for the same aspect label result from different perspectives for the concern or concerns included in these various models within an aspect description. These different perspectives often are the result of different modelling purposes with respect to the SM effort.

Aspects intended for consideration in SM reference models shall be identified with respect to their specific modelling purpose and context. In addition, aspects shall be represented as formal models using a well-formed notation that enables analysis and synthesis using both human examination and computational resources.

NOTE 2 While computational resources now enable the use of modelling technologies with far more capacity and processing capability than humans can perform, human examination of the basis for computation is still necessary to verify and validate analysis and synthesis outcomes.

Given appropriate models, many techniques exist for identifying common model elements that can serve as the basis for identification of potential interaction, either between different models of the same aspect or between aspects of rather different concerns. With attention given to variations in term and concept definitions, model schema matching is one explicit interaction approach [53]. Identifying structural relationships among aspects is another explicit interaction approach [47]. However, some aspects interactions are implicit and not easily or well represented in a formal model; consequently, textual characterization is necessary.

7.2 Specifying modelling dimensions

7.2.1 Collections of aspects as dimensions of smart manufacturing

A fundamental principle of dimensionality in modelling [60] [38] [59] is the dual criteria of dependency among elements of a modelling dimension, hereafter simply referred to as dimension, and independence between dimensions for pairwise considerations during analysis and synthesis. In this sense, a dimension is an independent variable within a problem space. The dimension is composed of dependent elements – the question being "dependent with respect to what".

NOTE 1 Because the dimensions involve the same entity problem space, they cannot be strictly independent but they can be 'independent enough', i.e. of sufficient distinction, for the purpose of the modelling effort.

The simple answer is shared participation in a particular type declaration that characterizes the members of the dimension where a similarity relation identifies the characteristics that inhere in that type. A more complicated answer results when 'type' is thought about as an abstraction involving not only static properties but dynamic properties as well.

A modelling dimension shall be coherent when the members of its type declaration exhibit all of the static and dynamic properties specified by the similarity relation for that type. Type declarations shall provide sufficient clarity of membership to meet the duality criteria of within dimension dependence of elements and independence of dimensions for analysis and synthesis.

NOTE 2 Here the notion of 'type' is distinguished but the similarity relation allows latitude in identifying the members of a particular type. The similarity relation can be thought of as a function that maps an aspect to a type for the purpose of collecting aspects with the same type designation into a dimension. In IEC TR 63319 [9] the similarity relation is referred to as `*aspect_collection_coherence_rule` and modelling dimension is referred to as `*aspect_collection`.

NOTE 3 In programming languages the type declaration is given an abstract data type (ADT) designation even though the properties and behaviour go well beyond notions of data per se.

EXAMPLE 1 Production, product and life cycle are often distinguished as dimensions of manufacturing where members of production are elements involved in producing an outcome, product has elements of the outcome produced, and life cycle elements segment activities associated with either production or product.

Having established the type qualification for membership in a dimension, the various modelled aspects of SM can be identified with respect to that dimension where the aspect characteristics include the type declaration of that dimension.

The next qualification for an aspect to be a dimension member is participation in a relationship with other members of the dimension. The relationship can be of a mereological nature, logical sort-order, or other logical relationship declaration.

NOTE 4 Often the type declaration induces a logical declaration among members of the same type declaration.

The final qualification for an aspect to be a dimension member is selection for relevance to the purpose of the modelling activity. Typically, the modeller selects aspects that address stakeholder concerns from among those aspects that meet the other two qualifications.

EXAMPLE 2 IEC TR 63319 [9] provides extensive discussion of the aspect members selected for relevance to modelling purpose by different reference architectures for three distinct modelling dimension: life cycle, hierarchy and layer.

The dimension similarity relation characterized by 1) a type declaration, 2) cross-aspect relationships, and 3) selection for relevance to modelling purpose, can also induce an inclusion relationship that restricts aspects to participation in one dimension.

NOTE 5 For a particular aspect, assignment to a dimension can vary as the modelling purpose, type declaration, and aspect relationships or aspect characterization change.

7.2.2 Collections of dimensions as an analytical framework for smart manufacturing

A modelling framework, as presented in Annex B, can both guide development of a new system or application and serve as a basis for the analysis of an existing system or application. Examination of the entities and relationships of the semantic model that links aspects within a dimension yields information useful for evaluating problems and opportunities associated with change to the modelled system or application. However, because the aspects are of the same type and members of the same dimension semantic model, that examination is unlikely to yield much information regarding aspects in other dimensions of the system or application.

To adequately understand the impacts of change, including potentially disruptive events, consequences to aspects beyond the single dimension shall be examined as well.

The number of other aspects and the number of their respective dimensions necessarily depend upon the explicit modelling dimensions available, the aspects included by those dimensions, and the robustness of the semantic model pertaining to each dimension. Modelling purpose heavily influences selection from those dimensions available, which aspects to include, and how robust a semantic model is sufficient. In addition, the extent of abstraction should be suitable for handling the intellectual challenges that become difficult to manage when high detail is present.

NOTE 1 The robust quality of a semantic model refers to both the accuracy of its representation of the reality it is intended to model and its stability to minor changes in that reality. Different kinds of semantic models are evaluated by different means, e.g. adversarial examples can help determine the robustness of a convolutional neural network used for machine learning [54] while attributes of soundness, completeness, lucidity and laconicity can help determine the robustness of an object-process model [40].

When examining more than one dimension, care is necessary to assure that their extent of abstraction and granularity of detail are roughly equivalent. Therefore, when constructing or analysing a multi-dimensional modelling framework, the participating dimensions shall be of roughly the same extent of abstraction, exhibit approximately the same granularity of detail in their semantic models, and be consistent with the purpose of the modelling framework. Lacking such rough equivalence, the analysis process shall make known and compensate for disparate information sources.

When composing dimensions, which are collections of aspects, into a facet of more than one dimension, Warfield and Christakis [59] point out two more selection criteria that shall be applied:

- Inclusion of the dimension makes possible a more accurate description of the system not possible if the dimension is omitted;

- Inclusion of the dimension implies that choices made in design will modify the behaviour in ways not possible if the dimension is omitted.

NOTE 2 In IEC TR 63319 [9] meta-model the modelling framework concept is identified as a facet and the criteria for inclusion in a modelling framework is identified as a facet_composition_rule.

Further, a modelling framework of too few dimensions is not able to attain the purpose of the modelling effort because the necessary descriptive variety is not available. Often missing in technology-based frameworks is recognition of human decision-making. Conversely, a modelling framework of too many dimensions is not able to attain the purpose of the modelling effort because the imposed aspects overwhelm users unable to respond effectively. A minimalist approach to dimension selection can focus human judgement so that it does not exceed short-term cognitive capabilities or over burden their physiology. Finally, prominent dimensions help to assure that the decisions make maximum use of available knowledge [59]. Thus, prominent dimensions of sufficient yet minimum variety can ensure fidelity of the modelling framework to the purpose for which it is created and utilized. Properly selected dimensions of modelled aspects is the descriptive precursor to prescriptive analytics.

NOTE 3 By relaxing the constraints on a collection of aspects or a framework of dimensions, an analytical framework that offers more possibilities for examining interactions of aspects can be possible. However, because those constraints are relaxed, the fidelity of the analysis is in jeopardy and great care is necessary to properly express the analytical results in a manner that assures a trustworthy interpretation. See further discussion in 7.3.

7.2.3 Collections of life cycle phases as dimensions of smart manufacturing

The distinction between life cycle phase and life history stage presented in 6.11 becomes very important when either is cast as a dimension of an analytic or synthetic modelling framework. The semantic model of a life cycle dimension should focus on mechanisms for identifying dependencies and similarities among models used in various life cycle phases by the other dimensions of the modelling framework.

The semantic model of a life history dimension should focus on mechanisms for capturing and recording instances of life cycle activity execution including initiation conditions, outputs, and termination conditions. The former is often more useful when synthesizing using a reference model while the latter is often more useful when analysing using a reference model.

NOTE The semantic model for a dimension already has internal dependencies identified.

Since life histories generally do not align or align only at particular milestones, a modelling framework can require more than one life-oriented dimension to fulfil its purpose. Such is the situation with a modelling framework that has a need for both a production and a product dimension. They are aligned as the product is being created in production but otherwise have rather different life histories and can have no interaction of their respective aspects other than production.

A life-oriented dimension shall clearly identify its purpose within a modelling framework and whether its aspects are referring to life cycle activity identification and segmentation, or life history recording of executed activities.

7.3 Using a semantic model for analytical reasoning in smart manufacturing

A reference model for SM should enable ways to analyse both existing manufacturing operations and the potential consequences of introducing change into that operation, particularly those changes of a disruptive nature. A modelling framework of aspects and associated semantic models allows direct examination of the explicitly identified objects and relationships of the semantic models. Where commonality exists in the objects or patterns among those models, a certain extent of inference about interactions is possible. In some situations, this limited examination is sufficient.

To aid in examination of interactions, tools for search and navigation should be available. Preferable are tools that integrate keyword or phrase search and navigation based on search results that can be applied to many different kinds of modelling framework.

However, the availability of powerful analytic engines provides additional opportunities for examination, particularly with respect to the consequences of dynamic change. To use most analytic engines or methods, the semantic models need forms that meet the input specification of that engine or method.

NOTE One reason to use the forms identified in 6.12.1 and 6.12.2 is to facilitate transition to the form necessary for analytical engines and methods.

Moving beyond examination of aspect interactions within a dimension to interactions among aspects of different dimensions, two observations are of interest. First, when two dimensions of aspects are placed into an orthogonal configuration, they form a matrix indexed by each of the dimensional aspect collections and offer the use of various matrix manipulation methods for analysis. Second, aspects of many dimensions are characterized as layers of aspects forming a layered network of aspect elements, which can coincide with the semantic model of the dimension or simply be an artefact of the aspect specifications. In either case, the methods of multi-layer network analysis can yield useful analytical results [40].

Also possible is an approach that combines matrix manipulation in the form of adjacency representation and multi-layer network analysis [49].

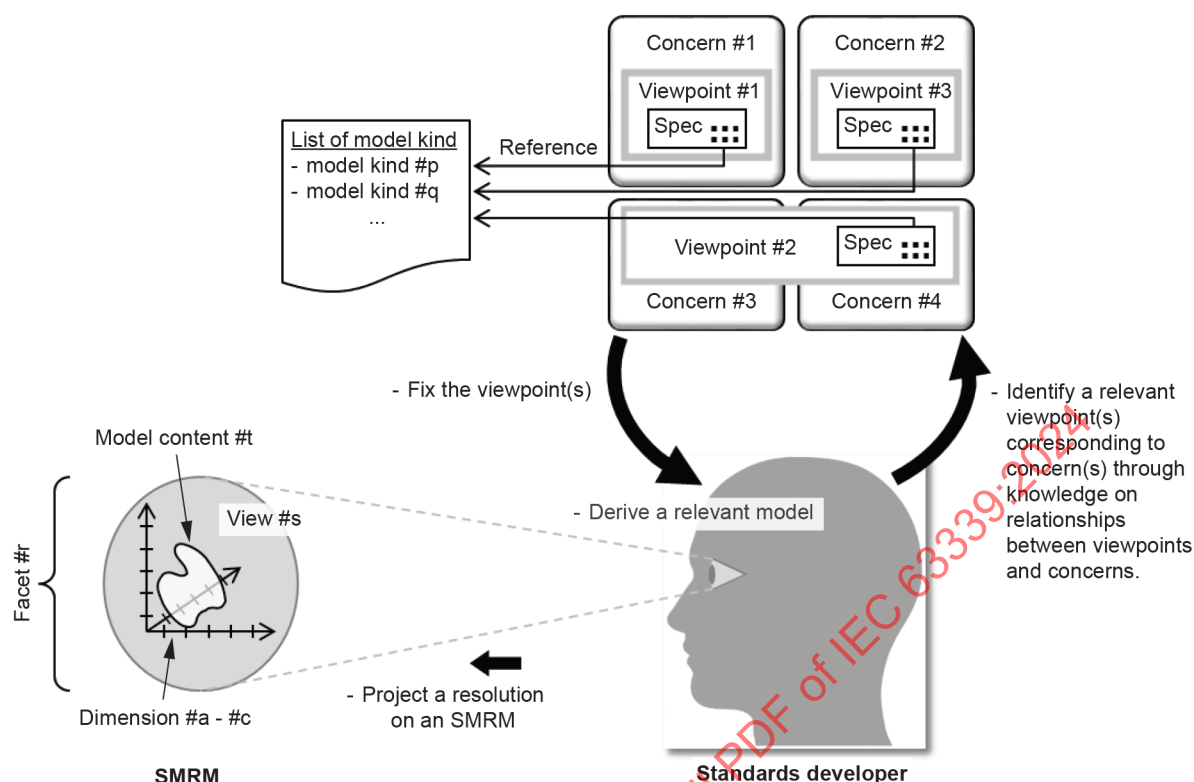
7.4 Selecting facet dimensions based upon concerns

SM standards developers should possess expert knowledge of stakeholder concerns and associated viewpoints that apply SM technologies. Because of the diversity of concerns and technologies that SM standards developers are likely to encounter, model view outcomes and analysis results determine the best selection of appropriate aspects and dimensions to structure facets that best meet the needs of stakeholders. Where possible and practical, an existing facet or portion thereof can be used.

EXAMPLE 1 The purpose criteria of meaningfulness is a capability of presenting a guideline for extracting a facet composed of one or multiple dimensions systematically, whether for reference or implementation, across the entirety of manufacturing with particular attention for the incorporation of and evolution to the SM paradigm.

The remainder of this subclause is an exemplar that applies the concepts present in the URMSM to a standard developer's problem of aligning stakeholder concerns with available aspect resources to resolve those concerns.

When an SM standards developer has access to a repository of existing SM related facets, they can utilize multiple-dimension facets for a particular combination of stakeholder concerns and associated viewpoints. The approach below specifies the sequence of activities by which SM standard developers can select appropriate model content from a model repository for a particular SM initiative. This approach adapts the terminology of ISO/IEC/IEEE 42010 [15] to characterize the artefacts considered and generated through an analytical mechanism from perception of the need to realization of the facet for smart manufacturing.



IEC

Figure 2 – SM standard developer perspective of facet reuse

Figure 2 depicts a typical facet reuse scenario. Since the specification of a viewpoint identifies model kind #p and #q, and the combination of concerns and viewpoint specified views result in identification of dimensions #a – #c, the facet #r is the source for relevant content from the associated semantic models that use the model kind paradigms.

EXAMPLE 2 If the semantic model of one of the dimensions includes standards of relevance or a taxonomy of terminology then the facet content can be a list of relevant standards and relevant terminologies that address the stakeholder's concerns.

Figure 3 depicts the procedural framework resulting from the typical facet reuse scenario with a flow from right to left. After locating viewpoint(s) that address the identified stakeholder concern(s), both model kind paradigm(s) and view specification(s) are available from the viewpoint(s). These view(s) link to aspect(s) that utilizes the view(s) and hence to dimension(s) in which the aspect(s) appear. Given the identified aspect(s) and dimension(s), the semantic model(s) and their model content expressed in the model kind(s) paradigm is available.

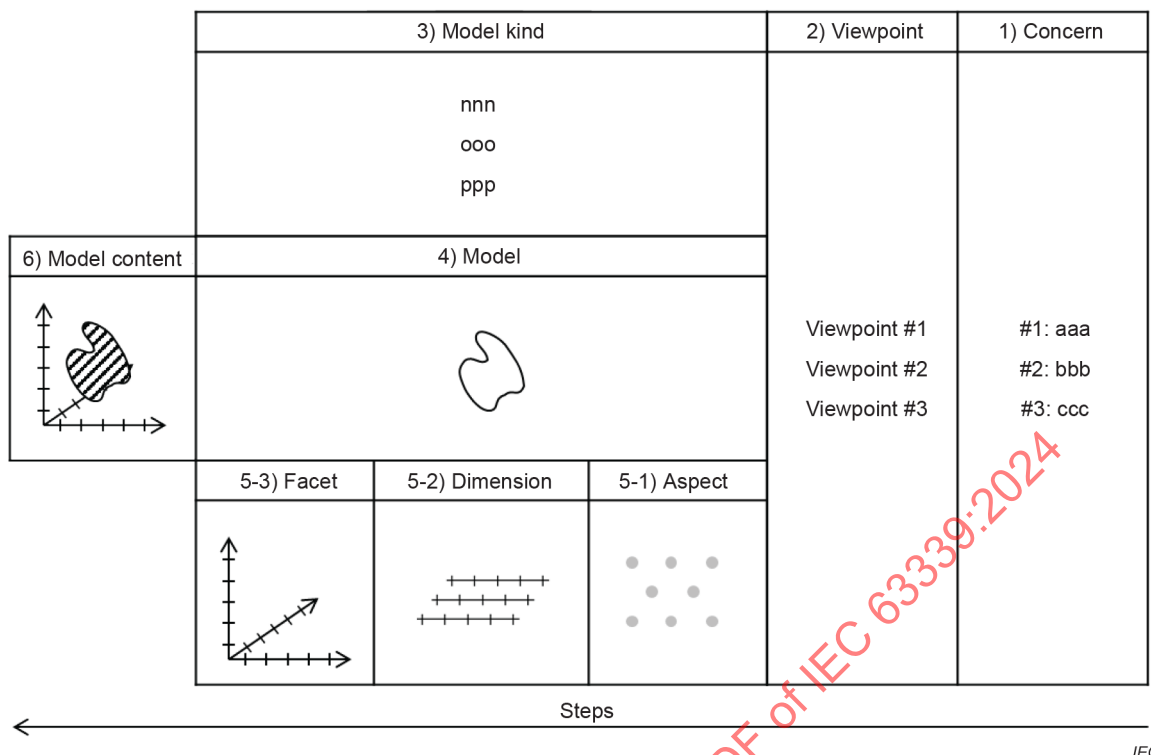


Figure 3 – Projection steps for standards developers

A similar procedural flow is possible when no existing facet is available from which to extract suitable content to satisfy the stakeholder's concern. In this scenario of a single model and view specification, the model content is created to meet the specific purpose of the modelling effort as follows:

- recognize and document stakeholder's concern;
- identify relevant viewpoint corresponding to documented concern through application of SM modelling expertise;
- verify corresponding model kind from the viewpoint can satisfy the concerns;
- using the model kind paradigm create model for which the projected view meets the viewpoint view specification for addressing the concern;
- iterate the following steps until a constructed facet meets requirements for relevance;
 - recognize aspect composed from the model view (see 5-1) in Figure 3);
 - specify dimensions suitable for each recognized aspect and verify aspects of the same type are within the same dimension relative to modelling purpose (see 5-2) in Figure 3);
 - construct facet based on the identified dimensions (see 5-3) in Figure 3);
- instantiate practical model content of the model views specified for the facet.

NOTE The national models found in IEC TR 63319 [9] provide guidance as to the way in which the iteration in e) above can occur with respect to a particular modelling purpose.

7.5 Identify meaningful dimension interactions

Not all interactions of aspects, either within a dimension or between dimensions, have practical meaning for the purpose of the reference model use activity. Only when the semantic model associated with an aspect has one or more features in common with other aspects is their interaction potentially meaningful.

Within and across dimensions, a smart manufacturing model shall identify all semantic model features that appear in common with the semantic model of another aspect.

NOTE Common features are particular modelling elements, often embodied into the semantic model associated with dimension coherence criteria, which characterize the aspects involved in an interaction.

EXAMPLE A dimension of product life cycle and a dimension of production life cycle clearly have much in common during production of the product but have far less or even nothing in common at the beginning or end of their respective life-times.

The purpose for dimensional modelling of aspects can also influence the relevance of aspect interactions. Aspect interactions between dimensions that occur beyond the purpose of the modelling effort are usually meaningless to that effort. Therefore, the purpose of the smart manufacturing modelling effort shall determine the scope of aspect interactions meaningful to that purpose.

When aspects are related as collections of aspects or aspect characteristics in a two-dimensional grid or matrix, the cells serve as containers for aspect interactions. No column or row shall be entirely devoid of interactions with the other dimensions. Many analytical techniques rely upon this kind of framework structure to enable pair-wise comparisons of aspect interactions among adjoining cells.

7.6 Frameworks as visualizations of interactions

The visual representation of aspect interactions can take different forms: semantic model graphical representations, frameworks with collections of aspects or aspect characteristics, grids or matrices, nested graphical objects, and multiple dimensions as projections of aspects or collections of aspects are frequent framework forms. Sometimes several forms of visual representation are combined into a single visualization.

NOTE 1 Graphical visualizations are representational as are semantic representations that use different classes of artefacts.

NOTE 2 When using more than one representational form for a single visualization, care is necessary to assure that the viewer does not conflate the interpretation of the different representations with interpretation of the single visualization, which usually attempts to aggregate or compose the several interpretations into an interpretation at a very different granularity.

NOTE 3 IEC TR 63319 [9] depicts many different forms of visualization. When the represented dimensions are coherent collections of aspects, the resulting depiction of interactions is a facet visualization.

NOTE 4 Missed or misinterpreted aspect interactions can be significant sources of risk.

An SMRM facet that conforms to URMSM shall consist of containers that result from semantically intersecting aspects within and between coherent dimensions. When aspects are related within a framework, the structure of the framework provides containers where interactions occur or between which interactions occur. The containers within a framework result from overlapping framework dimensions and are often called cells or loci of the framework. Unless the framework has a corresponding semantic model, that is, the framework is a facet conforming to URMSM, aspect interactions beyond possible execution sequence are usually implied and often dependencies among aspects are hidden. In lieu of a well-specified semantic model, frameworks usually rely upon textual descriptions of expectation regarding framework container contents and relationships with other containers.

At a minimum, frameworks shall enumerate containers, for example labelled cells, loci, nodes or objects, as intersections which designate aspects or collections of aspects of relevance to the application domain. Graphically, relationships between containers should be labelled arcs indicating the nature of the relationship.

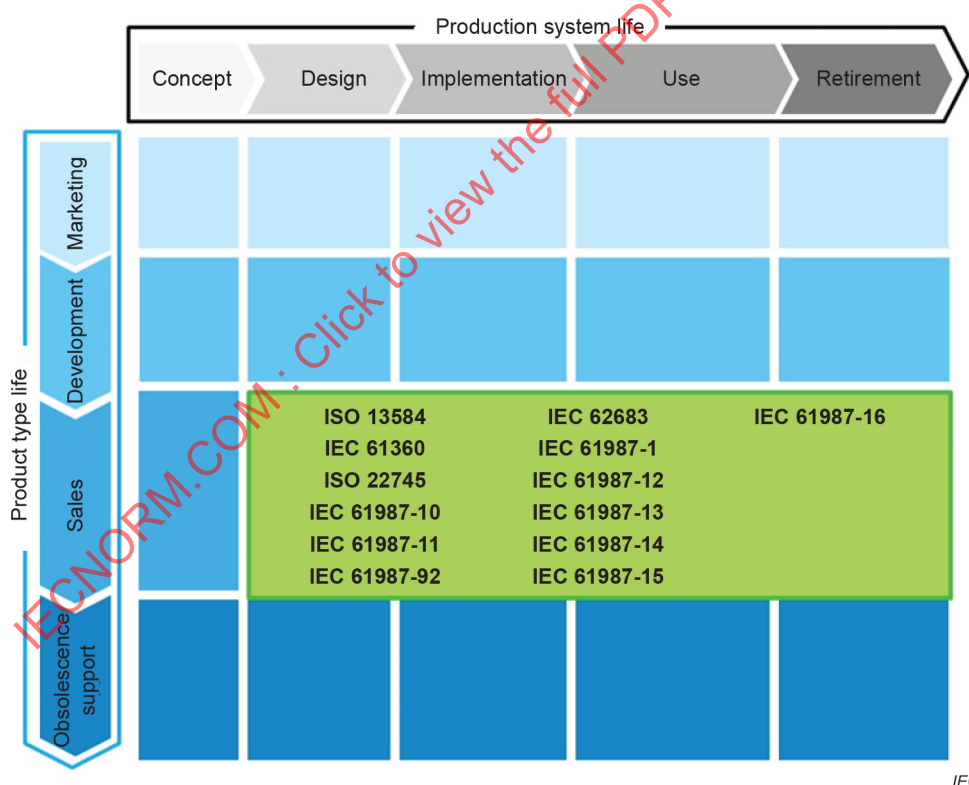
An SMRM facet that conforms to URMSM shall include the coherence criteria for its collections of aspects. A semantic model or models should relate those aspects to each other. See Annex G for examples of frameworks as IDEF0 diagrams.

Figure 4, Figure 5 and Figure 6 depict several kinds of visualizations that represent various interactions among aspects of SM.

Identification		Hierarchy										Life cycle										Ir a						
Reference		Title		Equipment hierarchy		Functional hierarchy								Product type life cycle		Product instance life cycle			Production system life cycle									
Status	Standard number	Standard title		Enterprise	Facility	Station	Device	Connected world	Business (L4)	Operations management (L3)	Control (L2)	Sensors and actuators (L1)	Process (L0)	Product	Marketing	Development	Sales	Obsolescence support	Manufacturing	Transport and stock	Use		Disposal	Concept	Design	Implementation	Use	Retirement
Publication	IEC 61158-2	Industrial communication networks - Fieldbus specifications - Part 2: Physical layer specification and service definition		-	-	1	1	-	-	-	1	1	1	1	-	1	-	-	1	-	1	-	1	1	1	1	-	-
Publication	IEC 61158-X-y	Industrial communication networks - Fieldbus specifications - Part x-y; Data-link and Application layers service definition and protocol specification - Type y elements		-	-	1	1	-	-	-	1	1	-	1	-	1	-	-	1	-	-	1	1	1	1	1	-	-

IEC

SOURCE: ISO/IEC TR 63306-1 [8]

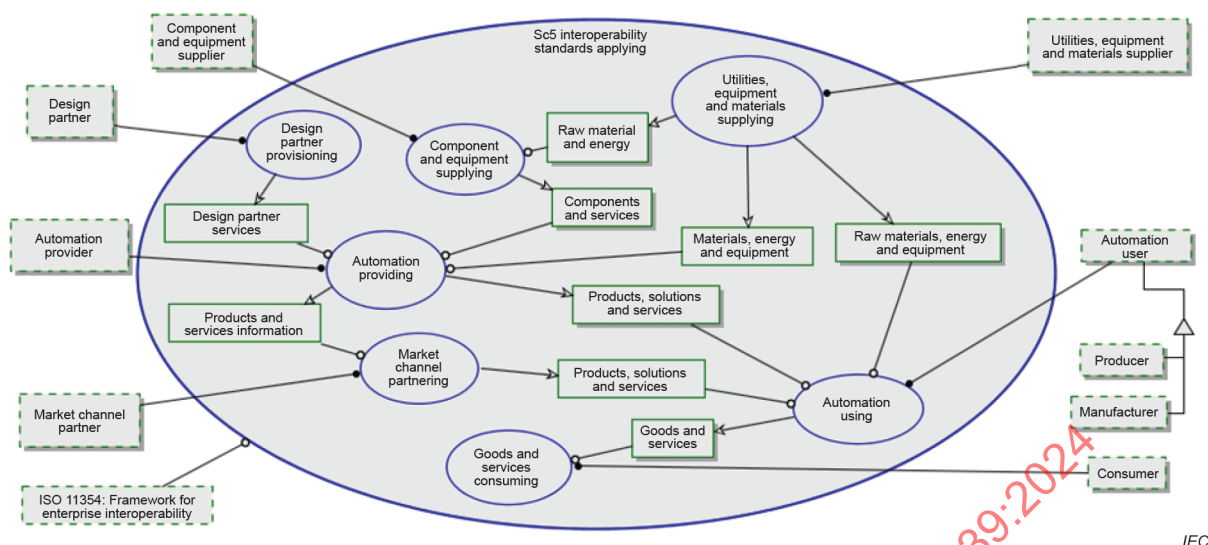
Figure 4 – A one dimensional framework representation

IEC

SOURCE: ISO/IEC TR 63306-1 [8]

Figure 5 – A two dimensional framework representation

When aspects are related within nested graphical objects, the encompassing extent of containment usually limits the interpretation of aspect interactions. Observers often confuse the enclosure of interacting objects within a labelled graphic symbol with an expression of commonality or group membership among the contained objects, similar to a collection or set name.



SOURCE: ISO/TC 184/SC 5 N1111 [24]

Figure 6 – Nested processes (centre oval) and user members (right)

Graphical depictions shall clearly distinguish containment intended to indicate interaction relationships from containment intended to indicate group membership.

NOTE 5 Behind the nested graphical objects a kind of first order logic is necessary to govern the simulation and thus the operative semantics of the specified grid system. Anticipating an analysis based upon nested graphical objects is misleading since nested graphical objects only serve the GUI of the graph simulator representing a situation but do not perform the implied semantics behind the representation as expressed by the designated interactions.

When aspects are related across more than two dimensions, usually as projections of aspects or collections of aspects from a dimension of related aspects, the interaction of aspects occurs both within and between the loci formed at the intersection of dimensions. The understanding of these interactions is complicated by the larger number of interacting aspects.

Given the cognitive difficulty in proper interpretation that visualizations of complicated or complex modelling situations that visualizations of more than three dimensions raise, visualizations of more than three dimensions should use one of the following visualization techniques:

- 1) Collapse two dimensions into a single dimension with revision as a single semantic model of consolidated aspects;

EXAMPLE 1 Consolidate Business with Production as one dimension.

- 2) Expand a locus of intersecting aspects using a subsidiary framework of one, two or three dimensions where the aspects intersecting at the locus are distinct from the aspects within the subsidiary framework;

EXAMPLE 2 Japan IVRA and SMU.

- 3) Generate multiple frameworks by repeating one or two dimensions in each until all of the relevant dimensions are in one or more framework visualizations;

EXAMPLE 3 ISO 11354-1 [17].

- 4) Provide annotations on a framework visualization indicating additional aspects or collections of aspects that are relevant to the purpose of the modelling effort;

EXAMPLE 4 RAMI4.0 addition of Product to the Hierarchy dimension.

- 5) Provide a combination of visualization forms within a single graphic image;

EXAMPLE 5 OF1-SM2 as composite of SM2 with linear frame, 2D face, and 3D cube.

- 6) Provide overlay annotations for additional related dimensions.

EXAMPLE 6 SSIF and GERA and Annex A and Annex G.

However, the recommendation regarding use of one of the listed visualization techniques does not restrict the use of other visualization techniques to provide graphical representations of complicated or complex modelling situations [55].

8 Using the URMSM

8.1 Utility of a reference model for smart manufacturing

URMSM establishes a framework for using collections of entities and relationships to enable creation of SMRMs that provide guidance towards the specification of aspects of manufacturing, from conceptualization of a manufacturing system or manufactured product through its retirement or disposal. An SMRM should identify those aspects of manufacturing and how to apply when developing a model of SM for a particular industrial enterprise.

An SM system is a complicated and often complex system of systems, where many collaborating, competing and possibly conflicting systems are connected using unified, federated or integrated approaches [41] [17]. As the number of interacting aspects grows and the corresponding degrees of freedom in the behaviour of interacting processes and conceptual objects increase, deterministic behaviour often transitions into indeterminate situations with emergent behaviour resulting in complexity that is difficult to comprehend, analyse and manage. To manage this complicated and often complex interaction of many entities, some of which are well-defined systems, requires appropriate standardized interfaces and harmonized business processes to reduce the entangled interactions. Modelling provides systematic methods supporting the whole life cycle of system development, usage and retirement, allowing all the SM benefits while managing the complications and complexity of interactions among constituents.

An SMRM shall provide a framework for preparation of interoperability among component parts as well as guidance for architecture derivation and system design. SM stakeholders should use an SMRM to support the development process, and SM standard developers should use an SMRM to ensure coherence and compatibility in the developed body of standards.

An SMRM specifies relevant aspects of manufacturing with appropriate abstraction, including constituent activities, processes, resources and information with specific relationships among constituents. Starting from an SMRM that conforms to URMSM, models that are more specific can be derived in a systematic manner for achieving a model for the target system configuration and implementation.

Clarification and standardization of an SMRM at various extents of abstraction are necessary to improve development processes' efficiency by reusing constituent assets in system development and operations. An SMRM can also be used as a guide for effective use of existing standards and finding gaps for missing standards.

8.2 Industry specific application of the URMSM

SM systems are developed worldwide, leading to many possible system representations and reference models, each intended for a different purpose. IEC TR 63319 [9] clearly indicates the diversity of existing SMRMs and exposes the need to harmonize those models in order to achieve a unifying understanding about the modelling of SM systems.

As shown in Figure 7, URMSM is applicable across many domains by using this document to create a specialized SMRM for a particular manufacturing domain. In addition, URMSM can be a precursor to very purpose specific model of SM, again by specializing URMSM first to create an SMRM for the particular purpose and then using that specialization to create the model of SM. Instantiation of the elements of a specialized model of SM can result in an SM implementable model (SMIM) for a particular SM initiative.

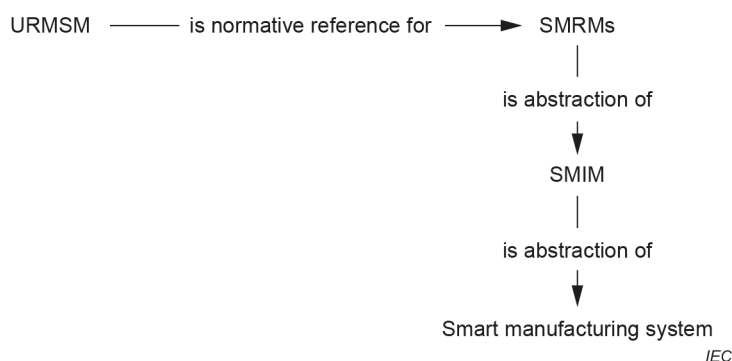


Figure 7 – URMSM abstraction stack

The URMSM has two major structural sub-models shown in Figure 7 as SMRM and SMIM that are associated by two “is abstraction of” relations, one as “normative requirements (NR)” for provisioning SMIM and one as “implementation reference (IR)” for provisioning the smart manufacturing system.

The first relation, NR, relates various arrangements of SM elements to configurations in SM enterprise domains and the second relation, IR, relates semantic elements to implementation concepts.

8.3 Specializing URMSM

8.3.1 Specific utilization of the URMSM and rules for derivatives of SMRMs

The URMSM was developed by applying inductive reasoning to identify modelling and representational features in many different SMRM that had no consistent representation. The URMSM specifies requirements, recommendations and possibilities regarding feature utilization when creating SMRM or SM implementations.

Usage consistent with the URMSM shall occur by applying the normative requirements of this document to elaborate the reference model concepts identified in Clause 6 augmented with modelling elements, i.e. entities and relationships, appropriate for the intended specialized purpose of the modelling effort.

NOTE 1 URMSM elaborates a conceptual model using terms largely derived from ISO/IEC/IEEE 42010 [15] and ISO 15704 [18].

Since this document does not specify particular aspects, dimensions or facets, each SMRM derived using the requirements of this document can be different and focused on the domain and purpose for which the SMRM is created and utilized. Modification of this document's requirement when applying to a specific domain and purpose should further constrain model development and use rather than enable wider latitude in model development by omission of one or more normative requirement.

EXAMPLE 1 An organization can determine that only 'actionable data' is to be used in model development or that SysML models are of sufficient semantic content to satisfy the requirements for semantic models to assure coherence of aspects in a dimension. Conversely, specialization that uses 'raw data' or uses an ad hoc sketch of idealized relationships to guide implementation can provide insufficient clarity to serve the requirements for elaborating the semantic model of an SMRM.

The various techniques for adapting visualizations for specific purposes listed in 7.6 represent specialization of URMSM specifications. The adaptation of visualizations for specific purposes should adhere to the requirements of URMSM to preserve the analysis and synthesis capabilities those requirements enable.

EXAMPLE 2 Embedding a production dimension into a business dimension to provide a single consolidated dimension can occur if both the production dimension and the business dimension have semantic models that compose into a single semantic model so that coherence is preserved.

Specializations can also include:

- aspect partitioning, e. g. dividing an aspect and its semantic model into two or more aspects;
- elaboration as a new aspect, e.g. insert a new aspect into a dimension by elaborating the semantic model of that dimension;
- reconfiguration of dimensions, e.g. rearranging aspects within a dimension to focus on aspects specifically related to purpose;
- introduction of a new dimension, e.g. adding a specific technology capability dimension;
- elimination of aspects or entire dimensions.

Given that semantic models can range from rather abstract to very fine detail, their suitability for use in a reference model depends upon the purpose of the reference model and the other semantic models used in that reference model's dimensions.

An included semantic model shall clearly identify the information and context as referenced. A specialization of URMSM as a reference model for one domain of practice shall elaborate and identify only those aspects of the semantic models most relevant to that domain of reference, other aspects not relevant need not be elaborated.

As analysis or synthesis proceed, other aspects can rise in relevance; those aspects shall be identified and elaborated to the same extent of detail so that pertinent entities and relationships can be identified relative to modelled structure, behaviour and purpose.

EXAMPLE 3 For physical entities, extent of decomposition using the equipment hierarchy of IEC 62264 [3] or IEC 61512-1 [2] can often suffice, but sometimes equipment capability profile is also necessary. For materials, decomposition sufficient to understand material properties can be sufficient but sometimes material location and transport is also necessary. For logical entities, the entity function, perhaps as an information transformation specification, can be sufficient but sometimes the allocation of logical function to a piece of hardware is also necessary.

NOTE 2 Raw data collected from sensors is often too granular for analysis, which can require average or median structured data [43], but is appropriate for synthesis of new capabilities [44].

8.3.2 Manipulating reference models to match purpose

For success when using a reference model approach for analysis or synthesis, two considerations are essential: 1) does the purpose for use clearly express or enable derivation of the stakeholders, their perspectives and the resulting concerns; and 2) do the aspects present in the reference model identify those stakeholders or perspectives and provide knowledge or information relevant to those concerns sufficient to conduct the analysis or synthesis associated with use of the reference model for the stated purpose.

While a highly generalized reference model typically casts a broad net to capture any possible stakeholders, their perspectives and their concerns, the granularity of the aspect semantic models is likewise very large and lacking detail. The result is an inability to assess the applicability of the aspect semantic models to specific stakeholders, their perspectives and their concerns.

Generalized reference models should be specialized to the extent that the necessary stakeholders, their perspectives and their concerns are clearly identifiable in the semantic models that articulate the aspects of manufacturing utilized as a reference for implementation.

Because using a reference model for analysis results in work effort and orientation that are different from the work effort and orientation associated with synthesis, different reference models can be appropriate. Each reference model should state whether its focus is analysis or synthesis or both analysis and synthesis. When utilized for analysis, a reference model can limit specializations to avoid analysis results missing relevant content. When utilized for synthesis, a reference model should enable the incorporation of new content as a development project matures.

Complex reference models often do not lend themselves to elaboration to achieve a new purpose. Such reference models can require significant clarification and a clear understanding of the limits the reference model imposes on the determination of suitable specializations. Each reference model should state the intended domains of applicability and known or expected limits of applicability.

Practical limits in cognitive capacity and manual manipulation of complicated or complex reference models have inhibited the use of many sophisticated analytical techniques, particularly across domains in an extended supply chain or value chain. However, the advent of automated analytical technologies now enables large scale model spaces to be manipulated with greater ease although placing increased burdens of data quality and completeness [64]. Newer techniques for functional analysis and identification of opportunities for continuous improvement depend upon the manipulation of large models, either models constructed as multi-domain reference models or as captured digital twin models of operating facilities or products.

Within the constraints of the embedded semantic models, a reference model shall state the analytical techniques applicable for use with derivatives of the reference model. Constraints of the embedded semantic models can result from limits on access to linked semantic models or resolution of conflicting or unrecognizable content from linked semantic models. These same constraints offer opportunities for operational improvement through elimination of the constraint, e.g. alignment of vocabulary or addition of clarifying model elements.

Since the scope of the URMSM is reference models rather than models intended for instantiation as real-world artefacts, the content of aspect, dimension and facet semantic models is modelling elements rather than instances of data or information those modelling elements can bear. Therefore, the limit of utility for the URMSM is the manipulation of representations of aspects of smart manufacturing and the actual data or information manipulation is beyond the scope of the URMSM. Smart manufacturing reference models should identify applicable methods, standards, or mechanisms for instantiating corresponding artefacts in the real-world.

9 Use cases of the URMSM

9.1 Analysis use case

9.1.1 Examining interactions at intersections of aspects

A reference model provides insight into the aspects of a system by identifying aspects pertinent to a stated purpose and by specifying the ways in which those aspects can interact. Since the URMSM expects semantic models that represent aspects and their collection into coherent modelling dimensions, those dimensions shall be the basis for insight about aspect interactions.

Two kinds of direct interaction between aspects can occur: 1) shared model elements in semantic models of two or more aspects within a single dimension, and 2) shared model elements in semantic models of two or more aspects in different dimensions.

NOTE The first kind of occurrence is the result of the coherence criteria for the dimension's aspects, while the second kind of occurrence is the result of interactions between modelled dimensions where the coherence criteria of the aspect's respective dimensions cannot apply.

For the analysis use case, the examination of the respective semantic models should yield information about identifiable impacts or insights regarding the consequences of the aspect's direct interactions.

EXAMPLE The supply chain dimension found in Annex G use the "ALEI" modelling element in the semantic model of each supply chain participant where "ALEI" qualification is a precursor for participation in the supply chain.

9.1.2 Examining interactions near intersections of aspects

For each identified direct interaction between aspects, other modelling elements of the respective semantic models can appear in the semantic models of "neighbouring" aspects and these other modelling elements can also contribute to aspect interactions. These indirect interactions with neighbouring aspects can occur: 1) in the same dimension but not directly related to the coherence criteria, or 2) in different dimensions that do not share the direct interaction of semantic models.

NOTE "neighbouring" aspects are those sharing semantic content with an aspect.

For the analysis use case, the examination of the respective neighbouring semantic models can yield information about identifiable impacts or insights regarding the consequences of the aspect's indirect interactions. The consequences of these interactions should be assessed to determine if the results of the interaction present an unacceptable result or action.

9.1.3 Inserting new capabilities to analyse

Improvement by adding a new capability in the content of an existing reference model to enable effective and efficient analysis results relies upon both the semantic quality of the reference model, that is how well the semantic model represents the SM situation, and the extent to which a specialization of the reference model aligns with the purpose of the analysis. Elaboration of the semantic models, either to enhance quality or as a specialization, can improve the breadth of analysis coverage but can suffer from the added cost of the broader analysis. The people commissioning the analysis and conducting the analysis should consider the cost benefit ratio associated with increasing analytical capabilities before undertaking such improvements.

9.2 Synthesis use case

9.2.1 Identifying necessary coverage of aspect interactions

A smart manufacturing reference model is especially well-suited for guiding smart manufacturing initiatives when that reference model includes a wide range of aspects pertinent to the applicable manufacturing environment. Since most smart manufacturing initiatives occur in established manufacturing environments, not all of the aspects of a smart manufacturing reference model are applicable to a particular initiative. However, pruning aspects considered as not pertinent too early in the initiative can reduce the identification of relevant direct and indirect aspect interactions important to the success of the initiative.

By specializing an SMRM, or one of its derivatives, with the additional semantic content initially associated with the SM initiative, the SMRM aspects that then share modelling elements with the added content from the SM initiative become evident. SM standard developers or SM practitioners that specialize an SMRM with new semantic content should use these newly identified shared modelling elements to examine potential direct and indirect interactions between aspects and assess the consequences of these interactions on parameters of manufacturing effectiveness and efficiency.

New technologies can present a problem for synthesis within smart manufacturing initiatives because a robust semantic model relevant to the new technology is not available. While essential characteristics of the technology are usually available as design specifications and usage guides, these artefacts are rarely rendered in useful semantic model forms suitable for use with SMRMs. Vendors and researchers should make available semantic models of the specific technology they offer using standardized semantic model techniques to facilitate smart manufacturing system developer understanding and use of the technology for smart manufacturing initiatives.

9.2.2 Sequencing activities based upon dependencies

The semantic models present in an SMRM can identify many of the dependencies between manufacturing elements. Elaboration of an SMRM through specialization exposes more dependencies. The examination of dependencies within and across life cycle phases can provide insight for one or more possible sequences of manufacturing activities that align with the precedence criteria, e.g. a work breakdown structure. Not all dependencies are relevant to activity sequence but usually all activities have some kind of dependency criteria [35].

Dependency criteria take a variety of forms, e.g. functional dependency and physical dependency. Identifying the specific form enables the discovery of applicable dependency criteria for a particular SMRM or implementation model situation.

EXAMPLE Between any two manufacturing elements twenty-seven different forms of logical ternary relationships as variations of reflexivity, symmetry and transitivity can exist [51].

An entity life cycle model also provides substantial information regarding dependencies across life cycle phases.

An SMRM shall identify the source for criteria it uses to determine existence of a dependency in model elements. An SMRM shall provide a means to identify direct dependencies among model elements as named relationships or annotation labels. System stakeholders should use the dependency information to structure the sequence or priority of activities relevant for entities of interest to them.

9.3 Simulation in SMRM

Simulation can provide great benefits in reducing risk and time in development of SM systems, such as the opportunity for use of a regularized simulation technique or tools to understand the behaviour of implementation models or digital twins based upon the SMRM or its specialization.

Simulation is particularly useful when synthesizing with new technology where the outcome of its introduction is not entirely known, and analysis of distinct possible configurations can undergo simulation iterations. Two basic kinds of simulation analysis can occur: 1) model checking for consistency and valid relationships, and 2) execution of a simulation facility populated with assigned or measured data elements.

Usually, a simulation takes place in the context of one semantic model. Modelling elements used in a simulation should be taken from semantic models that have the same extent of granularity and fidelity. Because of the multi-dimensional character and life cycle elements in SM, and since the criteria of membership for an aspect in a dimension does not require the same extent of granularity and fidelity for all aspect members of the dimension, a simulation involving different aspects in a dimension or across dimensions of intersecting aspects can result in the need to elaborate aspect semantic models to a consistent extent of granularity and fidelity prior to simulation so that modelling elements used by the simulation can be considered in roughly the same context. For large SMRM the number of entity and relationship model elements becomes too large to verify and validate through cognitive inspection. An SMRM should identify modelling tools capable of enforcing model element consistency within the modelling approach used to express the implementation models expected to result from use of the SMRM.

Since most simulation techniques expect inputs based upon real-world scenario data, an SMRM should provide a means for populating model elements with data elements consistent with the model purpose and for exporting that data in a form suitable for input to a simulation modelling tool.

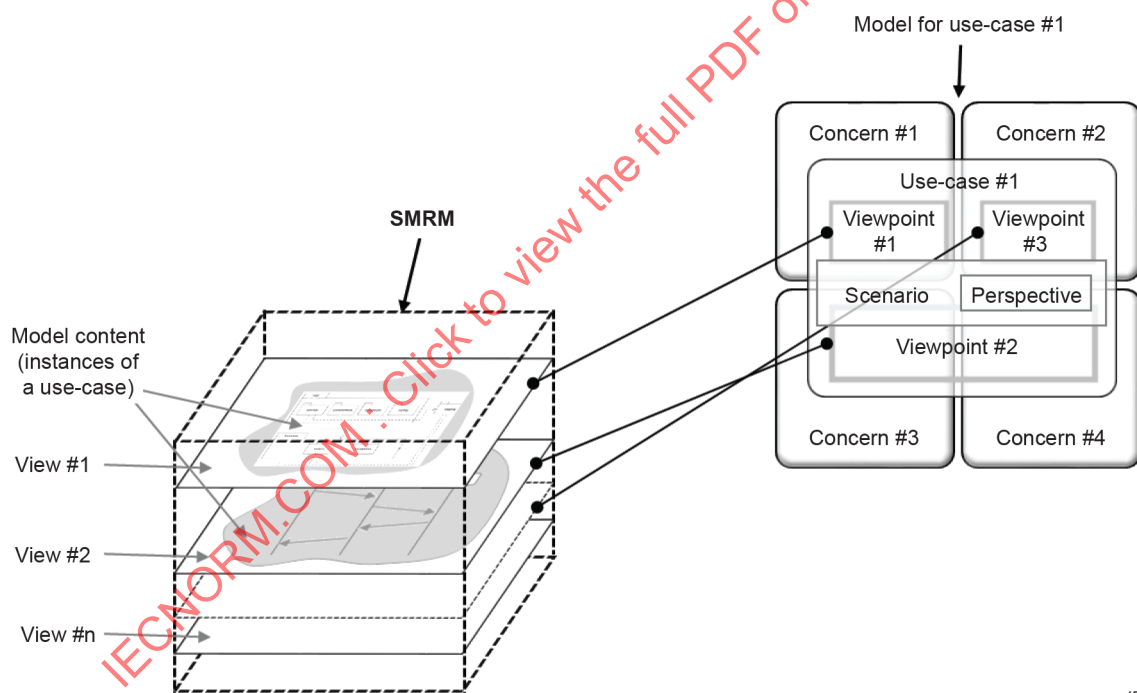
9.4 Implementation use case

Conformance to URMSM can deliver various benefits to not only standard developers but also smart manufacturing practitioners, and one of the benefits would be an assistance with design through use of the URMSM requirements and recommendations when implementing ideal manufacturing systems described in use cases.

The remainder of this subclause is an exemplar that applies the concepts present in the URMSM to an SM practitioner's use of an SMRM. First, the following describes a relationship between URMSM conforming reference models and use cases.

Figure 8 depicts the generation of simple views from models specified by viewpoints, as aspects of a “View” dimension. This dimension is captured as a vertical axis by several specific SMRM representations, e.g. RAMI [6] and IIC [39]. Each view carries model content into the intersections with the aspects of other dimensions. In most situations, the viewpoint draws not only concern information from a use case but also use case proposals or required means and mechanisms for addressing those concerns in model content.

The model content derived from viewpoint governed modelling activity that incorporates a use case should be projected onto one or multiple views in order to present the use case characteristics in the aspect (see Annex F).



IEC

Figure 8 – Example of a model for use case #1

The following assumptions apply to utilization of a use case:

- A use case covers single or multiple concern(s), and contributes to a single or multiple viewpoint(s) related to each concern it covers;
- A use case is characterized by a scenario articulating concerns corresponding to achievement of a specific goal from a particular perspective;
- A use case needs to have the appropriate content, however, not all use cases are rich enough to record sufficient information to generate the necessary content;
- A part of a use case becomes the basis for a viewpoint specification that results in one or more views of model content;

- A characteristic such as location, cover area, and maturity are possible as a parameter of each viewpoint that changes according to some conditions assigned by the stakeholder through the use of a parametric concern use case.

Figure 9 shows an example situation that draws diversified smart manufacturing systems from different stakeholder groups such as smart manufacturing practitioners using a reference model. Typical examples of the diversity of stakeholders are scale, for example large enterprises or SME, and management style, for example innovative or traditional. Differences in the functionality, scalability, and situation of existing manufacturing systems in factories lead to differences in improvements and/or expansions required to upgrade the systems. In addition, differences in the situations in individual stakeholders' businesses lead to differences in investment priorities and/or differences in the amount of investment. Various differences can lead to conflict and contradictions in model development that need to be resolved.

While a final objective of a use case for smart manufacturing might be singular in nature, situations faced by stakeholders are not singular because of dependencies between various manufacturing capabilities. Therefore, stakeholders should refer to one or multiple model contents to accomplish the use case objectives in their situations (see Annex G).

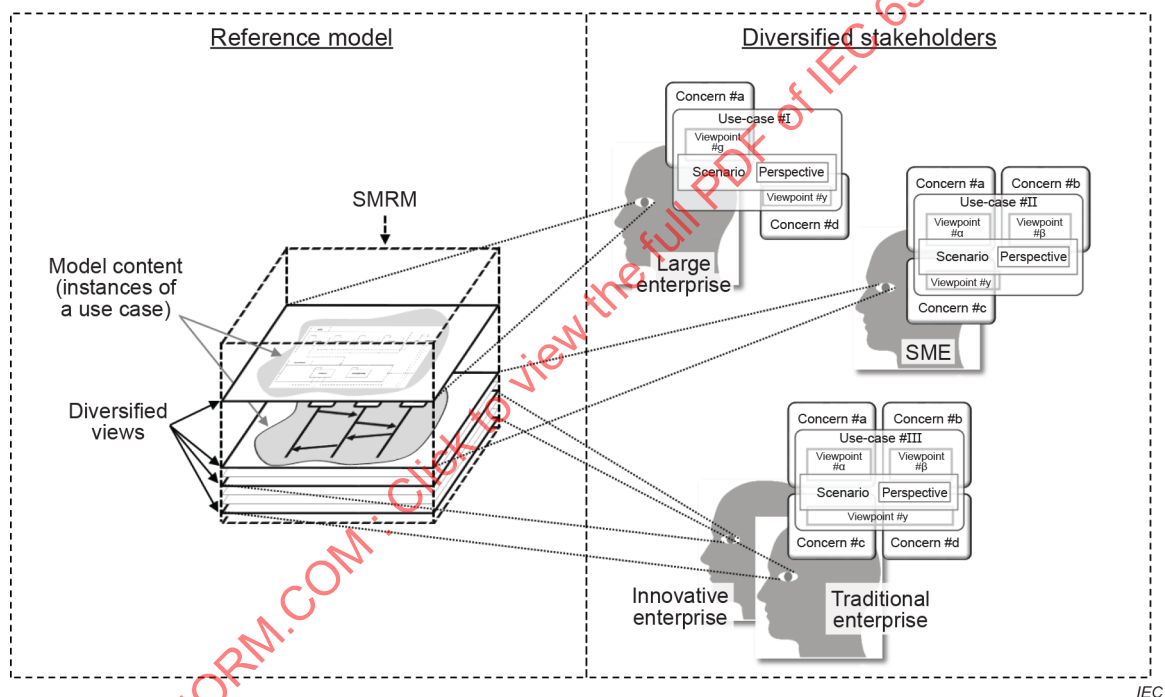


Figure 9 – Diversified smart manufacturing systems expected from different stakeholders

10 Family of reference models based upon the URMSM

10.1 A base of essential SM modelling dimensions

In the domain of manufacturing, aspects of manufacturing are intuitively aligned into three semantic dimensions where coherence among the aspects appears obvious – product, production and life cycle, hereafter referred to as the essential SM modelling dimensions. While many relationships exist between these three dimensions of manufacturing, each has coherence criteria expressible without utilizing a cross-dimension relationship.

For the product dimension, the type declaration is the result of product characteristics contained in the semantic model of the product that are independent of the means of production or the life cycle of the product. This semantic model can also include model elements shared with other dimensions, for example model elements involved during production of the product to establish a particular characteristic or model elements identifying dependencies between life cycle phases. Generally, a particular product specification can be met by several different production systems.

For the production dimension, the type declaration is the result of facility infrastructure and capabilities for manufacturing, i.e. means for conversion of raw materials into a finished goods. This infrastructure and these capabilities are contained in the semantic model of the production system that is independent of the products produced. This semantic model can also include model elements shared with other dimensions, for example model elements involved in material acquisition for specific products and product specific tooling or model elements identifying dependencies between life cycle phases. Generally, a particular production system can produce different products.

For the life cycle dimension, the type declaration is the result of precedence relationships that exist between one identified life cycle phase and its successor life cycle stage. Life cycle serves to demark a collection of activities resulting in completion of one or more objectives that enable a subsequent collection of activities to proceed to completion. Life cycle phases are identified in the semantic model of the life cycle as aspects of manufacturing. This semantic model can also include model elements shared with other dimensions, e.g. model elements of the product dimension or production dimension or by both product and production dimension.

NOTE 1 The production dimension also contains products that are the means of production. Consequently, the life cycle of the production dimension needs to accommodate the life cycle on the products that are a means of production.

NOTE 2 The semantics of the product that is the means of production, can many times be imported into the production dimension model, such as machine tool or an assembly machine.

The life cycle dimension differs from the product or production dimension in that a specific life cycle depends upon another dimension to which it applies. Product dimension life cycle dependencies are a function of the means of product development, manufacture, and use. Production dimension life cycle dependencies are a function of facility planning, construction and utilization. While the life cycle phases as applied to these two dimensions overlap, each is specified with respect to the aspects of the dimension to which it refers, that is, the semantic model of a life cycle necessarily includes modelling elements of the dimension to which it refers.

The identification of phases depends upon 1) the purpose of the SMRM as a reference for implementation, whether that is a general context or a specific context, and 2) the granularity of the phases, i.e. extent of dependency gradations, which in turn depend upon the purpose for which the context occurs and expected or realized modelling element detail.

Sometimes the demarcation of transitions from one life cycle phase to the next is established by a significant event, such as assembly line construction and testing complete, or product in warehouse ready for shipment to customer. Often activities in one phase overlap with activities in another phase because a later phase activity can begin before all of the prior phase activities are complete.

An SMRM shall include at least one of the essential SM modelling dimensions expressed as a coherent dimension of aspects. Each included dimension should have a semantic model for that dimension. The total number of dimensions included in an SMRM shall be sufficient to include the aspects of manufacturing considered necessary to satisfy the purposeful intent for application of the SMRM (see 7.2.2).

EXAMPLE Portions of product life cycle can be imbedded into or elaborate a production life cycle. Alternatively, an SMRM can include both a product and a production life cycle context expressed in separate dimensions.

10.2 Re-arranging framework dimensions

As identified in 10.1, the life cycle dimension only has meaning when associated with another dimension to which it refers. To elaborate the life cycle dimension to refer to different dimensional references, the life cycle semantic model can be specialized into distinct semantic models for each dimensional reference, for example a product life cycle semantic model and a production life cycle semantic model.

EXAMPLE The SSIF [28] has six dimensions: business, business life cycle, product, product life cycle, production and production life cycle.

An SMRM should have as many coherent dimensions as necessary to fulfil its purpose. Since the semantic models inhere in a coherent dimension, the depiction of a dimension can be altered to fit a visualization purpose without changing the underlying semantic model. This kind of re-arrangement can help focus attention to aspect interactions of most interest to a particular audience.

Since the extent of abstraction for an SMRM is relative to modelling purpose and the semantic model of aspects may contain reference to other semantic models (see Figure A.1), care is necessary when rearranging aspects in a particular dimension.

NOTE Care is necessary to not conflate the individual purpose of each semantic model when composed into a single coherent dimension or facet of many dimensions.

A further consideration regarding semantic contexts is the dynamic nature of the represented real-world situation. Semantic models are most often rendered as a static representation or point-in-time representation rather than a dynamic and ever-changing manufacturing enterprise. A chronological time dimension is one way to represent these dynamics with increments of time as aspects of manufacturing. When utilized with a time dimension, a life cycle associated with a production dimension enables examination of the life history of a production system as it produces products.

10.3 Complementary frameworks for same situation

While a many dimensional SMRM can represent a highly complicated or complex manufacturing system or manufactured product, the result can be overwhelming. An overview visualization of more than three dimensions is very difficult and even when the number of aspects is reasonably small, the size of the underlying semantic models in terms of conceptual entities and relationships is very large. Fortunately, computational techniques enable satisfactory management of a large, complicated SMRM.

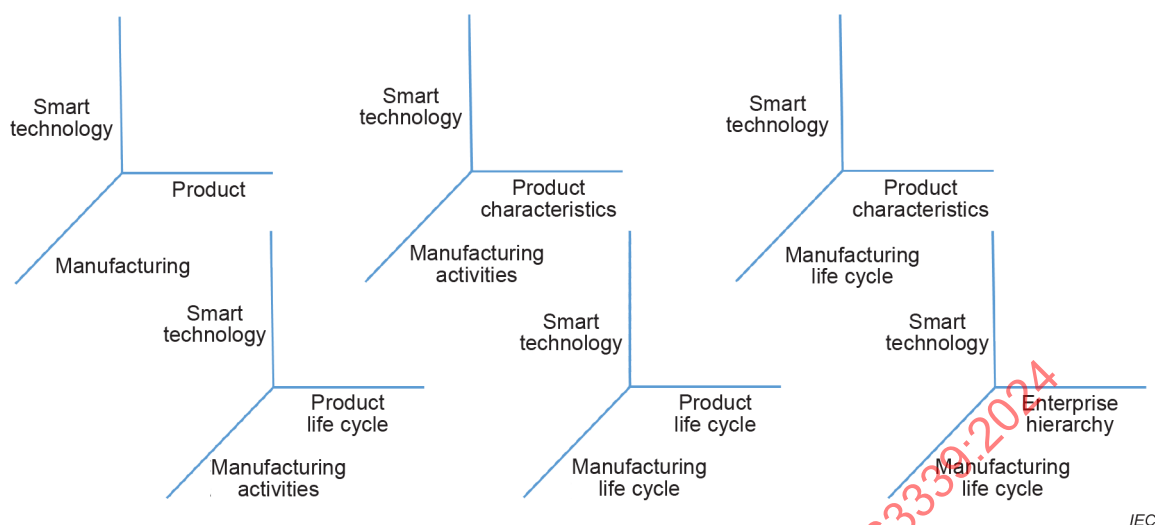
However, to effectively serve as a reference for smart manufacturing initiatives that are driven by human cognitive skills, scaling of the SMRM conceptual space to highlight and focus attention on less complicated situations is necessary. The approaches in 10.2 are available to create a set of complementary reference models that replicate portions of the larger SMRM in adaptations focusing on different sub-facets of the larger situation.

Each sub-facet extracted from a larger multi-dimensional SMRM shall include at least one coherent dimension of the parent SMRM and the semantic models associated with that collection.

The inclusion of at least two dimensions of a parent facet can preserve some known interactions between dimensions. With these two dimensions as a base, enhancement or adaptation with additional coherent dimensions and their semantic models can create a complementary reference model, which is in effect a derivative of the parent SMRM. Complementary reference models shall retain the purpose of the parent SMRM. At least two dimensions of a complementary reference model can serve as the base for other complementary reference models.

Each complementary reference model shall retain at least one dimension of the originating SMRM.

NOTE As depicted in Figure 10, the collection of an SMRM and the complementary reference models containing at least one dimension of that SMRM identify a family of reference models.



SOURCE: IEC TR 63319 [9]

Figure 10 – Basic structure for a family of SMRM with alternative 3D representations

10.4 Using multiple SMRMs to achieve purpose

An SMRM embodies a methodological approach to a smart manufacturing situation as identified by the aspects it articulates and the facets it composes from those aspects. For any particular smart manufacturing initiative, examination of several methodological approaches can expose hidden difficulties and exceptional opportunities. Even within the same broad approach, differences in articulation can limit the usefulness of an SMRM to a particular SM initiative. In addition, many SM initiatives have wide ranging impacts on business relationships, infrastructure needs, supply chain, operations and customer experiences.

An SM standards developer or SM practitioner should utilize as many distinct SMRM, or derivatives thereof, as necessary to serve as implementation references for their SM initiative. When considering which SMRM to use, an SM standards developer or SM practitioner can benefit from selection of those SMRM with semantic models that incorporate the provisions of Clause 5 enabling the assessment of aspect interactions between implementation models. Satisfactory assessment of multiple SMRM utilization depends upon the completeness of the resulting composed or integrated semantic model with respect to the manufacturing situation and alignment of that resulting semantic model with the organization's domain specific semantic model.

Annex A (informative)

Concept areas of SM

A.1 Aspects of production and products

The content of production and product aspects are the result of expressing viewpoints in models of various kinds that address stakeholder concerns and SM developer initiatives to resolve those concerns. In addition to the more traditional aspects of functionality and qualities relevant to manufacturing, the URMSM accommodates new aspects of relevance to SM. These aspects include embedded intelligence and self-correcting processes that distinguish a need to examine products and production across situations. To reach the desired features of flexibility, scalability and less engineering, some of the new intelligent process and resource capability aspects for production and products are:

- trustworthy communication, for example secure connectivity, message privacy;
- self-integrating resources, for example autonomous negotiation, situation awareness;
- change resilience, for example adaptable configuration, graceful failure recovery;
- computational efficiency, for example data stream analytics, updatable semantics;
- service composition, for example functional transparency, micro-services, on-line assembly;
- model-based development, for example stakeholder viewpoints, model views; and
- model-based operation, for example digital representation, simulation.

Manufacturing elements are represented in aspects of manufacturing as interoperable SM models that can characterize the evolution of production capability and product features over their respective life cycles.

A.2 Perspectives of production and products stakeholders

In the realm of SM, products are often thought about in the context of their production and production is often thought about in the context of products produced. This duality of the manufacturing domain can result in confusion when making decisions about SM initiatives because of the complicated relationships that exist between production and products. Further complicating the situation are the facts that some aspects of production have little to do with the produced products and some aspects of products have little to do with the way in which they are produced.

When modelling production or product systems a clear understanding of the purpose for which a particular model is being developed or used is essential. Very often the way in which stakeholders or modellers think about and represent production and product systems, i.e. their respective perspectives of the manufacturing domain, results in incoherence with respect to the combined product-production system, or is of little applicability for the intended purposeful use of a reference model.

From the user's perspective, the SMRM is a framework that provides useful information when building an SM system. Based on that information, an SMRM provides values that allow efficient system construction and effective system operation. Specifically, SMRM provides the following values:

- since the system is built as a subsystem that connects to existing systems in the world, SMRM provides information regarding interoperability;
- SMRM provides information on KPIs and KGIs associated with the system to be built;

- SMRM provides information on functional and non-functional requirements regarding SM technologies for incorporation into the system.

A URMSM conforming SMRM can improve the return on investment of the built system by appropriately providing the information value as concrete contents, such as terminology, interfaces, protocols, data models, and use cases.

An SM initiative can cover a wide range of manufacturing domain aspects, such as the life cycle of products and manufacturing equipment, the structure of the SM system, the capabilities and education of people and organizations. Therefore, the structure of URMSM conforming SMRM is not in a simple list format or orthogonal graph that people can intuitively understand, but a multi-dimensional arrangement of collections of aspects that suits each of various purposes. In fact, many SMRM exist for various purposes in the world, and it is necessary to identify the URMSM as the common requirements and recommendations that can add the concrete information value characterized above to these current and future SMRM.

A.3 Lifecycle considerations

For most SM situations, aspects and perspectives of production and products unfold with regular life cycle patterns. Each aspect, both of production and products, and each perspective, both stakeholder and analytical, have distinct life cycle patterns. While these patterns are distinct, they are also highly intertwined.

NOTE The aspects detailed at different life cycle phases (concept, design, operation, etc.) and perspectives (designer, builder, operator, etc.) will determine the details of the models.

In addition, various business cycles, particular asset life cycles, and external economic and social cycles can influence the success or failure of SM initiatives. The structure of the URMSM accommodates a wide variety of life cycle considerations.

Life cycle considerations include segmentation of life history by dependencies rather than time of occurrence that results in multiple iterations of overlapping life cycles for aspects and perspectives of production and product interactions.

A.4 Modelling of products and production using semantic models

The utility of models in the context of SM lies in their capability to convey meaning and insight for the elements of production and products they represent. Standardized semantic methodologies are critical enablers for establishing common understanding of shared data or information digital representations from collaboration across contexts and domains. Information has a contextual relationship since information is derived from observation of a phenomenon in a certain context. The relationships between SM concept, context and concept model are outlined in Figure A.1 where the SM concepts are described in terms of a three-part inclusive conceptual model. Any SM concept, for example an event, is related to an SM context, where it may happen, that has a concept model, for example an ontology of the event, which in turn describes the SM concept. Care is necessary to clearly define these three parts of the conceptual model in a manner that accommodates analytic and synthesizing tools (see Annex E).

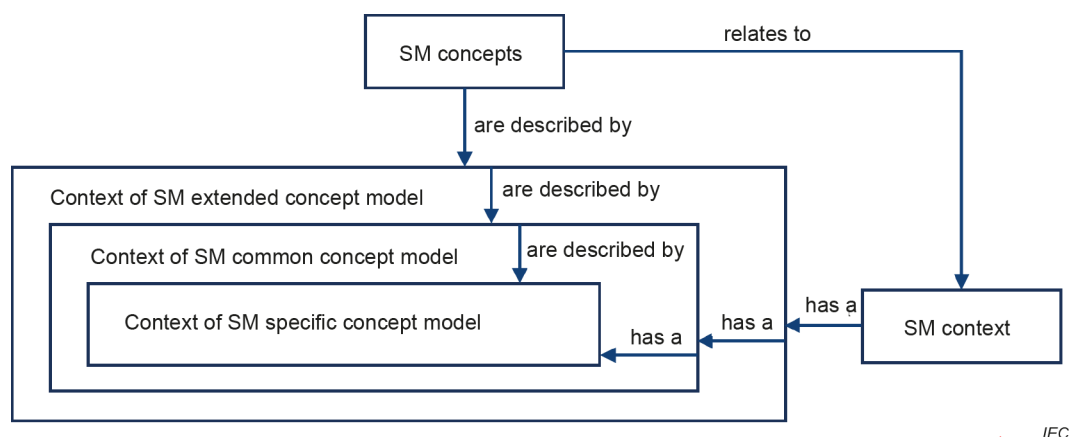


Figure A.1 – SM contextual relationships

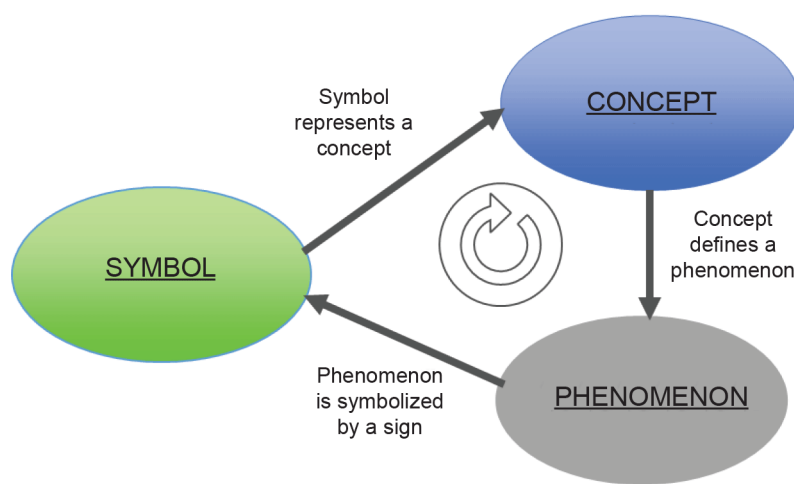
The use of semantic models as referred to by URMSM has three related extents of application contexts:

- SM specific semantics defined within an industrial sector or enterprise;
- SM common semantics shared across different SM contexts;
- SM external semantics defined outside SM but with a benefit from an SM unified understanding of these concepts.

When creating semantic models, the conveyance of meaning depends upon the application of the principles of semiotics. The field of semiotics arose over 100 years ago with the realization that conveyance of meaning required three essential relationships among three essential elements: a sign or symbol to signify something, the object or thing to which the signification applies, and the contextual interpretation of the object or thing as signified [65]. While originally intended for use in a simple context, over time these elements have come to be more complicated and now even complex situations are cast in this way.

The use of semantic models for SM can be considered using the conceptualizations defined by a semiotic triangle, shown in Figure A.2, with the three semiotic corners of

- concept that provides semantic artefacts stated in a formal manner,
- symbol that provides ontological symbols in a descriptive manner, for example standards, and
- phenomenon that provides 'a meaningful physical or informational representation' of symbols and concepts, a technical thing.



NOTE The nodes and arcs of this figure are given different labels by various authors over the past 100 years: Peirce used sign, object, interpretant [65], Ogden and Richards used symbol, referent, reference [45], de Meer uses symbol, concept, thing [36].

**Figure A.2 – Semiotic Triangle with 3 semiotic domains and 3 morphisms
(relations between pairs of semiotic domain artefacts)**

Morphisms map artefacts among the three semiotic coloured corners, which is ontological artefacts (symbol) map onto concept artefacts (concept) that map onto technical artefacts (phenomenon) that map onto descriptive ontological artefacts (symbol) and so on. By the cyclic application, as depicted in Figure A.1 and Figure A.2, of the semiotic triangle, the relationships are adapted to the intensional semantics and thus made more mature. Semantics that define behaviour or activities outside SM can comprise various sets of artefacts for the purpose of defining a "Top Level Concept Model", a "Natural Aspect Concept Model", or "Common Modelling Elements" to aid in creation of new models (see Annex E).

While syntactic modelling elements are not part of the semantics, they can be introduced into symbols of the Semiotic Triangle where syntactic elements such as formats and grammatical expressions are applicable.

A.5 Semantic models

Based upon the principles of semiotics, a wide variety of semantic models can be useful for articulating the elements of products and production. Models, as representative artefacts, need to clearly indicate the signification elements as symbols or signs and for each such element provide the corresponding phenomenological object or process signified and the appropriate concepts associated with that phenomenon in the context of its identification. Meaning becomes clear when each element and the relationships between them are expressed fully. Most of the expression of the phenomenon, or its related concept give rise to additional symbols, phenomenon or concepts. The iteration of symbols, phenomenon and concepts result in a semantic model.

EXAMPLE 1 As shown in Figure A.3, product catalogues, based on product standards, provide common characteristics and properties that individual manufacturers use to describe product features. The explicit feature statements enable comparison of product features to meet the manufacturing applications requirements (see Figure 8). The product standards provide semantic models of the products, including specific terms and definitions, which are used in product catalogues. The product standards provide the information, while the product catalogue is the context for use of that information. The IEC 61360 [1] framework and the ISO 22745 [23] framework provide methods to describe product catalogues.

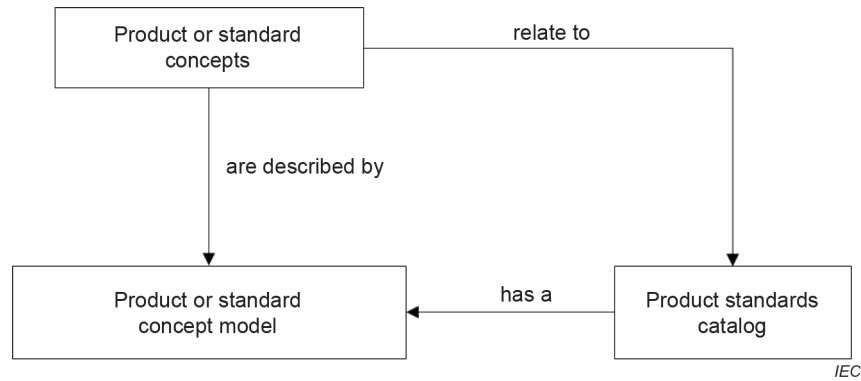


Figure A.3 – Product standards catalogue concept model

EXAMPLE 2 ISO/IEC TR 63306-1 [8] provides a selection of standards using a selection matrix where a row and column matrix with definitions of the headings enables a comparison of features and uses of the standards.

NOTE Annex G provides a more extensive illustrative example.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63339:2024

Annex B (informative)

Formal Foundation for URMSM

B.1 Modelling framework for URMSM

B.1.1 Formalism caveat

This Annex B is an overview of the formalization of a modelling framework rather than an exhaustive treatise of that formalization [52] [40] [49]. No claim is made regarding the rigor or robustness of the formalism and several simplifying assumptions are present. Among them is the assumption that some kind of semantic model, or perhaps a collection of semantic models, either exist or is under development with respect to smart manufacturing and that those semantic models are relevant to the purpose of URMSM.

The URMSM provides ways to arrange or examine the semantic model(s) from the perspective of a particular modelling purpose. The semantic model needs to include consideration of the manufacturing elements of each aspect of manufacturing that is important to the purpose of the modelling activity as expressed by the stakeholder concerns relative to that purpose [50]. Without an appropriate semantic model, the URMSM has little utility beyond a pictorial representation of some idealized manufacturing entity and it becomes simply a box occupied with ideas that are or are not linked in meaningful ways.

The notion of dimensionality as a means for better understanding complex situations was articulated formally by Fritz Zwicky [60] and has since gained wide use across many disciplines and domains of practice. The essential analytical need is to separate a problem or opportunity space in meaningful ways so that elemental interactions can be parsed and examined. Arthur Hall [38] identified several ways in which the use of particular dimensions, i.e. time segmented by milestones, problem solving procedure segmented by procedural steps, and facts that define a discipline, profession, or technology, provide useful insight for system engineers. Warfield [58] provides a formal mathematical definition of dimensionality to segment the various design options toward a solution. Each of these conceptualizations of dimensionality is present in the examples found in IEC TR 63319 [9].

Each of these authors, and many more since, stress a fundamental principle of dimensionality in modelling [60] [38] [58] is the dual criteria of dependency among elements of a modelling dimension, hereafter simply referred to as dimension, and independence between dimensions for pairwise considerations during analysis and synthesis. In this sense, a dimension is an independent variable within a problem space. The dimension is composed of dependent elements – the question being "dependent with respect to what".

NOTE 1 Because the dimensions involve the same entity problem space they cannot be strictly independent but they can be 'independent enough', i.e. of sufficient distinction, for the purpose of the modelling effort.

The simple answer is shared participation in a particular type declaration that characterizes the members of the dimension where a similarity relation identifies the characteristics that inhere in that type. A more complicated answer results when 'type' is thought about as an abstraction involving not only static properties but dynamic properties as well.

B.1.2 Modelling framework formalism

The formal foundation for URMSM is a modelling framework that enables examination of the interactions among elements within a smart manufacturing enterprise. The modelling framework is a four-tuple $\mathcal{F} = \langle \mathcal{Q}, \mathcal{D}, \mathcal{C}, \mathcal{S} \rangle$.

where:

- $\mathcal{A}$ are aspects within a smart manufacturing (SM) domain,
- $\mathcal{D}$ are dimensions of a modelling framework useful for understanding the interactions within that SM domain,
- $\mathcal{C}$ is a coherence function that partitions the aspects among those modelling dimensions,
- $\mathfrak{S}$ is a semantic model that incorporates the aspects as elements of that SM domain.

The coherence function $\mathcal{C}$ maps the aspects of $\mathcal{A}$, which result from model views and model view compositions within the domain of smart manufacturing, into modelling dimensions of $\mathcal{D}$ for which an underlying semantic model, designated as $\mathfrak{S}$, exists or is expected to exist.

Each member of the tuple is a collection of more refined concepts that characterize the model-based representation of a smart manufacturing configuration. Most importantly, members of $\mathfrak{S}$ can themselves be recursively refined as modelling frameworks and in particular, aspects are often themselves models of various kinds residing as portions of $\mathfrak{S}$.

NOTE 1 This presentation of the foundation for a modelling framework does not include information about the manner in which aspect specifications are developed or specific content of aspects.

The mapping of aspects onto modelling dimensions is stated as $\mathcal{C}: \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{D}$.

More particularly,

$$\forall a_i \in \mathcal{A}, d_j \in \mathcal{D} \exists c_j \in \mathcal{C}: a_i \rightarrow d_j \vee \text{nil} \quad (\text{B.1})$$

where

- $\mathcal{A}$ is the collection of all aspects identified with respect to an SM domain, individual aspects being designated $a_1, a_2, \dots, a_n$,
- $\mathcal{D}$ is the collection of useful modelling dimensions identified by stakeholders, including architects and other designers, with respect to that domain and modelling purpose, individual modelling dimensions designated $d_1, d_2, \dots, d_k$,
- $\mathcal{C}$ is the mapping function for coherence expressed as the collection of selection criteria that partitions the members of $\mathcal{A}$ into the modelling dimensions of $\mathcal{D}$ with a sub-function within $\mathcal{C}$, designated $c_1, c_2, \dots, c_k$, corresponding to a coherence criteria for each modelling dimension in $\mathcal{D}$,
- a_i is an individual aspect,
- d_j is an individual modelling dimension,
- c_j is the coherence criteria for each modelling dimension.

Notice that an aspect is not assigned to any modelling dimension when that aspect is not relevant to the modelling purpose of the particular framework. Observe the assumptions that

- all aspects are identifiable with no specified range,
- stakeholders can identify useful modelling dimensions, and
- a mapping function for coherence is available to partition aspects into dimensions.

Also, $\mathcal{D}$ and $\mathcal{C}$ share the same indexes, i.e. for all d_j there exists a c_j . However, each c can itself be a collection of sub-functions, i.e. a composition of coherence criterion for a modelling dimension.

EXAMPLE 1 One possible selection criterion can be $a_i \rightarrow d_j, a_f \rightarrow d_g, d_j \neq d_g \Rightarrow a_i \neq a_f$, which enforces a strict separation of aspects into dimensions [58] [59].

NOTE 2 In some situations, e.g. examining the intersection of dimensions from different modelling paradigms, it can be useful to relax this latter constraint with the mapping restated as $\mathcal{A} \in \mathcal{D}$ to allow one aspect to appear in more than one dimension.

The coherence criteria of $\mathcal{C}$ are not included in the semantic model $\mathcal{S}$ because they are associated only with the modelling purpose rather than the smart manufacturing situation being modelled. This distinction between the way in which the framework dimensions are formed and the way in which an entity is semantically modelled is critical to the effective use of a modelling framework. Confusing or substituting the conceptualization of structural aspects embodied in framework dimensions with the reality of relationships embedded in the entity of interest can lead to erroneous assumptions about cause and effect. The way a thing is viewed can change the observer's perception of that thing but does not change that thing.

The relationships within the semantic model are designated $r^{s_1}, \dots, r^{s_m}$ with the same r^{s_i} appearing in multiple s_k semantic model partitions where the same portion of a semantic model appear in more than one modelling dimension, i.e. $\exists s_i \in \mathcal{S} \mid s_i \in d_i \wedge s_i \in d_j \wedge d_i \neq d_j$. Likewise, elements related to aspects can appear in more than one specific semantic model partition.

Given a domain with the following set of aspects: $\mathcal{A} = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$, collection of mapping coherence criteria functions: $\mathcal{C} = \{c_1, c_2, c_3\}$, set of modelling dimensions: $\mathcal{D} = \{d_1, d_2, d_3\}$, and a semantic model set: $\mathcal{S} = \{s_1, s_2, s_3\}$ with semantic relationships among aspects $r^{s_1}, \dots, r^{s_{12}}$ then, for the purpose of illustrating the variety of possible situations, Table B.1 presents a morphologic structure with different aspects, dimensions and semantic model relationships.

Be aware that a subtle shift in denotation with respect to aspect semantic models occurs from this point onward to simplify relationship and modelling element notation, i.e. the notation $r^{s_1}(a_1, a_2)$ indicates that relation r^{s_1} exists between one or more modelling elements of a_1 and one or more modelling elements of a_2 . Also, the same relationship, e.g. "is part of", can exist between different pairs of modelling elements as with r^{s_9} that appears twice in Table B.1.

The partitioning of the members of $\mathcal{A}$ into the elements of $\mathcal{D}$ also partitions the elements of $\mathcal{S}$, designated $s_1, \dots, s_k$, that involve the partitioned members of $\mathcal{A}$.

$$\forall a_i, d_j, s_j \exists c_j: a_i \rightarrow d_j \wedge a_i \rightarrow s_j \quad (\text{B.2})$$

where

a_i is an individual aspect,

d_j is an individual modelling dimension,

s_j is the semantic model for the j^{th} modelling dimension,

c_j is the coherence criteria for the j^{th} modelling dimension.

Importantly, some portions of aspects, e.g. a manufacturing element in a model of the aspect, which lack relevance to the modelling purpose for which the dimension is utilized, can appear in s_j but not in an a_i placed into d_j because those aspect portions are involved in a relationship to other aspects that do appear in d_j . Such "outlying" elements can be significant sources of disruptive effects.

While the partitioning of $\mathcal{D}$ by $\mathcal{C}$ results from modelling purpose, knowledge of $\mathcal{S}$ is critical to deriving a $\mathcal{C}$ that meets that modelling purpose. To successfully achieve the modelling purpose, the partitioning of $\mathcal{C}$ into $\mathcal{D}$ has several distinct kinds of properties to consider:

- a) Is $\mathcal{D}$ or a particular modelling dimension $\mathbf{d}_j$ within $\mathcal{D}$ bounded or unbounded?

EXAMPLE 2 The domain of RAMI4.0 is "the aspects of a smart manufacturing system asset".

- b) If bounded, is the modelling dimension $\mathbf{d}_j$ flexible in assignment of aspects or of fixed aspects?

EXAMPLE 3 All three modelling dimensions of RAMI4.0 are fixed, although the concept of "Asset Administration Shell" enables more flexibility in implementation [6].

- c) Can the coherence criteria be formally stated or is the rationale for the assignment too complicated for formal definition?

EXAMPLE 4 The coherence criteria forming the dimensions of RAMI4.0 are complicated, being drawn from a variety of sources. (See item e) and f) below.)

- d) Is every modelling dimension $\mathbf{d}_j$ functionally independent from every other modelling dimension in $\mathcal{D}$?

EXAMPLE 5 While all products have a life cycle, the dimension of a product specification, i.e. the features and attributes of the product, is functionally independent from the life cycle dimension specifying the activity groupings related to that product.

NOTE 3 Functional independence of individual dimensions does not preclude a co-dependency relationship when a collection of dimensions create a dependency for another dimension.

- e) Does a coherence criterion impose a necessary ordering on the aspects within the modelling dimension, e.g. $\mathbf{a}_i < \mathbf{a}_f$ or $\mathbf{a}_i < \mathbf{a}_f$.

EXAMPLE 6 The Hierarchy Levels dimension of RAMI4.0 has the following sub-criteria; if $\mathbf{a}_i$ is an identifiable logical or physical entity with respect to the asset's life cycle and $\mathbf{a}_{i+1}$ is within the *scope* of $\mathbf{a}_i$, and $\mathbf{a}_i \in \mathbf{d}_j$, then $\mathbf{a}_{i+1} \in \mathbf{d}_j$, and $\mathbf{a}_i < \mathbf{a}_{i+1}$ resulting in the following scaled dimension: Hierarchy Level {Connected World, Enterprise, Work Centres, Station, Control Device, Product} and further, Product $\models$ Control Device $\models$ Station $\models$ Work Centres $\models$ Enterprise $\models$ Connected World.

NOTE 4 Any necessary ordering is a reflection of relationships in the semantic model of the entity.

- f) What body of knowledge exists that can be cited to justify the coherence criteria by which the aspects are assigned to the dimension?

EXAMPLE 7 The Hierarchy Levels dimension of RAMI4.0 is based on the reference architecture model for a factory along the lines of IEC 62264-1 [3] and IEC 61512-1 [2], the standards for integrating enterprise IT and control systems with Industrie 4.0 enhancements and further explained in IEC PAS 63088 [6].

B.1.3 Using a URMSM framework

In a general sense, modelling frameworks enable examination of impacts that changes in aspects have on the modelled system. These impacts can be with respect to aspects within a modelling dimension, across dimensions where aspects intersect as a result of modelling purpose, or in regions around intersecting aspects. The examination can be analytical with respect to an existing modelled system or constructive for an emerging system.

Having partitioned the aspects of a domain into the dimensions of a modelling framework, the interactions within and among the aspects using several approaches is possible. Every approach relies upon the completeness and quality of the underlying semantic model with respect to the purpose of the modelling framework [50]. A system's semantic model is often fragmented and lacks comprehensible integration, which complicates the use of a modelling framework intended to represent an entire system, and the purpose of the modelling framework needs to recognize deficiencies in the semantic model when developing a specific modelling framework.

Direct interaction occurs within a modelling dimension, as identified in the relevant semantic model portion identified in logical expression (2). Since these intersections occur because of the assignment of aspects to dimensions, they represent known or anticipated interactions related to the modelling purpose rather than interactions among aspects of the underlying system elements as specified in the semantic model. However, the interactions assumed by the partitioning for a modelling purpose are usually present in the semantic model as well.

Additional aspect direct interactions occur as a result of placing the functionally independent modelling dimensions into orthogonal configurations such that they form a grid indexed by aspects from the respective dimensions (see Table B.3). This approach to interactions of aspects is known as morphological modelling [60], which has seen application in the field of system engineering to examine the consequences of different physical and logical configurations of components [35] and in social systems to study problems in policy analysis [46].

Indirect interactions or modelling region interactions are the consequence of direct interactions with respect to the modelling purpose and semantic model. While direct interactions occur with the intersection of aspects from different dimensions, indirect interactions occur between an aspect involved in a direct interaction and a neighbouring aspect in the same modelling dimension. These indirect or regional interactions result from the specific modelling purpose for which the modelling framework is created. In addition to the relationships among intersecting aspects, the semantic model can identify other relationships among aspects across dimensions that are not in the direct interaction. (See Table B.4)

EXAMPLE 1 If one dimension has 5 aspects represented and another dimension has 6 aspects represented, then the grid formed by placing those dimensions into an orthogonal configuration has 5 times 6 = 30 intersections of aspects.

NOTE 1 While a grid is one way of visualizing the orthogonal configuration, other visual representations of the functionally independent dimensions are possible.

The totality of these direct and indirect interactions enables analytic examination of the impact resulting from configuration and material changes. Knowledge of these interactions enable synthetic introduction of new technologies, materials and methods. Enabling the understanding of these many impacts of change is the purpose behind the URMSM as a reference model for generating more specific modelling frameworks for analysis and synthesis in the domain of smart manufacturing.

More formally, the modelling framework $\mathcal{M}$ has an associated semantic model $\mathcal{S}$, with distinct dimension semantic models designated $s_1 \dots s_k$ such that the aspects found in d_j are also found in s_j , (see logical expression (2)), i.e. the aspects appearing in the dimension also appear in the semantic model associated with that dimension as at least a minimal dimension semantic model with semantic relationships suggested by the coherence criteria governing the mapping of aspects to the dimension. (Below these criteria derived relationships are labelled r').

In addition, each s_i can contain many other meaningful relationships among elements of the SM domain and indeed since each s_i can be an entire model, very complicated relationship networks are possible.

The utility of URMSM is exploitation for analysis and synthesis of these semantic relationships between aspects in a dimension and most significantly between portions of the semantic model in relation to intersecting aspects.

NOTE 2 In the normative text of this document, the term "facet" is used to designate a structure composed of functionally independent modelling dimensions into orthogonal configurations.

EXAMPLE 2 SSIF [28] has 4 distinct semantic models for its six (6) specified dimensions with one semantic model applicable for 3 of the 6 dimensions.

B.1.4 Semantic models of dimensions composed of aspects

Given a domain with the following set of aspects: $\mathcal{A} = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$, collection of mapping coherence criteria functions: $\mathcal{C} = \{c_1, c_2, c_3\}$, set of modelling dimensions: $\mathcal{D} = \{d_1, d_2, d_3\}$, and a semantic model set: $\mathcal{S} = \{s_1, s_2, s_3\}$ with semantic relationships among aspects $r^s_1, \dots, r^s_{12}$ then, for the purpose of illustrating the variety of possible situations, the following morphologic structure can exist (notice that r^s_9 appears twice):

Table B.1 – Semantic model scenario

Modelling dimension	Semantic model of aspects
$c_1 = a_i < a_{i+1}$ $d_1 = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$	$r'_1 = a_1 < a_2 < a_3 < a_4$ $s_1 = \{r^s_1(a_1, a_2), r^s_2(a_1, a_4), r^s_3(a_2, a_3), r^s_4(a_2, a_4), r^s_5(a_4, a_3)\}$
$c_2 = a_i < a_{i+1}$ $d_2 = \{a_5, a_6, a_7, a_8, a_9\}$	$r'_2 = a_5 < a_6 < a_7 < a_8 < a_9$ $s_2 = \{r^s_6(a_5, a_6), r^s_7(a_5, a_9), r^s_8(a_6, a_7), r^s_9(a_7, a_8)\}$
$c_3 = a_i < a_{i+1}$ $d_3 = \{a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$	$r'_3 = a_{10} < a_{11} < a_{12} < a_{13}$ $s_3 = \{r^s_{10}(a_{10}, a_{11}), r^s_{11}(a_{11}, a_{12}), r^s_{12}(a_{10}, a_{12}), r^s_9(a_{12}, a_{13})\}$

The coherence criteria set $\mathcal{C}$ induces three distinct dimensional axes as depicted in Figure B.1 and Figure B.2:

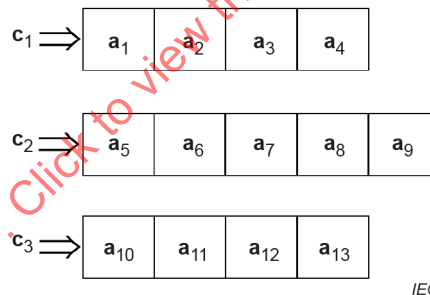


Figure B.1 – Semantic model scenario dimensions

The semantic model, as presented in Table B.1, is represented as an N-squared diagram in Table B.2:

Table B.2 – Semantic model scenario as N-squared diagram

	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉	a ₁₀	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃
a ₁	I	r ^s ₁		r ^s ₂									
a ₂		I	r ^s ₃	r ^s ₄									
a ₃			I										
a ₄			r ^s ₅	I									
a ₅					I	r ^s ₆			r ^s ₇				
a ₆						I	r ^s ₈						
a ₇							I	r ^s ₉					
a ₈								I					
a ₉									I				
a ₁₀										I	r ^s ₁₀	r ^s ₁₂	
a ₁₁											I	r ^s ₁₁	
a ₁₂												I	r ^s ₉
a ₁₃													I

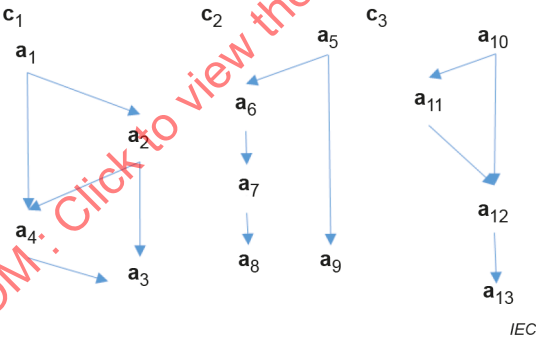


Figure B.2 – Semantic model scenario as relationship graph

Table B.3 identifies the direct intersections of aspects possible for the semantic model scenario of Table B.1.

Table B.3 – Semantic model scenario Direct Intersections

a_1, a_5, a_{10}	a_1, a_5, a_{11}	a_1, a_5, a_{12}	a_1, a_5, a_{13}
a_1, a_6, a_{10}	a_1, a_6, a_{11}	a_1, a_6, a_{12}	a_1, a_6, a_{13}
a_1, a_7, a_{10}	a_1, a_7, a_{11}	a_1, a_7, a_{12}	a_1, a_7, a_{13}
a_1, a_8, a_{10}	a_1, a_8, a_{11}	a_1, a_8, a_{12}	a_1, a_8, a_{13}
a_2, a_8, a_{10}	a_2, a_8, a_{11}	a_2, a_8, a_{12}	a_2, a_8, a_{13}
a_3, a_5, a_{10}	a_3, a_5, a_{11}	a_3, a_5, a_{12}	a_3, a_5, a_{13}
a_3, a_7, a_{10}	a_3, a_7, a_{11}	a_3, a_7, a_{12}	a_3, a_7, a_{13}
a_3, a_9, a_{10}	a_3, a_9, a_{11}	a_3, a_9, a_{12}	a_3, a_9, a_{13}
a_4, a_6, a_{10}	a_4, a_6, a_{11}	a_4, a_6, a_{12}	a_4, a_6, a_{13}
a_4, a_7, a_{10}	a_4, a_7, a_{11}	a_4, a_7, a_{12}	a_4, a_7, a_{13}
a_4, a_8, a_{10}	a_4, a_8, a_{11}	a_4, a_8, a_{12}	a_4, a_8, a_{13}
a_4, a_9, a_{10}	a_4, a_9, a_{11}	a_4, a_9, a_{12}	a_4, a_9, a_{13}

Given a direct interaction of (a_4, a_7, a_{12}) , Table B.4 gives the possible indirect interactions to review.

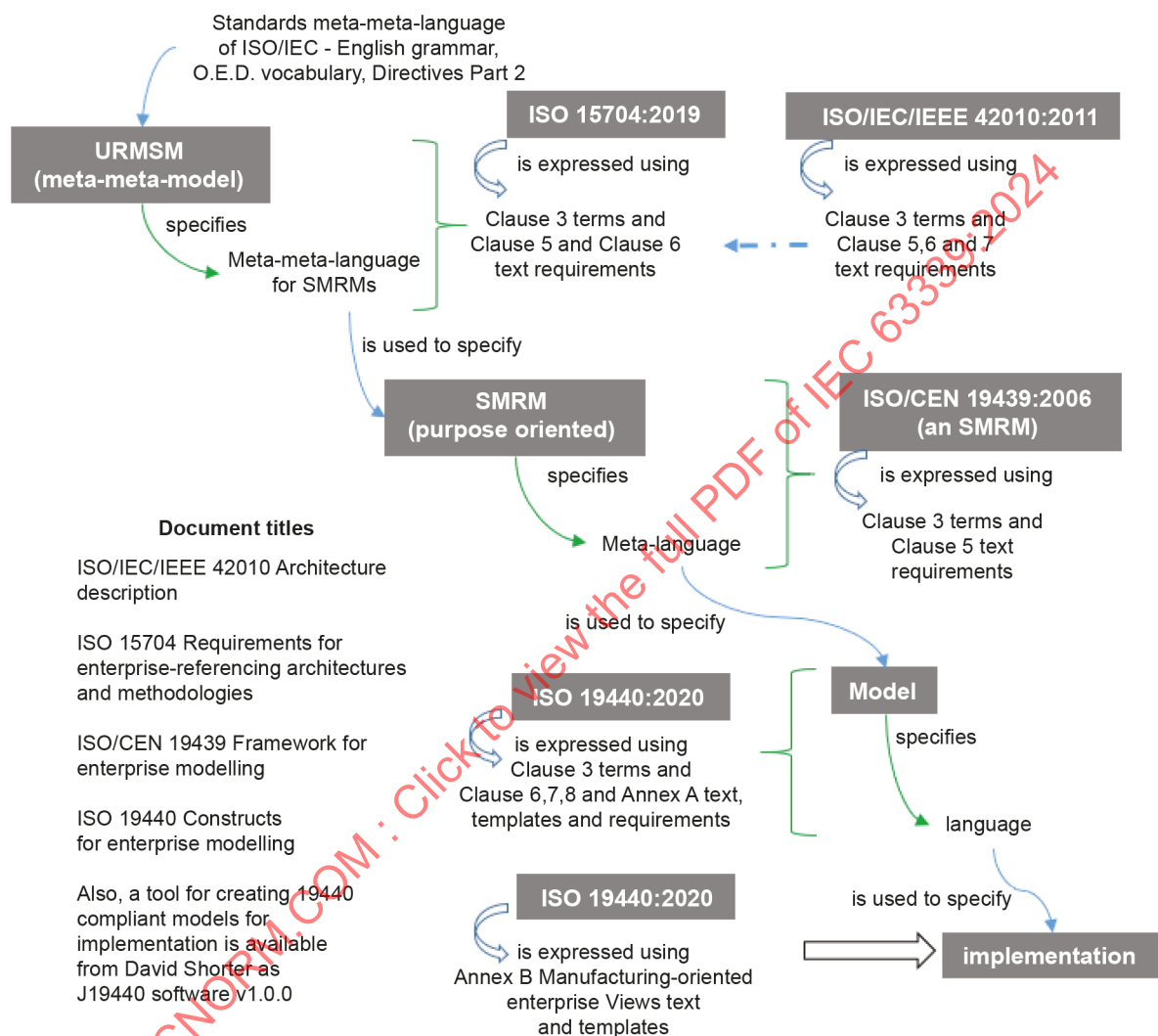
Table B.4 – Semantic model scenario Indirect Interactions

Extent of indirection	Direct aspect	Semantic relationship	Indirect aspect	Semantic relationship	Indirect aspect	Semantic relationship	Indirect aspect
1	a_4	r^s_2	a_1				
2			a_1	r^s_1	a_2		
1	a_4	r^s_4	a_2				
2			a_2	r^s_3	a_3		
1	a_4	r^s_5	a_3				
2			a_3	r^s_3	a_2		
1	a_7	r^s_8	a_6				
2			a_6	r^s_6	a_5		
3					a_5	r^s_7	a_9
1	a_7	r^s_9	a_8				
1	a_{12}	r^s_{12}	a_{10}				
2			a_{10}	r^s_{10}	a_{11}		
1	a_{12}	r^s_{11}	a_{11}				
1	a_{12}	r^s_9	a_{13}				

Annex C (informative)

Positioning URMSM among reference models

C.1 Positioning URMSM among reference models



IEC

Figure C.1 – Example of cascading reference models

Figure C.1 depicts the relationships among existing standards that form an abstraction stack from more abstract down to less abstract modelling paradigms, and finally to an implementation. Each standard has a specific place within the stack and provides concepts and constructs used to add detail as the stack becomes a closer description of the actual implementation.

Annex D (informative)

Meta-model for reference model analysis

D.1 Meta-model analysis

NOTE With minor modification to fit the context of this document, the text and graphic of this Annex D are extracts from IEC TR 63319 [9].

The analysis of several SMRMs in IEC TR 63319 [9] found that common and essential features exist in both graphical form and textual content. To provide a basis for modelling these features in a consistent manner even though they use different representational styles, i.e. structural arrangements and terminology, a conceptual model can represent these features uniformly with an abstract language applicable for expressing the common concepts and relationships of various individual SMRMs. URMSM, as specified in this document, provides the vocabulary, requirements, recommendations and possibilities for applying the IEC TR 63319 [9] conceptual model elements in a unifying manner to produce SMRMs appropriate for analysis and synthesis of smart manufacturing systems of many different kinds.

D.2 Using a meta-model

D.2.1 General

The intent of the meta-model is to provide a meta-language for representing concepts and relationships to be used by standards developers as they identify and document an SMRM. The meta-model specified here is an abstraction of the concepts and relationships evident in the contributions for SMRMs. Because the meta-model needs to be useful for discussing this wide range of models, the meta-model is rather abstract and imprecise, sometimes stretching the conventional word meaning to extend coverage for different situations.

D.2.2 Assumptions, constraints and guidance

D.2.2.1 Assumptions

The following assumptions result from discussions and a need for a concise way to characterize aspects of SM.

- 1) Contributions provided by experts representing national standards bodies form the basis for the meta-model.

NOTE 1 This assumption also includes a very general notion of model, which can be formally defined or informally conceived.

- 2) The specificity of the meta-model is constrained by the need of the unifying SMRM to allow for the wide variety of content types in the SMRMs.

NOTE 2 Since a reference model will likely be specialized for a domain or purpose, flexibility in content is essential. The number of aspects expected for SM is very large, approaching uncountable.

- 3) Model coherence with intended purpose requires an expressed commonality among constituent modelling elements and alignment to purpose.

NOTE 3 To efficiently examine and represent different collections of SM aspects, each collection needs to be coherent, i.e. each collection has at least one expressed feature common to each of its constituents, which binds them into a meaningful collection.

- 4) Collection of information elements does not imply ordering of information elements.

NOTE 4 Placing aspects into a collection based upon some common features does not necessarily impart an ordering of those aspects within that collection. As a practical matter, most collections of the submitted SMRMs do have at least a partial ordering of constituents for at least one common feature, but many collections have partial ordering for several common features.

- 5) The meta-model consists of language concept specifications (as detailed in D.2.3.2) and propositions relating those concepts to each other (as detailed in Figure D.1).

NOTE 5 While the formal meta-model is a textual expression of concept specifications and the propositions among them, a visualization is possible using a variety of drawing tools. However, the visualization can fail to capture the particulars of the meta-model, i.e. text is still necessary to explain some consequences of the meta-model representation.

D.2.2.2 Constraints

The following constraints result from discussions and a need for a concise way to characterize aspects of SM.

- 1) Meta-language concept terms and relationship labels are used consistently.
- 2) Expressed concepts and relationships do not conflict with the contributions for SMRMs.

D.2.2.3 Guidance

The following guidance results from discussions and a desire to link the meta-model to established practice.

- 1) Develop the meta-model using guidance from ISO/IEC/IEEE 42010, *Architecture description* and ISO 15704, *Requirements for enterprise-referencing architectures and methodologies*.
- 2) Introduce new terms, not used by contributions for SMRMs, for critical concepts.
- 3) Keep the "picture" relatively simple, e.g. ignore relationship cardinality, and use short labels while using a limited number of concepts and relationships.

D.2.3 Concepts

D.2.3.1 General

Concepts and their relationships are the primary items abstracted from the contributions for SMRMs as they pertain to the meta-model based upon the guidance.

The meta-language concept terms, as symbols, are starred and italicized. The meta-model concepts are modelling elements used in the meta-language that is the meta-model.

D.2.3.2 Concepts of the meta-model

D.2.3.2.1 **Smart_Manufacturing_domain*

The **Smart_Manufacturing_domain* consists of those entities and processes that are the subject of this document.

D.2.3.2.2 **stakeholder*

A **stakeholder* is either a developer of a reference model, i.e. **stakeholder* (standards developer), or a user of a reference model to craft their own particular SM model, i.e. a **stakeholder* (SM practitioner). One individual can have **stakeholder* roles as standards developer and SM practitioner.

D.2.3.2.3 **perspective*

A **perspective* is the orientation of a **stakeholder* within an SM domain, where each **stakeholder* or group of **stakeholders* has its own **perspective* arising from their knowledge, expertise, responsibility, authority and accountability relative to an SM effort. Since the meta-model distinguishes two groups of **stakeholder*, two different primary **perspectives* occur because of the different orientations. The **perspective* (SM practitioner) is the origin of one or more **use_case*, the purpose of which is to explain a specific collection of **concern* (practitioner) relative to SM, and the **perspective* (standards developer), as the holder of the modelling expertise, is the origin of one or more **viewpoints*.

D.2.3.2.4 **use_case*

A **use_case* is a specification of **stakeholder* (SM practitioner) needs based upon an SM scenario, which identifies a situation, relevant concerns regarding that situation, and desired outcomes.

NOTE Since an **aspect* is an expression of a **viewpoint* and a **viewpoint* is an expression of a **use_case*, a **use_case* is conceptually a basis for an SM **aspect*.

D.2.3.2.5 **concern*

A **concern* is a subject that results from a **perspective* or **use_case*. Since the meta-model distinguishes two different **perspectives*, there are two corresponding sets of **concerns*. The **concern* (standards developer) generally relates to the means and methods for specifying a coherent **viewpoint* that captures all relevant **concerns* for assuring that a well-known set of **concerns* within the relevant domain are included. The **concern* (SM practitioner) generally relates to more domain specific and purpose specific information, methods, and expectations for modelling outcomes, often where a **use_case* provides an explanation of a group of associated **concern* (SM practitioner).

D.2.3.2.6 **viewpoint*

A **viewpoint* is a collection of **concerns* and specification of one or more kind of models or methods for providing necessary and sufficient information content for expressing the harmonization, understanding and resolution of those **concerns*, most often by the projection of **model_content* as an **aspect* of an SM domain. The **viewpoint* concept has two elaborations, one as **viewpoint* (simple) for use in specifying **concern* resolution for which a single **model_kind* can be used to project a **view* satisfying the **viewpoint* (simple) specification. The second, designated as **viewpoint* (complicated), is for use in specifying **concern* resolution that requires more than one **model_kind* from which projections need to be composed to satisfy the **viewpoint* (complicated) specification. For both situations, **viewpoint* (simple) and **viewpoint* (complicated), the resulting resolution is designated as an **aspect*, which is an expression of the **viewpoint*.

NOTE The meta-model resists the temptation to use "complex" to designate the alternative to "simple" because a modelling paradigm rarely is able to address a "complex" situation with the precision expected for a solution to a manufacturing problem. Most "complex" situations are not decomposable into "simple" situations for effective modelling while "complicated" situations can always be decomposed. Therefore, a "complex" **viewpoint* is treated as an imprecise **viewpoint* (simple) for the purpose of identifying a suitable **model_kind* and resulting **view* and **aspect*.

EXAMPLE A **viewpoint* (simple) specifies only one **model_kind*, e.g. an information model, from which the specified view is projected; but the viewpoint can specify several views and become a **viewpoint* (complicated) if all of the specified views projected from the information models are not suitable for composition based upon common elements. A **viewpoint* (complicated) can also specify more than one **model_kind*, e.g. an information model, a process model that uses elements of the information model, and a simulation that provides an execution trace for the process model in operation; these **model_kinds* can be difficult to compose into a single representation, e.g. a dashboard monitoring the process.

D.2.3.2.7 **model_kind*

A **model_kind* is a modelling paradigm for expressing concepts and relationships among concepts. The specifier of a **viewpoint* selects a **model_kind* suitable for creating a **model*, which, when populated with information, is suitable for projecting a **view* that satisfies the **viewpoint* specification or identified part of the specification. Modelling paradigms range from information models, through simulation models, to conceptual sketches.

D.2.3.2.8 **model*

A **model* is a specification or representation of concepts and the relationships among those concepts often based upon a formal syntax and semantics for the words or symbols used. This formality enables disparate **models* to be integrated or composed into single specifications or representations.

D.2.3.2.9 **model_content*

The **model_content* of a **model* is the collection of labels and values assigned to concepts in the **model* as information provided by instantiation of the **model*. **Model_content* can be static (e.g. result of database query), or dynamic (e.g. a real-time trace of values resulting from a simulation).

D.2.3.2.10 **view*

A **view* is the projection of **model_content* information for the specific purpose of resolving a **viewpoint* (simple) specification.

D.2.3.2.11 **aspect*

An **aspect* is a **view* or a composition of more than one **view*, where each **view* of **model_content* can be the result of projection from a **model* created using a different **model_kind*. Each **aspect* is usually given a label indicating the specific purpose or topic of the **views* from which it is composed. **aspect* is the foundational concept for understanding an SM domain.

D.2.3.2.12 **aspect_collection*

An **aspect_collection* is one or more than one **aspect* grouped into a labelled collection. An **aspect_collection* is most meaningful when a relationship among the meanings of the various **aspects* in the collection exists and is articulated for reference. **aspect_collections* provide the basis for representation of the SM domain for a particular purpose.

D.2.3.2.13 **aspect_collection_coherence_rule*

An **aspect_collection_coherence_rule* constrains or places a criterion rule upon an **aspect_collection*, e.g. ordered or unordered, possessing a common characteristic, sorted by a semantic relationship. **aspect_collection_coherence_rules* bind the individual **aspects* into a representative whole.

D.2.3.2.14 **alias_label*

An **alias_label* is an alternative designation for **aspect_collection* frequently used by **stakeholders*. The two most common alternatives are **alias_label* (dimension) and **alias_label* (axis).

NOTE Other concepts likely have common alternative designations as well.

D.2.3.2.15 **facet*

A **facet* is a specification of one or more **aspect_collection* intersecting orthogonally such that some of the intersecting **aspects* from different **aspect_collections* have meaning for an SM domain and contribute to achieving the purpose for which the **facet* exists. When the **facet* has more than one **aspect_collection*, i.e. the **facet* is multi-dimensional, only certain sub-dimensionality can make sense to SM. The purpose of the meta-model is to facilitate the understanding of those sub-dimensionality that make sense to SM.

D.2.3.2.16 **facet_composition_rule*

A **facet_composition_rule* constrains or places a criterion upon the juxtaposition of **aspect_collections*, usually pertaining to intersection of specific **aspects* as **model_content_purpose* derived from **views* of SM. **facet_composition_rules* bind the individual **aspect_collections* into a representative whole.

D.2.3.2.17 **model_content_purpose*

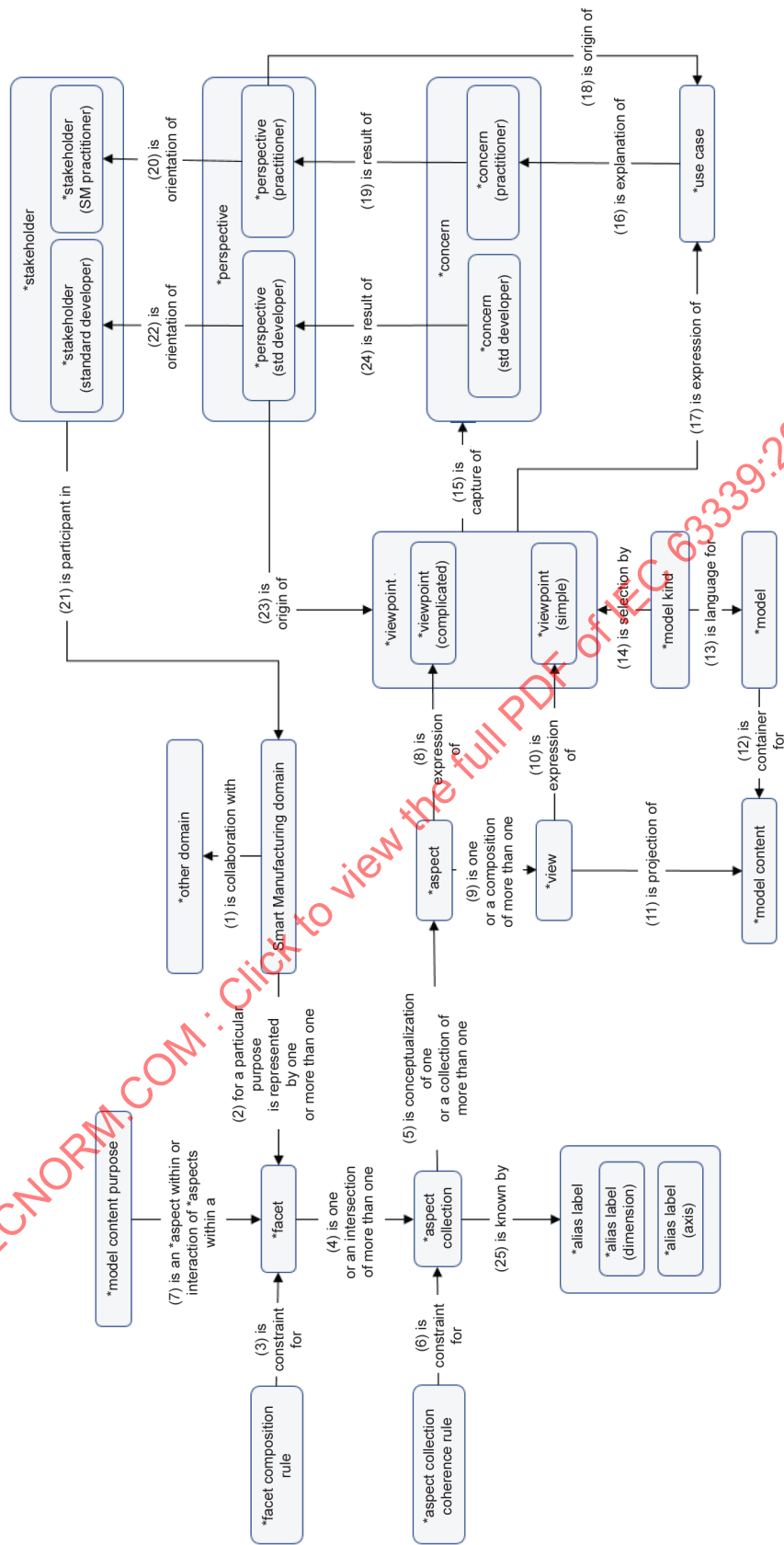
The **model_content_purpose* is the information available at the intersection of **aspects* within a **facet* for SM. These intersections are a conjunction or blending of **aspects* and thus of **viewpoints* and the **concerns* those **viewpoints* entail. Often the content of the intersection leads to interpretation for desired effects.

D.2.3.2.18 **other_domain*

An **other_domain* is a place holder for collaborators with an SM domain, e.g. engineering, logistics, marketing, procurement, sales. For a particular SM domain, the collaborating **other_domains* can be very specific.

A depiction of the meta-model for SMRM is shown as Figure D.1. In Figure D.1 some concept labels are abbreviated to fit presentation constraints for readability.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63339:2024



(1) is collaboration with	(14) is selection by
(2) for a particular purpose is represented by one or more than one	(15) is capture of
(3) is constraint for	(16) is explanation of
(4) is one or an intersection of more than one	(17) is expression of
(5) is conceptualization of one or a collection of more than one	(18) is origin of
(6) is constraint for	(19) is result of
(7) is an *aspect within or interaction of *aspects within a	(20) is orientation of
(8) is expression of	(21) is participant in
(9) is one or a composition of more than one	(22) is orientation of
(10) is expression of	(23) is origin of
(11) is projection of	(24) is result of
(12) is container for	(25) is known by
(13) is language for	

SOURCE: IEC TR 63319 [9]

Figure D.1 – Meta-model for SMRM

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63339:2024

Annex E (informative)

Principles of semantic modelling

E.1 Top level conceptual model

In the digital (computable) landscape of today and tomorrow, understanding the meaning of concept, phenomenon, symbol and knowledge, and how they relate, is essential. Figure E.1 illustrates these relationships as an adaptation of Shimon Ullman's "Semiotic Triangle" [56], where the triangle is loosely interpreted as the means for the mind's ability to create meaning about the real-world.

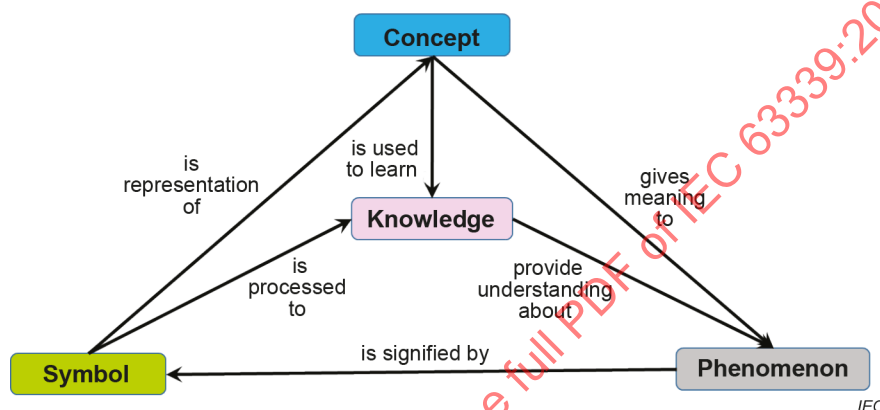


Figure E.1 – Top level conceptual model "The Semiotic Triangle"

In this conceptual model a Concept is an abstraction of a phenomenon that is a perception of a phenomenon of interest. Phenomenon of interest is the referenced subject (real or imaginary) to be meaningfully understood from the presented data. A concept is then used to recognize new data according to earlier learned concepts. Data is a symbol for the phenomenon as well as the data that is representing the phenomenon of interest. In this model the concept of data includes digital as well as analogue forms of data. Information gets meaning from earlier learned concepts used to recognize the referenced phenomenon of interest. Information is a meaningful representation of the phenomenon. Data is a physical representation of information when learned concepts recognize data.

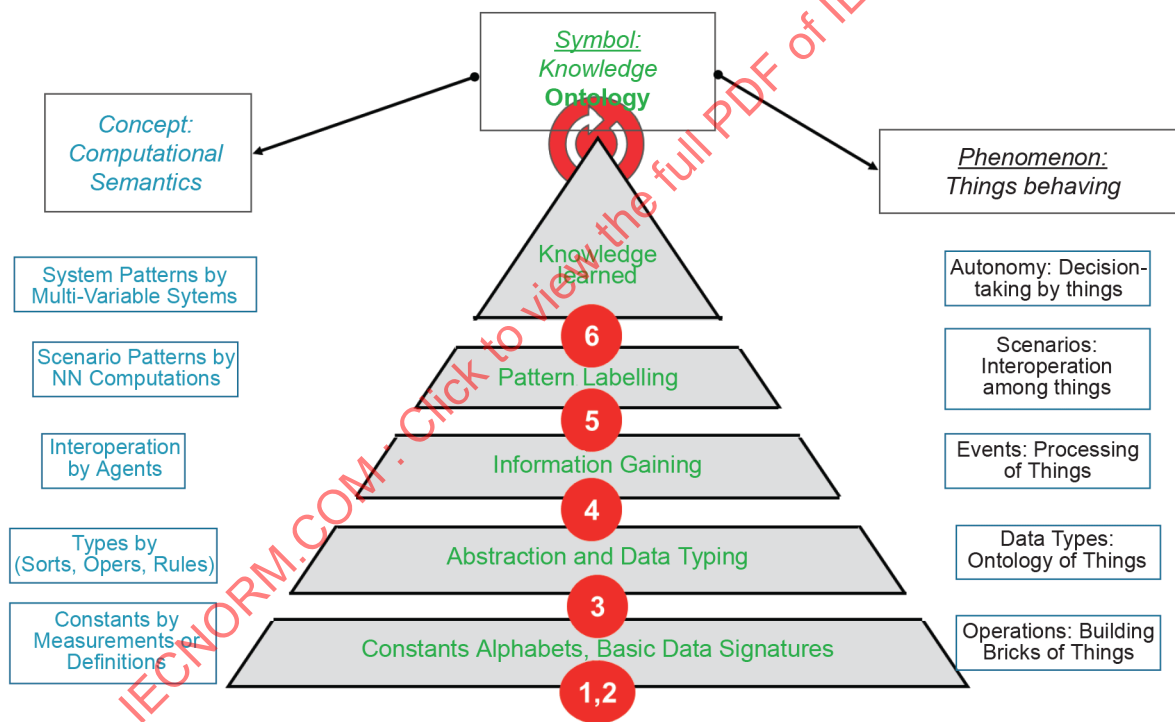
EXAMPLE 1 When reading the word fish as a symbol on paper, the data creates information for a situation meaningful as the representation of a fish, the phenomenon of interest. The representation of a fish comes from concepts created from earlier experiences and learning about fish.

Figure A.2 provides a generalized abstract semiotic triangle model with roots in logic and philosophy that is a suitable basis for semantic modelling of SM artefacts. To understand the manner in which that model applies to SM, a practitioner needs to be aware that a triangularity (a phenomenon, a symbol, a concept) can be represented by using many artefacts for the phenomenon or concept or symbol/ontology being considered. The edges of the triangle represent morphisms defined on pairs of artefacts, for example phenomenological and symbolic language artefacts or phenomenological and conceptual artefacts.

EXAMPLE 2 The triangularity of the physical construction of a heater, the thermodynamic differential equations, and the naming of the phenomenon i.e. "heater" in English or "Heizung" in German with the same semantics representing the same type of thing, namely a heater functioning according to the linearized differential equations (concept).

The ‘creation of meaning’ is possible provided the ‘right tools’ are made available to stakeholders. Hence, the right tools comprise ‘concepts’ to state the declarative semantic meaning, ‘symbols’ to state descriptive ontologies, ‘real-world phenomenon’ to achieve real things (assets) using, ‘information’ to identify the effect of a phenomenon, ‘data’ to represent, to communicate or to manipulate (big) measurement data, ‘knowledge’ to reason about phenomenon etc.

Phenomenon of Interest is the referenced subject to be meaningfully understood by observation of the dynamic behaviour of the subject. Information from current observations of probabilistic events can be analysed by learned composite data and graph models. In Figure E.2 the ‘knowledge pyramid’ is depicted as a layered structural sequence by beginning with the declarations of the symbols to be used by the ontology that can obey a certain grammar like ‘subject predicate object’. The next step is to span the data space by many-sorted signatures with variables, operations, rules. The third step is the probabilistic event space that invents a kind of dynamic happenings, i.e. playing dice or tossing a coin, where the probabilistic results are equal to the information gained from observation of the activities. These events, i.e. the activities, can be compared to learned patterns in order to analyse similarities of the input vector. Finally, the compound system that is represented as a system of variables and that is actualized by basic measurement data, i.e. real-time data observations, where updated patterns can be simulated using tools based on graph manipulation theories [36].



IEC

Figure E.2 – Knowledge Ontology (K-Pyramid) explained by the three coloured corners of the Semiotic Triangle (Concept || Symbol || Phenomenon)

The transitions between layers, i.e. 1 through 6, are expressed and defined as:

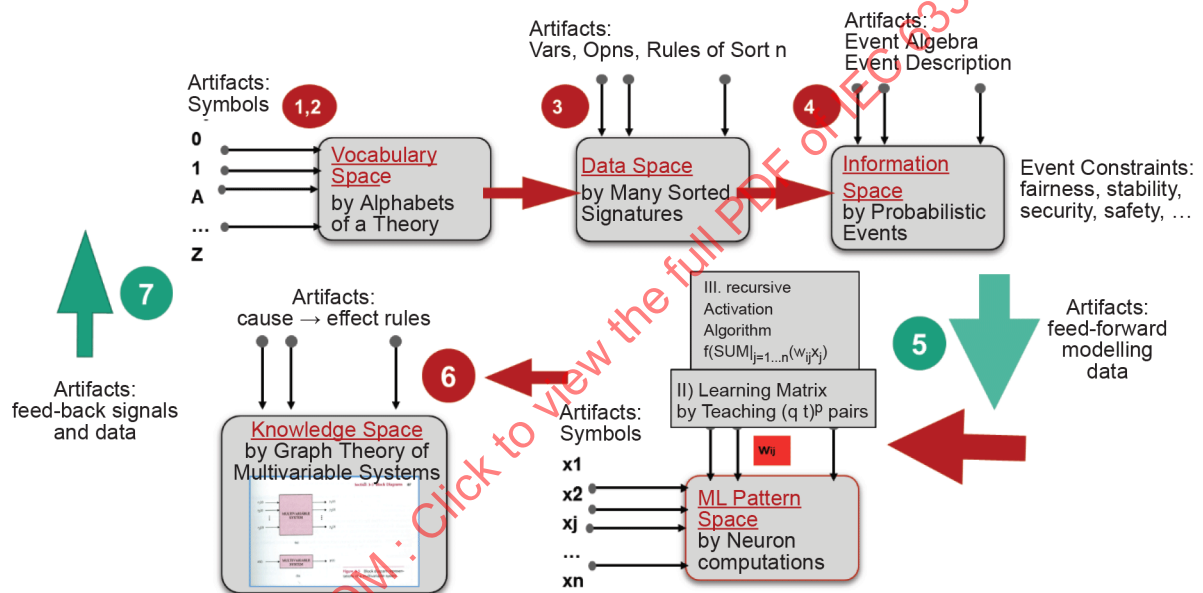
- 1) Setting the context for a Process to extract Knowledge stepwise from System Behaviour by relating OT assets and things to semantic concepts to language expressions;
- 2) Applying an Alphabet of Symbols that is the set of initially stated Artefacts to build Signatures (RA) of Human-Machine-Interoperable things;
- 3) Identifying Data (types) that are descriptive Ontologies of Signatures of things to characterize the architecture and structure;

- 4) Gathering Information that is the set of derived Artefacts (data type elements) from observations of processes (single events) for state changes and dynamic behaviour performed by things (OT);
- 5) Recognizing an ML Pattern that is a set of learned/labelled Artefacts, which is fed forward to a model to co-ordinate/to control the interoperation of things;
- 6) Acquiring Knowledge that is a set of arranged Artefacts (data model), which can be used in a formal manner for reasoning and prediction of behaviour of a System of Things.

The last transition is the use of recursion and iteration to provide:

- 7) feed-back (learned) data and signals from analysed/validated model into
 - a) real systems to improve processing control of machinery or
 - b) NLP or defect reports of standards to improve requirement statements/sentences.

These transitions are labelled by number in Figure E.3 as a flattened knowledge pyramid to depict an Industry 4.0 Methodology / Theory of Data.



IEC

SOURCE: deMeer et al. [36]

Figure E.3 – I4.0 Methodology / Theory of Data: Flattening the knowledge/data pyramid

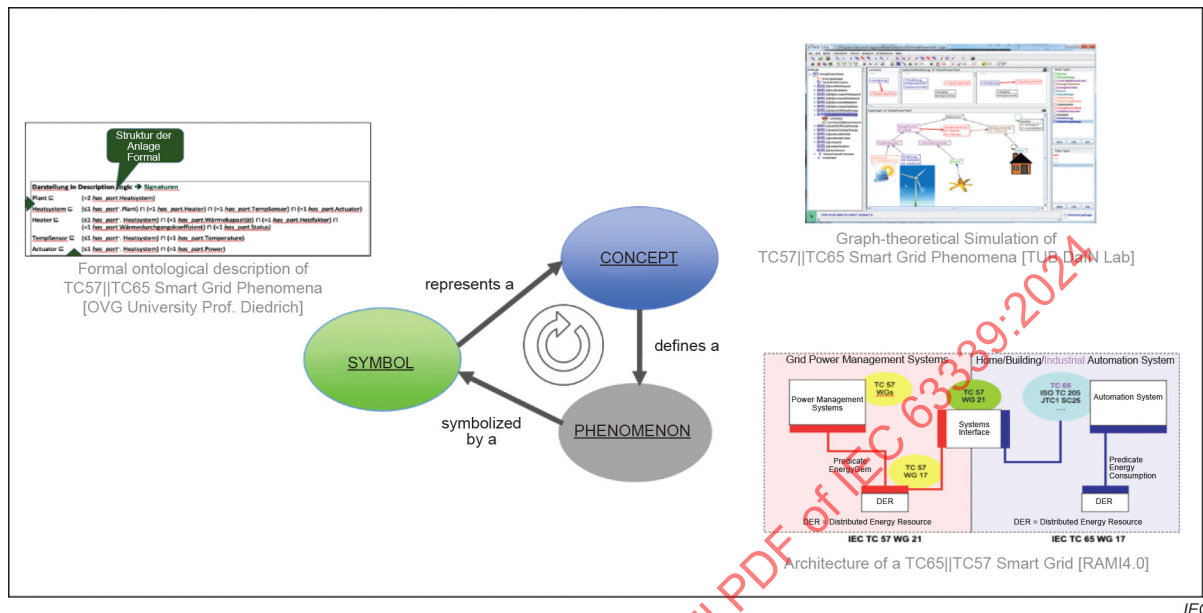
E.2 Semiotic conceptual model

A graphical format only graphically represents some kind of semantic behaviour of a system, a GUI representation, which is independently executed by some kind of, often unspecified, behavioural simulator. As the semiotic triangle informs us there are only three formats of representations allowing analysis and synthesis of a modelled system behaviour:

- 1) textual as by a standard;
- 2) hard-wired and programmed as by the thing;
- 3) semantically as comprised by a GUI for graphical representation and a semantic simulator like a graph manipulator to perform semantic interpretation.

For a specific system all three formats depend upon each other, which is defined by and given by three morphisms that relate textual artefacts to thing artefacts to semantic artefacts. Therefore, to be complete, the semantics of a textual standard requires the definition of these three morphisms.

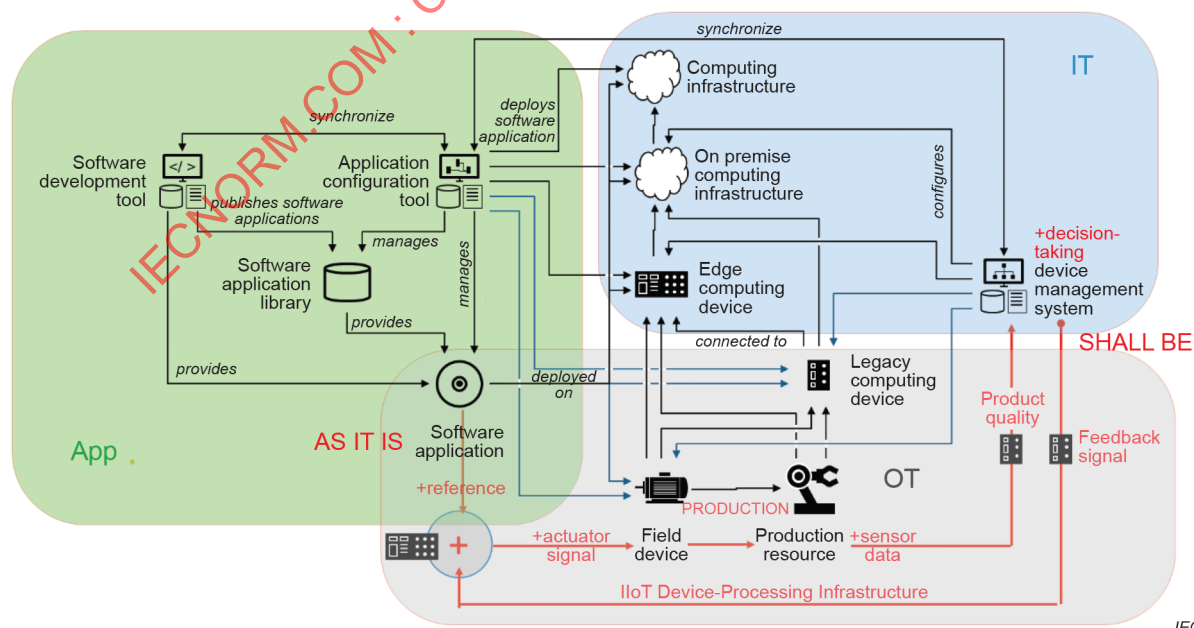
The semiotic triangle shown in Figure E.4 comprises the three characterizations (semantic concept, symbolic expression, cyber-physical phenomenon, which is a thing) and three morphisms among these characterizations: a) a symbol, of a language, represents the behaviour of a thing or a phenomenon, b) a symbol represents some parts of semantics, c) the semantics is an abstract model of some phenomenon.



SOURCE: deMeer et. al.[36]

Figure E.4 – Cyclic semiotic relationships (morphisms)

The images in Figure E.4 depict a use case of tightly coupled systems of a power management system with Smart Manufacturing System examples from IEC TC 56 and IEC TC 65. Figure E.5 depicts a highly abstracted representation of the three characterizations of an SM scenario.

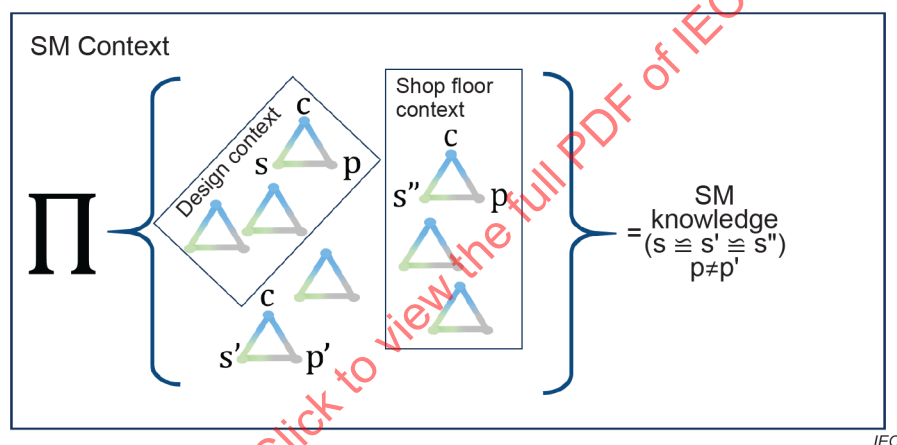


SOURCE: deMeer et.al.[36]

Figure E.5 – A first high level consolidation of interactions (I) – including IIoT Control Structure

As mathematics tell us an algebra comprises data, functions and computation rules. Thus the 'concept model' based on semantics must comprise data + ruled functions and the ability to model processes. The 'data model' is an abstract data type (ADT) and the 'information model' is an algebraic model that models processes by graphs. According to Information theory, information is gained from observation of probabilistic events where the results are not known before acting. Processes generate new information by making progress (i.e. checking rules) with state transformations, e.g. sequences of events that are represented by sequences of graph edges each of which being a pair of directed graph vertices. The phenomenon model represents the engineering of (real-world) things. Consequently, the three models of Figure E.4 collapse into a semantic model comprising data and information and into a phenomenon model comprising engineering measures and methods to create real-world things and being in accordance with the applied artefacts of the semantic model.

Within SM the language used by different domains of practice can be difficult to align throughout the life cycle. Semantic modelling provides the means to understand these different languages by making explicit the context of their use, the concepts they actually intend and the things being addressed by a particular expression. Figure E.6 depicts an SM context with several domains of practice and a logical operator to compose the aspects of SM into meaningful knowledge about the SM context.



Key

- c additive process
- p mechanical machine
- p' electronic machine
- s description of mechanical
- s' description of electronic
- s'' description of electronic on shop floor
- Π composition of components across the life cycle



aspect of SM as semantic model

Figure E.6 – Composition of SM knowledge from different SM domains

Figure E.6 shows an SM context and two sub-contexts for domain of practice with labels that signify an additive process concept where 3 identified aspects are distinguished among other aspects, i.e. the corner nodes of the aspect's semiotic triangle symbol are annotated. Each of these domains of practice has its own language and while talking about the same concept they use different symbols and can be talking about different phenomenon. One deals with the aspect that is an additive process concept (c), its related mechanical machine phenomenon (p) and the description of mechanical (s), which is the symbol for that aspect in a design context. Another deals with the aspect that is an additive process concept (c), its related mechanical machine phenomenon (p) and the description of electronic on the shop floor (s'), which is the symbol for that aspect in a shop floor context. The third deals with the aspect that is an additive process concept (c), its related electronic machine phenomenon (p') and the description of electronic (s'), which is the symbol for that aspect in the overall SM context.

SM knowledge results from the consideration of these aspects, and others, when composed as an appropriately pruned Cartesian product (Π) of the aspects by using the process shown in Figure E.3 and the related 7-step procedure described in the text to climb the K-pyramid shown in Figure E.2. The ontological disambiguation of the various symbols and phenomenon and concepts, i.e. acquisition of SM knowledge, can reveal for example, that while s, s', and s" are symbols for description of different aspects, they are related to the same concept c of an additive process ($s \cong s' \cong s''$), but the phenomena p and p' are not the same ($p \neq p'$), for example because the SM context electronic machine phenomenon is power consumption whereas the design and shop floor contexts are aspects related to the machine control electronics.

E.3 Top level model domains

The model in Figure E.7 adds the notions of context and domain to the semiotic triangle in Figure E.1. Context is the surroundings of the phenomenon, when and where the phenomenon is referenced, which defines a state of the phenomenon. A concept may represent different meanings depending on the stakeholder's domain (purpose of activity in a context), which can result in different understanding of the phenomenon.

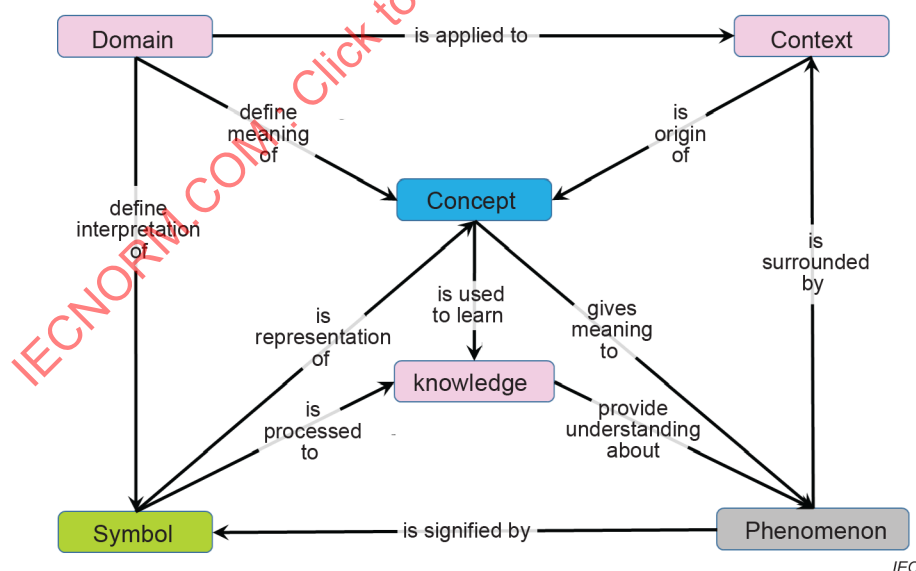


Figure E.7 – Top level concept model for model domain

As shown in Figure E.1 through Figure E.5, the notions considered in Figure E.8 are extended to include any kind of phenomenon dynamics. Figure E.8 adds the notions needed to develop different kinds of concrete models such as information-, data-, activity-, function-, control-, state and other phenomena artefacts representing relevant combinations of aspects for a phenomenon.

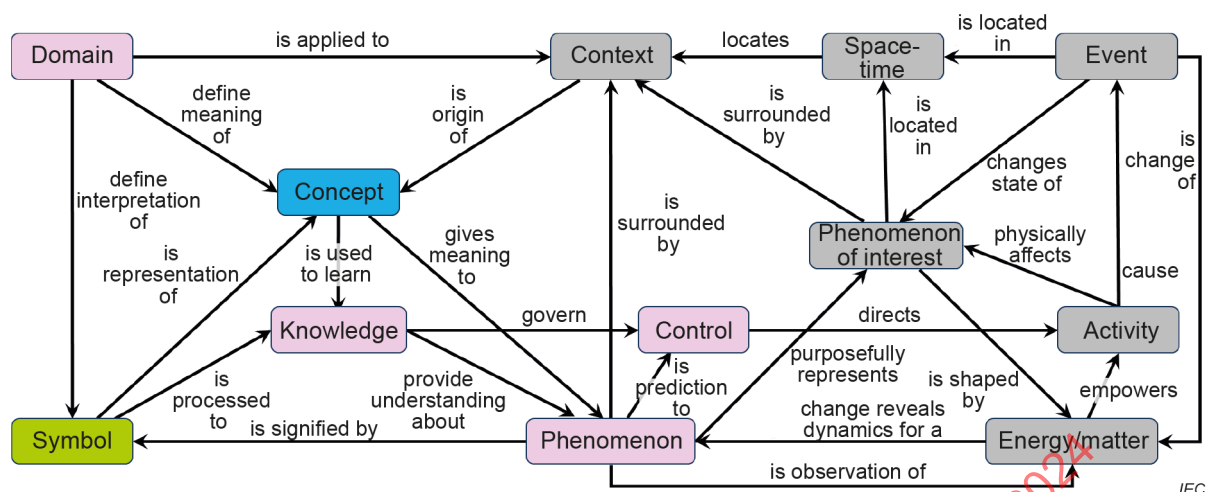


Figure E.8 – Natural aspect concept model – dynamics

To capture phenomenon dynamics in terms of the notions space-time, energy, event, activity, phenomenon of interest and control, these notions are added to co-locate the phenomenon in context with the physically affecting activity in a time sequence appropriate to achieve the anticipated affect.

Figure E.8 indicates that the dynamics of a phenomenon can be derived from applications of the notions of the figure. The beginning of a dynamics is the observation of events that eventually result in the collection of knowledge.

EXAMPLE Energy distribution and transportation shapes the phenomenon in space-time where context, activity, and event are identified.

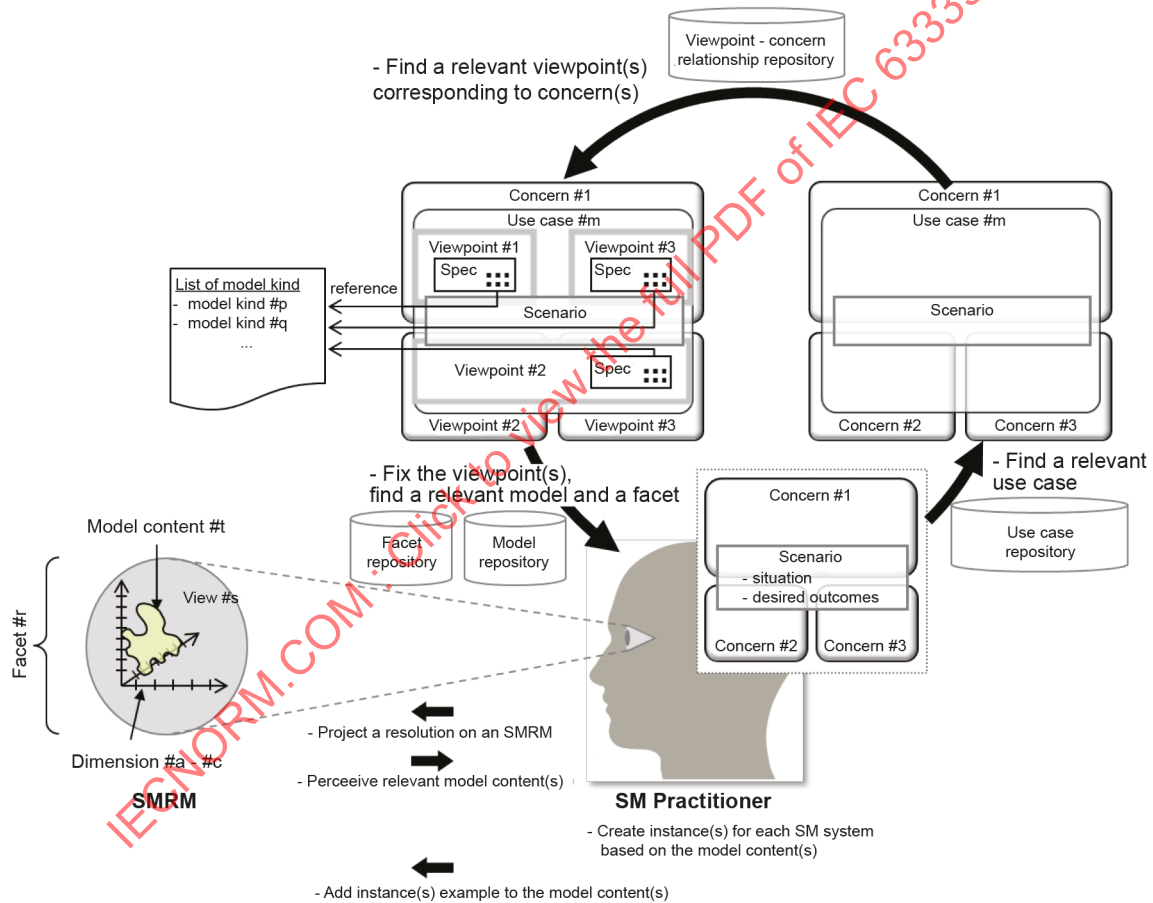
Annex F (informative)

Practitioner's modelling activity in a systematic usage of URMSM

F.1 Use case derivation of concerns, aspects, and perspectives

As discussed in 9.4, stakeholder diversity is important for defining a systematic usage of URMSM requirements and recommendations as use cases are created. Figure F.1 and Figure F.2 depict frameworks for utilizing the URMSM specifications to present resolutions for SM through an analysis of a mechanism from perceptions to realization.

Figure F.1 shows a model of a modelling activity of SM practitioners with the URMSM and use case.



IEC

Figure F.1 – Utilization of the URMSM through a modelling activity of SM practitioners

In the scenario depicted in Figure F.1, SM practitioners can identify/use an intended scenario(s) with concern(s), situation, and desired outcomes, but they do not know a relevant use case(s) and viewpoint(s). Therefore, as the first step, they identify and use a scenario(s) for an ideal smart manufacturing system(s), and after that they define the current situation, concern(s), and an expected outcome consistent with or according to the scenario, because appropriate concern(s) and the outcome corresponding to the situation can be selected to compensate diversified gaps between ideal situation and as-is situation. Then they find a relevant use case(s) from use case repository. After getting the relevant use case(s), they find a relevant viewpoint(s) corresponding to concern(s) from a viewpoint-concern relationship repository, because the generalized use case(s) already contains a relevant viewpoint(s) in the relationship with concern(s). Since the specification of a viewpoint(s) refers a model kind(s) (as model kind #p, model kind #q shown in Figure F.1), and since the combination of concern(s) and viewpoint(s) selects aspect(s), dimension(s) (as dimensions #a – #c shown in Figure F.1), and facet (as facet #r shown in Figure F.1), the SM practitioners refer to a relevant model(s) defined by the model kind(s) in the facet. As a premise for modelling activity by a SM practitioner, a standards developer prepares models that meet the needs of the SM practitioner in advance. It enables SM practitioners to refer to those models during modelling activity without construction of a new model. With the model(s), they get model content(s) (as model content #t shown in Figure F.1) for SM practitioners, for example getting a list of relevant standards, relevant terminologies, relevant KPIs (Key Performance Indicators), relevant data models, relevant communication protocols, relevant graphical user interface (GUI) to represent the simulation, graph manipulation to perform simulation, formats.

Figure F.2 shows the procedure of the modelling activity. The procedure flows from right to left. SM practitioners can create an intended scenario with situation, concern(s) and desired outcomes (as Step 1), 2-1), 2-2), 2-3) in Figure F.2), and they find a relevant use case from use case repository (as Step 3) in Figure F.2). Then they find a relevant viewpoint(s) corresponding to concern(s) from a viewpoint-concern relationship repository (as Step 4) in Figure F.2). After that, the procedure is divided into two parts. The first part is to find the model kind(s) referenced by the viewpoint(s) specifications (as Step 5) in Figure F.2), and the second is to find the relevant aspect(s) (as Step 6) in Figure F.2). In the second step, after finding aspect(s), dimension(s) and a facet is found in order (as Step 7), Step 8) and Step 9) in Figure F.2). Then, by referring to a repository of models pre-defined by standards developers in advance, the SM practitioners find model(s) described by the model kind(s) on the facet, and extract model content(s) in it.

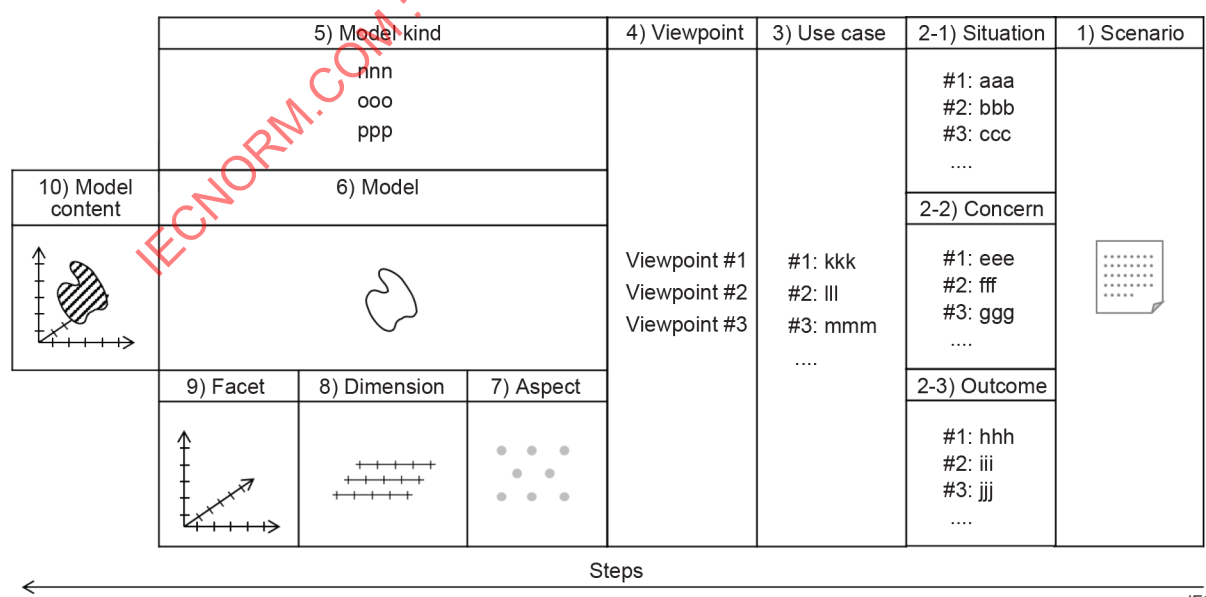


Figure F.2 – Projection steps for SM practitioners

In summary, for a modelling activity of SM practitioners with URMSM, a projection of model content is assumed to proceed with the following steps:

- 1) perceive a scenario for an ideal smart manufacturing situation;
- 2) perceive the current situation, concern(s), and an expected outcome according to the scenario, because appropriate concern(s) and the outcome corresponding to the situation can be selected to compensate diversified gaps between ideal situation and as-is situation;
- 3) find desired use case(s) to address the concern(s) under the situation;
- 4) identify viewpoint(s) corresponding to such use case(s);
- 5) recognize corresponding model kind(s) from the viewpoint(s);
- 6) instantiate practical model content of the model(s) on the facet as views that address the concern(s);
- 7) recognize relevant aspect(s) from the viewpoint(s);
- 8) select appropriate dimension(s) from the aspect(s);
- 9) construct a facet based on the dimension(s);
- 10) draw proper model(s) addressing the concern(s) onto the facet using the model kind(s).

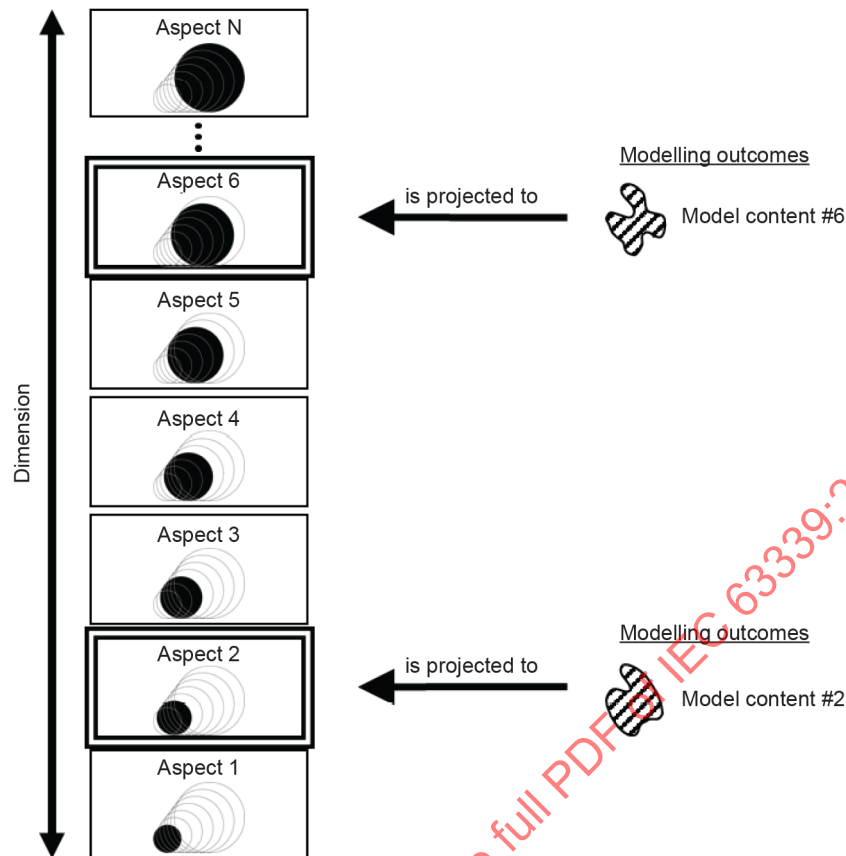
That is, to define a systematic usage of URMSM for use cases, the framework provides SM practitioners with not only the relevant use cases to their intended scenarios but also the relevant contents like a list of relevant standards, relevant terminologies, relevant KPIs, relevant data models, relevant communication protocols, relevant GUI formats, etc., for their manufacturing system developments.

NOTE Existing SMRM such as RAMI4.0 and IIRA use axes of typical dimensions by presenting coherent collections of related aspects.

F.2 Relationship between aspects on a dimension and model contents

F.2.1 General

While the previous clause discussed relationships among use cases and appropriate dimensions of SMRM, this clause describes a projection way to model contents onto the dimensions. Produced model contents do not present any relationship explicitly to aspects of dimensions of an SMRM because an SM standards developer and an SM practitioner derive model contents from a use case by referring to relevant concerns, viewpoints, and others. Therefore, as shown in Figure F.3, these dimensions assist SM standards developers and SM practitioners to classify and recognize individual model contents logically through explicit categorization or indexing into relevant aspects presented on each dimension. The following subclauses explain individual dimensions and the relationship between dimension and model content.



IEC

Figure F.3 – Relationship between aspects on a dimension and model contents

F.2.2 Implication of the dimension of lifecycle

Lifecycle as a dimension is for projecting model contents of manufacturing systems produced through modelling activity onto the dimension characterized with aspects for categorizing situations placed explicitly as modelling phases. The coherence criteria for this dimension involves the Individual categories as aspects on the dimension corresponding to the dependencies among activities as the system develops and operates. An SMRM life cycle dimension saves, refers, and maintains model content such as a standard, use case, data model, etc., related to the system in each phase in association with the corresponding category.

F.2.3 Implication of the dimension of smart technology

Smart technology as a dimension is for projecting model content of manufacturing systems produced through modelling activity onto a dimension of aspects characterized as smart technologies that apply explicitly to implement modelled functionalities. The coherence criteria for this dimension involves distinct smart technology functionalities, similar to the OSI model for network communication. An SMRM saves, refers, and maintains model content such as standards, use cases, data models, etc., related to each smart technology aspect's semantic model and for the semantic model of smart technologies as an evolving holistic dimension. For this dimension, a view produced from model contents by an SM standards developer or an SM practitioner is projected onto a corresponding aspect of the SMRM smart technology dimension. Since the model produced from a use case can cover more than a single aspect of smart technologies, the model content can result in views related to more than one smart technology aspect.

F.2.4 Implication of the dimension of enterprise hierarchy

Enterprise hierarchy as a dimension is for projecting model contents of manufacturing systems produced through modelling activity onto a dimension of aspects characterized as enterprise management and control hierarchy that explicitly incorporate technology and business process. The coherence criteria for this dimension involves levels in the enterprise hierarchy where functionality at each level equips a subordinate hierarchy level. For this dimension, a view produced from model contents by an SM standards developer or an SM practitioner is projected onto a corresponding aspect of the SMRM enterprise hierarchy. Since the model produced from a use case can cover more than a single aspect of enterprise hierarchy, the model content can result in views related to more than one enterprise hierarchy aspect. An SMRM saves, refers, and maintains model content such as standards, use cases, data models, etc., related to each enterprise hierarchy aspect's semantic model and for the semantic model of enterprise hierarchy as an evolving holistic dimension. An example of this dimension is the integration of enterprise and control systems found in IEC 62264 [3].

F.2.5 Implication of the dimension of capability level

Capability level as a dimension is for projecting model contents of manufacturing systems produced through modelling activity onto a dimension of aspects characterized as capability levels that explicitly express process capabilities. The coherence criteria for this dimension involves levels or extents of capability where functionality at each level equips a subordinate level. Functionality at a lower level is to satisfy simple and primitive requirements, and functionality at a higher level is to satisfy sophisticated requirements. An SMRM saves, refers, and maintains model content such as standards, use cases, data models, etc., related to each capability level aspect's semantic model and for the semantic model of capability level as an evolving holistic dimension. An example of this dimension is CMMI (Capability Maturity Model Integration).

F.3 Concept of step-by-step approach

F.3.1 Formalism caveat

Although the steps described in Annex F theoretically work for SM practitioners, in reality, there is a potential problem with the modelling activity utilizing existing SMRM constructed with typical dimensions as axes. As shown in Figure F.4, the potential problem is that it tends to leave various gaps between the as-is manufacturing circumstance and an ideal scenario, which the SM practitioners image as resolved due to lack of modelling expertise. That is, the problem arises because the modelling is often performed without fully evaluating the capabilities available, e.g., how much performance can be improved with existing hardware, how much performance can be improved with newly purchased hardware, how much performance can be improved with the ability of existing workers, how much performance can be improved by education of workers in the future, etc.

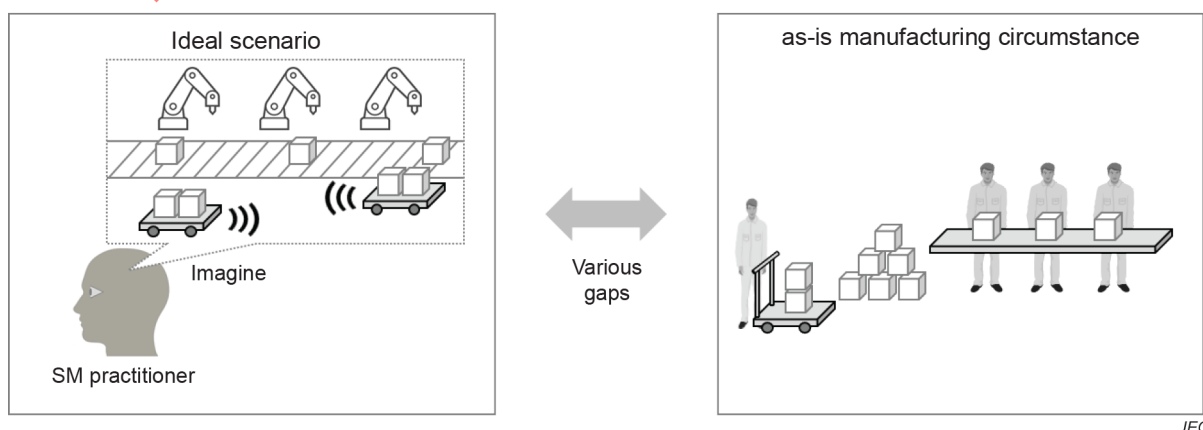


Figure F.4 – Potential problem of the modelling activity by SM practitioners

Unless building new manufacturing systems, most SM practitioners need to consider retrofit or modernization or both retrofit and modernization of their existing manufacturing systems to implement a scenario. If there are huge gaps, the scenario can be difficult to implement because existing manufacturing elements and performance need to be overcome. Coping with this problem, a step-by-step approach needs to be applied for utilization of the URMSM.

The difference between the performance of the as-is manufacturing system and that of the ideal manufacturing system needs to be evaluated from the viewpoint of the scale of hardware investment, software investment, the improvement speed of worker skills, etc. As a result of the evaluation, the scenario drawn by the SM practitioners is realized by defining a roadmap to reach the ideal manufacturing system through stepwise investment and stepwise skill improvement.

F.3.2 Practical procedure

A roadmap can happen when SM practitioners improve factory performance as a part of a new supply chain ecosystem. Factories that support information flow and communication in the target supply chain also need to improve support for the model content of aspects related to the supply chain dimension. The improvement can involve multiple dimensions related to factory capabilities that need to change to handle model content so that the current capability transitions to the desired capability.

For consideration of such actual problems, it is necessary to define a systematic framework by using use cases to support conformance with URMSM specifications.

The step-by-step approach consists of four steps:

- 1) derivation of model content of the ideal system;
- 2) derivation of model content of the as-is system;
- 3) recognition of a gap between the ideal system and the as-is system;
- 4) derivation of model content of intermediate systems toward the ideal system.

In the step-by-step approach, step 1 and step 2 derive appropriate model content using the projection steps for SM practitioners shown in Figure F.2. During the fourth step, iteration of the projection steps for SM practitioners, beginning with the as-is system through possible intermediate systems can resolve the recognized gaps and reach the desired ideal system.

Figure F.5 shows details of the step-by-step approach based on a classification of capability level of manufacturing systems into several process capabilities designated 'Process capability 1' through 'Process capability N'. As the expanding black circles indicate, a higher capability level has broader process capability coverage than a lower capability level. Importantly, the higher capability level need not retain all lower process capabilities but can fulfil a requirement or an aim using a different process capability approach from the approach taken by the lower process capability.

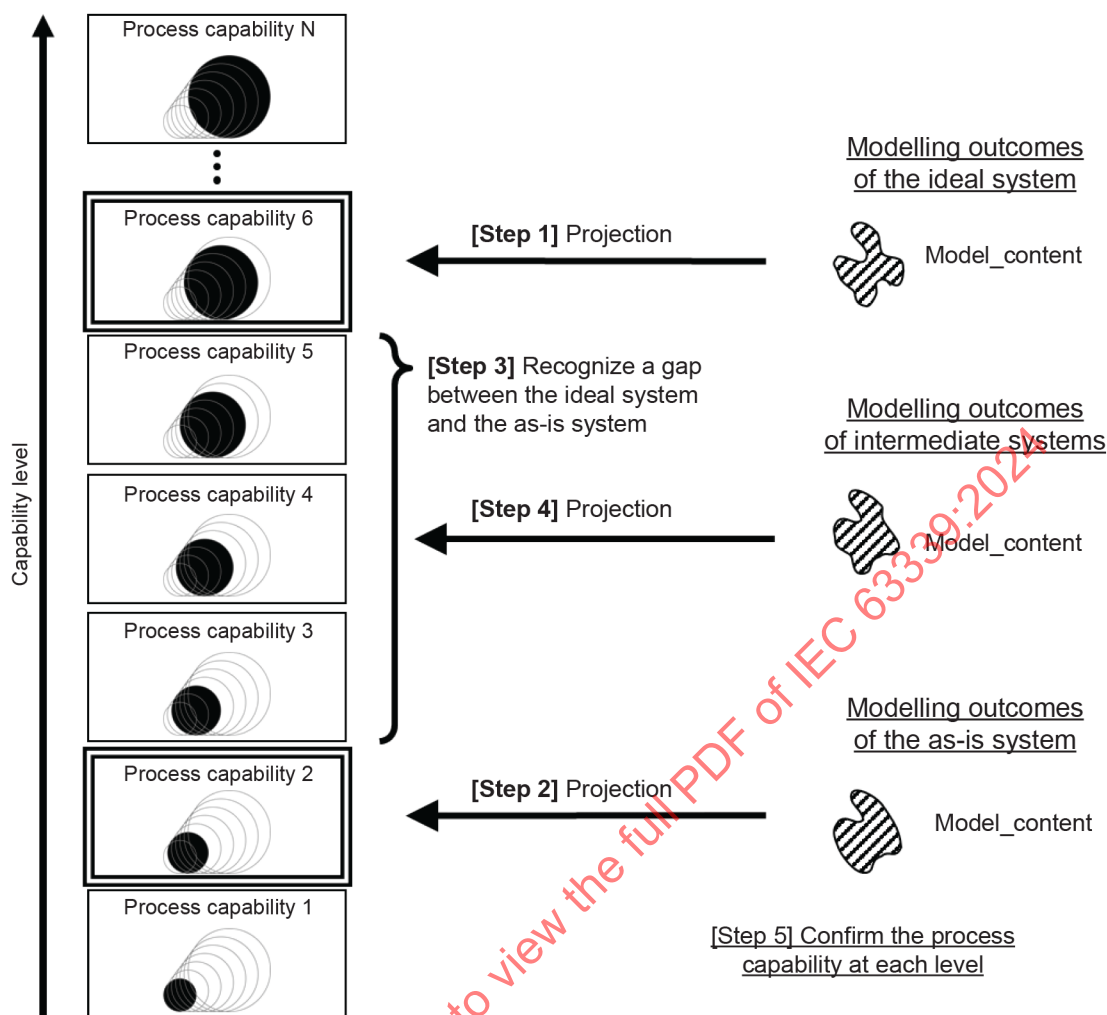


Figure F.5 – Step-by-step approach

In this approach, there is a necessary condition, which must include an aspect of capability level for manufacturing systems as one of selected aspects through the projection steps.

Two utilizations of the projection steps for SM practitioners are possible. One is to use the projection steps without any limitation regarding selected viewpoint. This is a versatile approach, because it allows acceptance of changes to the selected viewpoint during the process. However, all those viewpoints must have a collection of aspects for a common capability level of manufacturing system. Another approach is to use the projection steps with the same viewpoint during the process. This approach assists easy comparison among the process capabilities because it keeps the use of the same facet.

With the above step-by-step approach, URMSM and use cases can deliver a useful guide to SM practitioners for the ideal system development.

Annex G (informative)

Use case: Value stream

G.1 Overview

ABC-Retailer is a retail store that sources many products and sells to its customer through a highly integrated set of logistics systems. ABC-Retailer uses URMSM methodology in the initial phase of establishing supplier information and requesting new product manufacturing specifications. As these suppliers are integrated into its logistics systems ongoing needs are communicated with its suppliers based on current market conditions.

YN Manufacturing is also using URMSM methodology and has developed a multi-dimensional product model to enable assessment of all aspects of the product life cycle and its relation to the production system life cycle. In the past, the information about the product would be exchanged with product specifications, 3D models, and related information on how to produce the product. By using smart manufacturing tools and technologies, YN Manufacturing can take product concepts from its customers and develop a product model that can evolve from a simple concept to a complicated set of related information to produce and deliver the product.

G.2 Conveyor system project

ABC-Retailer has put together a concept drawing with a set of requirements for products packaged in containers for shipment to its retail operations. Initially, since this is a new product the number of items to be delivered and its packaging can easily be handled by manual packaging. However, as the volume is increased, ABC-Retailer expects its suppliers to be able to accommodate higher performance requirements. ABC-Retailer has setup “process capability measurement criteria” for its supplier with process capability 1 through process capability 6 to assist them in forecasting and preparing their manufacturing capacity. Process capability 0 is the basic level of performance for new product requirements. Each process capability has a set of attributes relating to quality, cost, and delivery (QCD). ABC-Retailer’s suppliers develop their own process capabilities to match the QCD requirements for each process capability.

As market acceptance of the product drives more demand, the process capability level will need to increase.

NOTE 1 See Figure F.5 for example of process capability levels.

YN Manufacturing has a number of suppliers that also use SM tools and technologies to facilitate exchange of design and manufacturing information. YN Manufacturing and all the suppliers are using the new SM reference model that expedites and facilitates exchange of product model information and specifications. They have built a manufacturing ecosystem that has adopted standardized systems for parts and components, across a wide range of items and manufacturing tools for a wide range of materials. The adoption of a common set of standards assures interoperability of the information ranging from production systems to business systems and enables quick turnaround on new product features and prototypes, to order systems that can accommodate a wide range of order sizes from a one-off lot to large scale orders.

NOTE 2 Exchange of information among different phases of design and manufacturing depends upon the context and information encoding. The use of different tools and methodologies typically requires some import and export applications to use the information in the respective application.

ABC-Retailer knows that these systems used by its suppliers will reduce ABC-Retailer’s risk to any supply disruptions and/or changing customer demand or new regulations because the impact to these dynamics can provide rapid notification, as well as proposed alternatives to any of these disruptions.

G.3 SM use case

ABC-Retailer has developed a 'use case' with a number of 'scenarios' elaborated using a sequence diagram that is a model kind artefact defined in ISO/IEC 19501. In the URMSM, one of the critical features for a SM system is to identify how different aspects of a manufacturing enterprise and system work together. Key to understanding these different aspects is to work with existing standards and systems and to develop domain specific implementations.

Within a supply chain, a number of stakeholders have similar needs that are commonly expressed by information or models specific to the particular use of the stakeholder. The information that a procurement person needs is quite different than the information needed to on-board the supplier. The information, about raw material and specifications, for items of supply needed by product designers are different than the information needed by the production system. Much of the supply chain information is associated with concepts about logistics information, but loosely coupled to information of items of supply. As new suppliers are added, or as a company changes (name, location, etc.) information that is already captured in the manufacturing facility information is no longer valid. This dis-information leads to disruptions when that information is related to maintenance and repair operations, as well as to ongoing manufacturing operations related to items of supply for production.

By requiring the use of common concept models for information, such as the supplier authoritative source and the material authoritative source models, the validity and quality of the information in the supply chain can be improved.

Based on the product concept proposed by ABC-Retailer, YN Manufacturing has produced a project plan to delineate the high level sequence of interactions on the product model, from concept to first article production as shown in Figure G.1.

The interactions between the various dimensions are depicted as shown in Figure G.1 and Figure G.2. The sequence diagram is numbered to indicate a set of actions that take place in the manufacturing and supply chain process. The numbering does not necessarily imply a timing constraint, but a set of steps that would normally need to occur in the product or production system concept, design, manufacturing, and delivery activities. Within each dimension (or swim-lane), a set of processes are intertwined with the interactions between dimensions. Having a common set of concepts between and within dimensions improves the ability for the overall supply chain to respond more quickly to changing dynamics.

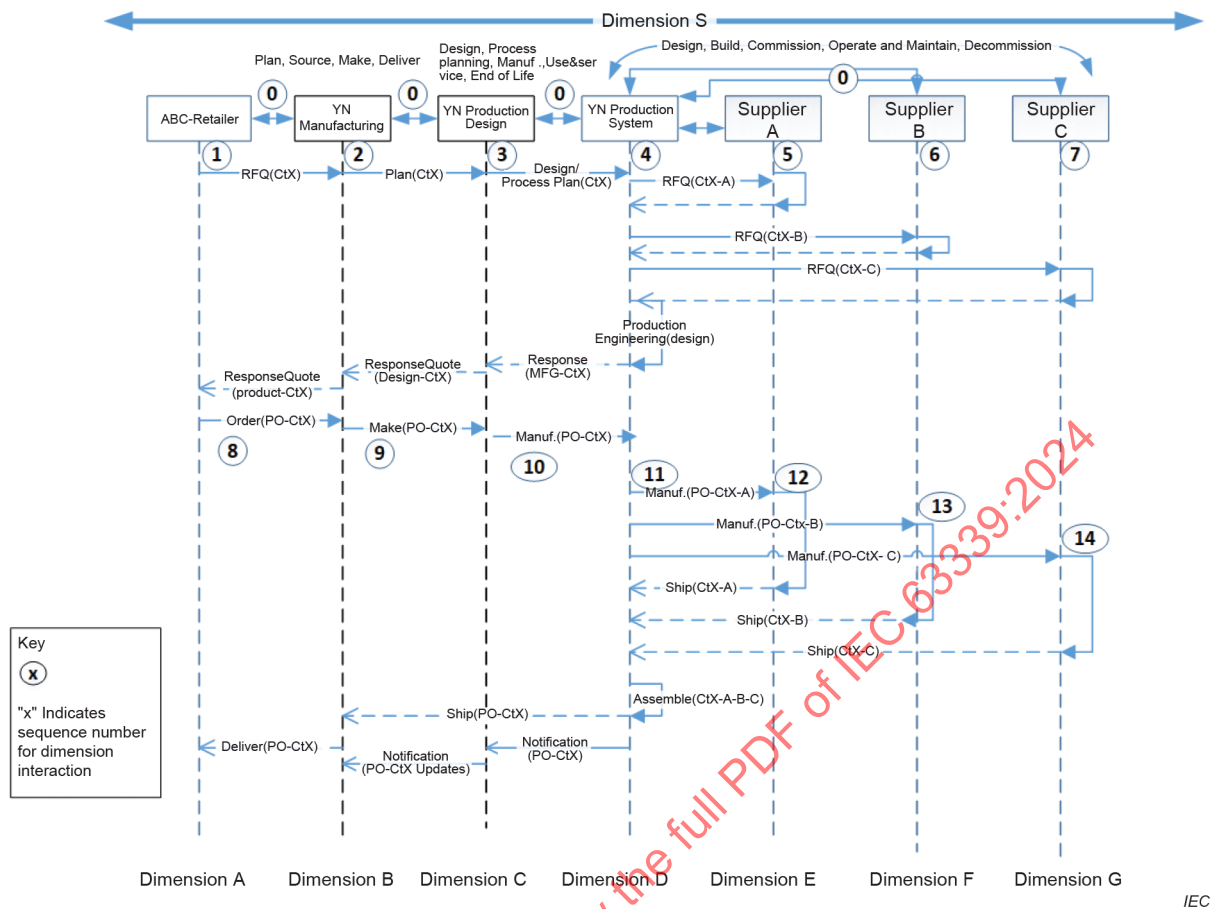


Figure G.1 – Product model interactions

Within each dimension, Figure G.1 identifies a number of sub-actions for each interaction sequence number. These sub-actions must be coordinated with the other activities in that dimension where later diagrams can document those activities and events. For instance, sequence ① is an interaction between Dimension A and Dimension B. The information flow “RFQ (Ctx)” message has a return information flow response message “ResponseQuote (product-Ctx)”. Each sequence number has a corresponding information message and message response. The direction of the arrow indicates the origination and destination of the interaction. The interaction can have multiple sub-interactions or sub-activities as noted by a suffix to the numeric notation, for example 4.1.

NOTE Messages are not necessarily “blocking” linkages in the overall message flow, i.e., another message can be sent before the response to the previous message occurs.

In Figure G.1 and Figure G.2, the numeric labels are associated with an interaction within or between dimensions. For instance, in Figure G.1, the notation ① is related to Dimension A, while the notation ② is related to Dimension B. A numeric notation indicates a specific interaction between dimensions; accordingly, a 1-2 notation indicates an interaction between Dimension A and B.

Figure G.2 shows that in the Dimension D for YN Production System, sequence ④ has a number of sub-activities (4.1, 4.2, 4.3, and 4.4). Some sub-activities relate to Dimension C (4.1, 4.4) and some relate to Dimension E (4.2, 4.3).

G.4 Dimensions

G.4.1 Information in context

To facilitate communications and information flow in each area of the enterprise, a number of aspects are grouped together as structured information (knowledge) to enable workflow process automation. This grouping binds the aspects into a coherent context of shared understanding. Aspect information has a definite concept definition that enables contextualized understanding of data as meaningful information in the context of its use. In many cases, the information represents real tangible material, equipment, and processes.

G.4.2 Dimension coherence using semantic models

Each dimension needs an agreed upon “coherence” between “aspects” in that dimension as well as an agreed upon semantic model or specification for exchange of information in that dimension. For instance, in the product design dimension, the concept phase can anticipate many different material types and processes for manufacturing. At each phase of the product design dimension, a coherent set of characteristics (properties) needs to be elaborated in the product design model. Within a particular set of activities in a dimension, such as product design, the meaning of the information and tools to design the product have evolved to enable cross communication between tools and actors.

In the product and production system design dimension, from the concept to end of life of the product, early phase product design tools have the most capabilities to exchange information. It is well known, that fixing errors early in the design process alleviates expensive changes later in the product life cycle (the well-known V curve of product development).

For instance, CAD tools for the product construction (mechanical, electrical, electronic, etc.) have developed methods for relating the models and views such that a change in mechanical design can easily be related to needed changes in electrical design. Changes in the product design affect product engineering tooling and material requirements. Providing a common understanding or semantic model for the information reduces errors and expedites changes to documentation needed to manufacture the product.

Many products have a software component associated with the product, so the product information model (PIM) and the product life cycle management (PLM) tools facilitate the integrations of information in the C and D dimensions.

Dimension I of Figure G.2, shows a similar set of circumstances needs to happen in the design and build of the manufacturing facility. Because of the large expense (time and money) to build a manufacturing facility, the activities in the Production System dimension happen less frequently. However, once a set of resources are built and commissioned to manufacture products, the interactions with the product dimension happen on a more frequent timeline.

G.4.3 Interactions between dimensions

Interactions occur both intra- and inter- enterprise between dimensions. For a new or changed existing product design, a new product design can use new material types or manufacturing processes that are reflected in new properties in the product design model. The new properties of the product design model are exchanged with the production system dimension. Impacts from new product changes are assessed in the production system dimension to ascertain if tooling and equipment changes are required.

Many times, manufacturing concerns arise, such as tooling, part availability, or equipment issues. By providing a set of concepts common to all dimensions, problems can be readily diagnosed, and potential solutions identified.

G.4.4 Dimension S – The supply chain

In this dimension, the customer/supplier relationships are established. Typical activities include selection of suppliers, on-boarding of supplier information in the enterprise database, entering supplier material descriptive information for items of supply and agreements on how to exchange various types of data related to that information, such as a typical interaction between Dimension A and Dimension B.

G.4.5 Dimension C – Product/production system design

For any company developing a product or production system, rigorous design standards are necessary to ensure the design meets relevant regulatory, safety, security, and quality measures. Following those standards and procedures yield repeatable results; changing standards and/or customer demands ensures that new products comply with the customer and qualitative requirements.

G.4.6 Dimension D – Production system

A consistent set of workflows in the production system, as depicted in Figure G.2, enables product designers to anticipate how the products get produced and tested. Material and manufacturing qualitative issues are identified in this dimension.

G.4.7 Dimension H – Operations management (shown within the production systems dimension D)

Figure G.2 depicts dimension “D” with elaboration of the aspects associated with dimension H, the hierarchy from “Enterprise Level 4” (operations management) to Manufacturing Operations Management Level 3 (MOM) to Manufacturing Execution Systems Level 2 (MES) to Control/Process Level 1 (work cell or unit cell); see IEC 62264-1 [3]. The flow of information, as contextualized and interpreted data, from Level 4 to Level 1 is shown only for the operations activities related to the external interactions issues for dimension D and for work in process activities (dimension I) that are related to actual material transformation into product. The expression $\mathcal{Q}(H)$ denotes those interactions in dimension H for aspects that are coherent in terms of the information associated with those interactions (see Annex C).

$\mathcal{Q}(H) = \{4.6, 4.7, 11.7, 11.8, 11.9, 11.10, 11.11, 11.12, 11.13, 11.14\}$

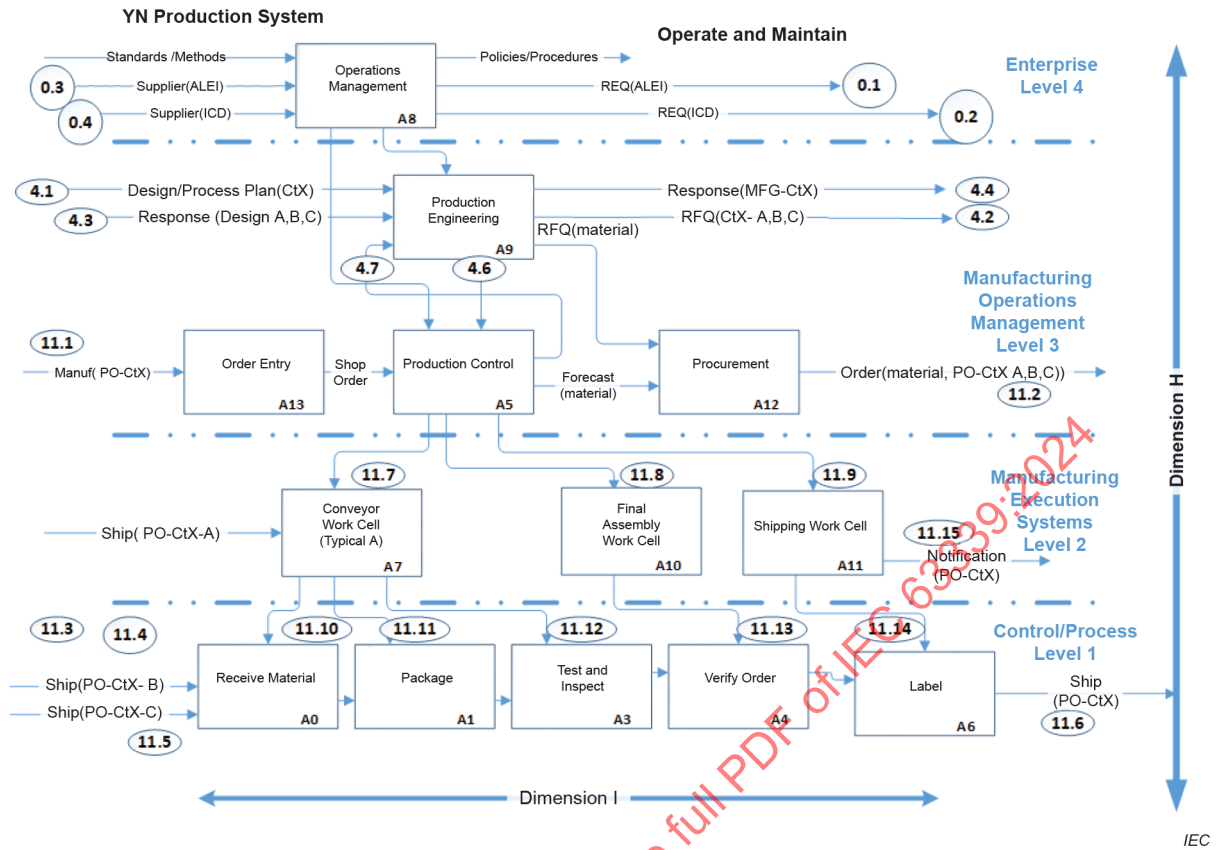


Figure G.2 – Production System Dimension D

NOTE The notation for Figure G.2 is IDEF0 [29]. Only suffixes for Dimension D are shown in Figure G.2, The other dimensions have corresponding interactions with suffixes.

G.4.8 Dimension I – Control/process level 1 (shown within Dimension D)

In Figure G.2, the control process flow of manufacturing execution systems level 2 with the control/process level 1 as dimension I, depicts the process flow as work in process models of real work at various stages of workflow. Dimension H is related to operations management dimension I (level 2 work cell controlling the control/process level flows).

The related aspects in this dimension are:

$$\mathcal{Q}(I) = \{11.3, 11.4, 11.5, A0, A1, A2, A3, A4, 11.6\}$$

G.5 Project flow and interaction

G.5.1 Product concept (Ctx) quotation

G.5.1.1 General concept flow

There are two different sequences for the project flow shown in Figure G.1. The first set of sequences establishes the product or production system concept requirements (by a set of specifications, or a model that is elaborated throughout the progression through the sequences). The second set of sequences details the interactions as the product is ordered and various interactions occur in the supply chain until the product is delivered. The specifications or the model contents are indicated by information flow or product flow or by information flow and product flow sent between the various entities in the supply chain. For simplification, each information flow is a tuple with a “message type” and a “content type.” In this example, “RFQ(Ct0)” is a “request for quote” message type with a “category 0.” “RFQ(Ctx)” indicates that “x” could be in range of “0” to “n” depending on the desired QCD for the product.

NOTE Interactions between the dimensions are listed according to the sequence numbers between the dimensions. Associated with each sequence number is information about the product or product model concept. The information is related to the specification of the product. The exception is sequence 0; sequence 0 is information that is exchanged when on-boarding and setting up new relationships with suppliers.

G.5.1.2 Request for quote flow details

The following list provides a short explanation of each identified RFQ-Ctx sequence relationship.

- Sequence 0-0 indicates initial customer / supplier relationships. As new customers and suppliers are added, preconditions are necessary to meet regulatory and compliance considerations. Sequence sub-activities are elaborated on a separate diagram.
- Sequence 1-2 has ABC-Retailer providing the initial product concept via "RFQ(Ctx)" to YN Manufacturing (sales engineering, for instance). YN Manufacturing has a number of departments that are forwarded the product concepts.
- Sequence 2-3 is YN Manufacturing sending the product concept (Ctx) to YN Product Design; this department is responsible for developing specifications (models) for the product concept (Ctx) and plans (initial plans for bill of materials and sourcing).
- Sequence 3-4 is YN product design sending plans and concept (Ctx) to YN Production System. YN Production System is responsible for identifying suppliers for material and components, developing initial concepts for testing and tooling for the product concepts and plans and coordinating with suppliers.
- Sequence 4-5, 4-6, 4-7 are component concepts and plans sent to suppliers as a result of various parallel development activities within YN Production Systems manufacturing planning.
- Response Sequence 5-4, 6-4, 7-4 are supplier responses with estimates for production and delivery of the product concept(Ctx) components to YN Production Systems.
- Response Sequence 4-3 is provision to YN Product Design of the YN Production System integration of estimates from suppliers with its own manufacturing estimates.
- Response Sequence 3-2 is sending to YN Manufacturing from YN Product Design a verification that the integrated information meets requirements.
- Response Sequence 2-1 is sending a product quote(CtX) to ABC-Retailer from YN Manufacturing and verification that the product design quote meets ABC-Retailer concept(Ctx) requirement and YN Manufacturing policies.

G.5.1.3 RFQ flow summary

The results of the product concept(Ctx) quotation process are a specification (model) that defines the characteristics and properties from the perspective of the ABC-Retailer's requirements for the product concept(Ctx). The product concept model (RFQ-Ctx) provided the basic template to be filled out with values determined by the quotation process with the resulting product model provided to ABC-Retailer as shown by ResponseQuote(product-Ctx) in Figure G.1.

G.5.2 Product order process

G.5.2.1 Purchase order flow details

The following list provides a short explanation of each identified purchase order (PO-Ctx) sequence relationship.

- Sequence 8-9 is customer submitting a purchase order (PO-Ctx), based on the product concept(Ctx) quote, with specifics for amount, timing, delivery based on terms of the quote. Sequence sub-activities are elaborated on a separate diagram.
- Sequence 9-10 is YN Manufacturing sending the PO(Ct0) to production system design for final design signoff and confirmation. Because Ct0 was selected on PO(Ct0), YN production system engineering specifies this production system configuration.
- Sequence 10-11 is YN Product System Design sending the final Production System Design to YN Production Systems.
- Sequence 11-12, 11-13, 11-14 are YN Production Systems sending PO(Ct0) and final design documents to Supplier A, B and C. In parallel with those interactions, orders are placed for any additional material. Tooling and procedures are finalized for integration of components into final assembly.
- Response Sequence 12-11, 13-11, 14-11 are suppliers providing component A, B and C that YN Production Systems integrates, assembles, and conducts final tests to quality control (QC) the product. Supplier A provides the Production Conveyor Line with the characteristics required to meet the Category X, QCD requirements. Suppliers B & C provide the materials to be packaged on the conveyor line.
- Response Sequence 11-10 is YN Production Systems notifying Product Design that Product has shipped.
- Response Sequence 11-9 is YN Production Systems shipping completed and packaged products to YN Manufacturing for customer facing shipping and notifications.
- Response Sequence 9-8 is YN Manufacturing sending completed product and associated information to customer. Any needed instruction and training manuals are provided to the customer.

G.5.2.2 Purchase order process summary

The product order process described in G.5.2.1 is for a one-off order. Subsequent orders or high volume orders would change the sequence. The important aspects in this interaction would also enable provisions for additional notifications, such as a change in delivery or problems in receiving material. On the product order side, some aspects such as colour changes, or options also can use a similar set of sequences.

G.5.3 New product concept(Ctx) quotation

ABC-Retailer has had good success with the new product delivery, however, that success is resulting in many new orders, which cannot be supplied with the low level of assembly using manual labour (see Figure F.4, right side). ABC-retailer requests a new Product Concept Category 6 to automate the conveyor assembly process as shown in F.5, right side. A new message "RFQ(Ct6)" is sent to YN Manufacturing. Additional messages, similar to those of G.5.1.2, are sent through-out the supply chain to accommodate the needed production capacity in preparation for new orders, which results in a new product order process sent to YN Manufacturing.

G.5.4 Interaction matrix

Table G.1 identifies interactions between the dimensions listed according to the sequence numbers between the dimensions. The purpose of the interaction matrix is to depict the product model information exchanged between the dimensions. The information is related to the specification of information about the product. The exception is sequence ①. Sequence ① is information that is exchanged when on-boarding and setting up new relationships with suppliers.

Table G.1 – Interaction matrix

Interaction Matrix								
	A	B	C	D	E	F	G	H
A		1.1-2.1						
A		8.1-9.1						
A		0.1,0.2						
B	2.4-1.2		2.2-3.1					
B	9.4-8.2		9.2-10.1					
B	0.3,0.4							
C		3.5-2.3		3.2-4.1				
C		10.4-9.5		3.3-4.1				
C				10.2-11.1				
D					0.1,0.2	0.1,0.2	0.1,0.2	
D			4.4-3.4		4.2-5.1	4.2-6.1	4.2-7.1	4.1-4.6
D			11.15-10.3		11.2-12.1	11.2-13.1	11.2-14.1	11.1-11.7,8,9
E				0.3,0.4				
E				5.2-4.3				
E				12.5-11.3				
F				0.3,0.4				
F				6.2-4.3				
F				13.5-11.4				
G				0.3,0.4				
G				7.2-4.3				
G				14.6-11.5				
H				4.7-4.4				

Bibliography

- [1] IEC 61360 (all parts), *Common Data Dictionary* (CDD – V2.0014.0017). Available from: <https://cdd.iec.ch/cdd/iec61360/iec61360.nsf>. Accessed 30 April, 2023
- [2] IEC 61512-1, *Batch control – Part 1: Models and terminology*
- [3] IEC 62264 (all parts), *Enterprise-control system integration*
- [4] IEC TS 62443-1-1:2009, *Industrial communication networks – Network and system security – Part 1-1: Terminology, concepts and models*
- [5] IEC 62559 (all parts), *Use case methodology*
- [6] IEC PAS 63088:2017, *Smart manufacturing – Reference architecture model industry 4.0 (RAMI4.0)*
- [7] IEC TR 63283-1, *Industrial-process measurement, control and automation – Smart manufacturing – Part 1: Terms and definitions*
- [8] ISO/IEC TR 63306-1:2020, *Smart manufacturing standards map (SM2) – Part 1: Framework*
- [9] IEC TR 63319, *A meta-modelling analysis approach to smart manufacturing reference models*
- [10] ISO/IEC 14977, *Information technology – Syntactic metalanguage – Extended BNF*
- [11] ISO/IEC 19501:2005, *Information technology – Open Distributed Processing – Unified Modeling Language (UML) Version 1.4.2*
- [12] ISO/IEC 21838 (all parts), *Information Technology – Top-Level Ontologies (TLO)*
- [13] ISO/IEC/IEEE 15939:2017, *Systems and software engineering – Measurement process*
- [14] ISO/IEC 15944-20:2015, *Information technology – Business operational view – Part 20: Linking business operational view to functional service view*
- [15] ISO/IEC/IEEE 42010:2022, *Systems and software engineering – Architecture description*
- [16] TMB/SMCC Stockholm meeting 2018-02-20, draft report ISO-TMBG-SMCC-N0116, clause 8.1, dated 2018-03-22
- [17] ISO 11354 (all parts), *Advanced automation technologies and their applications – Requirements for establishing manufacturing enterprise process interoperability*
- [18] ISO 15704:2019, *Enterprise modelling and architecture – Requirements for enterprise-referencing architectures and methodologies*
- [19] ISO TS 15926-12, *Industrial automation systems and integration – Integration of life-cycle data for process plants including oil and gas production facilities – Part 12: Life cycle integration ontology represented in Web Ontology Language (OWL)*
- [20] ISO 19439:2006, *Enterprise integration – Framework for enterprise modelling*

- [21] ISO 19440, *Enterprise modelling and architecture – Constructs for enterprise modelling*
- [22] ISO 19450:2024, *Automation systems and integration Object-process methodology*
- [23] ISO 22745 (all parts), *Industrial automation systems and integration – Open technical dictionaries and their application to master data*
- [24] ISO/TC 184/SC 5 N1111, *Object Process Methodology Study Group – Final Report 2011*
- [25] ISO 22549:2020, *Automation systems and integration – Assessment on convergence of informatization and industrialization for industrial enterprises – Part 1: Framework and reference model*
- [26] ISO/IEC 27036-1:2021, *Cybersecurity – Supplier relationships – Part 1: Overview and concepts*
- [27] ISO 27917:2017, *Carbon dioxide capture, transportation and geological storage – Vocabulary – Cross cutting terms*
- [28] SIS/TR 66:2023(en), *Industrial data and interoperability – Scandinavian Smart Industry Framework (SSIF)*
- [29] Integration Definition for Function Modeling (IDEF0), *Federal Information Processing Standards Publication FIPS PUB 183*, Department of Commerce – NIST, December 21, 1993
- [30] Object Management Group, *Unified Architecture Framework Version 1.2*, July 2022. Available from: <https://www.omg.org/spec/UAF> Accessed 30 April, 2023
- [31] American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Digital Engineering Integration Committee, *Digital Twin: Reference Model, Realizations and Recommendations*. January 2023
- [32] World Wide Web Consortium, *Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition)*, 26 November 2008. Available from: <http://www.w3.org/TR/2008/REC-xml-20081126/>. Accessed 30 April, 2023
- [33] World Wide Web Consortium, *Web Ontology Language*, 2012-12-11. Available from: <http://www.w3.org/standards/techs/html>. Accessed 30 April, 2023
- [34] Barrett, L. F., *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, pages 1- 23, 2017
- [35] Browning, T. R. *Design Structure Matrix Extensions and Innovations: A Survey and New Opportunities*, IEEE Transactions on Engineering Management, 63(1): 27-52, 2016
- [36] deMeer, J., Reussner, R. H., Koziolk, A. and Heinrich, R. *Semantics for I4.0 Smart Manufacturing*, INFORMATIK 2020, Lecture Notes in Informatics (LNI), Gesellschaft für Informatik, Bonn 2020 15
- [37] Enterprise Integration Lab, University of Toronto, Toronto, Canada. Available from: <http://ontology.eil.utoronto.ca/>. Accessed 30 April, 2023
- [38] Hall A. D., *Three-Dimensional Morphology of Systems Engineering*, In IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, Vol. SSC-5, No 2, April 1969

- [39] Industrial Internet Consortium, The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture, IIC:PUB:G1:V1.80:20170131, 2017
- [40] Kivela M., et.al. Multi-layer networks, Journal of Complex Networks (2014) 2, 203-2771, doi:10.1093/comnet/cnu06. Accessed 30 April, 2023
- [41] Kurtz, Cynthia F.; Snowden, David J. (2003). "The new dynamics of strategy: Sense-making in a complex and complicated world". IBM Systems Journal. 42 (3): 462-483. doi:10.1147/sj.423.0462
- [42] Lu, Y., Feng, S., Witherell, P. and Jones A., Reference Model and Standards Landscape for Additive Manufacturing Data, Systems Integration Division Engineering Laboratory, National Institute of Standards and Technology (NIST), 2022
- [43] Maier, J. F., Eckert, C. and Clarkson, J. P. Experimental Investigation of the Implications of Model Granularity for Design Process Simulation, Journal of Mechanical Design, Vol. 141, Issue 7, July 2019. Available from: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/data-quality-dimension> Accessed 30 April, 2023
- [44] Maier, J. F., Eckert, C. and Clarkson, P. J. Model granularity in engineering design – concepts and framework, Design Science, Vol. 3 Edition 1, Cambridge University Press. journals.cambridge.org/dsj DOI: 10.1017/dsj.2016.16. Accessed 30 April, 2023
- [45] Ogden, C. K. and Richards, I. A. The meaning of meaning, 1923, translation 1989, Harcourt, Brace, Jovanovich, Inc., Orlando, Florida 32887. Available from: <https://courses.media.mit.edu/2004spring/mas966/Ogden%20Richards%201923.pdf>. Accessed 30 April, 2023
- [46] Ritchey, T. (2006a) "Problem Structuring using Computer-Aided Morphological Analysis". Journal of the Operational Research Society, Special Issue on Problem Structuring Methods, (2006) 57, 792-801. Available for download in PDF at: <http://www.swemorph.com/pdf/psm.gma.pdf>. Accessed 30 April, 2023
- [47] Rodrigues, D., Silva, A. D. A study on machine learning techniques for the schema matching network problem. Journal of Brazil Computer Society 27, 14 (2021). <https://doi.org/10.1186/s13173-021-00119-5>. Accessed 30 April, 2023
- [48] Samarin, A. Smart Cities Reference Architecture, BIS-IEC International Conference on Smart City Standardization "Smart standards – Smarter Cities", Varanasi, India, 2018-12-10
- [49] Schoonenberg, W. C. and Farid, A. M. Modeling Smart Cities with Hetero-functional Graph Theory. In 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2017), Intelligent Industrial System Special Session, volume 1, pages 1–10, Banff, Canada, 2017
- [50] Semantic interoperability: challenges in the digital transformation age, IEC White paper Semantic Interoperability 2019. Available from: <https://webstore.iec.ch/publication/65942>
- [51] Simpson J. J. and Simpson M. J., Augmented Model-Exchange Isomorphism V1.1. Available from: https://www.researchgate.net/publication/332186969_Augmented_Model_Exchange_Isomorphism_v20. Accessed 30 April, 2023
- [52] Strnadl, C. F. The Mathematical Syntax of Architectures, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.03719>. Accessed 30 April, 2023

- [53] Sutanta E., Wardoyo, R., Mustofa K., Winarko E. Survey: Models and Prototypes of Schema Matching, *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 6(3), June 2016, DOI: 10.11591/ijece.v6i3.9789. Accessed 30 April, 2023
- [54] Tjeng, V., Xiao, K, and Tedrake R. Evaluating Robustness of Neural Networks with Mixed Integer Programming, *ICLR Conference 2019*, Massachusetts Institute of Technology {vtjeng, kaix, russt@mit.edu}
- [55] Tufte, Edward R (2001) [1983], *The Visual Display of Quantitative Information* (2nd ed.), Cheshire, CT: Graphics Press, ISBN 0-9613921-4-2
- [56] Ullman S. *Semantics: An Introduction to the Science of Meaning*. Blackwell paperbacks. Blackwell, 1972
- [57] Vitruvius, Pollio (transl. Morris Hicky Morgan, 1960), *The Ten Books on Architecture*. Courier Dover Publications. ISBN 0-486-20645-9
- [58] Warfield J. N., Dimensionality, *Proceedings 1986 IEEE International. Conference on Systems, Man & Cybernetics*, Vol 2, IEEE, N.Y. (1986) 1118-1121
- [59] Warfield, J. N. and Christakis, A. N., Dimensionality, *Systems Research* Vol. 4, No. 2, pp. 127 – 137, 1987. Available from <https://doi.org/10.1002/sres.3850040207>. Accessed 30 April, 2023
- [60] Zwicky, F., *Discovery, Invention, Research – Through the Morphological Approach*, Toronto: The Macmillian Company (1969)
- [61] <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/semantic-modeling>. Accessed 30 April, 2023
- [62] https://en.wikipedia.org/wiki/Reference_model. Accessed 30 April, 2023
- [63] https://en.wikipedia.org/wiki/Uniform_Resource_Identifier. Accessed 30 April, 2023
- [64] <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/data-quality-dimension>. Accessed 30 April, 2023
- [65] https://en.wikipedia.org/wiki/Semiotic_theory_of_Charles_Sanders_Peirce and <https://plato.stanford.edu/entries/peirce-semiotics/>. Accessed 30 April, 2023
- [66] <https://www.w3.org/Consortium/>. Accessed 30 April, 2023
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	104
INTRODUCTION.....	106
1 Domaine d'application	110
2 Références normatives	110
3 Termes, définitions, abréviations, acronymes et conventions	110
3.1 Termes et définitions	110
3.2 Abréviations et acronymes	115
3.3 Conventions.....	116
4 Conformité.....	117
4.1 Utilisation prévue	117
4.2 Conformité totale	117
4.3 Conformité partielle.....	117
4.3.1 Conformité aux exigences d'objet et de contexte	117
4.3.2 Conformité aux dimensions et à la cohérence	117
4.3.3 Conformité à la modélisation sémantique des aspects	117
4.3.4 Conformité aux facettes et aux cadres	117
5 L'URMSM dans les concepts de fabrication intelligente.....	118
6 Concepts de modèle de référence	119
6.1 Modélisation SM	119
6.2 Objectif de modélisation.....	120
6.3 Dimensions de modélisation	121
6.4 Cohérence des dimensions	122
6.5 Parties prenantes.....	123
6.6 Préoccupations	124
6.7 Cas d'utilisation	124
6.8 Points de vue et vues.....	125
6.9 Perspectives	125
6.9.1 Utilisation d'une perspective	125
6.9.2 Perspectives des parties prenantes	126
6.9.3 Cadre analytique	126
6.10 Aspects.....	126
6.11 Modélisation du cycle de vie	127
6.12 Modélisation sémantique de la SM	128
6.12.1 Vue d'ensemble de la modélisation sémantique	128
6.12.2 Formes de représentation sémantique	130
6.12.3 Granularité des modèles sémantiques	131
7 Dimensions de l'URMSM	132
7.1 Identification des interactions entre les aspects de la fabrication intelligente	132
7.2 Spécification des dimensions de modélisation.....	133
7.2.1 Ensembles d'aspects servant de dimensions de fabrication intelligente	133
7.2.2 Ensembles de dimensions servant de cadre analytique pour la fabrication intelligente.....	134
7.2.3 Ensembles de phases de cycle de vie servant de dimensions de fabrication intelligente.....	135
7.3 Utilisation d'un modèle sémantique pour le raisonnement analytique dans le cadre de la fabrication intelligente.....	136
7.4 Sélection des dimensions de facette en fonction des préoccupations	136

7.5	Identification des interactions de dimensions qui ont du sens.....	138
7.6	Cadres servant de visualisations d'interactions	139
8	Utilisation de l'URMSM	142
8.1	Utilité d'un modèle de référence pour la fabrication intelligente.....	142
8.2	Application de l'URMSM pour l'industrie.....	143
8.3	URMSM spécialisé.....	144
8.3.1	Utilisation spécifique de l'URMSM et règles pour les dérivés des SMRM	144
8.3.2	Manipulation de modèles de référence pour les adapter à un objectif	145
9	Cas d'utilisation de l'URMSM.....	147
9.1	Cas d'utilisation "analyse".....	147
9.1.1	Examen des interactions aux intersections d'aspects.....	147
9.1.2	Examen des interactions près des intersections d'aspects.....	147
9.1.3	Insertion de nouvelles capacités d'analyse	147
9.2	Cas d'utilisation "synthèse".....	148
9.2.1	Identification de la couverture nécessaire des interactions d'aspect	148
9.2.2	Activités de séquençement basées sur des dépendances.....	148
9.3	Simulation dans un SMRM	149
9.4	Cas d'utilisation "mise en œuvre".....	149
10	Famille de modèles de référence basée sur l'URMSM	151
10.1	Une base de dimensions essentielles de modélisation SM	151
10.2	Réorganisation des dimensions d'un cadre	152
10.3	Cadres complémentaires pour la même situation	153
10.4	Utilisation de plusieurs SMRM pour atteindre l'objectif	154
Annexe A (informative)	Domaines conceptuels de SM	155
A.1	Aspects de la production et des produits.....	155
A.2	Perspectives des parties prenantes concernant la production et les produits	155
A.3	Considérations relatives au cycle de vie	156
A.4	Modélisation de produits et de production à l'aide de modèles sémantiques	157
A.5	Modèles sémantiques	158
Annexe B (informative)	Base formelle de l'URMSM.....	160
B.1	Cadre de modélisation pour l'URMSM.....	160
B.1.1	Mise en garde contre le formalisme	160
B.1.2	Formalisme du cadre de modélisation.....	161
B.1.3	Utilisation d'un cadre URMSM	164
B.1.4	Modèles sémantiques de dimensions composées d'aspects	165
Annexe C (informative)	Positionnement de l'URMSM parmi les modèles de référence	168
C.1	Positionnement de l'URMSM parmi les modèles de référence	168
Annexe D (informative)	Métamodèle pour l'analyse du modèle de référence	169
D.1	Analyse du métamodèle	169
D.2	Utilisation d'un métamodèle	169
D.2.1	Généralités	169
D.2.2	Hypothèses, contraintes et recommandations	169
D.2.3	Concepts	170
Annexe E (informative)	Principes de modélisation sémantique.....	175
E.1	Modèle conceptuel de premier niveau	175
E.2	Modèle conceptuel sémiotique	178
E.3	Domaines d'un modèle de haut niveau.....	181

Annexe F (informative) Activité de modélisation d'un professionnel dans une utilisation systématique d'URMSM	183
F.1 Dérivation des cas d'utilisation de préoccupations, d'aspects et de perspectives	183
F.2 Relation entre les aspects sur une dimension et des contenus de modèle.....	186
F.2.1 Généralités	186
F.2.2 Implication de la dimension "cycle de vie"	186
F.2.3 Implication de la dimension "technologie intelligente"	187
F.2.4 Implication de la dimension "hiérarchie d'entreprise"	187
F.2.5 Implication de la dimension "niveau de capacité"	187
F.3 Concept d'approche par étape	188
F.3.1 Mise en garde contre le formalisme	188
F.3.2 Procédure pratique	188
Annexe G (informative) Cas d'utilisation: flux de valeurs.....	191
G.1 Vue d'ensemble	191
G.2 Projet d'un système de convoyeur	191
G.3 Cas d'utilisation de la SM.....	192
G.4 Dimensions	194
G.4.1 Informations en contexte	194
G.4.2 Cohérence des dimensions grâce aux modèles sémantiques	194
G.4.3 Interactions entre dimensions	195
G.4.4 Dimension S – Chaîne logistique	195
G.4.5 Dimension C – Conception de systèmes de production/produit	195
G.4.6 Dimension D – Système de production	195
G.4.7 Dimension H – Gestion des opérations (représentée dans la Dimension D des systèmes de production).....	195
G.4.8 Dimension I – Niveau 1* Contrôle/processus (présenté à l'intérieur de la Dimension D).....	196
G.5 Flux de projet et interaction.....	197
G.5.1 Offre de concept de produit (Ctx).....	197
G.5.2 Processus de commande de produit	198
G.5.3 Offre de nouveau concept de produit (Ctx)	199
G.5.4 Matrice d'interaction	199
Bibliographie.....	200
Figure 1 – Utilisation de l'URMSM.....	107
Figure 2 – Perspective des développeurs de normes de SM concernant la réutilisation d'une facette.....	137
Figure 3 – Étapes de projection pour les développeurs de normes.....	138
Figure 4 – Représentation d'un cadre unidimensionnel	140
Figure 5 – Représentation d'un cadre bidimensionnel	141
Figure 6 – Processus imbriqués (ovale central) et membres de l'utilisateur (à droite).....	141
Figure 7 – Pile d'abstraction de l'URMSM	144
Figure 8 – Exemple de modèle pour le cas d'utilisation 1	150
Figure 9 – Systèmes de fabrication intelligente diversifiés attendus des différentes parties prenantes	151
Figure 10 – Structure de base pour une famille de SMRM avec d'autres représentations 3D	154

Figure A.1 – Relations contextuelles de la SM	157
Figure A.2 – Triangle sémiotique avec 3 domaines sémiotiques et 3 morphismes (relations entre paires d'artefacts de domaine sémiotique).....	158
Figure A.3 – Modèle de concept de catalogue de normes de produits	159
Figure B.1 – Dimensions d'un scénario de modèle sémantique	166
Figure B.2 – Scénario de modèle sémantique sous forme de graphe de relations	166
Figure C.1 – Exemple de modèles de référence en cascade	168
Figure D.1 – Métamodèle pour un SMRM.....	174
Figure E.1 – Modèle conceptuel de haut niveau sous forme de triangle sémiotique.....	175
Figure E.2 – Ontologie des connaissances (pyramide de la connaissance) expliquée par les trois angles de couleur du triangle sémiotique (Concept Symbole Phénomène)	176
Figure E.3 – Méthodologie/théorie de données I4.0: aplatissage de la pyramide de la connaissance/de données.....	177
Figure E.4 – Relations sémiotiques cycliques (morphismes)	178
Figure E.5 – Consolidation de premier niveau des interactions (I), structure de contrôle de l'Internet industriel des objets (IIoT, Industrial Internet of Things) incluse	179
Figure E.6 – Composition des connaissances sur la SM provenant de différents domaines de SM	180
Figure E.7 – Modèle de concept de premier niveau pour un domaine de modèle.....	181
Figure E.8 – Modèle de concept d'aspect naturel – dynamique	181
Figure F.1 – Utilisation de l'URMSM pour une activité de modélisation des professionnels de la SM.....	183
Figure F.2 – Étapes de projection pour les professionnels de la SM.....	185
Figure F.3 – Relation entre les aspects sur une dimension et des contenus de modèle.....	186
Figure F.4 – Problème potentiel de l'activité de modélisation par les professionnels de la SM	188
Figure F.5 – Approche par étape.....	190
Figure G.1 – Interactions au sein d'un modèle de produit.....	193
Figure G.2 – Dimension D: système de production.....	196
Tableau B.1 – Scénario de modèle sémantique.....	165
Tableau B.2 – Scénario de modèle sémantique sous forme de schéma à N-carrés	166
Tableau B.3 – Scénario du modèle sémantique Intersections Directes	167
Tableau B.4 – Scénario du modèle sémantique Interactions Indirectes	167
Tableau G.1 – Matrice d'interaction	199

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MODÈLE DE RÉFÉRENCE UNIFIÉ POUR LA FABRICATION INTELLIGENTE

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique 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. À 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'IEC attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de propriété revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'IEC n'avait pas reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être nécessaires à sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse <https://patents.iec.ch>. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets.

L'IEC 63339 a été établie par le comité d'études 65 de l'IEC: Mesure, commande et automation dans les processus industriels, en coopération avec le comité technique ISO/TC 184: Systèmes d'automatisation et intégration. Il s'agit d'une Norme internationale.

Elle est publiée comme norme double logo.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

Projet	Rapport de vote
65/1020/FDIS	65/1094/RVD

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

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/publications.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site Web de l'IEC sous webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé, ou
- révisé.

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de ce document 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 63339:2024

INTRODUCTION

Le terme "fabrication" fait référence à un éventail d'activités humaines, de l'artisanat à la haute technologie, et s'applique généralement à la production industrielle, où les matières premières et les pièces sont transformées en produits finis à petite ou grande échelle par une série de processus interconnectés. La fabrication intelligente (SM) est une caractéristique émergente de la fabrication, obtenue par les technologies numériques et qui a été progressivement mise en place durant la transformation numérique, combinant diversité et uniformité et offrant une valeur ajoutée continue permise par un ensemble très compliqué de processus interagissant sur différentes échelles de temps. Dans le paysage manufacturier actuel, la fabrication n'est plus définie comme un ensemble de processus en série, mais plutôt comme un ensemble hautement interconnecté de processus distribués qui sont capables de coopérer sur différentes échelles de temps. Un ensemble de processus de surveillance assure la coordination de ces processus distribués en utilisant des liens qui permettent une réponse dynamique à l'évolution des conditions de la demande, de l'offre, de l'environnement, de l'énergie et d'autres événements probabilistes d'origine humaine ou naturelle. Comme ces événements probabilistes ne sont pas connus avant de se produire, ils sont souvent disruptifs et entraînent l'évolution des conditions.

L'objectif de la fabrication intelligente est de s'adapter à ces événements disruptifs, tout en soutenant l'introduction de nouvelles technologies et méthodes de manière coordonnée entre les différents clients, fournisseurs et parties prenantes, à différents stades de la chaîne de valeur.

S'appuyant sur les connaissances et résultats communs identifiés dans l'IEC TR 63319 [9]¹ intitulée "A meta-modelling analysis approach to smart manufacturing reference models", comme décrit à la Figure 1, le présent document spécifie le modèle de référence unifié pour la fabrication intelligente (URMSM) en vue de créer des modèles de référence de domaine et d'application spécifiques aux initiatives de fabrication intelligente, en précisant la structure et la terminologie nécessaires pour exprimer de tels modèles. L'URMSM s'applique aux nombreux domaines et applications qui existent au sein d'une entreprise de fabrication.

Les modèles de référence pour la fabrication intelligente (SMRM), qui sont conformes aux exigences du présent document, offrent aux développeurs de normes et aux professionnels de la fabrication intelligente de meilleures possibilités de mettre en œuvre des modèles de systèmes de production et de produits qui tirent pleinement parti des innovations technologiques. Ces innovations se produisent pendant:

- l'analyse et la synthèse à l'aide de modèles de fabrication;
- l'application de nouveaux matériaux, processus et installations pour la fabrication;
- la compréhension de l'émergence de concepts de jumeaux numériques et d'autres technologies de fabrication intelligente.

L'URMSM n'est pas un modèle ou une visualisation de modèle. Il s'agit de la spécification pour une famille de modèles de référence qui partagent des propriétés structurelles et comportementales destinées à promouvoir l'interopérabilité.

NOTE Le paragraphe 8.2 fournit plus d'informations concernant les relations entre les modèles et les relations de dérivation.

L'URMSM rassemble des concepts issus de travaux existants, aussi bien des normes que des pratiques, afin de couvrir la diversité des modèles de référence existants, l'adaptation des modèles de référence existants à de nouvelles utilisations et l'émergence de nouveaux modèles de référence, qui tirent tous parti de l'évolution des technologies de fabrication.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

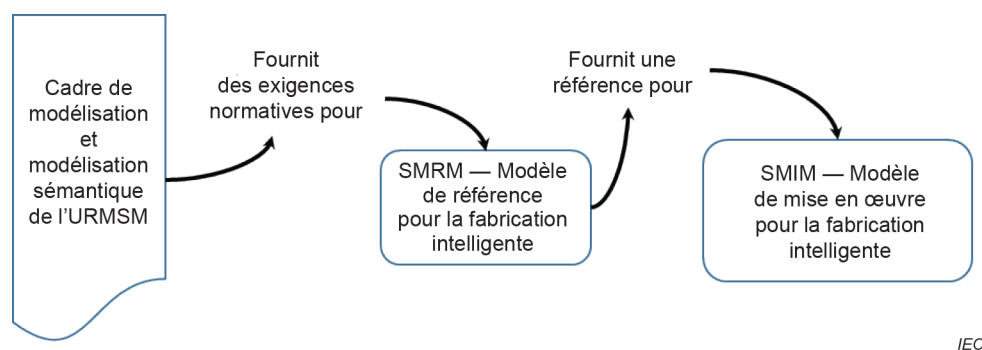


Figure 1 – Utilisation de l'URMSM

L'approche basée sur un modèle telle qu'adoptée par l'URMSM comporte deux composantes structurelles majeures. La première est un cadre de modélisation permettant de prendre en charge divers assemblages d'éléments de fabrication dans des configurations conceptuelles jugées pertinentes pour les domaines des entreprises de fabrication. La seconde est la conceptualisation de modèles sémantiques qui se trouvent dans le cadre de modélisation. Une terminologie URMSM concise couvre à la fois le cadre de modélisation et les modèles sémantiques conceptuels.

Étant donné que la fabrication intelligente est essentiellement une conception humaine de technologies et de pratiques de fabrication améliorées, les différences d'interprétation de ce concept peuvent conduire certains professionnels à simplifier à l'extrême la nature compliquée des interactions entre les perspectives et les propriétés dans les systèmes de fabrication actuels. Il est difficile de concrétiser la notion d'"intelligence" pour la fabrication, car depuis plus de 200 ans les développeurs et les professionnels utilisent la fabrication de plus en plus intelligemment.

En ce qui concerne les travaux de l'IEC dans un domaine de complexité similaire, l'auteur de la Référence [48] résume l'"intelligence" dans le domaine des villes intelligentes comme suit:

L'intelligence est une caractéristique émergente d'un système

- obtenue par des technologies numériques;
- dont l'architecture et la conception permettent explicitement de réduire la complexité;
- progressivement mise en place durant la transformation numérique;
- offrant une valeur ajoutée continue;
- combinant diversité et uniformité;
- coordonnant toutes les parties prenantes et assurant leur coopération.

Compte tenu de cette caractérisation, l'URMSM fournit les moyens de créer des modèles de référence pour la fabrication intelligente qui permettent l'émergence de solutions techniques davantage orientées vers le numérique afin de dégager de la valeur ajoutée des opérations de fabrication. Il en résulte une amélioration des performances du fait de l'utilisation intégrée et intelligente des processus et des ressources dans les sphères cybernétique, physique et humaine pour créer et fournir des produits et des services qui collaborent également avec d'autres domaines au sein des chaînes de valeur des entreprises [16].

Le présent document identifie un ensemble de critères permettant d'organiser les aspects du domaine de la fabrication intelligente en tant que modèles de référence. Les relations importantes entre les éléments de fabrication permettent un examen utile et la dérivation de conceptions pratiques afin de remplir un objectif défini, mais aussi de maintenir et d'améliorer le système qui en résulte au moyen de méthodes d'analyse et de synthèse.

L'URMSM donne un aperçu de la modélisation des aspects des éléments de fabrication à prendre en compte lors du développement de nouveaux éléments. Les méthodes de soutien intelligent pour mener à bien ce développement ou cette modification peuvent exiger une évolution de la pratique existante vers une approche plus unifiée basée sur un modèle.

Le présent document peut être utilisé pour appuyer les processus de développement de la fabrication intelligente et pour assurer la cohérence et la compatibilité pendant le développement des normes.

Le présent document identifie les moyens d'appliquer les aspects de la fabrication et la perspicacité essentielle au développement d'un modèle de fabrication intelligente pour une entreprise industrielle particulière.

L'URMSM va au-delà des fonctionnalités de représentation des éléments de fabrication. L'idée est de permettre l'examen des interactions entre ces éléments en utilisant des modèles afin de traiter les difficultés qui surviennent au cours des initiatives de fabrication intelligente.

Les attentes concernant le résultat d'un URMSM satisfaisant sont les suivantes:

- permettre l'examen de valeur dans un réseau de création de valeur;
- permettre l'utilisation d'un ensemble de bibliothèques appropriées (par exemple, de cas d'utilisation, de définitions d'interface, de modèles pour la sémantique, d'informations et de données, et de Normes internationales) en tant que vues modélisées à des fins de modélisation pour des situations particulières de fabrication intelligente;
- permettre la représentation sous la forme d'un espace multidimensionnel composé de divers ensembles d'aspects pour répondre à des objectifs de modélisation particuliers (par exemple, les aspects de la production, les aspects d'un produit, les aspects de la technologie intelligente et leurs relations au cours de leurs cycles de vie respectifs);
- assurer que les informations sont structurées de manière cohérente en utilisant des normes pour les informations, les données et les langages de modélisation, sans ambiguïté de sens, et en appliquant des modèles et des techniques sémantiques;
- permettre une utilisation efficace pour la création de modèles de fabrication intelligente personnalisés qui répondent aux préoccupations particulières d'une partie prenante.

L'URMSM prend en charge les trois modalités d'interopération (unifiée, intégrée et fédérée) qui peuvent coexister dans un cadre de modélisation, malgré des degrés variables d'efficacité et d'efficience (voir ISO 11354 [17]). Une compréhension formelle des cadres de modélisation permet une utilisation plus efficace et efficiente de ces cadres.

L'Article 4 spécifie les degrés de conformité à l'URMSM en fonction du respect des exigences et des recommandations dans leur intégralité (conformité totale) ou pour des paragraphes particuliers (conformité partielle).

L'Article 5 présente les aspects de la fabrication généralement associés à la fabrication intelligente.

L'Article 6 présente les concepts de modélisation essentiels à la construction de modèles de référence appropriés dans le domaine de la fabrication intelligente.

L'Article 7 établit les critères d'examen et de dérivation pour l'interopération des aspects de la fabrication.

L'Article 8 présente les moyens d'utiliser l'URMSM pour créer des modèles de référence spécifiques à un objectif.

L'Article 9 présente des cas d'utilisation pour l'URMSM et une progression des marqueurs de capacité qui indiquent la maturité de l'application de l'URMSM.

L'Article 10 traite des moyens de manipuler et d'utiliser les cadres de référence pour une analyse et une synthèse étendues des systèmes utilisés dans la fabrication intelligente.

L'Annexe A présente les domaines conceptuels de la fabrication intelligente.

L'Annexe B fournit une base formelle pour l'approche URMSM, y compris un cadre de modélisation pour l'URMSM.

L'Annexe C fournit un exemple de figure de modèles de référence en cascade.

L'Annexe D fournit un résumé du métamodèle destiné à l'analyse des modèles de référence, issu de l'IEC TR 63319 [9].

L'Annexe E fournit une introduction aux principes qui sous-tendent la modélisation sémantique.

L'Annexe F fournit l'activité de modélisation d'un professionnel dans une utilisation systématique d'URMSM.

L'Annexe G fournit un exemple étendu d'URMSM appliqué à un scénario de fabrication multidimensionnel.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 63339:2024

MODÈLE DE RÉFÉRENCE UNIFIÉ POUR LA FABRICATION INTELLIGENTE

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale spécifie le modèle de référence unifié pour la fabrication intelligente (URMSM) à l'aide d'une terminologie et d'une structure données, et établit des critères pour la création de modèles de référence, en tant que spécialisations, qui prennent en charge la fabrication intelligente. La terminologie et la structure comprennent un ensemble d'éléments de modélisation communs, leurs associations et des critères de conformité. Ces éléments de modélisation communs traitent des aspects et des perspectives des produits et de la production, ainsi que des considérations relatives à leur cycle de vie.

L'URMSM permet de créer de multiples modèles en partant d'un modèle de référence qui est suffisamment développé pour comprendre les relations significatives entre les entités impliquées dans la fabrication intelligente (SM) et pour développer des normes et d'autres spécifications.

Les spécifications relatives à l'URMSM dans le présent document permettent des spécialisations cohérentes et compatibles pour les aspects pertinents des systèmes de fabrication composés d'équipements, de produits et de services dans le domaine de la fabrication. Les dispositions du présent document s'appliquent à la création d'un nouveau modèle de référence pour la fabrication intelligente (SMRM) ou à l'affinement des capacités d'un SMRM existant (par exemple, l'amélioration des capacités d'analyse des opportunités et de synthèse des avancées technologiques, et l'amélioration de l'interopérabilité des systèmes nouveaux et existants).

Le présent document n'a pas pour but de prescrire des considérations d'interopérabilité ou des schémas de données de modèles. La normalisation du contenu relatif aux modèles fera l'objet d'autres normes et textes spécifiques à ces domaines de modèles.

2 Références normatives

Le présent document ne contient aucune référence normative.

3 Termes, définitions, abréviations, acronymes et conventions

3.1 Termes et définitions

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

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <https://www.electropedia.org/>;
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp/ui>.

3.1.1

aspect

désignation étiquetée d'un ensemble de concepts dans un contexte particulier

EXEMPLE fonctionnel, structurel, informatif, de sécurité, de disponibilité, client.

Note 1 à l'article: Un aspect est souvent exprimé comme une vue sur un ou plusieurs modèles dans le cadre d'un système de fabrication.

Note 2 à l'article: Les éléments d'un aspect peuvent avoir des descripteurs fonctionnels, non fonctionnels ou d'autres types de descripteurs.

Note 3 à l'article: L'identification d'un aspect est souvent le résultat de connaissances, d'expériences et de pratiques antérieures dans le domaine auquel l'aspect s'applique.

3.1.2

interaction entre les aspects

relation entre deux *aspects* (3.1.1) ou plus dans laquelle un aspect influence ou est influencé par la présence d'un autre

Note 1 à l'article: L'influence comprend, sans toutefois s'y limiter, la dépendance et le contrôle.

3.1.3

métier

série de processus dont chacun a un objet clairement défini impliquant une ou plusieurs personnes, réalisés au moyen d'un échange d'informations visant certains objectifs convenus d'un commun accord et se déroulant sur une période donnée

[SOURCE: ISO/IEC 15944-20:2015, 2.2]

3.1.4

complexe

<contexte>

situation de décision caractérisée par des variables de décision non ordonnées et des catégories, critères et dépendances mal définis

3.1.5

compliqué

<contexte>

situation de décision caractérisée par des variables de décision énumérées et des catégories, critères et dépendances bien définis

3.1.6

préoccupation

question pertinente ou importante pour une *partie prenante* (3.1.20) concernant un système de fabrication ou un élément de celui-ci

Note 1 à l'article: Les préoccupations exprimées sont utiles lorsqu'elles sont pertinentes par rapport à l'objectif poursuivi par l'effort de modélisation et qu'elles font référence à des difficultés, problèmes ou exigences spécifiques plutôt que catégoriques.

Note 2 à l'article: L'expression d'une préoccupation prend de nombreuses formes, notamment: des questions sur les caractéristiques ou fonctionnalités, des mots-clés pour de nombreux sujets connexes, ou encore les attributs de qualité attendus du système de fabrication ou de ses produits et services.

[SOURCE: ISO/IEC/IEEE 42010:2022, 3.10, modifié – ajout de "concernant un système de fabrication ou un élément de celui-ci"]

3.1.7

dimension

ensemble cohérent d'*aspects* (3.1.1) pertinents pour un *domaine de fabrication* (3.1.12)

Note 1 à l'article: L'exigence de cohérence de la dimension peut aboutir à un ensemble d'aspects non ordonnés, partiellement ordonnés, totalement ordonnés, liés d'une autre manière, ou encore non ordonnés de quelque façon que ce soit (voir 6.4 sur la cohérence dimensionnelle pour plus d'informations).

3.1.8

élément

constituant tangible ou intangible d'un système de fabrication ou d'un produit

Note 1 à l'article: Un constituant peut aller d'atomes de matière première, de constructions logiques ou d'éléments d'information à des produits finis, des logiciels et des services, en passant par des modèles ou équipements de fabrication, des usines entières, des chaînes logistiques et des réseaux de valeur ajoutée.

Note 2 à l'article: Bien que le terme tel que défini ait un sens large, la désignation d'un sens spécifique pour un élément de fabrication ou un produit fabriqué inclut un adjectif afin de limiter le sens approprié à cet élément de fabrication particulier.

3.1.9

facette

cadre composé d'une ou de plusieurs dimensions (3.1.7)

Note 1 à l'article: Les règles de composition de dimensions cohérentes distinguent les facettes des autres cadres de modélisation.

Note 2 à l'article: Les endroits où les aspects des dimensions se croisent sont des conteneurs pour les modèles représentant chacun des aspects qui se croisent.

3.1.10

granularité

niveau de détail ou de spécificité

Note 1 à l'article: Le niveau possible va de grossier à fin.

3.1.11

cycle de vie

ensemble de phases distinctes et d'étapes à l'intérieur de phases qu'une entité traverse depuis sa création jusqu'à ce qu'elle cesse d'exister

Note 1 à l'article: Les phases d'une entreprise imbriquée peuvent être des étapes du cycle de vie de l'entreprise qui la contient.

Note 2 à l'article: L'utilisation des termes "phase" et "étape" n'implique pas un ordre temporel prescrit des types d'activité. L'expression "historique de vie" désigne l'occurrence des activités.

[SOURCE: ISO 15704:2019, 3.12, modifié – ajout de la Note 2 à l'article]

3.1.12

fabrication

tout ou partie des activités de conception, d'approvisionnement, de construction, de mise en service, de déploiement, de tri, d'essais, de production, de stockage, d'étiquetage, d'emballage ou de distribution de produits et de systèmes de production

3.1.13

domaine de fabrication

partie d'un *métier* (3.1.3) traitant de la *fabrication* (3.1.11) de produits

3.1.14**métamodèle**

description d'éléments de modélisation à utiliser pour construire des *modèles* (3.1.15) relatifs à un domaine

Note 1 à l'article: Un métamodèle se rapporte toujours au modèle dans lequel ses éléments de modélisation apparaissent.

[SOURCE: ISO 19440:2020, 3.47]

3.1.15**modèle**

représentation simplifiée et ciblée de certaines entités, de leurs caractéristiques et de leurs relations, soit a) en utilisant un formalisme, soit b) en utilisant un paradigme, une approche ou une technique établis ou ad hoc de modélisation

Note 1 à l'article: Un modèle ad hoc est plus difficile à mettre en œuvre en utilisant une technique de conception établie.

Note 2 à l'article: Un modèle peut être un sous-ensemble d'un modèle plus large.

[SOURCE: ISO 15704:2019, 3.15, modifié – ajout de "simplifiée et ciblée" et de "et de leurs relations"]

3.1.16**type de modèle**

catégorie de *modèle* (3.1.15) se distinguant par ses caractéristiques clés et ses conventions de modélisation

EXEMPLE Modèles fonctionnels, modèles d'activité, modèles structurels, modèles de cas d'utilisation, modèles géopolitiques, modèles analytiques et modèles économiques.

[SOURCE: ISO/IEC/IEEE 42010:2022, 3.15]

3.1.17**perspective**

façon de penser à une entité d'intérêt, en particulier en ce qui concerne les préoccupations

Note 1 à l'article: La façon dont une personne pense à une entité peut être influencée par ses croyances, sa formation ou son expérience, etc.

[SOURCE: ISO/IEC/IEEE 42010:2022, 3.18, modifié – suppression de "partie prenante" et de l'EXEMPLE]

3.1.18**architecture de référence**

ensemble d'éléments architecturaux communs pour un domaine particulier et leurs relations générales utilisables pour en déduire une architecture spécifique afin de remplir un objectif défini dans ce domaine

3.1.19**modèle de référence**

description abstraite ou ontologie spécifique d'un domaine constituée d'un ensemble interconnecté de concepts clairement définis produits par un expert ou un groupe d'experts afin de permettre une communication claire

Note 1 à l'article: Un modèle de référence peut représenter les parties constitutives de toute idée cohérente, allant des fonctions métier jusqu'aux composants d'un système, tant qu'il représente un ensemble complet. Ce cadre de référence peut ensuite être utilisé pour communiquer clairement des idées entre les membres d'une même communauté.

[SOURCE: ISO 22549-1:2020, 3.11, modifié – remplacement de "cadre" par "description"]

3.1.20

modèle sémantique

type de modèle (3.1.16) qui transmet une signification par rapport aux éléments du *modèle* (3.1.15) ou au modèle dans son ensemble

3.1.21

partie prenante

rôle, position, individu, organisation ou catégories de ceux-ci, ayant un intérêt, un droit ou une part dans une entité

EXEMPLE Utilisateurs finaux, exploitants, acquéreurs, propriétaires, fournisseurs, architectes, promoteurs, constructeurs, responsables de la maintenance, régulateurs, contribuables, organismes de certification et marchés.

Note 1 à l'article: Un modélisateur, c'est-à-dire une personne qui conçoit, construit et utilise des modèles de différents types dans le cadre de son programme de travail habituel, est souvent considéré comme une partie prenante du projet ou du produit dans lequel il s'engage.

[SOURCE: ISO/IEC/IEEE 42010:2022, 3.17, modifié – remplacement de "entité d'intérêt (3.12)" par "entité" et ajout de la Note 1 à l'article]

3.1.22

chaîne logistique

ensemble d'organisations disposant d'un socle de ressources et de processus liés, dont chacun agit en tant qu'acquéreur, fournisseur ou les deux, pour former des relations successives de fournisseur établies lors de la conclusion d'un bon de commande, d'un accord ou de tout autre accord formel d'approvisionnement

[SOURCE: ISO/IEC 27036-1:2021, 3.10]

3.1.23

système

combinaison d'éléments agissant ensemble, organisés de façon à atteindre un ou plusieurs buts définis

[SOURCE: ISO/IEC/IEEE 15939:2017, 3.38]

3.1.24

cas d'utilisation

technique de saisie d'exigences fonctionnelles potentielles

Note 1 à l'article: Cette technique utilise un ou plusieurs scénarios pour expliquer comment le système interagit avec l'utilisateur final ou un autre système pour atteindre un ou plusieurs objectifs spécifiques.

Note 2 à l'article: En général, les cas d'utilisation traitent le système comme une boîte noire et les interactions avec le système, y compris les réponses du système, sont perçues de l'extérieur du système. Les cas d'utilisation sont populaires parce qu'ils simplifient la description des exigences et évitent d'avoir à formuler des hypothèses sur la façon dont la fonctionnalité sera accomplie.

[SOURCE: IEC TS 62443-1-1:2009, 3.2.132, modifié – déplacement d'une partie de la définition au Note 1 à l'article]

3.1.25

chaîne de valeur

séquence complète d'activités ou d'acteurs qui fournissent ou reçoivent de la valeur sous forme de produits ou de services

[SOURCE: ISO 27917:2017, 3.1.4]

3.1.26**vue**

produit d'un travail exprimant une perception ou représentation sélective d'un *modèle* (3.1.15) accentuant certaines caractéristiques ou fonctionnalités particulières et négligeant les autres

[SOURCE: ISO 19439:2006, 3.25, modifié – ajout de "produit d'un travail exprimant une" avant "perception", remplacement de "modèle d'entreprise accentuant" par "modèle (3.1.15) accentuant", et remplacement de "certains aspects particuliers" par "certaines caractéristiques ou fonctionnalités particulières".]

3.1.27**point de vue**

identification d'un ou de plusieurs types de *modèles* (3.1.15) utiles pour traiter un ensemble de *préoccupations* (3.1.6) associées émanant de *parties prenantes* (3.1.21)

Note 1 à l'article: Lorsque l'expression "point de vue" est utilisée sans qualificatif, elle fait référence au cas général. Lorsqu'elle est utilisée avec un qualificatif, le point de vue s'applique à un ensemble spécifique de préoccupations (par exemple, le point de vue opérationnel, le point de vue des capacités, le point de vue des services).

Note 2 à l'article: Un point de vue identifie un ou plusieurs modèles nécessaires et suffisants pour exprimer une ou plusieurs vues de modèle d'entreprise qui traitent de l'ensemble spécifique de préoccupations associées de certaines parties prenantes.

[SOURCE: ISO 15704:2019, 3.24]

3.2 Abréviations et acronymes

TAD	Type abstrait de données
ALEI	Authoritative Legal Entity Identifier (Identifiant d'entité juridique faisant autorité)
FA	Fabrication additive
CAO	Conception assistée par ordinateur
EBNF	Extended Backus-Naur Form (Notation de forme étendue Backus-Naur)
EDI	Echange de données informatisé
IDEF0	Integration DEfinition for Function modelling (modélisation IDEF0)
IIC	Industry IoT Consortium
IdO	Internet des objets
GERA	Generic Enterprise Reference Architecture (Architecture de référence d'entreprise généralisée)
GUI	Graphical user interface (Interface utilisateur graphique)
TI	Technologies de l'information
IVRA	Industrial Value chain Reference Architecture (Architecture de référence de la chaîne de valeur industrielle)
KGI	Key Goal Indicator (Indicateur d'objectif clé)
KPI	Key Performance Indicator (Indicateur de performance clé)
MES	Manufacturing Execution System (Système d'exécution de fabrication)
ML	Machine Learning (Apprentissage automatique)
MOM	Manufacturing Operation Management (Gestion des opérations de fabrication)
NC	Numerical Control (Commande numérique)
NIST	National Institute of Standards and Technology (Institut national des normes et des technologies)
TLN	Traitement du langage naturel
OMG	Object Management Group (Groupe de gestion d'objets)
TO	Technologie opérationnelle

OWL	Web Ontology Language (Langage d'ontologies web)
CQ	Contrôle qualité
QCL	Qualité, coût, livraison
RA	Resource Authority (Autorité des ressources)
RAMI4.0	Reference Architecture Model Industrie 4.0
RDFS	Resource Description Framework Schema (Schéma RDFS)
SM	Smart Manufacturing (Fabrication intelligente)
SM2	Smart Manufacturing Standards Map (Cartographie des normes [et standards] pour la fabrication intelligente)
PME	Petites et moyennes entreprises
SMIM	Smart Manufacturing Implementation Model (Modèle de mise en œuvre pour la fabrication intelligente)
SMRM	Smart Manufacturing Reference Model (Modèle de référence pour la fabrication intelligente)
SMU	Smart Manufacturing Units (Unités de fabrication intelligente (IVRA))
SSIF	Scandinavian Smart Industry Framework (Cadre de l'industrie intelligente scandinave)
SysML	System Modelling Language (Langage de modélisation des systèmes)
UML	Unified Modelling Language (Langage de modélisation unifié)
URI	Uniform Resource Identifier (Identificateur de ressource uniforme)
URL	Uniform Resource Locator (Adresse URL)
URMSM	Unified Reference Model for Smart Manufacturing (Modèle de référence unifié pour la fabrication intelligente)
UUID	Universally Unique Identifier (Identifiant unique universel)
XML	eXtensible Markup Language (Langage de balisage extensible)

3.3 Conventions

L'expression "un ou plusieurs" est interprétée comme "un ou plus d'un" et nécessite, de ce fait, une forme de verbe pluriel en français.

Les abréviations figurant en 3.2 désignent aussi bien le singulier que le pluriel.

L'Annexe A et l'Annexe E utilisent des couleurs dans les figures pour désigner des angles distincts du triangle sémiotique. Le bleu indique l'angle Concept, le vert l'angle Symbole et le gris l'angle Phénomène aux Figure A.2, Figure E.1, Figure E.2, Figure E.4, Figure E.5, Figure E.6, Figure E.7 et Figure E.8.

L'Annexe B comprend un ensemble de symboles qui utilisent la police **AR HERMANN** pour les caractères minuscules gras accompagnés d'indices et d'exposants, et la police *French Script NS* pour les caractères majuscules gras servant d'éléments d'expressions logiques pour caractériser la base du cadre de modélisation pour l'URMSM.

L'Annexe D comprend un ensemble de symboles constitués d'un "*" suivi d'un mot ou d'une phrase en italique (par exemple, "**aspect*" qui désigne un concept au sein du métamodèle extrait de l'IEC TR 63319 [9]).

4 Conformité

4.1 Utilisation prévue

Les exigences spécifiées pour l'URMSM dans le présent document se rapportent toujours à un SMRM (ou SMIM). L'utilisateur du présent document est une personne qui applique les exigences déclarées de l'URMSM pour produire un SMRM ou peut-être un SMIM. La conformité au présent document se produit uniquement en appliquant les exigences de l'URMSM à un SMRM ou un SMIM. Il n'y a qu'un seul URMSM, tel que spécifié dans le présent document. Aucun autre URMSM ne peut exister.

Les exigences du présent document sont marquées par l'utilisation du verbe "devoir" conjugué, c'est-à-dire "doit" ou "doivent". Les recommandations sont marquées par l'utilisation de l'expression "il convient". Les permissions sont marquées par l'utilisation du verbe "pouvoir" conjugué, c'est-à-dire "peut" ou "peuvent".

Le présent document est conçu de sorte qu'aucune "personnalisation" ne soit exigée ou autorisée pour son utilisation lors de l'établissement de déclarations de conformité.

4.2 Conformité totale

Un SMRM peut revendiquer la conformité totale à l'URMSM lorsque le SMRM démontre que la spécification du SMRM est conforme aux exigences de l'URMSM figurant aux Articles 6, 7, 8, 9 et 10.

Le présent document identifie également quatre situations dans lesquelles une demande de conformité partielle aux dispositions de l'URMSM est possible.

4.3 Conformité partielle

4.3.1 Conformité aux exigences d'objet et de contexte

Lorsque la conformité est demandée pour les besoins et le contexte d'un SMRM, la demande doit démontrer que la spécification du SMRM satisfait aux exigences des paragraphes 6.2, 6.9, 7.1, 8 et 9.1.1.

4.3.2 Conformité aux dimensions et à la cohérence

Lorsque la conformité est demandée pour les dimensions et la cohérence d'un SMRM, la demande doit démontrer que la spécification du SMRM satisfait aux exigences des paragraphes 6.3, 6.4, 7.2, 7.5 et 10.1.

4.3.3 Conformité à la modélisation sémantique des aspects

Lorsque la conformité est demandée pour la modélisation sémantique des aspects d'un SMRM, la demande doit démontrer que la spécification du SMRM satisfait aux exigences des paragraphes 6.10, 6.12, 7.4 et 9.2.

4.3.4 Conformité aux facettes et aux cadres

Lorsque la conformité est demandée pour les facettes et les cadres, la demande doit démontrer que la spécification du SMRM satisfait aux exigences des paragraphes 7.6 et 10.3.

5 L'URMSM dans les concepts de fabrication intelligente

En utilisant une approche par famille de modèles dans laquelle de nombreux modèles appropriés peuvent être obtenus à partir du même paradigme général, l'URMSM qualifie les méthodologies d'examen de l'impact des technologies intelligentes dans le contexte d'initiatives de SM et permet d'identifier un grand nombre de préoccupations auxquelles il est nécessaire que les professionnels répondent lorsqu'ils mettent en œuvre des programmes de SM. De plus, l'URMSM devient un ensemble de principes et de pratiques concernant:

- la construction de cadres de représentation pour la SM;
- les lignes directrices pour la mise en œuvre des modèles de référence de SM;
- les propositions ou exemples de représentations existantes ou potentielles de modèles de référence de SM; et
- les critères permettant de refléter les éléments de modélisation nécessaires à la prise de décision dans un contexte de SM.

Pour améliorer la représentation et l'examen ultérieur des initiatives de SM, le présent document identifie trois catégories utiles communes à toutes les situations de fabrication et qui peuvent couvrir l'ensemble du cycle de vie de fabrication ainsi que sa chaîne logistique. Ces catégories fondamentales pour comprendre les opportunités de SM et obtenir des résultats positifs sont les suivantes:

- les éléments qui comprennent la production et les produits allant des matières premières aux produits finis en service;
- les relations entre les éléments qui reflètent les interactions dynamiques des éléments de production et de produits; et
- les cycles de production et de vie du produit dans un environnement de fabrication.

Ces catégories fondamentales combinent de nombreuses façons de caractériser les initiatives de SM. Le présent document met l'accent sur un modèle de référence qui offre un moyen unifié de représenter la diversité et les utilisations des modèles pour examiner les interactions des éléments de fabrication dans le contexte de la SM.

Selon la perspective des développeurs de normes, un cadre de modélisation, qui comprend le type de cadre envisagé pour une utilisation de référence dans les domaines de la fabrication intelligente (voir Annexe B), possède deux qualités principales liées à l'interopération intentionnelle des éléments de fabrication: 1) analytique, pour identifier les éléments de fabrication et leurs relations qui forment un ensemble pour l'entreprise de fabrication par rapport à un système opérationnel cible; 2) synthétique, pour identifier les éléments et les relations au sein de l'entreprise de fabrication qui doivent interopérer pour obtenir un nouvel ensemble ou une partie de celui-ci en tant que système opérationnel.

La qualité analytique offre une approche basée sur la décomposition tandis que la qualité synthétique offre une approche fondée sur la composition. Pour la fabrication intelligente, la qualité analytique permet d'examiner les impacts potentiellement disruptifs qui surviennent lorsque de nouvelles technologies et une nouvelle méthodologie sont introduites dans un système opérationnel établi. La qualité synthétique permet de créer de nouvelles configurations d'éléments de fabrication et de relations qui incluent des technologies et méthodologies de fabrication intelligente après résolution de tout impact disruptif et une fois que les nouvelles opportunités d'interopération sont claires.

L'exploitation des qualités analytiques et synthétiques constitue la base des cas d'utilisation primaires pour l'utilisation du modèle de référence dans la fabrication intelligente. Pour les qualités analytiques et synthétiques, une compréhension d'une base solide pour la modélisation, l'utilité d'une telle base et l'aptitude de cette base à atteindre l'objectif de modélisation sont essentielles pour une utilisation efficace et efficiente du cadre [57].

Le présent document identifie quatre domaines conceptuels associés à la SM (voir Annexe A):

- les aspects de la production et des produits qui identifient les éléments de fabrication dans un domaine spécifique de SM;
- les perspectives de production et de produits qui identifient les caractéristiques importantes pour les parties prenantes de ce domaine;
- les considérations relatives au cycle de vie ayant un impact sur ces aspects et ces perspectives; et
- la modélisation des éléments de fabrication utilisant des modèles sémantiques.

NOTE 1 Les aspects sont liés aux caractéristiques du produit ou du système de production (l'élément à modéliser), tandis que les perspectives sont liées aux considérations des parties prenantes (l'utilisateur de l'élément).

Le présent document identifie le concept de la modélisation sémantique comme le moyen d'exprimer le contenu de modélisation pour les trois autres domaines conceptuels associés à la SM. Différents degrés de modélisation sémantique permettent d'affiner suffisamment d'aspects de la SM pour analyser les opportunités, assurer la synthèse des technologies avancées et améliorer l'interopérabilité liée à ces domaines conceptuels de SM.

NOTE 2 L'Annexe A fournit des informations supplémentaires sur les domaines conceptuels et sur l'utilisation de la modélisation sémantique.

NOTE 3 Une perspective utilisateur pour l'URMSM est présentée au paragraphe A.2.

6 Concepts de modèle de référence

6.1 Modélisation SM

La modélisation est une approche très efficace pour systématiser les activités de développement et d'exploitation de systèmes en utilisant les technologies de l'information avancées. La transformation numérique des activités de modélisation au cours des 30 dernières années offre désormais la puissance de traitement et l'étendue des fonctions de stockage nécessaires à une gestion inédite de la représentation de systèmes très compliqués. Cependant, pour réduire la duplication inutile des efforts et assurer l'interopérabilité des composants et des systèmes, il est nécessaire d'identifier et de comprendre les points communs au sein des nombreux modèles de SM.

Un modèle de référence donne un aperçu des aspects d'un système à prendre en compte lors du développement d'un nouveau système ou lors de la modification d'un système existant. Il peut également fournir des mécanismes permettant la réalisation de ce développement ou de cette modification. Les modèles de référence basés sur l'URMSM constituent une base commune pour le développement de systèmes individuels et permettent leur interprétation en tant que système intégral en réutilisant les caractéristiques communes à ces systèmes individuels.

NOTE 1 La Figure 7 et la Figure C.1 représentent les manières dont les modèles de référence fournissent un contenu à partir de modèles génériques, particuliers ou plus spécifiques d'initiatives de SM.

NOTE 2 L'Annexe B fournit des détails concernant la structure d'un SMRM conforme à l'URMSM.

Le présent document reconnaît que tous les SMRM ne sont pas conformes aux exigences et recommandations de l'URMSM. Cependant, l'objectif du présent document est de permettre la création de SMRM conformes à l'URMSM sous forme de nouveaux modèles ou en affinant un SMRM existant, généralement en articulant les modèles sémantiques associés et en établissant des critères de cohérence.

L'utilisation du terme SMRM dans le présent document fait toujours référence à un SMRM conforme aux exigences et recommandations de l'URMSM. De nombreux SMRM existants sont au moins partiellement conformes à l'URMSM.

Un SMRM conforme à l'URMSM spécifie son utilisation prévue dans un domaine de fabrication pertinent, avec des abstractions appropriées, incluant les activités, les processus, les ressources et les informations, ainsi que leurs relations. À partir de la spécification d'un métamodèle de référence unifié (voir IEC TR 63319 [9]), des modèles plus spécifiques par rapport à l'objectif peuvent être obtenus de manière systématique pour atteindre la configuration et la mise en œuvre du système cible.

NOTE 3 L'Annexe D donne une vue d'ensemble du métamodèle utilisé dans l'IEC TR 63319 [9] pour analyser les points communs de plusieurs modèles de référence différents dans le cadre de la SM.

EXEMPLE 1 Les principes incarnés dans l'URMSM sous-tendent la structure de l'ISO/IEC TR 63306-1 [8].

L'URMSM spécifie que les aspects pertinents de la fabrication avec des abstractions appropriées incluent leurs activités constitutives, leurs processus, leurs ressources et leurs informations, ainsi que leurs relations. À partir d'un SMRM, des modèles plus spécifiques peuvent être obtenus de manière systématique pour atteindre la configuration et la mise en œuvre du système cible.

Il est nécessaire de clarifier et de normaliser l'URMSM à différents degrés d'abstraction dans le SMRM afin d'améliorer l'efficacité des processus de développement en réutilisant les ressources constitutives lors du développement et de l'exploitation de systèmes. Le présent document peut également être utilisé comme guide pour utiliser efficacement les normes existantes et identifier les lacunes pour les normes manquantes.

NOTE 4 L'Annexe D donne une vue d'ensemble du métamodèle utilisé dans l'IEC TR 63319 [9] pour analyser les points communs de plusieurs modèles de référence différents dans le cadre de la SM.

Afin d'améliorer la cohérence des modèles sémantiques et de clarifier les relations pertinentes entre la production, le produit et les externalités des deux, il convient qu'un SMRM contienne de nombreuses perspectives et offre des moyens de filtrer les perspectives peu ou pas pertinentes pour un usage particulier (voir 6.9).

Une grande partie du texte de l'Article 6 et de l'Article 7 reprend le texte de l'ISO/IEC/IEEE 42010 [15] et de l'ISO 15704 [18]. La connaissance de ces deux normes peut aider les utilisateurs du présent document à mieux comprendre la base conceptuelle de l'URMSM en tant que spécification d'un RMSM. L'Annexe D s'appuie également sur ces deux normes.

6.2 Objectif de modélisation

La première étape de toute activité comprenant la génération d'un modèle est la compréhension claire de l'objectif de la modélisation ciblée. De plus, comme chaque modèle est une abstraction, physique ou logique, d'un artefact identifiable, il est nécessaire d'associer clairement cet objectif à un ou plusieurs aspects de cet artefact.

Une attention particulière est nécessaire pour distinguer clairement le modèle d'artefact de l'artefact instancié à proprement parler. Cette distinction passe souvent de la correspondance à l'identité fusionnée, c'est-à-dire que le modèle est traité comme s'il s'agissait de l'artefact plutôt que d'une représentation de ce dernier. Cette distinction est très importante dans le contexte de l'analyse et de la synthèse concernant l'objectif des modèles de référence où l'artefact est généralement un autre modèle plutôt que l'instanciation dans le monde réel. Un aspect spécifié dans un modèle de référence fait probablement référence aux propriétés d'une instance qui est supprimée deux fois ou plus de son identification logique, physique ou descriptive spécifique d'un domaine. L'ensemble de propriétés d'un aspect apparaît dans les modèles successifs associés aux différentes phases du cycle de vie ou dans les éléments de modélisation des modèles de mise en œuvre.

EXEMPLE 1 Dans l'industrie chimique, la notion de vaccin (l'instance) est une mise en œuvre dans le monde réel. Cependant, lors de la prise en compte du concept d'un nouveau vaccin, les étapes d'évolution du vaccin d'une production en laboratoire à une production à plus grande échelle sont très compliquées. Le "modèle" de fabrication du vaccin exige une intégration soignée de la chaîne logistique, depuis l'approvisionnement (flacons de verre, substrat pour les vaccins, etc.) et les réacteurs pour la production de vaccins, jusqu'à la livraison au public, en passant par le remplissage et l'emballage des flacons, le suivi et le traçage du vaccin pour assurer des contrôles d'environnement appropriés, et la distribution.

L'artefact d'un modèle de mise en œuvre est le système de fabrication opérationnel réel. Étant donné que ce système présente de nombreux aspects, il peut exister une multitude de modèles de mise en œuvre pour le même système de fabrication. Chaque modèle de mise en œuvre concerne un ou plusieurs aspects de l'artefact qu'est le système de fabrication.

En raison de la capacité cognitive limitée des modèles générateurs et de ceux utilisant des modèles générés, chaque activité de modélisation doit commencer par un objectif bien défini qui spécifie le contexte, les objectifs de l'effort de modélisation et se concentre sur l'activité de modélisation.

NOTE Les objectifs peuvent être exprimés de plusieurs manières (par exemple, les exigences, les objectifs, les opportunités ainsi que les effets souhaités). L'atteinte des objectifs est plus difficile lorsqu'aucun cas d'utilisation n'est disponible pour affiner les objectifs et façonner les points de vue.

Bien qu'un modèle de référence puisse parfois être utilisé de la même manière qu'un modèle de mise en œuvre, dans la plupart des cas, un modèle de référence constitue la base de la génération de modèles de mise en œuvre plus spécifiques. Un modèle de référence peut, de ce fait, servir plus d'un objectif possible du modèle de mise en œuvre. Par conséquent, dans le présent document, l'objectif d'un modèle de référence est de permettre la création et la compréhension des modèles de mise en œuvre dans le domaine de la SM.

EXEMPLE 2 Voir Annexe C pour une description de la position que l'URMSM occupe dans une hiérarchie de spécifications pertinentes pour les professionnels de la SM.

En raison de la très grande diversité des systèmes de fabrication actuels, de nombreux modèles de référence spécifiques d'un domaine sont utilisés aujourd'hui. Certains de ces modèles de référence spécifiques d'un domaine font l'objet de Normes internationales et de spécifications de consortiums [62]. L'URMSM a pour but d'établir des critères afin d'orienter le développement de futurs modèles de référence spécifiques d'un domaine, que ce soit à des fins de référence ou de mise en œuvre, dans l'ensemble du secteur de fabrication, avec une attention particulière pour l'intégration et l'évolution du paradigme de SM.

6.3 Dimensions de modélisation

Les entreprises de fabrication sont un ensemble compliqué et souvent complexe de ressources, de personnes, de processus et de produits, tous composés de nombreuses variables distinctes. Pour fonctionner de manière efficace et efficiente dans le contexte de la fabrication qui applique les connaissances en matière de conception et de gestion de la production pour ajouter de la valeur aux produits, aux biens et aux services, il est nécessaire de comprendre l'étendue de ces variables et de leurs relations.

Il convient de reproduire ces variables dans des modèles qui peuvent représenter l'étendue et les relations entre les variables. Le modélisateur applique les connaissances existantes pour élaborer un ou plusieurs modèles et représenter ainsi des approches visant à répondre aux préoccupations des parties prenantes en utilisant des techniques de modélisation appropriées. Ces modèles sont utilisés pour générer des vues de modèle alignées sur les points de vue déterminés par le modélisateur pour affiner au mieux une ou plusieurs préoccupations et les moyens possibles d'y répondre.

Ces vues de modèle, peut-être sous forme de fractions ou d'extraits d'un modèle plus grand, constituent un ensemble de concepts dans un contexte particulier et satisfont ainsi à la définition d'un aspect. Certains aspects résultent de l'agrégation ou de la composition des vues de plusieurs modèles. La multitude d'aspects possibles constitue un espace de solution correspondant à l'espace de problème identifié par les préoccupations. Cependant, le plus souvent, les préoccupations des parties prenantes ou les aspects inclus dans les vues ne sont pas tous pertinents par rapport à l'objectif poursuivi par l'effort de modélisation.

Pour analyser et utiliser au mieux les connaissances présentes dans les aspects de la fabrication, tous les aspects identifiés doivent être organisés en différents ensembles d'aspects caractérisés par la cohérence entre les vues de modèle qui distinguent les aspects. Un ensemble cohérent d'aspects, composé de vues de modèle, est une dimension de modélisation de la fabrication. Les normes comprennent de nombreuses dimensions de la fabrication.

EXEMPLE La série de normes ISO/IEC 62264 [3] identifie plusieurs dimensions, c'est-à-dire la hiérarchie fonctionnelle, la hiérarchie des équipements en fonction des rôles et la hiérarchie des équipements d'un actif physique. Dans l'architecture généralisée de référence d'une entreprise présentée à son Annexe B, l'ISO 15704 identifie différentes dimensions d'une entreprise industrielle (par exemple, les phases du cycle de vie, les points de vue de modélisation et la généralité (instanciation)).

La réponse des dimensions de modélisation est susceptible d'évoluer à mesure que la compréhension de la fabrication intelligente gagne en maturité, que les nouvelles technologies offrent des opportunités importantes et que les systèmes de fabrication évoluent. L'URMSM prend en charge à la fois les dimensions de modélisation existantes, l'évolution des dimensions de modélisation existantes et les moyens de mise à disposition de nouvelles dimensions.

6.4 Cohérence des dimensions

Pour qu'une dimension présente une cohérence, elle doit présenter deux critères principaux: 1) chaque aspect de la dimension a un contexte bien défini; 2) les contextes des aspects de la dimension ont une relation contextuelle commune bien définie. Les critères de contexte d'aspect et de dimension peuvent imposer un ordre parmi les aspects, bien que cet ordre puisse ne pas impliquer de séquence, de dépendance ou de hiérarchie entre les aspects. L'ordre des aspects peut être celui d'aspects indépendants de valeur égale par rapport à l'objectif de modélisation établi à cet effet et peut, de ce fait, faire l'objet d'une réorganisation à des fins différentes (voir 7.2.1).

NOTE 1 Les deux critères principaux pour la définition du contexte peuvent se produire sans tenir compte de l'ordre ou de la séquence de réalisation. Parfois, chaque aspect a un contexte bien défini et cet ensemble de contextes permet de déduire le contexte d'une dimension. D'autres fois, le contexte d'une dimension est bien défini et les aspects individuels dans ce contexte de dimension sont identifiés en choisissant la partie de leur contexte d'aspect individuel qui correspond au contexte d'une dimension.

Les modèles d'aspect peuvent aller de modèles d'informations graphiques ou de descriptions textuelles très abstraits à des modèles de données ou d'activités très détaillés. Ces types de modèles font partie d'une multitude de techniques de modélisation et de descriptions que les modélisateurs peuvent utiliser. Des techniques de modélisation différentes pour le même contexte sont souvent nécessaires afin de communiquer efficacement avec différents groupes de parties prenantes et de concepteurs d'éléments de fabrication.

Les relations contextuelles communes entre des contextes d'aspects peuvent être aussi simples que des artefacts de modèles identiques apparaissant dans chaque contexte d'aspect, ce qui leur donne un élément ou une relation en commun. Mais elles peuvent également être aussi compliquées qu'un modèle sémantique unique couvrant tous les aspects d'une dimension.

Pour répondre aux besoins des professionnels de la SM et des développeurs de normes de SM, il est nécessaire de fournir un contexte bien défini et les détails associés, le tout à un niveau de granularité et de fidélité approprié à l'objectif de modélisation dans ce contexte. Les professionnels de la SM reçoivent souvent un contexte ambigu ou trop vaste (par exemple, très généralisé), ainsi que des détails sans contexte d'application approprié. Ils obtiennent donc des informations sans contexte approprié et considèrent un contexte qui n'a pas été prévu. Cette situation peut se produire en utilisant plusieurs normes qui ne sont pas harmonisées pour l'interopération, c'est-à-dire qu'il n'existe aucune condition dans laquelle les normes se rattachent au même contexte.

NOTE 2 Parfois, les segments d'une dimension peuvent être adaptés ou réorganisés pour aider à aligner les normes sur un contexte.

EXEMPLE 1 En utilisant le modèle FA du NIST [42], les dimensions de machine, matériel et produit interopèrent dans le cadre des opérations de production d'une pièce, mais sont par ailleurs quasiment disjointes.

NOTE 3 Le paragraphe 7.2.1 spécifie les exigences relatives au contexte de manière plus formelle en tant que type commun, interrelations définies et pertinence par rapport à l'objectif.

L'utilité de la dimension de modélisation pour l'analyse et la synthèse dans le domaine de la SM est directement liée à la granularité et à la fidélité des modèles sémantiques qui fournissent les descriptions du contexte d'aspect et des relations contextuelles communes entre les aspects de la dimension. De plus, à mesure que la granularité et la fidélité des modèles sémantiques s'alignent de plus en plus sur la réalité de fabrication, la sensibilité des modèles pour détecter et identifier les conséquences d'une modification disruptive dans l'environnement de fabrication augmente.

EXEMPLE 2 La commercialisation a besoin d'une dimension de granularité différente de celle de la fabrication ou, elle peut utiliser la même dimension, mais à des niveaux différents de granularité. Si l'objectif de l'effort de modélisation est de servir ces deux parties prenantes, il est alors nécessaire que le modèle sémantique prenne en charge les deux utilisations en permettant des vues spécifiques extraites d'un ou plusieurs modèles qui couvrent les préoccupations des deux.

EXEMPLE 3 Dans la fabrication pharmaceutique, la production du vaccin (le produit) exige un modèle détaillé pour la conception et le fonctionnement d'un réacteur. Les modifications apportées à la formule du vaccin peuvent entraîner des modifications détaillées du modèle de réacteur ou un ensemble plus simple d'étapes pour la formule opérationnelle. Les modifications apportées à la conception d'un réacteur peuvent également affecter la chaîne de fabrication qui remplit et emballe le vaccin dans des flacons.

NOTE 4 L'accent mis sur la construction de "jumeaux numériques" et les efforts déployés en ce sens sont le résultat direct de la compréhension de l'utilité de modèles sémantiques numériques à haute granularité et à haute fidélité pour les éléments de fabrication existants dans le monde physique.

6.5 Parties prenantes

Parmi les nombreuses parties prenantes ayant des préoccupations pertinentes dans un contexte de SM, deux types de parties prenantes, les développeurs de normes de SM et les professionnels de la SM, sont principalement impliqués dans l'utilisation du présent document, qui sert de référence pour des activités plus détaillées affectant toutes sortes de parties prenantes d'une entreprise de fabrication et de ses chaînes logistiques et de valeur.

Les développeurs de normes de SM sont des personnes et organisations chargées de spécifier les exigences de conduite des activités associées à un système de SM. Leur mission s'étend des modèles de référence utilisés pour la description de l'architecture d'une entreprise et d'un système jusqu'aux techniques de modélisation sémantique des éléments de fabrication, en passant par le développement de scénarios d'utilisation. Il convient que les développeurs de normes de SM fournissent des ressources habilitantes (par exemple, des outils et une documentation de modèle) pour les initiatives de SM en aval.

Les professionnels de la SM sont les personnes et organisations qui participent à l'application d'outils, de technologies et de méthodes, n'importe où dans la chaîne logistique ou de valeur, pour la mise en œuvre d'initiatives de SM. Lorsque les normes ou méthodologies existantes présentent des lacunes, il convient que les professionnels de la SM travaillent avec les développeurs de normes de SM pour définir de nouvelles exigences de SM afin de répondre aux préoccupations identifiées en matière de SM.

Les développeurs de normes de SM et les professionnels de la SM peuvent concevoir, construire ou utiliser des modèles de différents types.

6.6 Préoccupations

Une préoccupation est une expression d'intérêt ciblée et importante concernant un ou plusieurs éléments d'un système de fabrication selon la perspective d'une ou de plusieurs parties prenantes. Il convient que les développeurs de normes de SM s'attachent principalement à répondre aux besoins des professionnels de la SM en fournissant les moyens et les méthodes permettant de spécifier un point de vue cohérent par rapport à ces préoccupations.

Les préoccupations des professionnels de la SM concernent généralement des informations, des méthodes et des attentes de modélisation spécifiques d'un domaine et d'un objectif donnés, qu'ils peuvent appliquer directement pour soutenir les initiatives de SM. Étant donné que les préoccupations des professionnels de la SM découlent de perspectives basées sur des applications pratiques très ciblées, il convient que les développeurs de normes de SM fournissent un modèle de référence complet avec un large éventail de capacités pour exprimer, examiner et autoriser les activités des professionnels de la SM.

L'expression d'une préoccupation peut prendre plusieurs formes. Les plus utiles sont les préoccupations exprimées sous forme de questions sur des caractéristiques ou fonctionnalités, de mots-clés pour de nombreux sujets connexes et d'attributs de qualité attendus du système de fabrication ou de ses produits et services. Des préoccupations découlent également de cas d'utilisation détaillés qui peuvent susciter de nombreuses préoccupations distinctes par rapport à un scénario de SM.

6.7 Cas d'utilisation

Un moyen efficace pour les professionnels de la SM de documenter leurs préoccupations est de préparer un cas d'utilisation qui couvre un ou plusieurs scénarios afin de transmettre la manière dont un élément de fabrication interagit avec les utilisateurs finaux ou avec d'autres éléments de fabrication pour atteindre un objectif spécifique. Un cas d'utilisation offre l'opportunité d'affiner une ou plusieurs préoccupations pour fournir des recommandations aux modélisateurs de SM, qu'ils soient développeurs de normes ou professionnels de la SM, car il permet d'identifier les points de vue et de créer des vues significatives pour de nombreuses parties prenantes. Un cas d'utilisation est particulièrement efficace pour identifier et présenter un comportement pour de nouvelles technologies innovantes ou une application nouvelle des technologies existantes.

Pour aider le développeur de normes de SM, il convient que les professionnels de la SM préparent des cas d'utilisation qui détaillent dans une mesure appropriée un scénario de fabrication et les résultats attendus pour servir de source de préoccupations selon la perspective des professionnels de la SM.

Les cas d'utilisation à plusieurs scénarios et préoccupations utilisent souvent davantage de points de vue. Ces cas d'utilisation plus compliqués peuvent fournir aux modélisateurs des informations supplémentaires concernant l'adaptation des points de vue à un paradigme de modélisation satisfaisant par rapport à l'objectif poursuivi par l'effort de modélisation SM.

NOTE 1 Le cas d'utilisation est le plus pertinent lorsque son domaine d'application relève complètement de l'objectif poursuivi par l'effort de modélisation SM pour lequel il est soumis et lorsque les résultats qui y sont décrits ne sont pas ambigus.

Un cas d'utilisation peut prendre des formes différentes en fonction de la granularité et de la fidélité de l'objectif pour lequel il est généré. Un cas d'utilisation peut couvrir des situations abstraites ou très spécifiques. Les cas d'utilisation métier ont tendance à être plus abstraits, avec un ensemble commun de termes provenant du secteur d'activité, et peuvent exister à différents niveaux d'une organisation. Cependant, au fur et à mesure que des détails sont ajoutés aux cas d'utilisation, la terminologie et la méthodologie commencent à diverger et les liens avec un cas d'utilisation métier deviennent moins évidents.

Bien que des scénarios d'application des cas d'utilisation puissent s'appliquer à l'ensemble d'un secteur, un référentiel de cas d'utilisation est souvent plus utile pour les entreprises d'un secteur industriel.

NOTE 2 La thématique du référentiel de cas d'utilisation n'est pas couverte explicitement dans l'URMSM.

Plusieurs modèles de cas d'utilisation et un nombre croissant de référentiels de cas d'utilisation sont disponibles (par exemple, dans l'IEC 62559 [5]). Les modèles de cas d'utilisation et les référentiels peuvent se révéler utiles en cas de nécessité d'adaptation aux préoccupations spécifiques d'un domaine.

Les installations de fabrication comprennent un certain nombre de parties prenantes et de perspectives et exigences de cas d'utilisation différentes, dont certaines peuvent souvent être partagées ou se chevaucher. L'IEC TR 63283-1 [7] traite notamment de ce chevauchement en ce qui concerne la terminologie.

NOTE 3 Étant donné qu'un aspect est lié à la vue obtenue par l'application d'un point de vue et qu'un point de vue s'appuie sur le contenu d'un cas d'utilisation, un cas d'utilisation constitue, sur le plan conceptuel, une base pour un aspect de la SM.

Il convient que les développeurs de normes de SM et les professionnels de la SM utilisent des techniques de cas d'utilisation pour vérifier les préoccupations et valider les vues de modèle proposées auprès des parties prenantes.

6.8 Points de vue et vues

Un point de vue de modélisation sert à recueillir des informations sur le sujet, sous la forme de préoccupations clairement énoncées par les parties prenantes, et à établir des conventions pour la création, l'interprétation, l'analyse et l'utilisation de vues de modèle par rapport aux préoccupations recueillies. Il convient que ce point de vue tienne compte des préoccupations des professionnels concernés et des préoccupations connues en matière de modélisation afin d'assurer une opportunité bien définie de création de modèles et de vues de modélisation qui répondent à ces préoccupations particulières. Les conventions concernant les points de vue peuvent spécifier un ou plusieurs paradigmes de modélisation ou types de modèles à utiliser lors de la construction d'un modèle pertinent, généralement sous une forme quelconque de modèle d'ingénierie. Les conventions peuvent également inclure des descripteurs moins formels pour orienter l'expression d'une vue.

Il convient que les vues de modèle, qu'il s'agisse d'un modèle complet ou de parties d'un ou de plusieurs modèles, fournissent aux parties prenantes les informations de résultats nécessaires pour prendre des décisions éclairées concernant d'autres activités de modélisation ou de mise en œuvre.

NOTE Voir ISO/IEC/IEEE 42010 [15] pour plus d'informations sur les points de vue, le type de modèle, le modèle et la vue appliqués à la description de l'architecture d'une entreprise et d'un système.

6.9 Perspectives

6.9.1 Utilisation d'une perspective

L'URMSM fournit des moyens d'organiser ou d'examiner le ou les modèles sémantiques à partir de plusieurs perspectives par rapport à un objectif de modélisation particulier. L'expression "perspective des parties prenantes" désigne la manière dont une partie prenante aborde sur le plan conceptuel le système de SM qui l'intéresse.

Un modèle sémantique pour un système de SM d'intérêt doit tenir compte des éléments de chaque aspect de fabrication qui sont importants pour l'objectif de l'activité de modélisation exprimé dans les préoccupations des parties prenantes par rapport à cet objectif.

Pour présenter les nombreux aspects du système d'intérêt par rapport à l'objectif de modélisation et pour répondre aux préoccupations des parties prenantes, un modélisateur regroupe la représentation des éléments de fabrication dans des modèles reliant ces éléments les uns aux autres. À partir de ces modèles, le modélisateur projette des vues pour articuler les aspects du système d'intérêt qui comprend les éléments de fabrication, conformément à l'objectif de modélisation spécifié. Souvent, des aspects fortement liés sont rassemblés dans des dimensions de modélisation pour faciliter la compréhension de ces relations par les parties prenantes. L'expression "perspective analytique" désigne la manière dont le modélisateur regroupe les éléments de fabrication en aspects de fabrication.

NOTE 1 Les aspects pertinents d'un modèle sont organisés dans un cadre descriptif afin de satisfaire à une perspective des parties prenantes qui permettra une prise de décision éclairée. Un cadre de modélisation organise généralement les aspects pertinents pour satisfaire à un objectif de modélisation, qui peut fournir plusieurs perspectives de parties prenantes en projetant des aspects pertinents qui intéressent les parties prenantes, ou qui peut fournir les cadres analytiques nécessaires à des techniques et méthodologies analytiques particulières.

Les perspectives des parties prenantes sont généralement externes ou à la limite d'un système de SM, car il s'agit de façons de réfléchir au système. Le cadre analytique comporte généralement des considérations internes résultant d'activités de modélisation alimentées par ces perspectives externes.

NOTE 2 La perspective de parties prenantes peut être considérée comme une contribution à l'activité de modélisation, tandis que le cadre analytique peut être considéré comme le résultat de l'activité de modélisation. Au cours de l'activité de modélisation, les points de vue de modélisation spécifient la manière dont les perspectives des parties prenantes donnent lieu à la création du cadre analytique.

6.9.2 Perspectives des parties prenantes

Les perspectives des parties prenantes concernant les initiatives de SM sont le résultat de leurs responsabilités, de leurs pouvoirs, de leur formation et de leur expérience dans le domaine de la fabrication. Elles conduisent au développement de cas d'utilisation et de préoccupations, eux-mêmes utilisés pour générer des points de vue reflétant ces perspectives.

6.9.3 Cadre analytique

Un cadre analytique traite de la création d'aspects et de leur organisation dans des ensembles identifiés comme étant des dimensions de la SM. Chaque dimension ou intersection de dimensions constitue une orientation analytique qui complète les perspectives des parties prenantes. Un cadre analytique organise les résultats de la modélisation des points de vue pour permettre l'examen des aspects par rapport à l'objectif de modélisation.

6.10 Aspects

Un aspect est un moyen de caractériser la structure, la qualité ou le comportement d'un élément de fabrication sous la forme d'une conceptualisation unique potentiellement composée de nombreux concepts. Une étiquette ou un nom identifie la conceptualisation de l'aspect qui inclut généralement de nombreux concepts plus particuliers. Cette caractérisation s'applique généralement à l'élément de fabrication par rapport à un contexte particulier et peut changer lorsque le contexte évolue. Par conséquent, les aspects se voient le plus souvent attribuer des caractérisations larges qui peuvent s'appliquer dans de nombreux contextes, tout en maintenant l'accent sur les fonctionnalités ou les propriétés qui permettent de faire la distinction entre les différents aspects. Les aspects bien spécifiés offrent un moyen de classer les fonctionnalités et les propriétés des éléments de manière à permettre un référencement collectif et une évaluation dans différentes situations, lesquelles sont des vues différentes du même aspect, mais dans différents contextes.

Chaque aspect d'un SMRM doit être exprimé par un modèle sémantique qui spécifie le contexte et tout constituant de ce contexte applicable à l'aspect utilisé dans le SMRM. Il convient que le modèle sémantique soit suffisant pour permettre l'inclusion de l'aspect dans un ensemble cohérent d'aspects.

Comme les aspects s'appliquent dans différentes situations, ils sont souvent identifiés comme des "préoccupations transversales", c'est-à-dire qu'ils sont intégrés à de nombreuses préoccupations différentes des parties prenantes avec la même caractérisation de base, mais affinés en fonction du contexte de préoccupation. Un point de vue peut utiliser cette intégration pour spécifier les aspects à inclure lors de la construction d'un modèle pour produire une ou plusieurs vues. Inversement, un point de vue peut spécifier une ou plusieurs vues pour caractériser un aspect. Un aspect peut être caractérisé par des vues de plusieurs points de vue distincts.

NOTE Dans certaines situations, un aspect peut être considéré comme étant la vue selon un certain point de vue.

Les aspects sont souvent étiquetés par référence à un contexte en utilisant un terme succinct (par exemple, des fonctionnalités d'élément, de sécurité, de sûreté). Les aspects sont généralement décomposables en sous-contextes pour des domaines spécifiques (par exemple, sécurité physique). Le contexte associé à un aspect peut être fonctionnel ou plus souvent non fonctionnel comme c'est le cas des mots en "ilité" des divers attributs de qualité, tels que la durabilité et la compatibilité. Les aspects sont les principaux discriminants dans les cadres de modélisation (par exemple, le cadre d'architecture unifié OMG [30]).

EXEMPLE Les aspects de la spécification de produit pour une pièce (élément de fabrication) peuvent comporter un ensemble de fonctionnalités et une spécification de matériaux. Les fonctionnalités basées sur un contexte de conception de produit sont prises en compte dans le contexte du système de production. Les exigences du marché déterminent les spécifications de conception des produits, telles que les matériaux et les fonctionnalités de la pièce. La modification d'un matériau et de fonctionnalités entraîne la modification des processus de fabrication nécessaires à la fabrication de la pièce. La modification d'un matériau peut affecter les vitesses et les flux d'un processus d'usinage. L'outillage, les aménagements fixes, la consommation d'énergie, les rebuts et la manipulation des matériaux sont des processus liés au processus d'usinage primaire. Les exigences relatives au volume et au débit pour la pièce peuvent tenir compte d'autres considérations, telles que la fabrication additive. Un lot de fabrication ponctuel par rapport à un lot de grande taille ou des propriétés de matériau spécifiques affectent ces considérations, ainsi que la taille, le poids, si plusieurs machines et processus sont exigés pour les fonctionnalités du produit. Pour un produit à grand volume, une machine spécialisée peut être envisagée. La modélisation de la pièce basée sur ces spécifications, ainsi que sur les systèmes de production, peut permettre d'effectuer des compromis plus rapidement si le modèle de produit et le modèle de production ont des modèles sémantiques correspondants.

L'identification et la caractérisation des aspects d'un élément de fabrication dans le contexte approprié, que l'élément soit une entreprise de fabrication entière ou la capacité d'un composant, sont essentielles à la configuration et à l'utilisation de l'URMSM pour créer un SMRM ou un modèle de mise en œuvre.

Afin de maximiser la capacité des modèles sémantiques d'aspects à analyser et synthétiser les interactions entre les aspects dans le contexte de la SM, il convient que les modèles d'aspects utilisent la représentation numérique disponible la plus expressive sur le plan sémantique.

6.11 Modélisation du cycle de vie

La notion de cycle de vie est tirée de la biologie, où chaque être vivant suit le même schéma (naissance, croissance, maturité, déclin et décès) appelé "cycle de vie". Ce schéma domine chez tous les êtres vivants et peut être étendu par abstraction à des choses conceptuelles (par exemple, des systèmes). Par extension, la notion de cycle de vie s'applique aux entreprises, services et produits de SM lorsque chaque instance suit le schéma de cycle de vie pendant sa durée de vie. Le même schéma de cycle de vie de base s'exprime de différentes manières pour des objectifs et situations différents. Étant donné que de nombreuses choses différentes comprennent chaque entreprise ou système, il existe de nombreux cycles de vie: un pour chaque chose. Chaque projet, composant, artefact et produit a un cycle de vie et, comme certains sont des éléments constitutifs des autres, les activités du cycle de vie apparaissent à répétition et se chevauchent presque toujours.

La fabrication intelligente reconnaît que la caractérisation du cycle de vie est une segmentation en différentes phases de cycle de vie par rapport aux dépendances mutuelles et à la similarité du contenu du modèle plutôt que par rapport à une séquence chronologique présumée. Différentes phases du cycle de vie peuvent avoir différents modèles et différents modèles peuvent exister au cours d'une phase de cycle de vie individuelle. Les modèles de phases du cycle de vie peuvent être simultanés, répétés ou vides, selon les besoins de la situation de modélisation.

Il convient qu'un SMRM délimite clairement les phases du cycle de vie concernant le SMRM particulier, telles qu'elles sont identifiées par l'organisation utilisatrice.

NOTE 1 L'alimentation des informations du modèle en amont et en aval des activités d'une phase de cycle de vie permet une itération à valeur ajoutée des processus qui améliore la qualité. Une activité de phase peut modifier ou étendre le modèle d'une activité de phase précédente aux besoins évolutifs d'une activité de phase ultérieure.

La notion d'historique de vie reflète la chronologie des activités d'une phase de cycle de vie telles qu'elles se produisent au cours d'un cycle de vie. L'historique de vie est souvent segmenté en étapes. Bien qu'un modèle de référence spécifie le plus souvent les représentations de modèles statiques, la compréhension des conséquences d'une modification peut exiger de connaître la séquence chronologique des activités qu'une entité particulière a connues pendant toute sa durée de vie. L'ISO 15704 [18] présente une explication étendue des concepts de cycle de vie et d'historique de vie.

NOTE 2 D'autres normes, en particulier celles alignées sur l'ISO/IEC/IEEE 15288, utilisent l'expression "étape du cycle de vie" au lieu d'"étapes d'historique de vie".

6.12 Modélisation sémantique de la SM

6.12.1 Vue d'ensemble de la modélisation sémantique

Pour comprendre ce qu'impliquent les interactions entre les aspects, une forme commune d'expression est nécessaire pour comparer et mettre en contraste leurs propriétés et comportements respectifs. Les modèles numériques fournissent des formes d'expression syntaxiques qui permettent un examen humain plus rapide dans une variété plus vaste de situations. Pour tirer pleinement parti des technologies numériques afin de compléter ou dépasser l'examen humain des interactions entre les aspects, il est nécessaire d'adapter la forme d'expression au calcul automatique. À de très rares exceptions près, les langages de modélisation numérique fournissent uniquement la terminologie de forme sémantique, ou de sens, complémentaire, mais pas les axiomes nécessaires au traitement d'inférence basé sur ces modèles qui permet d'automatiser l'analyse et la synthèse.

Pour la plupart des modèles basés sur des images graphiques, la signification des éléments du modèle et de leurs relations est limitée à des expressions syntaxiques, qui conviennent à une interaction lorsque la sémantique est déclarée sans ambiguïté sous forme de texte, mais ne conviennent pas à l'analyse et la synthèse lorsque la signification n'est révélée que par implication ou inférence. La signification du modèle dépend alors de l'interprétation par un observateur humain, entraînant souvent différentes interprétations.

NOTE 1 De nombreux outils de modélisation graphique fournissent également une expression non graphique du modèle, mais le plus souvent sans contenu explicite sémantiquement informatif et sans spécification complète de la sémantique.

Différentes représentations telles que des descriptions textuelles, des modèles d'information abstraits et des modèles de données ou d'activité peuvent modéliser des aspects qui comprennent des caractéristiques fonctionnelles ou non fonctionnelles de produits ou de production. Dans le cas de la SM, les artefacts de modélisation de base sont les informations, les données et l'activité à identifier dans les caractéristiques d'aspect.

Il convient qu'un modèle sémantique unifié, basé sur des algèbres de graphes et des types de données algébriques, permette la représentation, l'analyse et la synthèse d'un réseau de SM interopérant qui traite les informations, données et activités dans le contexte de la SM.

Les modèles et leurs outils utilisant des algèbres de graphes et des types de données algébriques sont des modèles sémantiques qui sont exécutables symboliquement et constituent ainsi les bases d'une analyse sémantique et d'une maintenance prédictive.

NOTE 2 En appliquant la GUI d'outils avec des algèbres de graphes et des types de données algébriques sous-jacents, une sorte de support linguistique pour la rédaction d'expressions sémantiques permet une analyse assistée par lesdits outils au-delà de l'analyse structurelle fournie par les schémas XML ou OWL [36].

Plusieurs articles et livres blancs [50] [61] proposent une analyse approfondie des questions liées à la conception et à l'utilisation de modèles avec un contenu sémantique suffisant pour prendre en charge l'interopérabilité des représentations de systèmes numériques. En particulier, deux formalismes de modélisation permettent l'échange d'informations pour prendre en charge l'interopération automatisée (schéma XML [32] et langage de modélisation OWL [33]). Le premier vise à caractériser la structure syntaxique, tandis que le second est destiné à caractériser la structure sémantique (ou la signification) [66].

NOTE 3 L'OWL utilise le schéma RDFS pour représenter les connaissances sur les choses, les groupes de choses et les relations entre les choses dans un langage basé sur la logique de calcul. Les connaissances exprimées en OWL peuvent être exploitées par des programmes informatiques, par exemple pour vérifier la cohérence de ces connaissances ou pour expliciter des connaissances implicites [33].

EXEMPLE 1 Dans cet exemple simple, qui concerne une partie d'une conception à proprement parler, la classe d'un rotor au sein du modèle de pompe "WBX-456A" peut être définie à l'aide d'une restriction OWL comme suit:

```
ex -des:ImpellerInWBX-456A
    owl:equivalentClass [
        owl:intersectionOf (
            ex-rdl:Impeller
            [ owl:onProperty lci:partOf;
              owl:allValuesFrom ex-des:WBX-456A ]
        )
    ];
    rdfs:subClassOf ex-des: WI-57SS .
```

De cette restriction, il peut être déduit qu'un rotor faisant partie d'une pompe de type "WBX-456A" est de type "WI-57SS" [19].

Les outils de modélisation destinés à appuyer la SM doivent fournir les moyens d'échanger le contenu d'un modèle sous des formes lisibles par l'homme, interprétables par une machine et utilisables par d'autres modélisateurs et modèles. Il convient au moins que la syntaxe soit bien formée à l'aide d'une norme établie.

EXEMPLE 2 Les paradigmes de modélisation qui prennent en charge les formes d'expression selon le schéma XML conviennent généralement aux processus de mise en correspondance des schémas, que ce soit par examen humain ou automatisation machine.

NOTE 4 Les modèles qui sont ou contiennent des images à contenu non différencié, bien qu'ils soient utiles pour certaines applications impliquant des aspects, ne sont pas bien adaptés à l'automatisation des analyses ou des synthèses. Le marquage d'image ou un moyen d'"analyser" l'image pour y trouver un contenu numérique encapsulé lié à un ou plusieurs autres aspects peut ajouter du contenu différencié à l'image, ce qui permet d'utiliser au moins cette partie de l'image pour des calculs.

Au-delà de l'exigence simple de représentation syntaxique, les paradigmes de modélisation avec une syntaxe formelle (par exemple, ceux définis à l'aide d'une spécification EBNF de leur syntaxe de langage de modélisation [10]) peuvent permettre d'identifier des relations sémantiques entre les aspects des schémas de modélisation fournis par la spécification EBNF [22] [21]. Certaines techniques de mise en correspondance des schémas de modèle tirent parti de cette fonctionnalité.

L'étape suivante dans la fourniture de modèles sémantiques pour un aspect implique l'utilisation de métamodèles pour un domaine particulier lorsque le domaine d'application peut être assez étendu. L'ISO 19440 [21] (dans le contexte du contrôle basé sur la modélisation) spécifie des constructs pour la modélisation d'entreprise en utilisant le langage de modélisation UML [11], qui possède une fonctionnalité de représentation conforme au schéma XML, puis fournit des métamodèles afin de configurer ces constructs pour les entreprises orientées fabrication et les entreprises orientées service.

Au sommet de la hiérarchie de modélisation sémantique, se trouvent les théories ontologiques qui donnent une signification aux concepts par rapport à d'autres concepts. Malheureusement, les théories ontologiques générales sont d'une utilité marginale pour les grands corps de connaissances, car ces bases de connaissances sont des réseaux de concepts interreliés. Cependant, ces théories constituent la base d'une ontologie spécifique d'un domaine très utile mise en œuvre en utilisant les spécifications OWL [37].

EXEMPLE 3 Les représentations numériques peuvent couvrir une combinaison de technologies théoriques graphiques algébriques et logiques, au moyen de l'utilisation de langages formels tels que l'OWL.

Une bonne compréhension de la relation entre les concepts sémiotiques et les concepts de modélisation est nécessaire pour obtenir des modèles numériques qui fournissent la forme sémantique ou de sens, complémentaire nécessaire au traitement d'inférence, qui permet l'automatisation de l'analyse et de la synthèse. De plus, les modèles sémantiques des langages de modélisation sont eux-mêmes des modèles et ont, en tant que tels, un historique de vie dans lequel les significations peuvent varier au fil du temps.

Lorsque des aspects sont liés au sein d'un même modèle sémantique, le modèle identifie généralement les relations qui servent de base aux interactions. Selon le formalisme syntaxique utilisé, les interactions peuvent être explicites ou implicites, les interactions explicites étant nommées ou étiquetées et les implicites pouvant être déduites du contexte.

Pour éviter les interactions manquantes ou mal interprétées, les aspects apparaissant dans un modèle sémantique doivent, dans la mesure du possible en fonction de l'objectif de ce modèle, rendre explicites les interactions avec les autres aspects (voir Annexe F et Annexe G).

6.12.2 Formes de représentation sémantique

Lors de la création d'un modèle sémantique pour un aspect en vue de comprendre les interactions avec d'autres aspects, il est essentiel de faire la distinction entre les objets statiques et les dynamiques qui les créent, les modifient et les éliminent. Étant donné que la majorité des modèles sémantiques prennent la forme de modèles d'information d'une nature ou d'une autre, ces formes deviennent le point focal pour spécifier le contenu sémantique approprié. Les modèles d'information ont tendance à identifier soit des choses statiques, comme des objets qui supportent des relations entre ces choses, soit des choses dynamiques, comme des processus qui se produisent avec des relations telles que des entrées et sorties de processus [12].

La forme de modèle d'information employée doit permettre de représenter les relations de contrainte entre deux aspects ou plus et peut permettre à cette représentation de spécifier les processus qui maintiennent cette relation, comme une autoréférence à l'entité qui réalise l'architecture et la conception de l'entité de fabrication.

NOTE 1 Tous les outils disponibles prenant en charge les algèbres de graphes et les types de données algébriques comprennent deux composants importants pour l'exécution des spécifications de choses représentées symboliquement. Le premier est la GUI qui applique en effet des symboles pour représenter des sous-spécificités (par exemple, les aspects des éoliennes ou des roues à aubes solaires dans un système global de réseau intelligent). Le deuxième composant d'un outil est le manipulateur de données et de graphes basé sur des règles, qui exécute toutes les règles spécifiées d'un aspect. Selon le contexte et la situation, ces dernières deviennent alors vraies ou fausses. Il s'agit, de ce fait, d'une simulation. Les progrès d'une simulation sont représentés en modifiant des objets graphiques dans la GUI, qui indique alors les modifications qui en résultent dans le système simulé.

Lorsque l'objectif de la modélisation des aspects est lié à une interaction entre ces aspects, il convient que les relations entre les objets statiques soient les processus qui les créent, les modifient ou les éliminent, en utilisant généralement une forme syntaxique nom – verbe – nom. La réification des processus, c'est-à-dire la transposition des relations en objets, donne alors un modèle cohérent de la forme syntaxique verbe – nom – verbe.

NOTE 2 Il n'est pas possible d'exprimer toutes les relations entre des choses statiques sous forme de transformations induites par des processus.

Dans presque toutes les situations, seule une partie du modèle d'un aspect participe au modèle sémantique qui relie cet aspect à un ou plusieurs autres aspects. Cependant, dans certaines situations, l'étendue de l'interaction peut avoir davantage d'effets sur les parties du modèle qui normalement ne sont pas impliquées.

NOTE 3 L'utilisation de dictionnaires techniques ouverts, tels que l'ISO 22745 [23] et l'IEC 61360 [1], fournit des méthodes pour décrire les termes et définitions, certains en contexte et d'autres qui permettent de faire référence à de nouveaux contextes.

EXEMPLE 1 Pour un aspect d'usinage en interaction, la vitesse de la broche et la fraise peuvent être ignorées dans certaines utilisations de l'aspect, mais il peut être nécessaire de les modifier lorsqu'un nouveau matériau d'alimentation est introduit.

Il convient que le modèle sémantique représentant l'interaction des aspects soit suffisamment détaillé pour maintenir l'interaction et tenir compte de la modification des participants.

Une difficulté évidente est la variation de l'utilisation de terme au sein d'un domaine, ce qui rend l'échange de connaissances transversal au moins ambigu. Il convient de spécifier clairement la syntaxe et la sémantique du langage du domaine dans un contexte, avant toute tentative d'échange d'informations significatives dans ce contexte.

EXEMPLE 2 Les écarts sémantiques entre les technologies de l'information et les technologies opérationnelles sont souvent à l'origine de discordes entre les services.

EXEMPLE 3 Dans la construction navale, les pompes font appel à différentes professions d'ingénierie travaillant ensemble pour l'installation de pompes complètes et chaque profession a son propre langage.

Tous les éléments d'un modèle sémantique qui interagissent avec d'autres entités en dehors de ce modèle sémantique doivent être identifiés et définis de manière unique, que ce modèle sémantique soit une entreprise de fabrication entière ou la capacité d'un composant.

6.12.3 Granularité des modèles sémantiques

Pour maximiser l'utilité des modèles sémantiques liés à l'aspect dans la compréhension des interactions entre les aspects, le niveau de granularité des modèles sémantiques constituants doit être similaire de sorte que les éléments d'un modèle sémantique puissent être identifiés dans un autre modèle sémantique associé. Parfois, une traduction du vocabulaire d'un modèle sémantique est nécessaire pour reconnaître les éléments modélisés communs.

Bien que l'apparition des méthodes UUID [31] et URI [63] pour les éléments du modèle de référence présente des opportunités pour les modèles concis construits en référence à d'autres artefacts, ces méthodes de référence présentent également de nombreuses difficultés potentielles pour étendre un modèle sémantique cohérent en incluant des éléments référencés.

Lorsque le modèle de référence spécifie des éléments par référence, ce modèle de référence doit indiquer le potentiel connu de déviance par rapport à l'intégrité du modèle sémantique, en raison soit d'une différence de granularité, soit d'une perturbation des critères de cohérence établis. Cette information de déviance est nécessaire pour permettre l'établissement de conditions limites de l'analyse et pour indiquer d'éventuelles opportunités utiles d'amélioration des performances par la synthèse de nouvelles capacités.

Lors de l'utilisation d'un modèle de référence dans un but spécifique, le fait de l'affiner donne souvent lieu à une spécialisation de la partie du modèle de référence qui se rapporte à cet objectif, aboutissant à un modèle sémantique avec différents niveaux de granularité pour les éléments constitutants.

Un modèle sémantique doit identifier les différences de granularité des éléments modélisés soit en annotant leur retrait du modèle sémantique spécifique de l'objectif recherché, soit en étiquetant les éléments du modèle ainsi affiné avec un descripteur de contexte pour indiquer son niveau de granularité plus détaillé.

7 Dimensions de l'URMSM

7.1 Identification des interactions entre les aspects de la fabrication intelligente

Certains aspects des systèmes de SM, qu'ils soient à l'échelle d'une chaîne logistique compliquée ou d'une machine-outil, peuvent être clairement spécifiés et limités de sorte qu'il existe peu ou pas de chevauchements de fonctionnalité ou de structure avec un autre système de SM. La relation avec les autres systèmes de SM ou composants d'un système de SM passe par des interfaces bien définies. Pour de nombreux autres aspects des systèmes de SM, en particulier ceux de nature plus qualitative, les interfaces bien définies ne sont pas évidentes et la notion d'interface n'est parfois pas pertinente. Cependant, pour ces deux situations, les aspects interagissent les uns avec les autres, parfois au moyen d'interfaces bien définies, parfois d'une manière qui n'est ni bien connue ni évidente.

Pour permettre la SM, il convient d'identifier les interactions entre les aspects susceptibles d'affecter l'efficacité et l'efficience de la fabrication.

EXEMPLE 2 Une machine-outil interagit avec les systèmes de manutention de matériaux qui alimentent le processus de fabrication, mais aussi avec les nouveaux outillages et les installations. Les programmes de pièces sont dynamiques et basés sur les exigences de l'opération de production pour la cellule de travail. Dans cette situation, les aspects relatifs à la pièce ont des interactions avec la machine qui produit la pièce. Les modèles de la pièce et de la machine ont chacun des limites qui sont affectées par les modifications apportées aux spécifications de pièce telles que les rebuts, la consommation d'énergie, la manipulation des matériaux. Certains de ces aspects peuvent être rassemblés dans une dimension telle que la consommation d'énergie du flux de travail, ainsi que la relation avec le cycle de vie.

L'IEC TR 63319 [9] identifie des dizaines d'aspects relatifs à la SM. La plupart de ces aspects ont un modèle de représentation sous-jacent. En revanche, les différents modèles pour la même étiquette d'aspect résultent de différentes perspectives pour la ou les préoccupations incluses dans ces différents modèles au sein d'une description d'aspect. Ces différentes perspectives sont souvent le résultat de différents objectifs de modélisation par rapport à l'effort de SM.

Les aspects destinés à être pris en compte dans les modèles de référence de SM doivent être identifiés en fonction de leur objectif et de leur contexte de modélisation spécifiques. En outre, les aspects doivent être représentés comme des modèles formels utilisant une notation bien formée qui permet l'analyse et la synthèse en utilisant à la fois des ressources d'examen humain et de calcul.

NOTE 2 Si les ressources de calcul permettent désormais l'utilisation de technologies de modélisation avec une capacité et une puissance de traitement bien supérieures à celles des humains, un examen humain de la base de calcul reste nécessaire pour vérifier et valider les résultats d'analyse et de synthèse.

Avec des modèles appropriés, il existe de nombreuses techniques permettant d'identifier les éléments communs des modèles qui peuvent servir de base à l'identification d'une interaction potentielle, soit entre différents modèles du même aspect, soit entre des aspects de préoccupations assez différentes. Avec l'attention portée aux variations des définitions de termes et de concepts, la mise en correspondance des schémas de modèle est une approche d'interaction explicite [53]. L'identification de relations structurelles entre les aspects est une autre approche d'interaction explicite [47]. Cependant, certaines interactions d'aspects sont implicites et ne sont pas facilement ou bien représentées dans un modèle formel. Par conséquent, une caractérisation textuelle est nécessaire.

7.2 Spécification des dimensions de modélisation

7.2.1 Ensembles d'aspects servant de dimensions de fabrication intelligente

L'un des principes fondamentaux de dimensionnalité dans la modélisation [60] [38] [59] est le double critère de dépendance entre les éléments d'une dimension de modélisation (ci-après simplement appelée "dimension") et d'indépendance entre les dimensions pour les considérations par paires lors de l'analyse et de la synthèse. Dans ce sens, une dimension est une variable indépendante au sein d'un espace de problème. La dimension est composée d'éléments dépendants, la question étant de savoir "dépendants par rapport à quoi".

NOTE 1 Dans la mesure où les dimensions impliquent le même espace de problème d'entité, elles ne peuvent pas être strictement indépendantes. En revanche, elles peuvent être "suffisamment indépendantes", c'est-à-dire suffisamment distinctes, pour l'objectif poursuivi par l'effort de modélisation.

Dans les cas de figure simples, les éléments de la dimension sont dépendants, car ils participent tous à une déclaration de type particulière qui caractérise les membres de la dimension, dans laquelle une relation de similarité permet d'identifier les caractéristiques inhérentes à ce type. La réponse est plus compliquée lorsque le "type" est considéré comme une abstraction impliquant non seulement des propriétés statiques, mais aussi des propriétés dynamiques.

Une dimension de modélisation doit être cohérente lorsque les membres de sa déclaration de type présentent toutes les propriétés statiques et dynamiques spécifiées par la relation de similarité pour ce type. Les déclarations de type doivent fournir une clarté d'appartenance suffisante pour satisfaire au double critère de dépendance et d'indépendance des dimensions pour l'analyse et la synthèse.

NOTE 2 Ici, la notion de "type" est distinguée, mais la relation de similarité permet une certaine latitude pour identifier les membres d'un type particulier. La relation de similarité peut être considérée comme une fonction qui met en correspondance un aspect et un type dans le but de recueillir dans une même dimension des aspects ayant la même désignation de type. Dans l'IEC TR 63319 [9], la relation de similarité est appelée *règle de cohérence des ensembles d'aspects et la dimension de modélisation est appelée *ensemble d'aspects.

NOTE 3 Dans les langages de programmation, la déclaration de type reçoit la désignation "type abstrait de données" (TAD) même si les propriétés et le comportement vont bien au-delà des notions de données à proprement parler.

EXEMPLE 1 La production, le produit et le cycle de vie sont souvent considérés comme des dimensions de fabrication différentes dans lesquelles les membres de la production sont des éléments impliqués dans la production d'un résultat, le produit comporte des éléments du résultat produit et les éléments du cycle de vie segmentent les activités associées à la production ou au produit.

Après avoir établi la qualification de type pour l'appartenance à une dimension, les différents aspects de SM modélisés peuvent être identifiés par rapport à cette dimension lorsque les caractéristiques d'aspect incluent la déclaration de type de cette dimension.

La qualification suivante pour qu'un aspect soit membre d'une dimension est la participation à une relation avec d'autres membres de la dimension. La relation peut avoir une nature méréologique, répondre à un ordre de tri logique ou toute autre déclaration de relation logique.

NOTE 4 La déclaration de type induit une déclaration logique parmi les membres de la même déclaration de type.

La dernière qualification pour qu'un aspect appartienne à une dimension est de le choisir pour sa pertinence par rapport à l'objectif de l'activité de modélisation. En général, le modélisateur sélectionne les aspects qui répondent aux préoccupations des parties prenantes parmi les aspects qui satisfont aux deux autres qualifications.

EXEMPLE 2 L'IEC TR 63319 [9] fournit une analyse approfondie des membres d'un aspect choisis pour leur pertinence par rapport à l'objectif de modélisation par différentes architectures de référence pour trois dimensions de modélisation distinctes: cycle de vie, hiérarchie et couche.

La relation de similarité de dimension caractérisée par 1) une déclaration de type, 2) des relations transversales et 3) une sélection par pertinence par rapport à l'objectif de modélisation peut également induire une relation d'inclusion qui limite les aspects à l'appartenance à une seule dimension.

NOTE 5 Pour un aspect donné, l'affectation à une dimension peut varier en fonction de l'objectif de modélisation, de la déclaration de type et des relations entre les aspects ou en cas de modification de la caractérisation de l'aspect.

7.2.2 Ensembles de dimensions servant de cadre analytique pour la fabrication intelligente

Un cadre de modélisation, tel que présenté à l'Annexe B, peut à la fois guider le développement d'un nouveau système ou d'une nouvelle application et servir de base à l'analyse d'un système ou d'une application existants. L'examen des entités et des relations du modèle sémantique qui relie les aspects au sein d'une dimension donne lieu à des informations utiles pour évaluer les problèmes et les opportunités associés à une modification du système ou de l'application modélisés. Cependant, comme les aspects sont du même type et sont des membres du modèle sémantique de la même dimension, il est peu probable que cet examen donne lieu à beaucoup d'informations sur les aspects dans d'autres dimensions du système ou de l'application.

Pour bien comprendre les impacts d'une modification, y compris les événements potentiellement disruptifs, les conséquences sur des aspects au-delà de la dimension unique doivent également être examinées.

Le nombre d'autres aspects et le nombre de leurs dimensions respectives dépendent nécessairement des dimensions de modélisation explicites disponibles, des aspects inclus par ces dimensions et de la robustesse du modèle sémantique correspondant à chaque dimension. L'objectif de la modélisation influence fortement la sélection parmi les dimensions disponibles, le choix des aspects à inclure et la robustesse suffisante d'un modèle sémantique. De plus, il convient que l'étendue de l'abstraction soit adaptée au traitement des défis intellectuels qui deviennent difficiles à gérer à mesure que le niveau de détails s'accroît.

NOTE 1 La qualité robuste d'un modèle sémantique fait référence à la précision avec laquelle il représente la réalité qu'il est destiné à modéliser, et à sa stabilité en cas de modifications mineures de cette réalité. Différents types de modèles sémantiques sont évalués par différents moyens (par exemple, des exemples antagonistes peuvent aider à déterminer la robustesse d'un réseau neural convolutif utilisé pour l'apprentissage automatique [54] tandis que des attributs de solidité, d'exhaustivité, de lucidité et de laconicité peuvent aider à déterminer la robustesse d'un modèle de processus-objet [40]).

Lors de l'examen de plusieurs dimensions, il est nécessaire de s'assurer que leur degré d'abstraction et la granularité des détails sont à peu près équivalents. Par conséquent, lors de la construction ou de l'analyse d'un cadre de modélisation multidimensionnel, les dimensions participantes doivent avoir environ le même degré d'abstraction, présenter des modèles sémantiques avec approximativement la même granularité de détails, et être cohérentes avec l'objectif du cadre de modélisation. En l'absence d'une telle équivalence, le processus d'analyse doit faire connaître et compenser les sources d'information disparates.

Lors de la composition des dimensions, qui sont des ensembles d'aspects, dans une facette de plusieurs dimensions, Warfield et Christakis [59] indiquent deux critères de sélection supplémentaires qui doivent être appliqués:

- l'inclusion de la dimension rend possible une description plus précise du système, ce qui n'est pas possible si la dimension est omise;
- l'inclusion de la dimension implique que les choix effectués lors de la conception modifient le comportement d'une manière qui serait impossible si la dimension était omise.

NOTE 2 Dans le métamodèle de l'IEC TR 63319 [9], le concept de cadre de modélisation est identifié comme une facette et les critères d'inclusion dans un cadre de modélisation sont identifiés comme une règle de composition d'une facette.

De plus, un cadre de modélisation contenant trop peu de dimensions n'est pas en mesure d'atteindre l'objectif poursuivi par l'effort de modélisation, car la variété descriptive nécessaire n'est pas disponible. La reconnaissance de la prise de décision par l'homme fait souvent défaut dans les cadres basés sur la technologie. Inversement, un cadre de modélisation comprenant un trop grand nombre de dimensions ne permet pas d'atteindre l'objectif poursuivi par l'effort de modélisation, car les aspects imposés submergent les utilisateurs qui ne parviennent pas à réagir efficacement. Une approche minimaliste de la sélection des dimensions peut focaliser le jugement humain de manière à ne pas dépasser les capacités cognitives à court terme ou provoquer une surcharge physiologique. Enfin, des dimensions prédominantes permettent de s'assurer que les décisions utilisent au maximum les connaissances disponibles [59]. Ainsi, une variété suffisante, mais minimale, de dimensions prédominantes peut assurer la fidélité du cadre de modélisation à l'objectif pour lequel il est créé et utilisé. Une sélection appropriée des dimensions des aspects modélisés constitue le point de départ descriptif de l'analyse prescriptive.

NOTE 3 En assouplissant les contraintes d'un ensemble d'aspects ou d'un cadre de dimensions, il est possible d'obtenir un cadre analytique qui offre davantage de possibilités d'examen des interactions entre les aspects. Cependant, comme ces contraintes sont assouplies, la fidélité de l'analyse est compromise et il est nécessaire d'exprimer correctement les résultats analytiques d'une manière qui assure une interprétation fiable. Voir 7.3 pour d'autres discussions.

7.2.3 Ensembles de phases de cycle de vie servant de dimensions de fabrication intelligente

La distinction entre une phase de cycle de vie et une étape d'historique de vie présentée en 6.11 devient très importante lorsque l'une ou l'autre est considérée comme une dimension d'un cadre de modélisation analytique ou synthétique. Il convient que le modèle sémantique d'une dimension "cycle de vie" se concentre sur les mécanismes permettant d'identifier les dépendances et les similitudes entre les modèles utilisés dans différentes phases du cycle de vie par les autres dimensions du cadre de modélisation.

Il convient que le modèle sémantique d'une dimension "historique de vie" se concentre sur les mécanismes de saisie et d'enregistrement des instances d'exécution des activités durant le cycle de vie, y compris les conditions de lancement, les résultats et les conditions de fin. Le premier est souvent plus utile pour les synthèses à l'aide d'un modèle de référence, alors que le second est souvent plus utile lors des analyses à l'aide d'un modèle de référence.

NOTE Le modèle sémantique d'une dimension a déjà des dépendances internes identifiées.

Étant donné que les historiques de vie ne s'alignent généralement pas ou ne s'alignent pas uniquement sur des repères temporels particuliers, un cadre de modélisation peut exiger plusieurs dimensions orientées vie pour remplir son objectif. Telle est la situation avec un cadre de modélisation qui a besoin à la fois d'une dimension "production" et d'une dimension "produit". Ces dimensions sont alignées au fur et à mesure que le produit progresse dans le processus de production, mais elles ont des historiques de vie plutôt différents et seuls leurs aspects liés à la production peuvent interagir.

Une dimension orientée vie doit clairement identifier son objectif au sein d'un cadre de modélisation et si ses aspects se rapportent à l'identification et la segmentation des activités menées au cours du cycle de vie ou plutôt à l'enregistrement de l'historique de vie des activités exécutées.

7.3 Utilisation d'un modèle sémantique pour le raisonnement analytique dans le cadre de la fabrication intelligente

Il convient qu'un modèle de référence pour la SM permette d'analyser à la fois les opérations de fabrication existantes et les conséquences potentielles de l'introduction d'une modification dans cette opération, en particulier en cas de modification de nature disruptive. Un cadre de modélisation des aspects et des modèles sémantiques associés permet d'examiner directement les objets et les relations explicitement identifiés des modèles sémantiques. Lorsqu'il existe parmi ces modèles une similitude dans les objets ou les schémas, une certaine inférence concernant les interactions est possible. Dans certaines situations, cet examen limité est suffisant.

Pour faciliter l'examen des interactions, il convient que des outils de recherche et de navigation soient disponibles. Il est préférable d'utiliser des outils qui intègrent la recherche par mots-clés ou par expressions et la navigation basée sur les résultats de recherche et qui peuvent s'appliquer à de nombreux types de cadres de modélisation.

Cependant, la disponibilité de moteurs analytiques puissants offre des opportunités supplémentaires d'examen, en particulier en ce qui concerne les conséquences d'une modification dynamique. Pour utiliser la plupart des moteurs ou méthodes analytiques, les modèles sémantiques ont besoin de formes qui satisfont à la spécification d'entrée du moteur ou de la méthode en question.

NOTE L'une des raisons justifiant l'utilisation des formes identifiées en 6.12.1 et 6.12.2 est que cela facilite la transition vers la forme nécessaire aux moteurs et méthodes analytiques.

Au-delà de l'examen des interactions entre les aspects au sein d'une même dimension et des interactions entre les aspects de dimensions différentes, deux observations présentent un intérêt. Tout d'abord, lorsque deux dimensions d'aspects sont placées dans une configuration orthogonale, elles forment une matrice indexée par chacun des ensembles d'aspects dimensionnels et offrent l'utilisation de différentes méthodes de manipulation matricielle pour l'analyse. Ensuite, les aspects de nombreuses dimensions se caractérisent par des couches d'aspects formant un réseau de couches d'éléments d'aspect, qui peuvent coïncider avec le modèle sémantique de la dimension ou simplement être un artefact des spécifications d'aspect. Dans les deux cas, les méthodes d'analyse des réseaux multicouches peuvent donner des résultats analytiques utiles [40].

Une approche qui combine la manipulation matricielle sous forme de représentation de contiguïté et d'analyse de réseau multicouche est également possible [49].

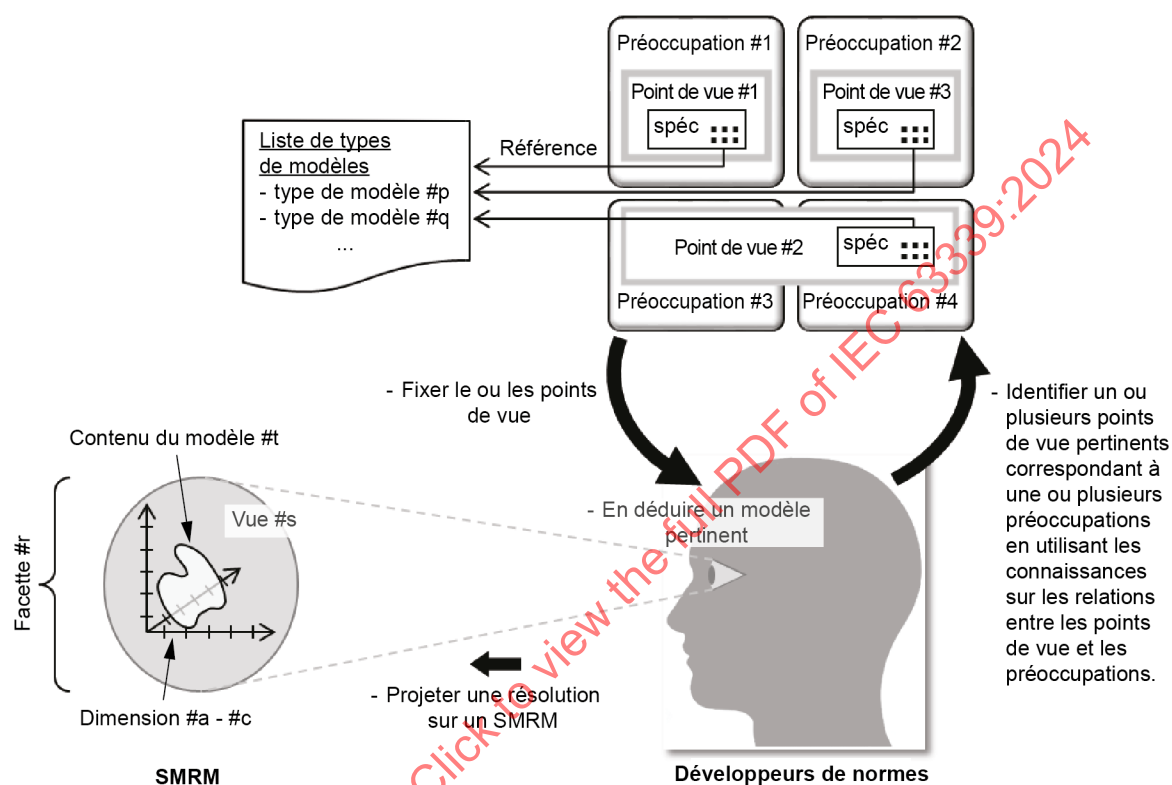
7.4 Sélection des dimensions de facette en fonction des préoccupations

Il convient que les développeurs de normes de SM possèdent une connaissance approfondie des préoccupations des parties prenantes et des points de vue associés qui appliquent les technologies de SM. En raison de la diversité des préoccupations et des technologies que les développeurs de normes de SM sont susceptibles de rencontrer, les résultats des vues de modèle et les résultats d'analyse déterminent les aspects et dimensions les plus adaptés pour structurer des facettes qui répondent au mieux aux besoins des parties prenantes. Lorsque cela est possible et pratique, une facette existante ou une partie de celle-ci peut être utilisée.

EXEMPLE 1 Les critères de sens sont une capacité à présenter une ligne directrice pour l'extraction systématique d'une facette composée d'une ou de plusieurs dimensions, que ce soit à des fins de référence ou de mise en œuvre, dans l'ensemble du secteur de fabrication, avec une attention particulière pour l'intégration et l'évolution du paradigme de SM.

Le reste du présent paragraphe propose un exemple qui applique les concepts présents dans l'URMSM à un problème rencontré par les développeurs de normes pour aligner les préoccupations des parties prenantes sur les ressources d'aspect disponibles dans le but de résoudre ces préoccupations.

Lorsqu'un développeur de normes de SM a accès à un référentiel de facettes existantes relatives à la SM, il peut utiliser des facettes multidimensionnelles pour une combinaison particulière de préoccupations de parties prenantes et de points de vue associés. L'approche ci-dessous spécifie la séquence d'activités qui permet aux développeurs de normes de SM de choisir le contenu de modèle approprié à partir d'un référentiel de modèle pour une initiative de SM particulière. Cette approche adapte la terminologie de l'ISO/IEC/IEEE 42010 [15] pour caractériser les artefacts pris en compte et générés par un mécanisme analytique, depuis la perception du besoin jusqu'à la réalisation de la facette pour une fabrication intelligente.



IEC

Figure 2 – Perspective des développeurs de normes de SM concernant la réutilisation d'une facette

La Figure 2 représente un scénario type de réutilisation d'une facette. Étant donné que la spécification d'un point de vue identifie les types de modèles #p et #q, et que la combinaison des préoccupations et des vues spécifiées par des points de vue entraîne l'identification des dimensions #a – #c, la facette #r est la source du contenu pertinent provenant des modèles sémantiques associés qui utilisent les paradigmes du type de modèle.

EXEMPLE 2 Si le modèle sémantique de l'une des dimensions inclut des normes de pertinence ou une taxonomie de terminologie, le contenu de la facette peut être une liste de normes pertinentes et de terminologies pertinentes qui répondent aux préoccupations des parties prenantes.

La Figure 3 représente le cadre procédural résultant du scénario type de réutilisation d'une facette avec un flux de droite à gauche. Après avoir identifié le ou les points de vue qui répondent à une ou plusieurs préoccupations des parties prenantes, le ou les paradigmes du type de modèle et les spécifications de vue peuvent être obtenus à partir du ou des points de vue. Cette ou ces vues sont reliées à un ou plusieurs aspects qui utilisent la ou les vues et donc à une ou plusieurs dimensions dans lesquelles apparaissent le ou les aspects. Grâce aux aspects et dimensions identifiés, le ou les modèles sémantiques et leur contenu, exprimés dans le paradigme du ou des types de modèles, sont disponibles.

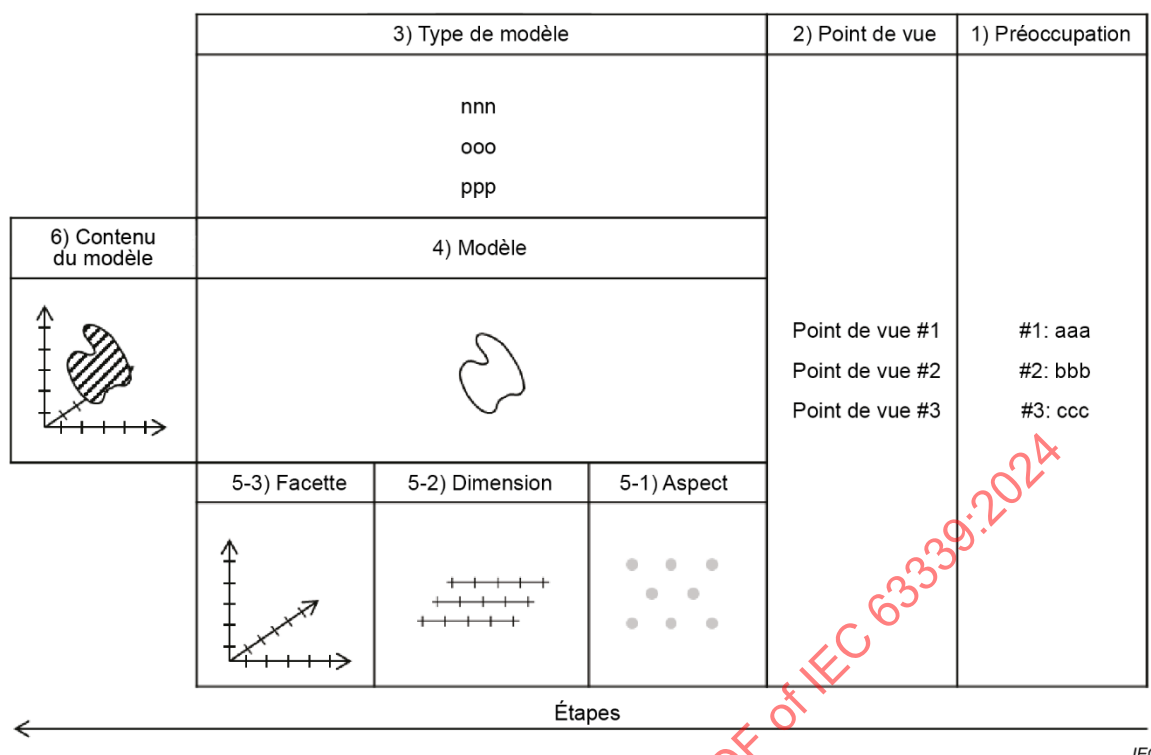


Figure 3 – Étapes de projection pour les développeurs de normes

Un flux procédural similaire est possible lorsqu'aucune facette existante n'est disponible pour extraire un contenu approprié afin de répondre aux préoccupations des parties prenantes. Dans ce scénario à une seule spécification de modèle et de vue, le contenu du modèle est créé pour satisfaire à l'objectif spécifique de l'effort de modélisation comme suit:

- reconnaître et documenter la ou les préoccupations des parties prenantes;
- identifier le point de vue pertinent correspondant à la préoccupation documentée, par application d'une expertise en modélisation SM;
- vérifier que le type de modèle correspondant découlant du point de vue choisi peut répondre aux préoccupations;
- l'utilisation du paradigme de type de modèle crée un modèle pour lequel la vue projetée satisfait à la spécification de vue du point de vue pour répondre à la préoccupation;
- itérer les étapes suivantes jusqu'à ce qu'une facette construite réponde aux exigences de pertinence;
 - reconnaître l'aspect composé à partir de la vue de modèle (voir 5-1) à la Figure 3);
 - spécifier des dimensions adaptées à chaque aspect reconnu et vérifier que les aspects du même type se trouvent dans la même dimension par rapport à l'objectif de modélisation (voir 5-2) à la Figure 3);
 - construire une facette basée sur les dimensions identifiées (voir 5-3) à la Figure 3);
- instancier le contenu pratique des vues de modèle spécifiées pour la facette.

NOTE Les modèles nationaux figurant dans l'IEC TR 63319 [9] donnent des recommandations quant à la manière dont l'itération donnée en e) ci-dessus peut se produire en fonction d'un objectif de modélisation particulier.

7.5 Identification des interactions de dimensions qui ont du sens

Les interactions d'aspects, que ce soit au sein d'une même dimension ou entre plusieurs dimensions, n'ont pas toute une signification pratique pour l'objectif poursuivi par l'activité d'utilisation du modèle de référence. Ce n'est que lorsque le modèle sémantique associé à un aspect comporte une ou plusieurs fonctionnalités en commun avec d'autres aspects que leur interaction est potentiellement significative.

Que ce soit au sein d'une même dimension ou entre plusieurs dimensions, un modèle de fabrication intelligente doit identifier toutes les fonctionnalités du modèle sémantique qui apparaissent en commun avec le modèle sémantique d'un autre aspect.

NOTE Les fonctionnalités communes sont des éléments de modélisation particuliers, souvent incorporés dans le modèle sémantique associé aux critères de cohérence des dimensions, qui caractérisent les aspects impliqués dans une interaction.

EXEMPLE Une dimension de cycle de vie d'un produit et une dimension de cycle de vie de production ont clairement beaucoup en commun pendant la production du produit, mais bien moins ou rien en commun au début ou à la fin de leur vie respective.

L'objectif de la modélisation dimensionnelle des aspects peut également influencer la pertinence des interactions entre les aspects. Les interactions d'aspects entre les dimensions qui se produisent au-delà de l'objectif de l'effort de modélisation sont généralement insignifiantes pour cet effort. Par conséquent, l'objectif de l'effort de modélisation de la fabrication intelligente doit déterminer l'étendue des interactions entre les aspects qui sont significatives pour cet objectif.

Lorsque des aspects sont liés en tant qu'ensembles d'aspects ou que caractéristiques d'aspects dans une grille ou une matrice bidimensionnelle, les éléments servent de conteneurs pour les interactions entre les aspects. Aucune colonne ou ligne ne doit être entièrement dépourvue d'interactions avec les autres dimensions. De nombreuses techniques analytiques s'appuient sur ce type de structure de cadre pour permettre des comparaisons par paires d'interactions d'aspects entre des cellules adjacentes.

7.6 Cadres servant de visualisations d'interactions

La représentation visuelle des interactions entre aspects peut prendre différentes formes: représentations graphiques de modèles sémantiques, cadres avec des ensembles d'aspects ou de caractéristiques d'aspects, grilles ou matrices, objets graphiques imbriqués. En outre, les dimensions multiples, telles que les projections d'aspects ou d'ensembles d'aspects, sont des formes fréquentes de cadres. Parfois, plusieurs formes de représentation visuelle sont combinées dans une seule visualisation.

NOTE 1 Les visualisations graphiques sont représentatives, de même que les représentations sémantiques qui utilisent différentes classes d'artefacts.

NOTE 2 Lors de l'utilisation de plusieurs formes de représentation pour une visualisation unique, il est nécessaire de s'assurer que la personne qui les consulte ne confond pas l'interprétation des différentes représentations avec l'interprétation de la visualisation unique, qui tente généralement de regrouper ou de composer les différentes interprétations dans une interprétation à un niveau de granularité très différent.

NOTE 3 L'IEC TR 63319 [9] représente de nombreuses formes différentes de visualisation. Lorsque les dimensions représentées sont des ensembles cohérents d'aspects, la représentation des interactions qui en résulte est une visualisation de facette.

NOTE 4 Les interactions manquantes ou mal interprétées entre des aspects peuvent constituer des sources de risque significatives.

Une facette de SMRM conforme à l'URMSM doit être constituée de conteneurs formés d'aspects dont la sémantique se croise à l'intérieur et entre des dimensions cohérentes. Lorsque des aspects sont liés au sein d'un même cadre, la structure du cadre fournit des conteneurs dans lesquels ou entre lesquels des interactions se produisent. Les conteneurs d'un même cadre résultent du chevauchement des dimensions du cadre et sont souvent appelés "cellules" ou "lieux géométriques" du cadre. Sauf si le cadre a un modèle sémantique correspondant (c'est-à-dire que le cadre est une facette conforme à l'URMSM), les interactions entre aspects au-delà de la séquence d'exécution possible sont généralement implicites et les dépendances entre les aspects sont souvent masquées. Au lieu d'un modèle sémantique bien spécifié, les cadres s'appuient généralement sur des descriptions textuelles d'attente concernant le contenu du conteneur et les relations avec d'autres conteneurs.

Les cadres doivent au moins énumérer des conteneurs, par exemple des cellules étiquetées, des lieux géométriques, des nœuds ou des objets, comme des intersections qui désignent des aspects ou des ensembles d'aspects pertinents pour le domaine d'application. Graphiquement, il convient que les relations entre conteneurs soient étiquetées par des arcs indiquant la nature de la relation.

Une facette de SMRM conforme à l'URMSM doit inclure les critères de cohérence pour ses ensembles d'aspects. Il convient qu'un ou plusieurs modèles sémantiques relient ces aspects les uns aux autres. Voir Annexe G pour des exemples de cadres de type schémas IDEF0.

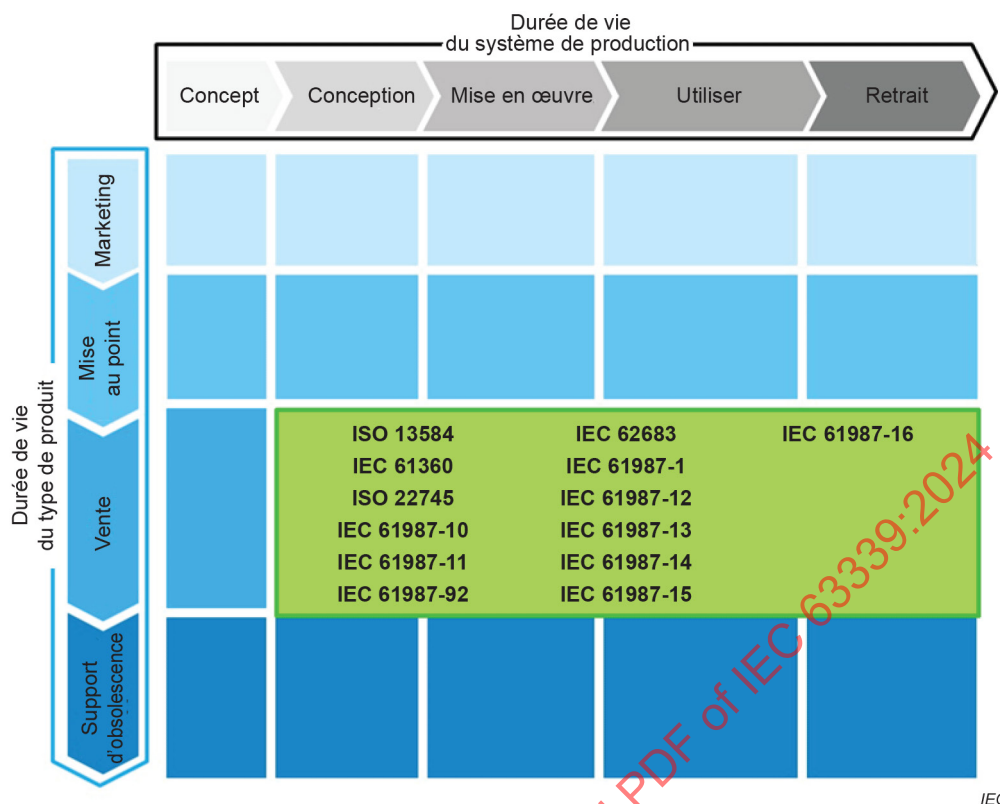
La Figure 4, la Figure 5 et la Figure 6 représentent plusieurs types de visualisations qui indiquent différentes interactions entre les aspects de la SM.

Identification			Hiérarchie											Cycle de vie											Intégration		
Référence	Titre		Hiérarchie des équipements				Hiérarchie fonctionnelle							Cycle de vie d'un type de produit			Cycle de vie d'une instance de produit			Cycle de vie d'un système de production							
État	Numéro de la Norme	Titre de la Norme	Entreprise	Installation	Station	Dispositif	Monde connecté	Métier (L4)	Gestion des opérations (L3)	Contrôle (L2)	Capteurs et actionneurs (L1)	Processus (L0)	Produit	Marketing	Mise au point	Vente	Support d'obsolescence	Fabrication	Transport et stock	Utiliser	Élimination	Concept	Conception	Mise en œuvre	Utiliser	Retrait	
Publication	IEC 61158-2	Réseaux de communication industriels — Spécifications des bus de terrain — Partie 2: Spécification et définition des services de la couche physique	-	-	1	1	-	-	-	-	1	1	1	-	1	-	-	1	1	1	-	1	1	1	1	-	-
Publication	IEC 61158-X-y	Réseaux de communication industriels — Spécifications des bus de terrain — Partie x-y: Spécification du protocole/ Définition des services de la couche de liaison de données/de la couche application — Éléments de type y	-	-	1	1	-	-	1	1	-	1	-	-	1	-	-	1	-	-	-	1	1	1	1	-	-

IEC

SOURCE: ISO/IEC TR 63306-1 [8]

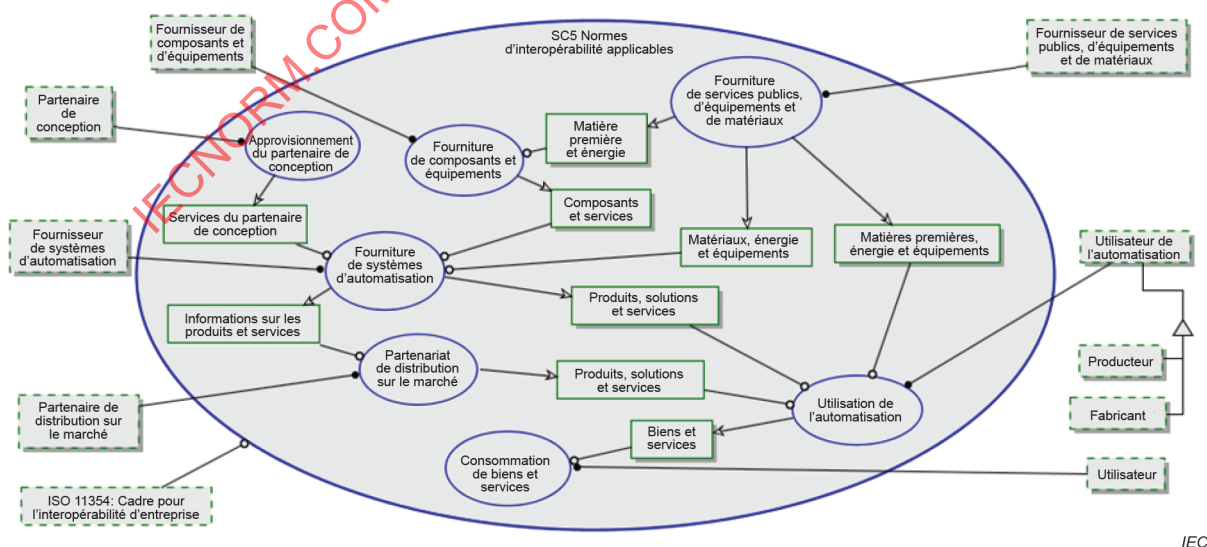
Figure 4 – Représentation d'un cadre unidimensionnel



SOURCE: ISO/IEC TR 63306-1 [8]

Figure 5 – Représentation d'un cadre bidimensionnel

Lorsque des aspects sont liés au sein d'objets graphiques imbriqués, l'étendue globale du confinement limite généralement l'interprétation des interactions entre les aspects. Les observateurs confondent souvent le regroupement d'objets en interaction au sein d'un symbole graphique étiqueté et l'expression d'une similitude ou d'une appartenance à un groupe parmi les objets qui y figurent, comme un nom d'ensemble ou de jeu.



SOURCE: ISO/TC 184/SC 5 N1111 [24]

Figure 6 – Processus imbriqués (ovale central) et membres de l'utilisateur (à droite)

Les représentations graphiques doivent faire clairement la distinction entre un confinement destiné à indiquer les relations d'interaction et un confinement destiné à indiquer l'appartenance à un groupe.

NOTE 5 Derrière les objets graphiques imbriqués, une sorte de logique de premier ordre est nécessaire pour régir la simulation et donc la sémantique opérationnelle du système de grille spécifié. L'anticipation d'une analyse basée sur des objets graphiques imbriqués est trompeuse car les objets graphiques imbriqués ne servent que la GUI du simulateur graphique représentant une situation, mais n'exécutent pas la sémantique implicite derrière la représentation telle qu'exprimée par les interactions désignées.

Lorsque des aspects sont liés dans plus de deux dimensions, généralement sous forme de projections d'aspects ou d'ensembles d'aspects à partir d'une dimension d'aspects liés, l'interaction des aspects se produit à la fois à l'intérieur et entre les lieux géométriques formés à l'intersection des dimensions. La compréhension de ces interactions est compliquée par le nombre croissant d'aspects en interaction.

Étant donné la difficulté cognitive d'interprétation correcte que soulèvent les visualisations de situations de modélisation compliquées ou complexes, il convient que les visualisations de plus de trois dimensions utilisent l'une des techniques de visualisation suivantes:

- 1) réduire deux dimensions en une seule avec révision en tant que modèle sémantique unique des aspects consolidés;

EXEMPLE 1 Consolider le Métier impliquant une Production dans une seule dimension.

- 2) étendre un lieu géométrique d'intersection d'aspects en utilisant un cadre subsidiaire d'une, deux ou trois dimensions, dans lequel les aspects qui se croisent au niveau du lieu géométrique sont distincts des aspects figurant dans le cadre subsidiaire;

EXEMPLE 2 IVRA et SMU au Japon.

- 3) générer plusieurs cadres en répétant une ou deux dimensions chacune jusqu'à ce que toutes les dimensions pertinentes soient dans une ou plusieurs visualisations de cadre;

EXEMPLE 3 ISO 11354-1 [17].

- 4) faire des annotations sur une visualisation de cadre indiquant des aspects ou des ensembles d'aspects supplémentaires qui sont pertinents par rapport à l'objectif poursuivi par l'effort de modélisation;

EXEMPLE 4 RAMI 4.0 Ajout d'un produit à la dimension Hiérarchie.

- 5) fournir une combinaison de formes de visualisation au sein d'une seule image graphique;

EXEMPLE 5 OF1-SM2 en tant que composite de SM2 avec une trame linéaire, une face 2D et un cube 3D.

- 6) fournir des annotations de recouvrement pour les dimensions associées supplémentaires.

EXEMPLE 6 SSIF, GERA, Annexe A et Annexe G.

Cependant, la recommandation concernant l'utilisation des techniques de visualisation énumérées ne restreint pas l'utilisation d'autres techniques de visualisation pour fournir des représentations graphiques de situations de modélisation compliquées ou complexes [55].

8 Utilisation de l'URMSM

8.1 Utilité d'un modèle de référence pour la fabrication intelligente

L'URMSM établit un cadre pour l'utilisation d'ensembles d'entités et de relations pour permettre la création de SMRM qui donnent des recommandations sur la spécification des aspects de fabrication, depuis la conceptualisation d'un système de fabrication ou d'un produit fabriqué jusqu'à son retrait ou son élimination. Il convient qu'un SMRM identifie ces aspects de la fabrication et comment l'appliquer lors du développement d'un modèle de SM pour une entreprise industrielle particulière.

Un système de SM est un système compliqué et souvent complexe de systèmes, dans lequel de nombreux systèmes collaboratifs, concurrents et éventuellement conflictuels sont connectés à l'aide d'approches unifiées, fédérées ou intégrées [41] [17]. À mesure que le nombre d'aspects en interaction augmente et que les degrés de liberté correspondants dans le comportement des processus et des objets conceptuels en interaction augmentent, le comportement déterministe se transforme souvent en situations indéterminées avec un comportement émergent, ce qui entraîne une complexité difficile à comprendre, à analyser et à gérer. La gestion de cette interaction compliquée et souvent complexe entre de nombreuses entités, dont certaines sont des systèmes bien définis, exige des interfaces normalisées appropriées et des processus métiers harmonisés pour réduire les interactions entremêlées. La modélisation fournit des méthodes systématiques prenant en charge l'ensemble du cycle de vie de développement, d'utilisation et de retrait du système, ce qui permet tous les avantages de la SM tout en gérant les complications et la complexité des interactions entre les constituants.

Un SMRM doit fournir un cadre pour la préparation de l'interopérabilité entre les composants ainsi que des recommandations pour la dérivation de l'architecture et la conception du système. Il convient que les parties prenantes de la SM utilisent un SMRM pour soutenir le processus de développement et que les développeurs de normes de SM utilisent un SMRM pour assurer la cohérence et la compatibilité dans l'ensemble de normes développé.

Un SMRM spécifie les aspects pertinents de la fabrication avec des abstractions appropriées, y compris leurs activités constitutives, leurs processus, leurs ressources et leurs informations, ainsi que les relations spécifiques entre les constituants. À partir d'un SMRM conforme à l'URMSM, des modèles plus spécifiques peuvent être obtenus de manière systématique afin d'obtenir un modèle pour la configuration et la mise en œuvre du système cible.

Il est nécessaire de clarifier et de normaliser le SMRM à différents degrés d'abstraction afin d'améliorer l'efficacité des processus de développement en réutilisant les actifs constituants lors du développement et de l'exploitation de systèmes. Un SMRM peut également être utilisé comme guide pour utiliser efficacement les normes existantes et identifier les lacunes pour les normes manquantes.

8.2 Application de l'URMSM pour l'industrie

Des systèmes de SM sont développés dans le monde entier, ce qui donne lieu à de nombreuses représentations et de nombreux modèles de référence possibles, chacun étant destiné à un usage différent. L'IEC TR 63319 [9] indique clairement la diversité des SMRM existants et expose la nécessité d'harmoniser ces modèles afin d'obtenir une compréhension unifiée de la modélisation des systèmes de SM.

Comme représenté à la Figure 7, l'URMSM s'utilise dans de nombreux domaines en appliquant le présent document à un SMRM spécialisé dans un domaine de fabrication particulier. En outre, l'URMSM peut être le point de départ d'un modèle de SM très spécifique à un objectif, en spécialisant tout d'abord l'URMSM afin de créer un SMRM pour l'objectif recherché, puis en utilisant cette spécialisation en vue de créer le modèle de SM. L'instanciation des éléments d'un modèle spécialisé de SM peut donner lieu à un modèle de SM applicable (SMIM, SM Implementable Model) pour une initiative de SM particulière.

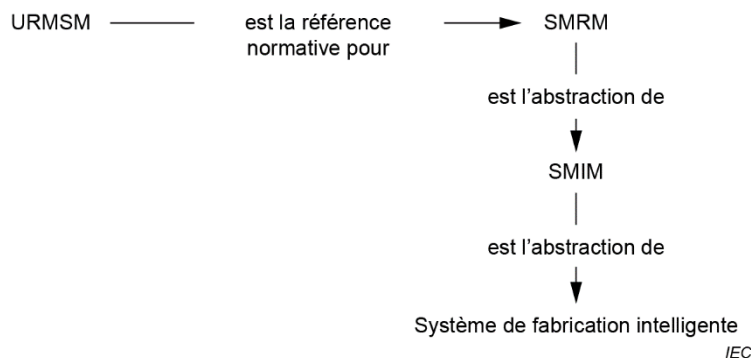


Figure 7 – Pile d'abstraction de l'URMSM

L'URMSM comporte deux sous-modèles structurels majeurs représentés à la Figure 7 pour le SMRM et le SMIM qui sont associés par deux relations "est abstraction de", l'une sous forme d'"exigences normatives (NR)" pour l'approvisionnement du SMIM et l'autre sous forme de "référence de mise en œuvre (IR)" pour l'approvisionnement du système de fabrication intelligente.

La première relation, NR, relie divers assemblages d'éléments de SM à des configurations dans des domaines d'entreprise de SM et la seconde relation, IR, relie des éléments sémantiques à des concepts de mise en œuvre.

8.3 URMSM spécialisé

8.3.1 Utilisation spécifique de l'URMSM et règles pour les dérivés des SMRM

L'URMSM a été développé en appliquant un raisonnement inductif pour identifier les caractéristiques de modélisation et de représentation dans de nombreux SMRM différents qui n'avaient aucune représentation cohérente. L'URMSM spécifie les exigences, recommandations et possibilités concernant l'utilisation des fonctionnalités lors de la création de mises en œuvre de SMRM ou SM.

Une utilisation cohérente avec l'URMSM doit se produire en appliquant les exigences normatives du présent document afin d'affiner les concepts de modèle de référence identifiés à l'Article 6 à l'aide d'éléments de modélisation (c'est-à-dire des entités et des relations) adaptés à l'objectif spécialisé prévu par l'effort de modélisation.

NOTE 1 L'URMSM affine un modèle conceptuel en utilisant des termes largement inspirés de l'ISO/IEC/IEEE 42010 [15] et de l'ISO 15704 [18].

Étant donné que le présent document ne spécifie pas d'aspects, de dimensions ou de facettes particuliers, chaque SMRM obtenu en utilisant les exigences du présent document peut être différent et focalisé sur le domaine et l'objectif pour lesquels le SMRM est créé et utilisé. Il convient que la modification des exigences du présent document lorsqu'elle s'applique à un domaine et à un objectif spécifiques limite davantage le développement et l'utilisation du modèle au lieu de permettre une plus grande latitude dans le développement du modèle par omission d'une ou de plusieurs exigences normatives.

EXEMPLE 1 Une organisation peut déterminer que seules des "données exploitables" sont à utiliser pour le développement de modèles ou que les modèles SysML ont suffisamment de contenu sémantique pour satisfaire aux exigences des modèles sémantiques et assurer la cohérence des aspects dans une dimension. À l'inverse, la spécialisation qui utilise des "données brutes" ou une esquisse ad hoc de relations idéalisées afin de guider la mise en œuvre peut ne pas être suffisamment claire pour répondre aux exigences d'amélioration du modèle sémantique d'un SMRM.

Les différentes techniques d'adaptation des visualisations à des fins spécifiques énumérées en 7.6 représentent la spécialisation des spécifications relatives à l'URMSM. Il convient que l'adaptation des visualisations à des fins spécifiques soit conforme aux exigences de l'URMSM afin de préserver les capacités d'analyse et de synthèse que ces exigences permettent.

EXEMPLE 2 Afin de préserver la cohérence, il est possible qu'une dimension "production" soit intégrée dans une dimension "métier" pour obtenir une seule dimension consolidée si les deux dimensions ont des modèles sémantiques qui se combinent dans un seul modèle sémantique.

Les spécialisations peuvent également inclure:

- le fractionnement d'aspect (par exemple, la division d'un aspect et de son modèle sémantique en deux aspects ou plus);
- l'affinement sous la forme d'un nouvel aspect (par exemple, l'insertion d'un nouvel aspect dans une dimension en affinant le modèle sémantique de cette dimension);
- la reconfiguration de dimensions (par exemple, la réorganisation des aspects à l'intérieur d'une dimension afin de se concentrer sur des aspects spécifiquement liés à l'objectif);
- l'introduction d'une nouvelle dimension (par exemple, l'ajout d'une dimension de capacité technologique spécifique);
- l'élimination d'aspects ou de dimensions entières.

Étant donné que les modèles sémantiques peuvent varier d'un niveau d'abstraction à un niveau de détail très fin, leur pertinence dans un modèle de référence dépend de l'objectif du modèle de référence et des autres modèles sémantiques utilisés dans les dimensions de ce modèle de référence.

Un modèle sémantique inclus doit clairement identifier les informations et le contexte comme référencé. Une spécialisation d'URMSM en tant que modèle de référence pour un domaine de pratique doit affiner et identifier uniquement les aspects des modèles sémantiques les plus pertinents pour ce domaine de référence. Il n'est pas nécessaire d'affiner les autres aspects non pertinents.

Au fur et à mesure que l'analyse ou la synthèse se poursuit, d'autres aspects peuvent devenir pertinents. Ces derniers doivent être identifiés et affinés au même niveau de détail de sorte que les entités et les relations pertinentes puissent être identifiées par rapport à la structure, au comportement et à l'objectif modélisés.

EXEMPLE 3 Pour les entités physiques, le degré de décomposition obtenu en utilisant la hiérarchie d'équipements de l'IEC 62264 [3] ou de l'IEC 61512-1 [2] peut souvent suffire, mais parfois le profil de capacité de l'équipement est également nécessaire. Pour les matériaux, une décomposition suffisante pour comprendre les propriétés des matériaux peut convenir, mais parfois l'emplacement et le transport des matériaux sont également nécessaires. Pour les entités logiques, la fonction d'entité, peut-être en tant que spécification de transformation de l'information, peut être suffisante, mais parfois l'attribution d'une fonction logique à un matériel est également nécessaire.

NOTE 2 Les données brutes collectées à partir de capteurs sont souvent trop granulaires pour l'analyse, ce qui peut exiger des données structurées moyennes ou médianes [43], mais elles conviennent tout à fait pour la synthèse de nouvelles capacités [44].

8.3.2 Manipulation de modèles de référence pour les adapter à un objectif

Pour que l'utilisation d'une approche basée sur un modèle de référence à des fins d'analyse ou de synthèse soit fructueuse, deux considérations sont essentielles: 1) déterminer si l'objectif d'utilisation exprime clairement ou permet de déduire les perspectives et préoccupations associées des parties prenantes; et 2) déterminer si les aspects présents dans le modèle de référence permettent d'identifier les parties prenantes ou les perspectives et fournissent assez de connaissances ou d'informations pertinentes sur ces préoccupations pour effectuer l'analyse ou la synthèse associée à l'utilisation du modèle de référence pour l'objectif indiqué.

Bien qu'un modèle de référence très généralisé couvre généralement un large éventail de parties prenantes, de perspectives et de préoccupations, la granularité des modèles sémantiques d'aspect est également très large et peu détaillée. Il en résulte une incapacité à évaluer l'applicabilité des modèles sémantiques d'aspect à des parties prenantes spécifiques, à leurs perspectives et à leurs préoccupations.

Il convient que les modèles de référence généralisés soient spécialisés dans la mesure où les parties prenantes nécessaires, leurs perspectives et leurs préoccupations sont clairement identifiables dans les modèles sémantiques qui expriment les aspects de la fabrication utilisés comme référence pour la mise en œuvre.

Étant donné que l'utilisation d'un modèle de référence à des fins d'analyse donne lieu à des efforts de travail et des orientations différents de ceux nécessaires à une synthèse, différents modèles de référence peuvent être appropriés. Il convient que chaque modèle de référence indique si son objectif est l'analyse, la synthèse ou bien l'analyse et la synthèse. Lorsqu'il est utilisé pour l'analyse, un modèle de référence peut limiter les spécialisations afin d'éviter que les résultats ne manquent de contenu pertinent. Lorsqu'il est utilisé pour la synthèse, il convient qu'un modèle de référence permette l'intégration de nouveau contenu au fur et à mesure que le projet de développement arrive à maturité.

Il arrive souvent que des modèles de référence complexes ne se prêtent pas à un affinement en vue d'atteindre un nouvel objectif. De tels modèles de référence peuvent exiger des clarifications significatives et une compréhension claire des limites que le modèle de référence impose pour la détermination de spécialisations appropriées. Il convient que chaque modèle de référence indique les domaines prévus d'applicabilité et les limites connues ou attendues d'applicabilité.

Les limites pratiques du pouvoir cognitif et de la manipulation de modèles de référence compliqués ou complexes ont empêché l'utilisation de nombreuses techniques analytiques sophistiquées, en particulier dans les domaines d'une chaîne logistique ou de valeur étendue. Cependant, l'avènement des technologies analytiques automatisées permet désormais de manipuler plus facilement les espaces de modèles à grande échelle, tout en imposant des contraintes accrues de qualité et d'exhaustivité des données [64]. Les nouvelles techniques d'analyse fonctionnelle et d'identification des opportunités d'amélioration continue dépendent de la manipulation de grands modèles qui sont des modèles construits soit sous la forme de modèles de référence multidomaines, soit en tant que modèles reproduits de jumeaux numériques de produits ou d'installations d'exploitation.

Dans les contraintes des modèles sémantiques intégrés, un modèle de référence doit indiquer les techniques analytiques applicables pour l'utilisation de dérivés du modèle de référence. Les contraintes des modèles sémantiques intégrés peuvent résulter des limites d'accès aux modèles sémantiques liés ou de la résolution de problèmes de contenus contradictoires ou non reconnus provenant de modèles sémantiques liés. Ces mêmes contraintes offrent des possibilités d'amélioration opérationnelle par l'élimination de la contrainte (par exemple, l'alignement du vocabulaire ou l'ajout d'éléments de modèle clarifiants).

Étant donné que l'URMSM s'applique aux modèles de référence plutôt qu'aux modèles destinés à l'instanciation sous forme d'artefacts du monde réel, les modèles sémantiques d'aspect, de dimension et de facette contiennent des éléments de modélisation plutôt que les instances de données ou d'informations que ces éléments de modélisation peuvent supporter. Par conséquent, l'utilité de l'URMSM se limite à la manipulation des représentations d'aspects de la fabrication intelligente et la manipulation de données ou d'informations réelles dépasse le domaine d'application de l'URMSM. Il convient que les modèles de référence pour la fabrication intelligente identifient les méthodes, normes ou mécanismes applicables pour instancier les artefacts correspondants dans le monde réel.

9 Cas d'utilisation de l'URMSM

9.1 Cas d'utilisation "analyse"

9.1.1 Examen des interactions aux intersections d'aspects

Un modèle de référence donne un aperçu des aspects d'un système en identifiant les aspects pertinents pour un objectif déclaré et en spécifiant la manière dont ces aspects peuvent interagir. Étant donné que l'URMSM demande des modèles sémantiques qui représentent les aspects et leurs ensembles dans des dimensions de modélisation cohérentes, ces dimensions doivent être la base de la compréhension des interactions entre les aspects.

Deux types d'interaction directe entre les aspects peuvent se produire: 1) les éléments de modèle partagés dans les modèles sémantiques de deux aspects ou plus au sein d'une seule dimension et 2) les éléments de modèle partagés dans des modèles sémantiques de deux aspects ou plus dans des dimensions différentes.

NOTE Le premier type d'occurrence est le résultat des critères de cohérence pour les aspects de la dimension, tandis que le deuxième type d'occurrence résulte d'interactions entre des dimensions modélisées dans lesquelles les critères de cohérence des dimensions respectives de l'aspect ne peuvent pas s'appliquer.

Pour le cas d'utilisation "analyse", il convient que l'examen des modèles sémantiques respectifs apporte des informations sur les impacts identifiables ou des connaissances concernant les conséquences des interactions directes de l'aspect.

EXEMPLE La dimension "chaîne logistique" présente dans l'Annexe G utilise l'élément de modélisation "ALEI" dans le modèle sémantique de chaque participant de la chaîne logistique, où la qualification "ALEI" est le point de départ de la participation à la chaîne logistique.

9.1.2 Examen des interactions près des intersections d'aspects

Pour chaque interaction directe identifiée entre des aspects, d'autres éléments de modélisation des modèles sémantiques respectifs peuvent apparaître dans les modèles sémantiques d'aspects "voisins" et contribuer également aux interactions entre les aspects. Ces interactions indirectes avec des aspects voisins peuvent se produire: 1) dans la même dimension, sans être directement liées aux critères de cohérence, ou 2) dans des dimensions différentes qui ne partagent pas l'interaction directe de modèles sémantiques.

NOTE Les aspects "voisins" sont ceux qui partagent du contenu sémantique avec un aspect.

Pour le cas d'utilisation "analyse", l'examen des modèles sémantiques voisins respectifs peut apporter des informations sur les impacts identifiables ou des connaissances concernant les conséquences des interactions indirectes de l'aspect. Il convient d'évaluer les conséquences de ces interactions pour déterminer si les résultats de l'interaction présentent un résultat ou une action inacceptable.

9.1.3 Insertion de nouvelles capacités d'analyse

L'amélioration par l'ajout d'une nouvelle capacité dans le contenu d'un modèle de référence existant pour permettre des résultats d'analyse efficaces et efficients repose à la fois sur la qualité sémantique du modèle de référence, c'est-à-dire sur la manière dont le modèle sémantique représente la situation de SM, et sur la mesure dans laquelle une spécialisation du modèle de référence s'aligne sur l'objectif de l'analyse. L'affinement des modèles sémantiques, soit pour améliorer la qualité, soit comme spécialisation, peut améliorer l'étendue de la couverture d'analyse, mais peut supporter le coût supplémentaire de l'analyse plus large. Il convient que les personnes qui commandent et mènent l'analyse tiennent compte du rapport coût-bénéfice associé à l'augmentation des capacités analytiques avant d'entreprendre de telles améliorations.

9.2 Cas d'utilisation "synthèse"

9.2.1 Identification de la couverture nécessaire des interactions d'aspect

Un modèle de référence de fabrication intelligente est particulièrement bien adapté pour guider les initiatives de fabrication intelligente lorsque ce modèle de référence inclut un large éventail d'aspects pertinents pour l'environnement de fabrication applicable. Comme la plupart des initiatives de fabrication intelligente se produisent dans des environnements de fabrication établis, les aspects d'un modèle de référence de fabrication intelligente ne s'appliquent pas tous à une initiative particulière. Cependant, l'élimination des aspects considérés comme non pertinents trop tôt dans l'initiative peut réduire l'identification d'interactions directes et indirectes pertinentes entre les aspects qui sont importantes pour la réussite de l'initiative.

En spécialisant un SMRM, ou l'un de ses dérivés, avec le contenu sémantique supplémentaire initialement associé à l'initiative de SM, les aspects du SMRM qui partagent ensuite des éléments de modélisation avec le contenu ajouté à partir de l'initiative de SM ressortent clairement. Il convient que les développeurs de normes de SM ou les professionnels de la SM qui spécialisent un SMRM avec du nouveau contenu sémantique utilisent ces éléments de modélisation partagés nouvellement identifiés pour examiner les interactions directes et indirectes potentielles entre les aspects et évaluer les conséquences de ces interactions sur les paramètres d'efficacité et d'efficience de la fabrication.

Les nouvelles technologies peuvent présenter un problème pour la synthèse dans le cadre d'initiatives de fabrication intelligente, car aucun modèle sémantique robuste pertinent n'est disponible pour les nouvelles technologies. Bien que les caractéristiques essentielles de la technologie soient généralement disponibles sous la forme de spécifications de conception et de guides d'utilisation, ces artefacts sont rarement rendus dans des formes utiles de modèle sémantique pouvant être utilisées avec des SMRM. Il convient que les fournisseurs et les chercheurs fournissent des modèles sémantiques pour la technologie spécifique qu'ils offrent, en utilisant des techniques normalisées de modèles sémantiques, afin d'aider les développeurs de systèmes de fabrication intelligente à comprendre et utiliser ladite technologie pour leurs initiatives de fabrication intelligente.

9.2.2 Activités de séquençement basées sur des dépendances

Les modèles sémantiques présents dans un SMRM peuvent identifier de nombreuses dépendances entre les éléments de fabrication. L'affinement d'un SMRM par spécialisation fait ressortir davantage de dépendances. L'examen des dépendances durant toutes les phases du cycle de vie peut fournir un aperçu d'une ou de plusieurs séquences possibles d'activités de fabrication qui s'alignent sur les critères de priorité (par exemple, une structure de répartition de tâches). Toutes les dépendances ne sont pas pertinentes pour la séquence d'activité, mais généralement toutes les activités ont un certain type de critères de dépendance [35].

Les critères de dépendance prennent différentes formes (par exemple, la dépendance fonctionnelle et la dépendance physique). L'identification de la forme spécifique permet de découvrir les critères de dépendance applicables à une situation particulière de SMRM ou de modèle de mise en œuvre.

EXEMPLE Entre deux éléments de fabrication quelconques, il peut exister vingt-sept formes différentes de relations ternaires logiques en raison des variations de réflexivité, de symétrie et de transitivité possibles [51].

Un modèle de cycle de vie d'entité fournit également des informations substantielles concernant les dépendances au cours des phases du cycle de vie.

Un SMRM doit identifier la source des critères qu'il utilise pour déterminer l'existence d'une dépendance dans les éléments du modèle. Un SMRM doit fournir un moyen d'identifier les dépendances directes entre les éléments du modèle sous forme de relations ou d'étiquettes d'annotation nommées. Il convient que les parties prenantes du système utilisent les informations de dépendance pour structurer la séquence ou la priorité des activités pertinentes pour les entités qui les intéressent.

9.3 Simulation dans un SMRM

La simulation peut procurer des avantages importants dans la réduction des risques et du temps de développement de systèmes de SM, tels que l'opportunité d'utiliser une technique ou des outils de simulation régularisés pour comprendre le comportement des modèles de mise en œuvre ou des jumeaux numériques basés sur le SMRM ou sa spécialisation.

La simulation est particulièrement utile pour la réalisation de synthèses à l'aide d'une nouvelle technologie lorsque le résultat de l'introduction de cette dernière n'est pas entièrement connu et l'analyse de différentes configurations possibles peut subir des itérations de simulation. Deux types fondamentaux d'analyse de simulation peuvent se produire: 1) la vérification de la cohérence et des relations valides du modèle et 2) l'exécution d'une installation de simulation remplie d'éléments de données assignés ou mesurés.

Habituellement, une simulation a lieu dans le cadre d'un modèle sémantique. Il convient que les éléments de modélisation utilisés dans une simulation proviennent de modèles sémantiques ayant le même niveau de granularité et de fidélité. En raison du caractère multidimensionnel et des éléments du cycle de vie de la SM, et comme les critères d'appartenance à un aspect d'une dimension n'exigent pas le même niveau de granularité et de fidélité pour tous les aspects de la dimension, une simulation impliquant différents aspects d'une dimension ou plusieurs dimensions d'aspects qui se croisent peut nécessiter d'affiner des modèles sémantiques d'aspect à un degré cohérent de granularité et de fidélité avant la simulation. L'objectif étant que les éléments de modélisation utilisés par la simulation puissent être pris en compte dans un contexte à peu près identique. Pour les grands SMRM, le nombre d'éléments du modèle d'entité et de relation devient trop important pour être vérifié et validé par examen cognitif. Il convient qu'un SMRM identifie des outils de modélisation capables d'assurer la cohérence des éléments d'un modèle dans l'approche de modélisation utilisée pour exprimer les modèles de mise en œuvre susceptibles de résulter de l'utilisation du SMRM.

Comme la plupart des techniques de simulation exigent des entrées basées sur des données de scénario du monde réel, il convient qu'un SMRM fournisse un moyen de remplir les éléments du modèle avec des éléments de données conformes à l'objectif du modèle et d'exporter ces données sous une forme adaptée à leur saisie dans un outil de modélisation de simulation.

9.4 Cas d'utilisation "mise en œuvre"

La conformité à l'URMSM peut offrir divers avantages non seulement aux développeurs de normes, mais aussi aux spécialistes de la fabrication intelligente. L'un de ces avantages serait une aide à la conception en utilisant les exigences et recommandations de l'URMSM lors de la mise en œuvre de systèmes de fabrication idéaux décrits dans les cas d'utilisation.

Le reste de ce paragraphe est un exemple d'application des concepts présents dans l'URMSM à l'utilisation d'un SMRM par un professionnel de la SM. Tout d'abord, ce qui suit décrit une relation entre les modèles de référence conformes à l'URMSM et les cas d'utilisation.

La Figure 8 représente la génération de vues simples à partir de modèles spécifiés par des points de vue, sous forme d'aspects d'une dimension "vue". Cette dimension est reproduite sous forme d'axe vertical par plusieurs représentations de SMRM spécifiques (par exemple, RAMI [6] et IIC [39]). Chaque vue transporte le contenu du modèle dans les intersections avec les aspects d'autres dimensions. Dans la plupart des cas, le point de vue utilise un cas d'utilisation pour en tirer non seulement des informations concernant les inquiétudes, mais aussi des propositions de cas d'utilisation ou les moyens et mécanismes exigés pour répondre à ces préoccupations dans le contenu du modèle.

Afin de présenter les caractéristiques d'un cas d'utilisation dans l'aspect, il convient de projeter sur une ou plusieurs vues le contenu du modèle découlant d'une activité de modélisation basée sur un point de vue et incluant ce cas d'utilisation (voir Annexe F).

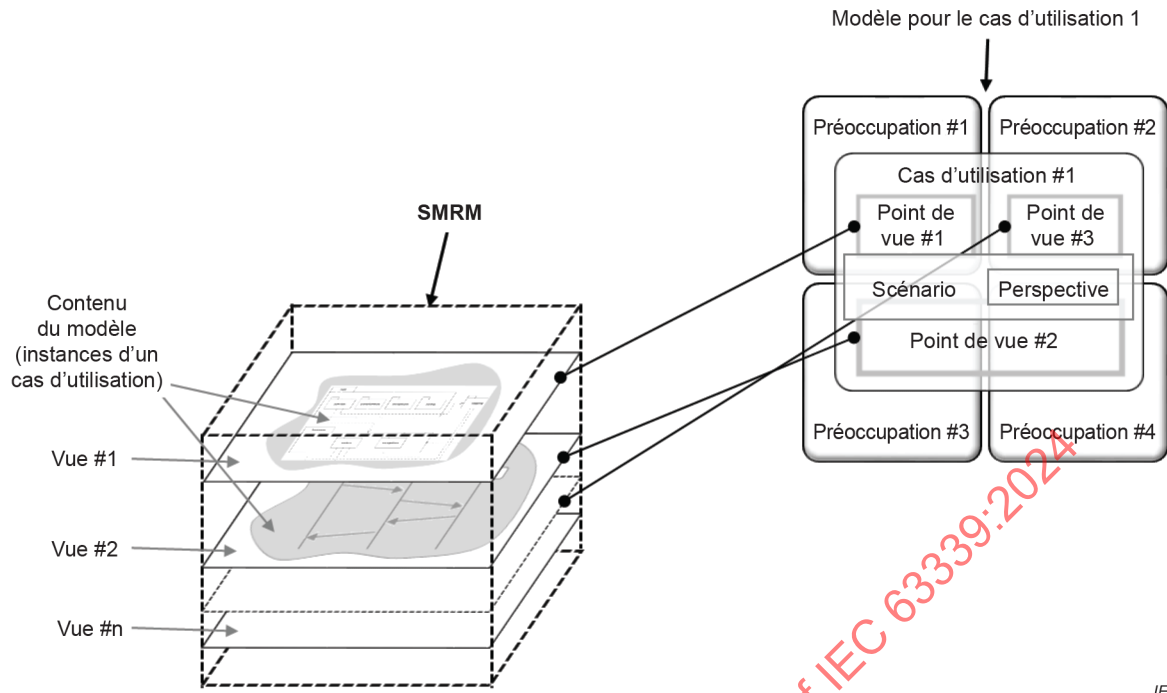


Figure 8 – Exemple de modèle pour le cas d'utilisation 1

Les hypothèses suivantes s'appliquent à l'utilisation d'un cas d'utilisation:

- un cas d'utilisation couvre une ou plusieurs préoccupations et contribue à un ou plusieurs points de vue uniques ou multiples relatifs à chaque préoccupation qu'il couvre;
- un cas d'utilisation est caractérisé par un scénario exprimant des préoccupations correspondant à la réalisation d'un objectif spécifique selon une perspective particulière;
- il est nécessaire qu'un cas d'utilisation ait le contenu approprié, cependant, tous les cas d'utilisation ne sont pas suffisamment riches pour enregistrer des informations suffisantes pour générer le contenu nécessaire;
- une partie d'un cas d'utilisation devient la base d'une spécification de point de vue qui donne une ou plusieurs vues du contenu du modèle;
- une caractéristique, telle que l'emplacement, la zone de recouvrement ou la maturité, peut être utilisée comme paramètre pour chaque point de vue modifié par des conditions assignées par la partie prenante, moyennant l'utilisation d'un cas d'utilisation de préoccupations paramétriques.

La Figure 9 représente un exemple de situation qui fait appel à des systèmes de fabrication intelligente diversifiés provenant de différents groupes de parties prenantes tels que des professionnels de la fabrication intelligente utilisant un modèle de référence. Des exemples types de diversité des parties prenantes sont l'échelle (par exemple, grandes entreprises ou PME) et le style de gestion (par exemple, innovant ou traditionnel). Les différences de fonctionnalité, d'évolutivité et de situation des systèmes de fabrication existants dans les usines entraînent des différences dans les améliorations et/ou expansions exigées pour la modernisation des systèmes. De plus, les différences de situations dans les métiers de chaque partie prenante conduisent à des différences de priorités d'investissement et/ou de montant d'investissement. Certaines différences peuvent conduire à des conflits et contradictions dans le développement du modèle, qu'il est nécessaire de résoudre.

Bien que l'objectif final d'un cas d'utilisation pour la fabrication intelligente puisse être singulier par nature, les situations auxquelles font face les parties prenantes ne sont pas singulières en raison des dépendances qui existent entre différentes capacités de fabrication. Par conséquent, il convient que les parties prenantes se réfèrent à un ou plusieurs contenus de modèle pour atteindre les objectifs de leurs cas d'utilisation particuliers (voir Annexe G).

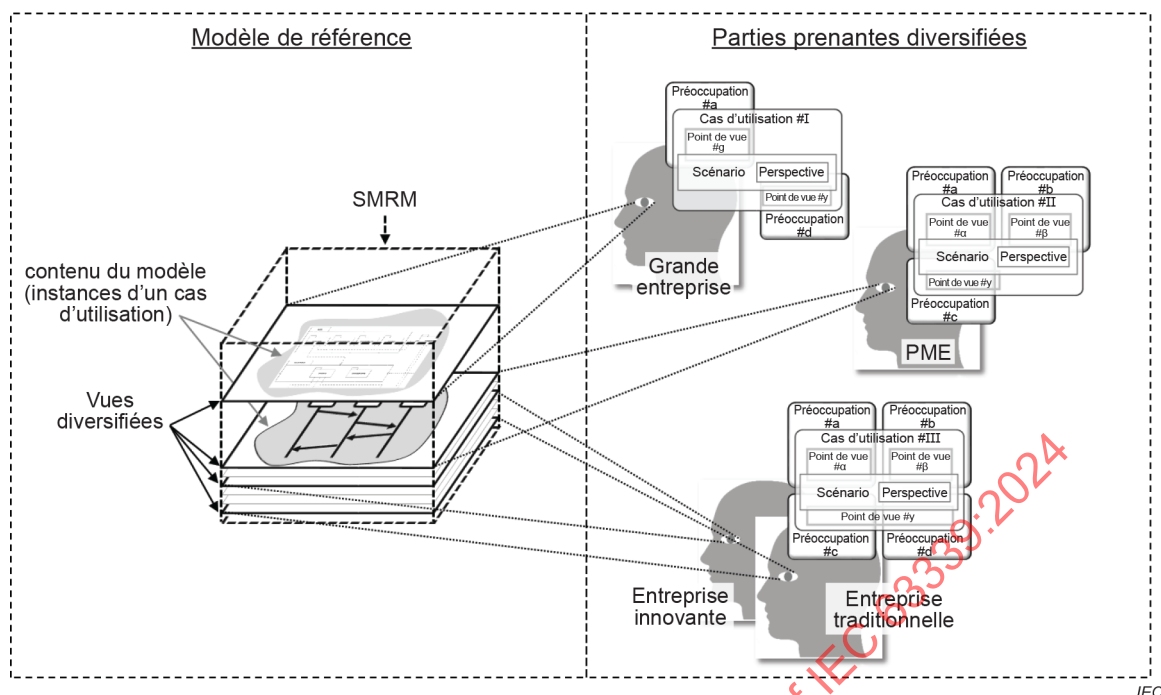


Figure 9 – Systèmes de fabrication intelligente diversifiés attendus des différentes parties prenantes

10 Famille de modèles de référence basée sur l'URMSM

10.1 Une base de dimensions essentielles de modélisation SM

Dans le domaine de la fabrication, les aspects de fabrication sont alignés de manière intuitive en trois dimensions sémantiques où la cohérence entre les aspects semble évidente: produit, production et cycle de vie. Ces dimensions sémantiques sont appelées dimensions essentielles de modélisation SM. Bien qu'il existe de nombreuses relations entre ces trois dimensions de fabrication, chacune a des critères de cohérence exprimables sans utiliser de relation de dimension transversale.

Pour la dimension "produit", la déclaration de type est le résultat des caractéristiques du produit contenues dans le modèle sémantique du produit, lesquelles sont indépendantes du moyen de production ou du cycle de vie du produit. Ce modèle sémantique peut également inclure des éléments de modèle partagés avec d'autres dimensions (par exemple, des éléments de modèle impliqués lors de la production du produit pour établir une caractéristique particulière ou des éléments de modèle identifiant les dépendances entre les phases du cycle de vie). En général, une spécification particulière de produit peut être satisfaite par plusieurs systèmes de production différents.

Pour la dimension "production", la déclaration de type est le résultat de l'infrastructure d'installation et des capacités de fabrication, c'est-à-dire les moyens de conversion des matières premières en produits finis. Cette infrastructure et ces capacités sont contenues dans le modèle sémantique du système de production, qui est indépendant des produits fabriqués. Ce modèle sémantique peut également inclure des éléments de modèle partagés avec d'autres dimensions (par exemple, des éléments de modèle impliqués dans l'acquisition de matériaux pour des produits spécifiques et pour de l'outillage spécifique à un produit, ou des éléments de modèle identifiant les dépendances entre les phases du cycle de vie). En général, un système de production particulier peut produire différents produits.

Pour la dimension "cycle de vie", la déclaration de type est le résultat de relations de priorité existant entre une étape de cycle de vie identifiée et l'étape de cycle de vie qui lui succède. Le cycle de vie sert à marquer un ensemble d'activités aboutissant à la réalisation d'un ou de plusieurs objectifs qui permettent à un ensemble ultérieur d'activités de se poursuivre jusqu'à leur achèvement. Les phases du cycle de vie sont identifiées dans le modèle sémantique du cycle de vie comme des aspects de fabrication. Ce modèle sémantique peut également inclure des éléments de modèle partagés avec d'autres dimensions (par exemple, des éléments de modèle de la dimension "produit", de la dimension "production" ou des deux).

NOTE 1 La dimension "production" contient également des produits qui sont les moyens de production. Par conséquent, il est nécessaire que le cycle de vie de la dimension "production" tienne compte du cycle de vie des produits qui sont des moyens de production.

NOTE 2 La sémantique du produit qui est un moyen de production (par exemple, une machine-outil ou une machine d'assemblage) peut être importée plusieurs fois dans le modèle de dimension "production".

La dimension "cycle de vie" diffère de la dimension "produit" ou de la dimension "production" en ce sens qu'un cycle de vie spécifique dépend d'une autre dimension à laquelle il s'applique. Les dépendances du cycle de vie de la dimension "produit" sont fonction des moyens de développement, de fabrication et d'utilisation du produit. Les dépendances du cycle de vie de la dimension "production" sont fonction de la planification, de la construction et de l'utilisation des installations. Alors que les phases du cycle de vie appliquées à ces deux dimensions se chevauchent, chacune est spécifiée en fonction des aspects de la dimension à laquelle il se réfère, c'est-à-dire que le modèle sémantique d'un cycle de vie comprend nécessairement des éléments de modélisation de la dimension à laquelle il se réfère.

L'identification des phases dépend 1) de l'objectif du SMRM ne tant que référence pour la mise en œuvre, qu'il s'agisse d'un contexte général ou d'un contexte spécifique, et 2) de la granularité des phases, c'est-à-dire de l'étendue des gradations de dépendance, qui dépendent à leur tour de l'objectif pour lequel le contexte se produit et du détail des éléments de modélisation attendus ou réalisés.

Parfois, la démarcation des transitions d'une phase de cycle de vie à l'autre est établie par un événement significatif, tel que l'achèvement de la construction et des essais d'une chaîne d'assemblage, ou un produit en entrepôt prêt à être acheminé sur le site du client. Souvent, les activités d'une phase chevauchent les activités d'une autre phase, car une activité de phase ultérieure peut commencer avant que toutes les activités de la phase précédente ne soient terminées.

Un SMRM doit inclure au moins l'une des dimensions essentielles de modélisation SM exprimées sous la forme d'une dimension cohérente d'aspects. Il convient que chaque dimension incluse ait un modèle sémantique pour cette dimension. Le nombre total de dimensions incluses dans un SMRM doit être suffisant pour inclure les aspects de fabrication considérés comme nécessaires pour satisfaire à l'objet ciblé d'application du SMRM (voir 7.2.2).

EXEMPLE Les portions du cycle de vie d'un produit peuvent permettre d'affiner un cycle de vie de production ou être intégrées dans ce dernier. En variante, un SMRM peut inclure à la fois un produit et un contexte de cycle de vie de production exprimé dans des dimensions séparées.

10.2 Réorganisation des dimensions d'un cadre

Comme identifié en 10.1, la dimension "cycle de vie" n'a de signification que lorsqu'elle est associée à une autre dimension à laquelle elle se réfère. Pour affiner la dimension "cycle de vie" en vue de se référer à différentes références dimensionnelles, le modèle sémantique du cycle de vie peut être spécialisé en modèles sémantiques distincts pour chaque référence dimensionnelle (par exemple, un modèle sémantique de cycle de vie de produit et un modèle sémantique de cycle de vie de production).

EXEMPLE Le SSIF [28] a six dimensions: métier, cycle de vie du métier, produit, cycle de vie du produit, production et cycle de vie de production.

Il convient qu'un SMRM ait autant de dimensions cohérentes que nécessaire pour remplir son objectif. Étant donné que les modèles sémantiques sont inhérents à une dimension cohérente, la représentation d'une dimension peut être modifiée pour répondre à un objectif de visualisation sans modifier le modèle sémantique sous-jacent. Ce type de réorganisation peut aider à concentrer l'attention sur les interactions entre aspects qui présentent le plus d'intérêt pour un public donné.

Étant donné que le degré d'abstraction d'un SMRM est lié à l'objectif de modélisation et que le modèle sémantique d'aspects peut contenir une référence à d'autres modèles sémantiques (voir Figure A.1), des précautions sont nécessaires lors de la réorganisation des aspects dans une dimension particulière.

NOTE Ces précautions sont nécessaires pour ne pas confondre l'objectif individuel de chaque modèle sémantique lorsqu'il est intégré à une seule dimension ou facette cohérente de plusieurs dimensions.

Une autre considération concernant les contextes sémantiques est la nature dynamique de la situation de monde réel représentée. Les modèles sémantiques sont le plus souvent rendus sous la forme d'une représentation statique ou d'une représentation à un moment donné plutôt que d'une entreprise de fabrication dynamique et en constante évolution. Une dimension temporelle chronologique permet de représenter cette dynamique avec des incréments de temps en tant qu'aspects de la fabrication. Lorsqu'il est utilisé avec une dimension temporelle, un cycle de vie associé à une dimension "production" permet d'examiner l'historique de vie d'un système de production lorsqu'il fabrique des produits.

10.3 Cadres complémentaires pour la même situation

Bien qu'un SMRM de plusieurs dimensions puisse représenter un produit fabriqué ou un système de fabrication très compliqué ou complexe, le résultat peut être écrasant. Une visualisation d'ensemble de plus de trois dimensions est très difficile et même lorsque le nombre d'aspects est raisonnablement faible, la taille des modèles sémantiques sous-jacents en matière de relations et d'entités conceptuelles est très importante. Heureusement, des techniques de calcul permettent la gestion satisfaisante d'un SMRM compliqué et de grande taille.

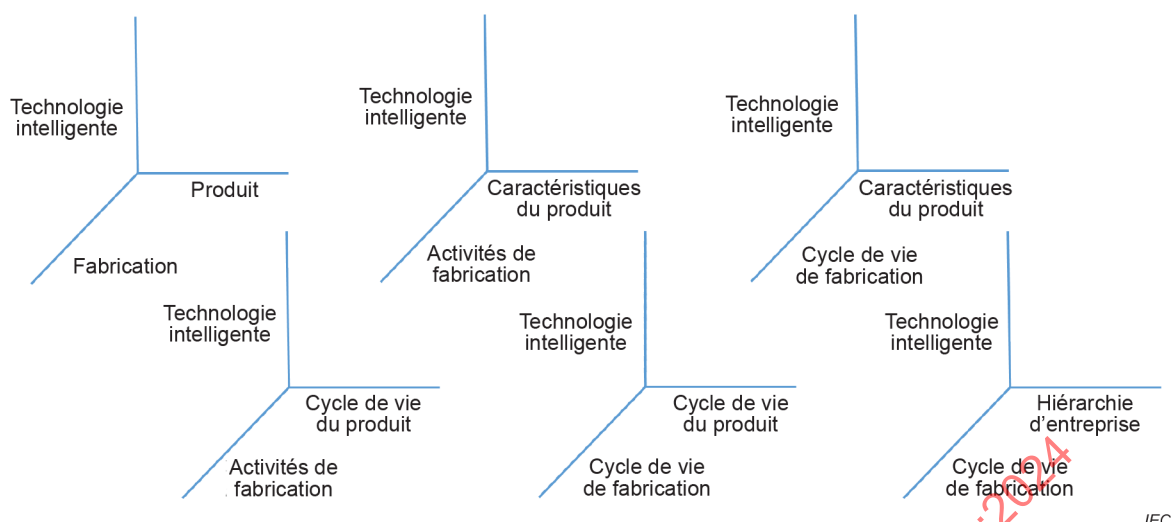
Cependant, pour servir efficacement de référence pour les initiatives de fabrication intelligente qui sont alimentées par des compétences cognitives humaines, il est nécessaire de mettre à l'échelle l'espace conceptuel du SMRM pour mettre en valeur et focaliser l'attention sur des situations moins compliquées. Les approches en 10.2 sont disponibles pour créer un ensemble de modèles de référence complémentaires qui reproduisent des portions d'un grand SMRM dans des adaptations centrées sur différentes sous-facettes d'une situation plus vaste.

Chaque sous-facette extraite d'un SMRM multidimensionnel plus grand doit comprendre au moins une dimension cohérente du SMRM parent et des modèles sémantiques associés à cet ensemble.

L'inclusion d'au moins deux dimensions d'une facette parente peut préserver certaines interactions connues entre les dimensions. En utilisant ces deux dimensions comme base, une amélioration ou une adaptation avec des dimensions cohérentes supplémentaires et leurs modèles sémantiques peut donner lieu à un modèle de référence complémentaire, qui est en fait un dérivé du SMRM parent. Les modèles de référence complémentaires doivent conserver le même objectif que le SMRM parent. Au moins deux dimensions d'un modèle de référence complémentaire peuvent servir de base pour d'autres modèles de référence complémentaires.

Chaque modèle de référence complémentaire doit conserver au moins une dimension du SMRM d'origine.

NOTE Comme représenté à la Figure 10, les ensembles d'un SMRM et les modèles de référence complémentaires contenant au moins une dimension de ce SMRM identifient une famille de modèles de référence.



SOURCE: IEC TR 63319 [9]

Figure 10 – Structure de base pour une famille de SMRM avec d'autres représentations 3D

10.4 Utilisation de plusieurs SMRM pour atteindre l'objectif

Un SMRM représente une approche méthodique d'une situation de fabrication intelligente identifiée par les aspects qu'il articule et les facettes qu'il compose à partir de ces aspects. Pour toute initiative de fabrication intelligente particulière, l'examen de plusieurs approches qualitatives peut révéler des difficultés cachées et des opportunités exceptionnelles. Même dans le cadre d'une même vaste approche, les différences d'articulation peuvent limiter l'utilité d'un SMRM à une initiative particulière de SM. De plus, de nombreuses initiatives de SM ont des impacts considérables sur les relations métier, les besoins d'infrastructure, la chaîne logistique, les opérations et les expériences client.

Il convient qu'un développeur de normes de SM ou un professionnel de la SM utilise autant de SMRM distincts, ou de dérivés, que nécessaire pour servir de références de mise en œuvre à leur initiative de SM. Lors de l'examen du SMRM à utiliser, un développeur de normes de SM ou un professionnel de la SM peut tirer avantage du choix de SMRM dont les modèles sémantiques incluent les dispositions de l'Article 5 et permettent de ce fait d'évaluer les interactions d'aspects entre les modèles de mise en œuvre. Pour pouvoir évaluer de manière satisfaisante l'utilisation de plusieurs SMRM, il est attendu que le modèle sémantique composé ou intégré qui en résulte soit complet par rapport à la situation de fabrication et que ce modèle sémantique soit aligné sur le modèle sémantique spécifique du domaine de l'organisation.

Annexe A (informative)

Domaines conceptuels de SM

A.1 Aspects de la production et des produits

Le contenu des aspects de la production et des produits est le résultat de l'expression de points de vue dans des modèles de différents types qui répondent aux préoccupations des parties prenantes et aux initiatives des développeurs de SM pour résoudre ces préoccupations. Outre les aspects plus traditionnels de la fonctionnalité et des qualités applicables à la fabrication, l'URMSM prend en compte de nouveaux aspects pertinents pour la SM. Ces aspects incluent les processus d'autocorrection et d'intelligence intégrés qui font ressortir le besoin d'examiner les produits et la production à travers différentes situations. Pour atteindre les fonctionnalités souhaitées de flexibilité, d'évolutivité et de réduction d'ingénierie, certains des nouveaux aspects de capacité des ressources et processus intelligents pour la production et les produits sont les suivants:

- une communication fiable (par exemple, une connectivité sécurisée, la confidentialité des messages);
- les ressources d'autointégration (par exemple, la négociation autonome, la prise de conscience de la situation);
- la résilience au changement (par exemple, la configuration adaptable, la reprise progressive après défaillance);
- l'efficacité de calcul (par exemple, l'analyse de flux de données, la sémantique actualisable);
- la composition du service (par exemple, la transparence fonctionnelle, les microservices, le montage sur chaîne);
- le développement basé sur un modèle (par exemple, les points de vue des parties prenantes, les vues de modèle); et
- le fonctionnement basé sur un modèle (par exemple, la représentation numérique, la simulation).

Les éléments de fabrication sont représentés dans les aspects de la fabrication comme des modèles de SM interopérables qui peuvent caractériser l'évolution de la capacité de production et des fonctionnalités d'un produit pendant leurs cycles de vie respectifs.

A.2 Perspectives des parties prenantes concernant la production et les produits

Dans le domaine de la fabrication intelligente, les produits sont souvent considérés dans le contexte de leur production et la production est souvent considérée dans le contexte des produits fabriqués. Cette dualité du domaine de fabrication peut porter à confusion lors de la prise de décisions concernant les initiatives de SM en raison des relations compliquées qui existent entre la production et les produits. Pour compliquer encore la situation, certains aspects de la production ont peu à voir avec les produits fabriqués et certains aspects des produits ont peu de rapport avec la façon dont ils sont fabriqués.

Lors de la modélisation des systèmes de production ou de produits, il est essentiel de bien comprendre l'objectif pour lequel un modèle particulier est en cours de développement ou d'utilisation. Très souvent, la manière dont les parties prenantes ou les modélisateurs considèrent et représentent les systèmes de production et de produits, c'est-à-dire leurs perspectives respectives du domaine de fabrication, entraîne une incohérence par rapport au système produit/production combiné ou ne s'applique pas vraiment à l'utilisation prévue d'un modèle de référence.

Selon la perspective de l'utilisateur, le SMRM est un cadre qui fournit des informations utiles lors de la construction d'un système de SM. Sur la base de ces informations, un SMRM fournit des valeurs qui permettent une construction efficace et un fonctionnement efficace du système. Plus précisément, un SMRM fournit les valeurs suivantes:

- étant donné que le système est construit comme un sous-système qui se connecte à des systèmes existants dans le monde, un SMRM fournit des informations relatives à l'interopérabilité;
- un SMRM fournit des informations sur les KPI et les KGI associés au système à construire;
- un SMRM fournit des informations sur les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles des technologies de SM destinées à être intégrées au système.

Un SMRM conforme à l'URMSM peut améliorer le retour sur investissement du système construit en fournissant de manière appropriée la valeur des informations sous forme de contenus concrets, tels que de la terminologie, des interfaces, des protocoles, des modèles de données et des cas d'utilisation.

Une initiative de SM peut couvrir un large éventail d'aspects du domaine de fabrication, tels que le cycle de vie des produits et des équipements de fabrication, la structure du système de SM, les capacités et la formation des personnes et des organisations. Par conséquent, la structure d'un SMRM conforme à l'URMSM ne se présente pas sous la forme d'une simple liste ou d'un graphique orthogonal qu'il est possible de comprendre de manière intuitive, mais plutôt sous la forme d'un assemblage multidimensionnel d'ensembles d'aspects qui s'adapte à chacun des objectifs. En fait, de nombreux SMRM poursuivant différents objectifs existent dans le monde et il est nécessaire d'identifier en tant qu'URMSM les exigences et recommandations communes qui peuvent ajouter la valeur d'information concrète décrite ci-dessus à ces SMRM actuels et futurs.

A.3 Considérations relatives au cycle de vie

Pour la plupart des situations de SM, les aspects et perspectives de production et de produits se développent avec des schémas de cycles de vie réguliers. Chaque aspect, tant de la production que des produits, et chaque perspective, tant celle des parties prenantes que la perspective analytique, présentent des schémas de cycles de vie distincts. Bien que ces schémas soient distincts, ils sont également fortement entrelacés.

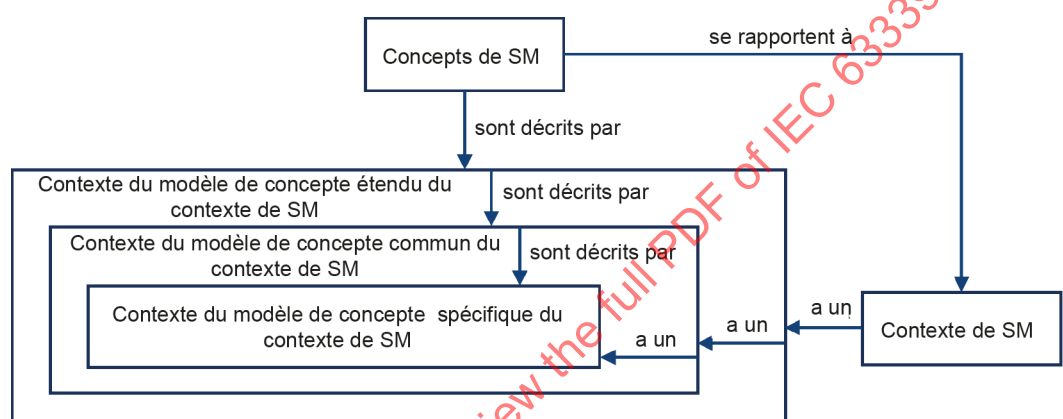
NOTE Les aspects détaillés aux différentes phases du cycle de vie (concept, conception, fonctionnement, etc.) et les perspectives (concepteur, constructeur, opérateur, etc.) déterminent les détails des modèles.

De plus, différents cycles métier, des cycles de vie d'actif particuliers et des cycles économiques et sociaux externes peuvent influencer le succès ou l'échec des initiatives de SM. La structure de l'URMSM tient compte d'un grand nombre de considérations relatives au cycle de vie.

Les considérations relatives au cycle de vie comprennent la segmentation de l'historique de vie par dépendances plutôt que par nombre d'occurrences, qui donne lieu à de multiples itérations de cycles de vie qui se chevauchent pour les aspects et perspectives d'interactions des éléments de production et de produits.

A.4 Modélisation de produits et de production à l'aide de modèles sémantiques

L'utilité des modèles dans le contexte de la SM réside dans leur capacité à transmettre la signification et un aperçu des éléments de production et de produits qu'ils représentent. Les méthodologies sémantiques normalisées sont des outils essentiels pour établir une compréhension commune des représentations numériques d'informations ou de données partagées issues d'une collaboration entre les contextes et les domaines. L'information a une relation contextuelle car elle découle de l'observation d'un phénomène dans un certain contexte. Les relations entre le concept de SM, le contexte et le modèle conceptuel sont décrites à la Figure A.1, dans laquelle les concepts de SM sont décrits sous forme de modèle conceptuel inclusif en trois parties. Tout concept de SM (par exemple, un événement) est lié à un contexte de SM, lorsqu'il peut se produire, qui a un modèle conceptuel (par exemple, une ontologie de l'événement) lequel, à son tour, décrit le concept de SM. Des précautions sont nécessaires pour définir clairement ces trois parties du modèle conceptuel de manière à pouvoir utiliser des outils analytiques et de synthèse (voir Annexe E).



IEC

Figure A.1 – Relations contextuelles de la SM

L'utilisation de modèles sémantiques tels qu'évoqués dans l'URMSM implique trois contextes d'application associés:

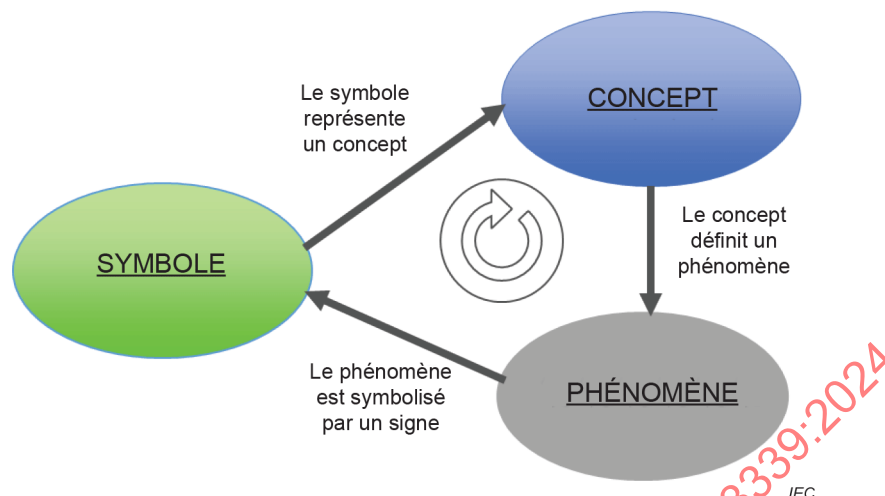
- sémantique spécifique de la SM définie au sein d'un secteur industriel ou d'une entreprise;
- sémantique commune de la SM partagée dans différents contextes de SM;
- sémantique externe de la SM définie en dehors de la SM, mais avec l'avantage d'une compréhension unifiée de ces concepts dans le cadre de la fabrication intelligente.

Lors de la création de modèles sémantiques, la transmission de la signification dépend de l'application des principes de la sémiotique. Le domaine de la sémiotique est apparu il y a plus de 100 ans avec la prise de conscience que la transmission de signification exigeait trois relations essentielles entre trois éléments essentiels: un signe ou un symbole pour signifier quelque chose, l'objet auquel ou la chose à laquelle la signification s'applique, et l'interprétation contextuelle de l'objet signifié ou de la chose signifiée [65]. Bien qu'ils soient à l'origine destinés à être utilisés dans un contexte simple, ces éléments se sont compliqués au fil du temps et, à présent, même des situations complexes sont présentées de cette manière.

L'utilisation de modèles sémantiques pour la SM peut être considérée en employant les conceptualisations définies par un triangle sémiotique, comme représenté à la Figure A.2, avec les trois angles sémiotiques suivants:

- le concept, qui fournit des artefacts sémantiques déclarés de manière formelle;
- le symbole, qui fournit des symboles ontologiques de manière descriptive (par exemple, des normes); et

- le phénomène, qui fournit une "représentation physique ou informationnelle significative" des symboles et des concepts, une chose technique.



NOTE Les nœuds et les arcs de cette figure ont été nommés différemment par divers auteurs ces 100 dernières années: Peirce utilisait les termes "signe", "objet" et "interprétant" [65], Ogden et Richards les mots "symbole", "réfèrent" et "référence" [45], tandis que de Meer a recours à "symbole", "concept" et "chose" [36].

Figure A.2 – Triangle sémiotique avec 3 domaines sémiotiques et 3 morphismes (relations entre paires d'artefacts de domaine sémiotique)

Les morphismes font correspondre les artefacts entre les trois angles sémiotiques de couleur, c'est-à-dire que les artefacts ontologiques (symbole) sont représentés sur les artefacts conceptuels (concept), qui sont représentés sur les artefacts techniques (phénomène), qui sont représentés sur les artefacts ontologiques descriptifs (symbole) et ainsi de suite. Par l'application cyclique du triangle sémiotique, telle que représentée à la Figure A.1 et à la Figure A.2, les relations sont adaptées à la sémantique intensionnelle et sont ainsi rendues plus matures. La sémantique qui définit le comportement ou les activités en dehors de la SM peut comprendre différents ensembles d'artefacts dans le but de définir un "modèle de concept de premier niveau", un "modèle de concept d'aspect naturel" ou des "éléments de modélisation communs" et d'aider à la création de nouveaux modèles (voir Annexe E).

Bien que les éléments de modélisation syntaxique ne fassent pas partie de la sémantique, ils peuvent être introduits dans les symboles du triangle sémiotique lorsque des éléments syntaxiques tels que des formats et des expressions grammaticales s'appliquent.

A.5 Modèles sémantiques

Sur la base des principes de la sémiotique, une grande variété de modèles sémantiques peut être utile pour articuler les éléments de production et de produits. Il est nécessaire que les modèles, en tant qu'artefacts représentatifs, indiquent clairement les éléments de signification sous forme de symboles ou de signes et fournissent, pour chaque élément de ce type, l'objet ou le processus phénoménologique signifié correspondant, ainsi que les concepts appropriés associés à ce phénomène dans le contexte de son identification. La signification devient claire lorsque chaque élément et les relations entre eux sont pleinement exprimés. La majeure partie de l'expression du phénomène ou de son concept associé donne lieu à des symboles, phénomènes ou concepts supplémentaires. L'itération des symboles, phénomènes et concepts donne lieu à un modèle sémantique.

EXEMPLE 1 Comme représenté à la Figure A.3, les catalogues de produits, basés sur les normes de produits, fournissent des caractéristiques et propriétés communes que les fabricants utilisent pour décrire les fonctionnalités d'un produit. Les énoncés de fonctionnalités explicites permettent de comparer les fonctionnalités des produits pour satisfaire aux exigences des applications de fabrication (voir Figure 8). Les normes de produits fournissent des modèles sémantiques pour les produits, y compris des termes et définitions spécifiques, qui sont utilisés dans les catalogues de produits. Les normes de produits fournissent les informations, tandis que le catalogue de produits constitue le contexte d'utilisation de ces informations. Le cadre de l'IEC 61360 [1] et celui de l'ISO 22745 [23] fournissent des méthodes pour décrire les catalogues de produits.

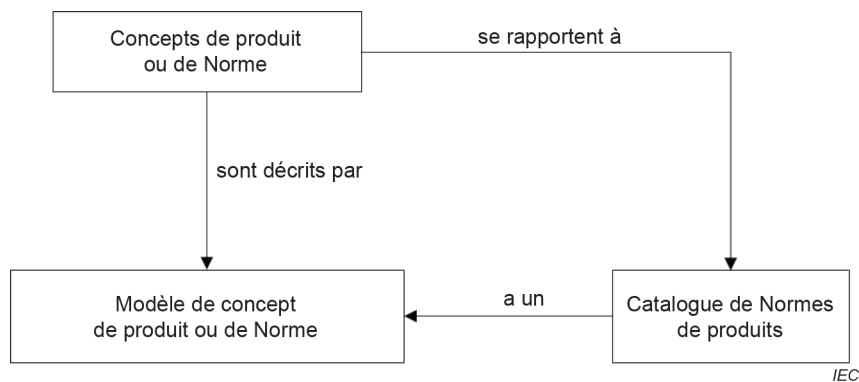


Figure A.3 – Modèle de concept de catalogue de normes de produits

EXEMPLE 2 L'ISO/IEC TR 63306-1 [8] spécifie plusieurs normes qui ont recours à une matrice de sélection composée de lignes et de colonnes, dont les en-têtes sont définis. Cette matrice permet de comparer les fonctionnalités et les utilisations des normes.

NOTE L'Annexe G fournit un exemple illustré plus détaillé.

Annexe B (informative)

Base formelle de l'URMSM

B.1 Cadre de modélisation pour l'URMSM

B.1.1 Mise en garde contre le formalisme

La présente Annexe B donne une vue d'ensemble de la formalisation d'un cadre de modélisation plutôt qu'un exposé exhaustif de cette formalisation [52] [40] [49]. Aucune revendication n'est faite concernant la rigidité ou la robustesse du formalisme et plusieurs hypothèses de simplification sont présentes. Parmi celles-ci figurent l'hypothèse selon laquelle une sorte de modèle sémantique, ou peut-être un ensemble de modèles sémantiques, existe ou est en cours de développement pour la fabrication intelligente et ces modèles sémantiques sont pertinents pour l'objectif de l'URMSM.

L'URMSM fournit des moyens d'organiser ou d'examiner le ou les modèles sémantiques selon la perspective d'un objectif de modélisation particulier. Il est nécessaire que le modèle sémantique tienne compte des éléments de fabrication de chaque aspect de fabrication qui sont importants pour l'objectif de l'activité de modélisation exprimé dans les préoccupations des parties prenantes par rapport à cet objectif [50]. Sans un modèle sémantique approprié, l'URMSM a peu d'utilité au-delà d'une représentation visuelle d'une entité de fabrication idéalisée et devient simplement une boîte occupée par des idées qui sont liées ou non d'une manière significative.

La notion de dimensionnalité pour mieux comprendre les situations complexes a été formellement articulée par Fritz Zwicky [60] et est largement utilisée depuis dans de nombreuses disciplines et de nombreux domaines de pratique. Le besoin analytique essentiel est de séparer un problème ou un espace d'opportunité de manière significative afin que les interactions élémentaires puissent être analysées et examinées. Arthur Hall [38] a identifié plusieurs façons dont l'utilisation de dimensions particulières (par exemple, le temps segmenté par des repères temporels, une procédure de résolution de problèmes segmentée par des étapes procédurales, et des faits qui définissent une discipline, une profession ou une technologie) fournit des connaissances utiles aux ingénieurs système. Warfield [58] offre une définition mathématique formelle de la dimensionnalité pour segmenter les différentes options de conception vers une solution. Chacune de ces conceptualisations de dimensionnalité est présente dans les exemples donnés dans l'IEC TR 63319 [9].

Chacun de ces auteurs, et bien d'autres depuis, soulignent un principe fondamental de dimensionnalité dans la modélisation [60] [38] [58] qui est le double critère de dépendance entre les éléments d'une dimension de modélisation (ci-après simplement appelée "dimension") et d'indépendance entre les dimensions pour les considérations par paires lors de l'analyse et de la synthèse. Dans ce sens, une dimension est une variable indépendante au sein d'un espace de problème. La dimension est composée d'éléments dépendants, la question étant de savoir "dépendants par rapport à quoi".

NOTE 1 Dans la mesure où les dimensions impliquent le même espace de problème d'entité, elles ne peuvent pas être strictement indépendantes. En revanche, elles peuvent être "suffisamment indépendantes", c'est-à-dire suffisamment distinctes, pour l'objectif poursuivi par l'effort de modélisation.

Dans les cas de figure simples, les éléments de la dimension sont dépendants, car ils participent tous à une déclaration de type particulière qui caractérise les membres de la dimension, dans laquelle une relation de similarité permet d'identifier les caractéristiques inhérentes à ce type. La réponse est plus compliquée lorsque le "type" est considéré comme une abstraction impliquant non seulement des propriétés statiques, mais aussi des propriétés dynamiques.

B.1.2 Formalisme du cadre de modélisation

La base formelle pour l'URMSM est un cadre de modélisation qui permet d'examiner les interactions entre les éléments au sein d'une entreprise de fabrication intelligente. Le cadre de modélisation est un quadruplet $\mathcal{F} = \langle \mathcal{A}, \mathcal{D}, \mathcal{C}, \mathcal{S} \rangle$

où:

- $\mathcal{A}$ désigne les aspects au sein d'un domaine de fabrication intelligente (SM);
- $\mathcal{D}$ désigne les dimensions d'un cadre de modélisation utiles pour comprendre les interactions au sein de ce domaine de SM;
- $\mathcal{C}$ est une fonction de cohérence qui répartit les aspects entre ces dimensions de modélisation;
- $\mathcal{S}$ est un modèle sémantique qui intègre les aspects en tant qu'éléments de ce domaine de SM.

La fonction de cohérence $\mathcal{C}$ met en correspondance les aspects de $\mathcal{A}$, qui résultent des vues de modèle et des compositions des vues de modèle dans le domaine de la fabrication intelligente, avec les dimensions de modélisation de $\mathcal{D}$ pour lesquelles un modèle sémantique sous-jacent, désigné $\mathcal{S}$, existe ou est susceptible d'exister.

Chaque membre du quadruplet est un ensemble de concepts plus affinés qui caractérisent la représentation basée sur un modèle d'une configuration de fabrication intelligente. Plus important encore, les membres de $\mathcal{F}$ peuvent eux-mêmes être redéfinis de manière récursive en tant que cadres de modélisation et, en particulier, les aspects sont souvent eux-mêmes des modèles de différents types faisant partie de $\mathcal{S}$.

NOTE 1 Cette présentation des bases d'un cadre de modélisation n'inclut pas d'informations sur la manière dont les spécifications d'aspect sont développées ni sur le contenu spécifique des aspects.

Le mapping entre les aspects et les dimensions de modélisation est exprimé sous la forme $\mathcal{C}: \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{D}$.

Plus particulièrement,

$$\forall a_i \in \mathcal{A}, d_j \in \mathcal{D} \exists c_j \in \mathcal{C}: a_i \rightarrow d_j \vee \text{nul} \quad (\text{B.1})$$

où

- $\mathcal{A}$ est l'ensemble de tous les aspects identifiés par rapport à un domaine SM, les aspects individuels étant désignés $a_1, a_2, \dots, a_n$;
- $\mathcal{D}$ est l'ensemble de dimensions de modélisation utiles identifiées par les parties prenantes, y compris les architectes et autres concepteurs, en ce qui concerne ce domaine et cet objectif de modélisation, les dimensions individuelles de modélisation étant désignées $d_1, d_2, \dots, d_k$;
- $\mathcal{C}$ est la fonction de mapping à des fins de cohérence exprimée comme étant l'ensemble de critères de sélection qui répartit les membres de $\mathcal{A}$ dans les dimensions de modélisation de $\mathcal{D}$ avec une sous-fonction à l'intérieur de $\mathcal{C}$, désignée $c_1, c_2, \dots, c_k$, correspondant à un critère de cohérence pour chaque dimension de modélisation dans $\mathcal{D}$;
- a_i est un aspect individuel;
- d_j est une dimension de modélisation individuelle;
- c_j désigne les critères de cohérence pour chaque dimension de modélisation.

Il est à noter qu'un aspect n'est attribué à aucune dimension de modélisation lorsqu'il n'est pas pertinent pour l'objectif de modélisation du cadre particulier. Il est essentiel de respecter les hypothèses selon lesquelles

- tous les aspects sont identifiables sans plage spécifiée;
- les parties prenantes peuvent identifier des dimensions de modélisation utiles; et
- une fonction de mapping pour la cohérence est disponible pour répartir les aspects dans des dimensions.

En outre, $\mathcal{D}$ et $\mathcal{C}$ partagent les mêmes index, c'est-à-dire que pour toutes les d_j il existe un c_j . Cependant, chaque c à proprement parler peut être un ensemble de sous-fonctions, c'est-à-dire un critère de composition de cohérence pour une dimension de modélisation.

EXEMPLE 1 Un critère de sélection possible peut être $a_i \rightarrow d_j, a_f \rightarrow d_g, d_j \neq d_g \Rightarrow a_i \neq a_f$, qui impose une séparation stricte des aspects en dimensions [58] [59].

NOTE 2 Dans certaines situations (par exemple, lors de l'examen de l'intersection des dimensions à partir de différents paradigmes de modélisation), il peut être utile d'assouplir cette dernière contrainte en reformulant le mapping sous la forme $\mathcal{C} \subseteq \mathcal{D}$ pour permettre à un aspect d'apparaître dans plusieurs dimensions.

Les critères de cohérence de $\mathcal{C}$ ne sont pas inclus dans le modèle sémantique $\mathcal{S}$ car ils sont uniquement associés à l'objectif de modélisation plutôt qu'à la situation de fabrication intelligente modélisée. Pour utiliser efficacement un cadre de modélisation, il est essentiel de faire la distinction entre la façon dont les dimensions du cadre sont formées et le mode de modélisation sémantique d'une entité. La confusion entre la conceptualisation des aspects structurels incorporés dans les dimensions du cadre et la réalité des relations intégrées dans l'entité d'intérêt (ou la substitution de la première par la seconde) peut conduire à des hypothèses de cause et d'effet erronées. La manière dont une chose est vue peut modifier la perception que se fait l'observateur de cette chose, mais cela ne modifie en rien cette dernière.

Les relations à l'intérieur du modèle sémantique sont désignées $r^{s_1}, \dots, r^{s_m}$, la même r^{s_i} apparaissant dans plusieurs fractions du modèle sémantique s_k où la même partie d'un modèle sémantique apparaît dans plusieurs dimensions de modélisation, c'est-à-dire $\exists s_i \in \mathcal{S} \mid s_i \in d_i \wedge s_i \in d_j \wedge d_i \neq d_j$. De même, des éléments relatifs aux aspects peuvent apparaître dans plusieurs fractions spécifiques d'un modèle sémantique.

Étant donné un domaine avec l'ensemble d'aspects suivant: $\mathcal{A} = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$, un ensemble de fonctions de critères de cohérence de mapping: $\mathcal{C} = \{c_1, c_2, c_3\}$, un ensemble de dimensions de modélisation: $\mathcal{D} = \{d_1, d_2, d_3\}$, et un ensemble de modèles sémantiques: $\mathcal{S} = \{s_1, s_2, s_3\}$ avec des relations sémantiques entre les aspects $r^{s_1}, \dots, r^{s_{12}}$ alors pour mettre en lumière la diversité des situations possibles, le Tableau B.1 présente une structure morphologique avec différents aspects, dimensions et relations entre les modèles sémantiques.

Il est essentiel d'être conscient qu'une modification subtile de la dénotation par rapport aux modèles sémantiques d'aspect se produit à partir de ce point pour simplifier la notation des éléments de relation et de modélisation, c'est-à-dire que la notation $r^{s_1}(a_1, a_2)$ indique que la relation r^{s_1} existe entre un ou plusieurs éléments de modélisation de a_1 et un ou plusieurs éléments de modélisation de a_2 . De plus, la même relation (par exemple, "fait partie de") peut exister entre différentes paires d'éléments de modélisation comme avec r^{s_9} qui apparaît deux fois dans le Tableau B.1.

La répartition des membres de $\mathcal{Q}$ dans les éléments de $\mathcal{D}$ fractionne également les éléments de $\mathcal{S}$, désignés $s_1, \dots, s_k$, qui impliquent les membres fractionnés de $\mathcal{Q}$.

$$\forall a_i, d_j, s_j \exists c_j: a_i \rightarrow d_j \wedge a_i \rightarrow s_j \quad (\text{B.2})$$

où

a_i est un aspect individuel;

d_j est une dimension de modélisation individuelle;

s_j est le modèle sémantique pour la $j^{\text{ème}}$ dimension de modélisation;

c_j désigne les critères de cohérence pour la $j^{\text{ème}}$ dimension de modélisation.

Autre point important, certaines parties d'aspects (par exemple, un élément de fabrication dans un modèle de l'aspect) qui n'ont pas de pertinence pour l'objectif de modélisation pour lequel la dimension est utilisée peuvent apparaître dans s_j , mais non dans un a_i placé dans d_j , car ces parties d'aspect sont impliquées dans une relation avec d'autres aspects qui apparaissent dans d_j . De tels éléments "périphériques" peuvent être des sources importantes d'effets disruptifs.

Bien que le fractionnement de $\mathcal{D}$ par $\mathcal{C}$ résulte de l'objectif de modélisation, la connaissance de $\mathcal{S}$ est essentielle pour déterminer une $\mathcal{C}$ qui satisfait à cet objectif de modélisation. Pour atteindre l'objectif de modélisation, le fractionnement de $\mathcal{Q}$ en $\mathcal{D}$ comporte plusieurs types distincts de propriétés à prendre en compte:

a) est-ce que $\mathcal{D}$ ou une dimension de modélisation particulière d_j à l'intérieur de $\mathcal{D}$ est limitée?

EXEMPLE 2 Le modèle RAMI 4.0 s'applique aux "aspects d'un actif de système de fabrication intelligente".

b) si elle est limitée, la dimension de modélisation d_j est-elle flexible en matière d'attribution des aspects ou d'aspects fixes?

EXEMPLE 3 Les trois dimensions de modélisation de RAMI 4.0 sont fixées, bien que le concept d'"Asset Administration Shell" (coquille d'administration des actifs) permette une plus grande flexibilité dans la mise en œuvre [6].

c) les critères de cohérence peuvent-ils être énoncés formellement ou la justification de l'attribution est-elle trop compliquée pour une définition formelle?

EXEMPLE 4 Les critères de cohérence formant les dimensions de RAMI 4.0 sont compliqués, car ils sont tirés de diverses sources. (Voir points e) et f) ci-dessous.)

d) chaque dimension de modélisation d_j est-elle fonctionnellement indépendante de toutes les autres dimensions de modélisation de $\mathcal{D}$?

EXEMPLE 5 Bien que tous les produits aient un cycle de vie, la dimension d'une spécification de produit, c'est-à-dire les fonctionnalités et les attributs du produit, est fonctionnellement indépendante de la dimension "cycle de vie" spécifiant les groupements d'activités relatifs à ce produit.

NOTE 3 L'indépendance fonctionnelle des dimensions individuelles n'exclut pas une relation de codépendance lorsqu'un ensemble de dimensions crée une dépendance pour une autre dimension.

e) est-ce qu'un critère de cohérence impose un ordre nécessaire aux aspects de la dimension de modélisation (par exemple, $a_i < a_f$ ou $a_i < a_f$).

EXEMPLE 6 La dimension "niveaux hiérarchiques" de RAMI 4.0 comporte les sous-critères suivants: si a_i est une entité logique ou physique identifiable par rapport au cycle de vie de l'actif et a_{i+1} se trouve dans le *domaine d'application* de a_i et $a_i \in d_j$, alors $a_{i+1} \in d_j$ et $a_i < a_{i+1}$, ce qui entraîne la dimension mise à l'échelle suivante: Niveau hiérarchique {Monde connecté, Entreprise, Centres de travail, Station, Dispositif de commande, Produit} ainsi que Produit $\models$ Dispositif de commande $\models$ Station $\models$ Centres de travail $\models$ Entreprise $\models$ Monde connecté.

NOTE 4 Tout ordre nécessaire reflète les relations dans le modèle sémantique de l'entité.

- f) quel corps de connaissances existant peut être cité pour justifier les critères de cohérence utilisés pour attribuer les aspects à la dimension?

EXEMPLE 7 La dimension "niveaux hiérarchiques" de RAMI 4.0 est basée sur le modèle d'architecture de référence pour une usine présenté à l'IEC 62264-1 [3] et l'IEC 61512-1 [2], qui sont des normes d'intégration d'améliorations de l'Industrie 4.0 dans les systèmes informatiques et de commande d'entreprise, et expliquée plus en détail dans l'IEC PAS 63088 [6].

B.1.3 Utilisation d'un cadre URMSM

Dans un sens général, les cadres de modélisation permettent d'examiner les impacts que les modifications d'aspects ont sur le système modélisé. Ces impacts peuvent concerner les aspects au sein d'une dimension de modélisation, entre plusieurs dimensions où des aspects se croisent en conséquence d'un objectif de modélisation, ou dans des régions autour d'aspects qui se croisent. L'examen peut être analytique par rapport à un système modélisé existant ou constructif pour un système émergent.

Après avoir réparti les aspects d'un domaine dans les dimensions d'un cadre de modélisation, les interactions à l'intérieur et entre les aspects sont possibles en utilisant plusieurs approches. Chaque approche repose sur l'exhaustivité et la qualité du modèle sémantique sous-jacent par rapport à l'objectif du cadre de modélisation [50]. Le modèle sémantique d'un système est souvent fragmenté et manque d'intégration compréhensible, ce qui complique l'utilisation d'un cadre de modélisation destiné à représenter l'ensemble d'un système. En outre, il est nécessaire que l'objectif du cadre de modélisation reconnaisse les carences du modèle sémantique lors du développement d'un cadre de modélisation spécifique.

Une interaction directe se produit dans une dimension de modélisation, comme identifié dans la partie pertinente du modèle sémantique détectée dans l'expression logique (2). Étant donné que ces intersections se produisent en raison de l'attribution d'aspects aux dimensions, elles représentent des interactions connues ou anticipées liées à l'objectif de modélisation plutôt que des interactions entre les aspects des éléments du système sous-jacent spécifiés dans le modèle sémantique. Cependant, les interactions présumées par cette répartition pour un objectif donné de modélisation sont généralement présentes dans le modèle sémantique également.

Des interactions directes supplémentaires entre aspects se produisent, car les dimensions de modélisation fonctionnellement indépendantes sont placées dans des configurations orthogonales de manière à former une grille indexée par les aspects des dimensions respectives (voir Tableau B.3). Cette approche des interactions d'aspects, connue sous le nom de modélisation morphologique [60], s'applique déjà dans le domaine de l'ingénierie des systèmes pour examiner les conséquences des différentes configurations physiques et logiques des composants [35] et dans les systèmes sociaux pour étudier les problèmes dans l'analyse des politiques [46].

Les interactions indirectes ou les interactions de régions de modélisation sont la conséquence d'interactions directes par rapport à l'objectif de modélisation et au modèle sémantique. Alors que des interactions directes se produisent avec l'intersection d'aspects de différentes dimensions, des interactions indirectes ont lieu entre un aspect impliqué dans une interaction directe et un aspect voisin dans la même dimension de modélisation. Ces interactions indirectes ou régionales résultent de l'objectif de modélisation spécifique pour lequel le cadre de modélisation est créé. Outre les relations entre des aspects qui se croisent, le modèle sémantique peut identifier d'autres relations entre les aspects des différentes dimensions qui ne sont pas dans l'interaction directe. (voir Tableau B.4)

EXEMPLE 1 Si une dimension a 5 aspects représentés et une autre dimension a 6 aspects représentés, alors la grille formée en plaçant ces dimensions dans une configuration orthogonale a $5 \times 6 = 30$ intersections d'aspects.

NOTE 1 Bien qu'une grille permette de visualiser la configuration orthogonale, d'autres représentations visuelles des dimensions fonctionnellement indépendantes sont possibles.