

Ingénierie et intégration multidisciplinaire à base de connaissances pour la conception de systèmes complexes

Chen Zheng, Matthieu Bricogne, Julien Le Duigou, Benoît Eynard
Université de Technologie de Compiègne
Département de Génie Mécanique - UMR UTC/CNRS 7337 Roberval
CS 60319, 60203 Compiègne Cedex, France

{chen.zheng; matthieu.bricogne; julien.le-duigou; benoit.eynard}@utc.fr

Résumé—Dans un système complexe, l'interface représente la relation logique ou physique d'intégration des composants au sein du système lui-même ou des composants avec l'environnement du système. Il est important pour garantir une intégration cohérente entre les composants conçus par les équipes d'ingénierie de différentes disciplines. Cet article présente la mise en œuvre d'ingénierie à base de connaissances (KBE) pour la conception d'interfaces pour capitaliser les données générées et les règles relatives à la définition et l'intégration des interfaces. Une méthode de conception s'appuyant sur l'ingénierie à base de connaissances dans laquelle la base de connaissances pour la conception d'interfaces est proposée pour améliorer l'intégration multidisciplinaire pendant la phase de conception détaillée des systèmes complexes. Cette méthode de conception est finalement validée par un cas d'étude d'un système de détection de décharge partielle (DP).

Mots-clés—Méthode de conception, Ingénierie à base sur de connaissance, Systèmes complexes, Modèle d'interfaces, Intégration multidisciplinaire

I. INTRODUCTION

Les systèmes deviennent de plus en plus complexes car des exigences des clients changent constamment. Les stricts systèmes mécaniques qui génèrent des mouvements ou des forces de transfert sont utilisés depuis longtemps. Au début du 20ème siècle, des systèmes de contrôle-commande ont été introduits pour piloter les systèmes mécaniques. Ce type d'évolution permet d'accomplir plus de fonctionnalités par rapport aux stricts systèmes mécaniques. En 1969, la Yaskawa Electric Corporation a introduit le terme «Mécatronique». Le système mécatronique est considéré comme une combinaison de systèmes mécaniques et de systèmes électroniques [1]. Après les années 1970, le concept de système mécatronique a été élargi et a inclus la composante de contrôle-commande. Dès ce moment-là, plus de disciplines, telles que celles de l'optique, hydraulique, pneumatique, etc., ont été graduellement intégrées dans les systèmes. Au cours des années 2000, sous l'impulsion du développement des technologies d'information et de communication, les systèmes sont influencés par certaines nouvelles tendances du développement qui se déplacent vers le traitement de l'information [2]. Dans ce contexte, différents types de systèmes complexes, tels que les systèmes embarqués,

les systèmes cyber-physiques (CPS), l'Internet des objets (IoT), les systèmes de systèmes (SoS), etc., ont été proposés et étudiés [3]. Un système complexe se définit comme un ensemble coordonné d'équipes (multiplicité de compétences, disciplines et métiers), de méthodes, de processus et de moyens pour répondre à un objectif.

L'introduction ci-dessus montre que la conception de systèmes complexes doit associer des technologies et des expertises métiers très divers. Par conséquent, une plus grande attention doit être portée sur l'intégration multidisciplinaire. L'intégration multidisciplinaire ne nécessite pas seulement l'intégration synergique des disciplines et des expertises impliquées, mais se concentre également sur les activités des ingénieurs lors du processus de conception [4]. Pendant la phase de conception détaillée des systèmes complexes, les composants sont généralement conçus en parallèle par des ingénieurs de différentes disciplines.

La définition de l'interface est au cœur de la nature multidisciplinaire de l'ingénierie et intégration des systèmes [5]. Le terme "interface" utilisé dans le domaine de l'ingénierie système est défini comme la relation logique ou physique d'intégration des composants au sein du système lui-même ou des composants avec l'environnement du système. Ils peuvent être donc utilisés pour décrire les interactions des composants conçus par différentes disciplines [6]. Cet article présente une méthode d'ingénierie à base de connaissance (KBE), dans laquelle le modèle d'interfaces est considéré comme la partie clé pour aider les équipes de conception à améliorer l'intégration multidisciplinaire. Deux nouvelles caractéristiques sont fournies dans le cadre de la méthode proposée. Tout d'abord, il permet de capitaliser et d'organiser les données de conception relatives aux interfaces et de les stocker dans une base structurée afin de faciliter la réutilisation des connaissances. De plus, il fournit un test de compatibilité automatisé pour garantir l'intégration correcte des différents composants. En appliquant les deux caractéristiques proposées par la méthode de conception, l'intégration synergique des composants dans un système complexe et l'intégration des différentes disciplines au cours du processus d'ingénierie deviennent plus intégrées, et l'intégration multidisciplinaire de systèmes complexes peut être améliorée.

Cet article est organisé en 5 parties. Le paragraphe 2 propose un état de l'art des méthodes de conception avec un focus sur l'ingénierie à base de connaissances. Le paragraphe 3 présente d'abord le modèle d'interfaces qui est utilisé comme l'élément central de la méthode de conception considérée. Ensuite, la méthode elle-même est introduite. La section 4 présente un cas d'application de la méthode dans la conception d'un système de détection des décharges partielles (DP). Enfin, les auteurs synthétisent les conclusions de ce travail dans le paragraphe 5.

II. ETAT DE L'ART

La conception de systèmes complexes nécessite l'extension des connaissances afin d'inclure plus de disciplines. Diverses méthodes de conception ont été présentées pour assurer une intégration multidisciplinaire. De nombreux chercheurs se concentrent sur des approches basées sur la CAO. Par exemple, Lefèvre et al [7] extraient les données géométriques d'un ventilateur de groupe moto-propulseur pour simuler la dissipation thermique avec Ansys Fluent. Biahmou et al [8] proposent une démarche permettant de traduire un modèle CAO en modèle de simulation de comportement numérique sous MATLAB / Simulink. Les approches basées sur la CAO se concentrent uniquement sur les dimensions définies et les matériaux mis en œuvre dans le produit ainsi que sur les caractéristiques géométriques. Mais généralement elles négligent les données et les règles qui peuvent être réutilisées au cours de la phase de conception détaillée [9].

La technologie KBE s'appuie sur la mise en œuvre de techniques logicielles avancées permettant de capitaliser, et de réutiliser des connaissances lors de la conception de produits [10]. Le KBE a été largement adopté pour la conception de systèmes monodisciplinaires, en particulier dans la discipline mécanique [11]. Chapman et Pinfold [12] proposent une application KBE pour la conception rapide des automobiles. Yang et al [13] développent une méthodologie KBE pour la conception d'un navire à quai et soulignent que le KBE peut également être utilisé pour aider le processus de conception dans d'autres disciplines. Aurum et al [14] soulignent l'importance des connaissances au cours du processus d'ingénierie logicielle et proposent un modèle structuré de gestion des connaissances en génie logiciel. Dans la discipline électronique, Wang et al [15] évaluent la possibilité d'appliquer un KBE dans la conception rapide d'une chambre de traitement de circuits intégrés.

Le paragraphe précédent montre que le KBE peut être utilisé comme un support efficace pour la conception monodisciplinaire. En considérant les spécificités de la conception multidisciplinaire, de nombreux chercheurs ont aujourd'hui mis en œuvre un KBE pour la conception de systèmes complexes. Chen et al [16] proposent une méthode basée sur un KBE pour la phase préliminaire de la conception de systèmes multidisciplinaires. La Rocca et van Tooren [17] développent des applications KBE pour la conception préliminaire d'avions. Tian et Voskuil [18] intègrent les connaissances des systèmes électroniques dans l'application KBE développée par La Rocca et van Tooren pour aider la conception des systèmes mécatroniques. L'analyse de l'état de l'art montre que les méthodes de conception basées sur un KBE se concentrent sur la phase de conception préliminaire.

Comment obtenir la collaboration des équipes d'ingénierie de différentes disciplines au cours de la phase de conception détaillée n'a pas été discuté ?

Les auteurs proposent une méthode KBE dans laquelle le modèle d'interfaces est exploité pour aider les ingénieurs dans l'intégration multidisciplinaire lors de la phase de conception détaillée pour les systèmes complexes. Le paragraphe suivant présentera les détails de la méthode de conception.

III. METHODE DE CONCEPTION EXPLOITANT UN KBE

La base de connaissances est utilisée pour capitaliser les données de conception, les règles, les expériences et autres informations caractéristiques. Aujourd'hui, la conception modulaire est largement utilisée par la plupart des méthodes KBE parce que la gestion de la modularité fournit des connaissances aux ingénieurs lors de la conception de systèmes complexes. Cependant, les connaissances relatives aux interfaces entre les modules et composants sont souvent négligées. La base de connaissances des modules permet de stocker les connaissances de disciplines spécifiques; tandis que la base de connaissances des interfaces gère les connaissances partagées par deux disciplines parce que les interfaces peuvent être la frontière entre deux disciplines. Les données de conception relatives aux interfaces sont stockées dans la base de connaissances. Cette base de connaissances est structurée par un modèle d'interface qui peut être réutilisé par les équipes d'ingénierie. De plus, les règles de compatibilité sont également décrites par le modèle d'interface, qui garantit une intégration cohérente entre les différents modules et composants. La méthode KBE présentée dans cet article implémente ce modèle d'interfaces comme un élément central pour aider les équipes d'ingénierie dans l'intégration multidisciplinaire pendant la phase de conception détaillée. Le modèle d'interfaces sera d'abord présenté dans ce paragraphe.

A. Modèle d'interfaces

Les auteurs proposent un modèle d'interfaces pour traiter le problème d'intégration multidisciplinaire [19]. Ce modèle d'interface fournit une base structurée pour stocker les données de conception liées aux interfaces afin de faciliter la réutilisation des connaissances. Il propose également des règles de compatibilité aux équipes d'ingénierie afin de garantir la bonne intégration des différents composants (Figure 1).

Afin de faciliter la réutilisation des connaissances, le modèle d'interfaces proposé contient des classes pour définir les attributs d'une interface et de ses ports. Le terme «port» est considéré comme l'emplacement principal par lequel un composant d'un système interagit avec l'autre. Les attributs d'interface sont définis en tenant compte de trois caractéristiques différentes: **Type**, **Configuration** et **Désirable / indésirable**. L'attribut **Type** se concentre sur les types de transferts (géométriques, énergétiques, de contrôle ou de données) qui se produisent dans une interface. L'attribut **Configuration** décrit les éléments reliés par l'interface. L'attribut **Désirable / indésirable** indique si l'interface crée des effets positifs (ex. transmission de données ou d'énergie) ou des effets secondaires indésirables (ex. chaleur, champ magnétique, vibration et autres effets secondaires). En résumé, les attributs contenus dans le modèle d'interfaces fournissent

une représentation commune pour les interfaces définies par les différentes équipes disciplinaires.

Ensuite, le modèle d'interface offre aux concepteurs la gestion des règles de compatibilité pour garantir une intégration cohérente entre les différents composants. La méthode **compatibility()** est contenue par la classe Interface pour vérifier la compatibilité d'une interface. Un exemple est cité ici pour illustrer cemécanisme. Deux composants (Composant 1 et Composant 2) sont reliés par une interface (Interface) via les ports (CP1 et CP2). Deux règles de compatibilité sont présentées comme suit :

Règle (1) :

$$\begin{aligned}
 &CP1.Parameter1.value = \\
 &CP2.Parameter2.value \wedge CP1.Parameter1.unit = \\
 &CP2.Parameter2.unit
 \end{aligned}$$

Règle (2) :

$$\begin{aligned}
 &CP1.Parameter1.value < CP2.Parameter2.maxValue \\
 &CP1.Parameter1.value > CP2.Parameter2.minValue \\
 &CP1.Parameter1.unit = CP2.Parameter2.unit
 \end{aligned}$$

CP1.Parameter1 représente le paramètre stocké dans la classe **Parameter** du port **CP1** et **CP2.Parameter2** est le paramètre du port **CP2**. Dans la **Règle (1)**, afin d'assurer que les deux composants s'intègrent correctement, les valeurs et les unités des paramètres de **CP1** et **CP2** doivent être égales. Cependant, parfois le paramètre de conception d'un port n'est pas spécifié par une valeur précisée. La **Règle(2)** est utilisée pour illustrer ce cas. Si le port **CP2** spécifie le paramètre en utilisant un intervalle (**minValue**, **maxValue**), le paramètre de **CP1** doit satisfaire que **CP1.Parameter1.value** ∈ (**CP2.Parameters2.minValue**, **CP2.Parameters2.maxValue**).

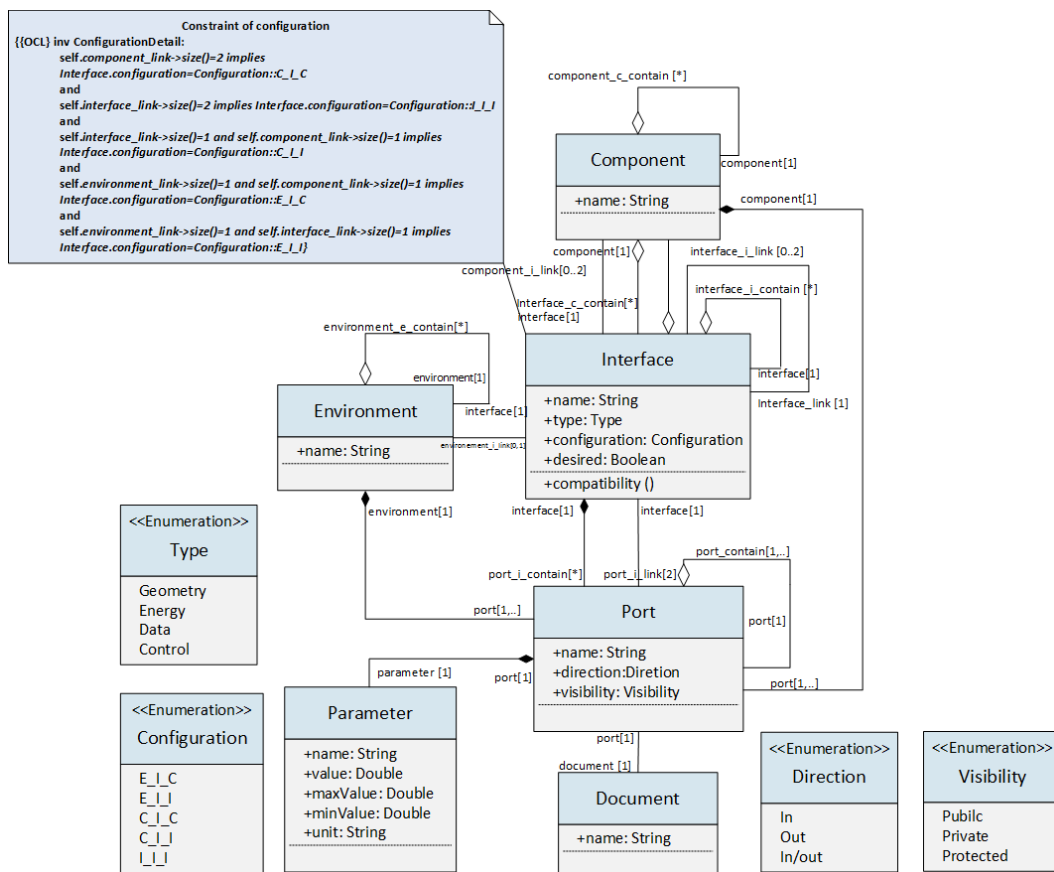


Figure 1. MODELE D'INTERFACES EN DIAGRAMME DE CLASSE D'UML

La base de connaissances qui est présentée dans cet article est basée sur le modèle d'interfaces précédent. Le sous-paragraphe suivant décrit la structuration de la base de connaissances et la méthode KBE associée.

B. Base de connaissances pour la conception d'interfaces dans la phase de détail

Dans cet article, une méthode de conception basée sur les connaissances est appliquée à la phase de conception détaillée de systèmes complexes. Les équipes d'ingénierie doivent capitaliser les paramètres de conception, y compris les données d'interfaces et les règles de compatibilité provenant des sources

hétérogènes et multidisciplinaires et les stocker dans la base de connaissances. Le logigramme exploitant sur la base de connaissances est présenté Figure 2. Ce logigramme illustre principalement comment la méthode de conception peut aider les équipes d'ingénierie à améliorer l'intégration multidisciplinaire pendant la phase de conception détaillée.

Avant d'entrer dans la phase de conception détaillée, les ingénieurs des systèmes ont défini l'architecture du système complexe [20]. Autrement dit, les ingénieurs système doivent décomposer l'architecture du système itérativement jusqu'aux composants standards ou aux composants qui peuvent être conçus par les ingénieurs de disciplines spécifiques. Au début de la phase de conception détaillée, les équipes des différentes disciplines définissent les composants monodisciplinaires. Ils capitalisent les données et les règles de conception relatives aux interfaces générées ou proposées au cours du processus monodisciplinaire. Le modèle d'interfaces est ensuite instancié avec les données et les règles de conception et stocké dans la base de connaissances. Une fois que le modèle d'une interface a été instancié et stocké dans la base, la compatibilité de l'interface doit être vérifiée en utilisant les règles de compatibilité afin de garantir une intégration cohérente entre les différents composants. Si les composants se révèlent incompatibles l'un avec l'autre, le processus itératif doit être poursuivi. Au cours de ce processus itératif, les ingénieurs utilisent les données stockées dans la base de connaissances pour reconcevoir les composants afin de résoudre les problèmes d'incompatibilité

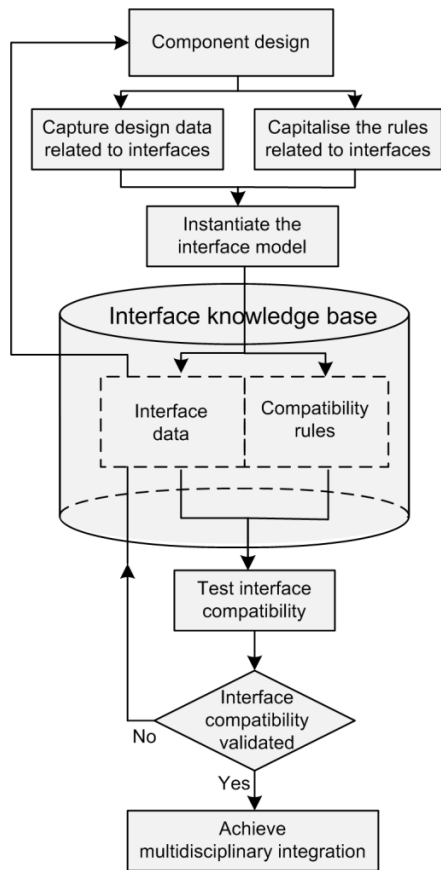


Figure 2. LOGIGRAMME DE LA PHASE DE CONCEPTION DÉTAILLÉE BASE SUR LA BASE DE CONNAISSANCE D'INTERFACES

Dans ce paragraphe, nous avons détaillé la base de connaissances et la méthode KBE associée. La base de connaissances stocke les connaissances de conception telles que les données et les règles de conception. Dans cet article, les connaissances sont envisagées en favorisant le stockage, pendant les phases de conception détaillée, de celles relatives aux interfaces utilisées. Les connaissances relatives aux interfaces non seulement renforcent la collaboration multidisciplinaire, mais favorisent également une démarche de conception modulaire en vérifiant si les règles de compatibilité des interfaces sont respectées. Un cas d'étude d'un système de détection de décharge partielle (DP) est proposé pour démontrer la méthode KBE.

IV. CAS D'ETUDE

Le cas d'étude sélectionné pour démontrer la méthode KBE dans ce paragraphe est un système de détection de décharge partielle (DP). Ce système DP est conçu pour détecter la décharge partielle dans un poste électrique sous enveloppe métallique (Gas Insulated Switchgear en anglais, abrégé GIS). Le GIS est un nouveau type d'appareillage électrique à haute tension qui a été largement utilisé dans les systèmes d'alimentation électrique. Bien que la fiabilité du GIS soit élevée, tous défauts d'isolation qui se produisent sans avertissement peuvent provoquer des dommages aux équipements voisins [21]. Le système de détection de DP a été largement appliqué dans le GIS pour identifier la décharge partielle dans le GIS afin d'éviter les défauts d'isolement. Le système de détection de DP est considéré comme un système complexe qui intègre les systèmes électriques / électroniques, les parties mécaniques, le traitement de l'information et la transmission de données. La conception du système nécessite donc une intégration multidisciplinaire. De plus, le système de détection de DP possède de nombreuses variantes selon les différentes structures internes ou les classes de tension du GIS. La conception par similitude des variantes peut directement réutiliser les connaissances de la base, y compris les données et les règles de conception. Ceci peut diminuer considérablement le cycle de conception tout en améliorant la qualité et l'efficacité de la conception. Figure 3 montre le principe du système de détection DP. Le signal DP peut être capturé par un capteur à ultra-haute fréquence et transféré par la ligne coaxiale au sous-système de prétraitement de signal. Le signal analogique sera ensuite filtré, amplifié et finalement converti en donnée numérique. Cette donnée numérique sera acquise et traitée ultérieurement. Le résultat du traitement sera utilisé pour l'isolation diagnostique et le contrôle de l'état du GIS.

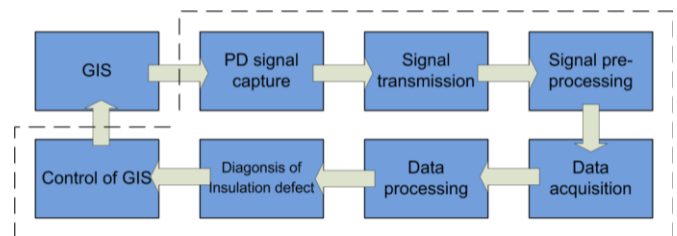


Figure 3. PRINCIPE DU SYSTEME DE DETECTION DP

Le principe du système de détection DP indique que différentes disciplines sont impliquées lors du processus de

conception. Par exemple, le capteur à ultra-haute fréquence pour capturer le signal DP est conçu par l'équipe de traitement de l'information, tandis que la ligne coaxiale et le sous-système de prétraitement de signal sont choisis et conçus par l'équipe électronique. Par conséquent, nous choisissons l'intégration entre le capteur à ultra-haute fréquence et la ligne coaxiale afin de démontrer la méthode de KBE proposée.

Le capteur à ultra-haute fréquence est conçu par l'équipe de traitement de l'information en raison de leurs expériences riches en conception d'antenne. Ils conçoivent une antenne spirale équiangulaire plane (planarequiangular spiral antenna en anglais, abrégé PESA) en tant que capteur à ultra-haute fréquence pour capturer le signal DP. En considérant la structure interne du GIS et l'onde électromagnétique créée par le signal DP, ils conçoivent une PESA avec une bande passante de 700 MHz à 3 GHz et son rayon extérieur de 109 mm. Le logiciel ANSYS est utilisé pour la modélisation et la simulation de la PESA, et le résultat de la simulation montre que l'impédance de l'antenne est 135 Ω. Les ingénieurs de l'équipe électronique choisissent la ligne coaxiale standard pour transférer le signal DP capturé par l'PESA dont l'impédance est de 50 Ω.

La méthode KBE est implémentée par l'intermédiaire d'un démonstrateur basé sur la plateforme 3DEXPERIENCE de Dassault Systèmes. Les deux composantes, le capteur à ultra-haute fréquence et la ligne coaxiale (deux blocs bleus), et

l'interface entre eux (bloc violet) sont présentées par le démonstrateur en haut sur la Figure 4. Le diagramme de classe UML de la Figure 4 décrit l'instance de l'interface en considérant les données de conception relatives à l'interface I1. Les attributs de l'interface I1 et les paramètres des ports liés à I1 sont structurés par le modèle d'interface (à gauche et en bas sur la Figure 4) et stockés dans la base de connaissances (au centre sur la Figure 4). La règle pour vérifier la compatibilité de l'interface I1 est traitée par l'atelier Knowledgeware de la plateforme 3DEXPERIENCE. Le résultat de la vérification de la compatibilité (à droite sur la Figure 4) indique que l'interface entre le capteur à ultra-haute fréquence et la ligne coaxiale est incompatible car l'impédance du capteur est différente de celle de la ligne coaxiale. La différence des impédances entre le capteur à ultra-haute fréquence et la ligne coaxiale implique les deux composants sont incompatibles l'un avec l'autre. Cette incompatibilité va produire un effet négatif lors de la transmission du signal DP.

Le logigramme de la Figure 2 montre que si les composants sont incompatibles l'un avec l'autre, le processus itératif doit être renouvelé. Les équipes impliquées doivent tenir compte des données de conception relatives à l'interface incompatible stockées dans la base de connaissances. Un transformateur d'impédance est conçu par les ingénieurs de l'équipe de traitement de l'information. Ce transformateur d'impédance est ajouté entre le capteur à ultra-haute fréquence et la ligne coaxiale et il peut changer l'impédance de 135 Ω à 50 Ω.

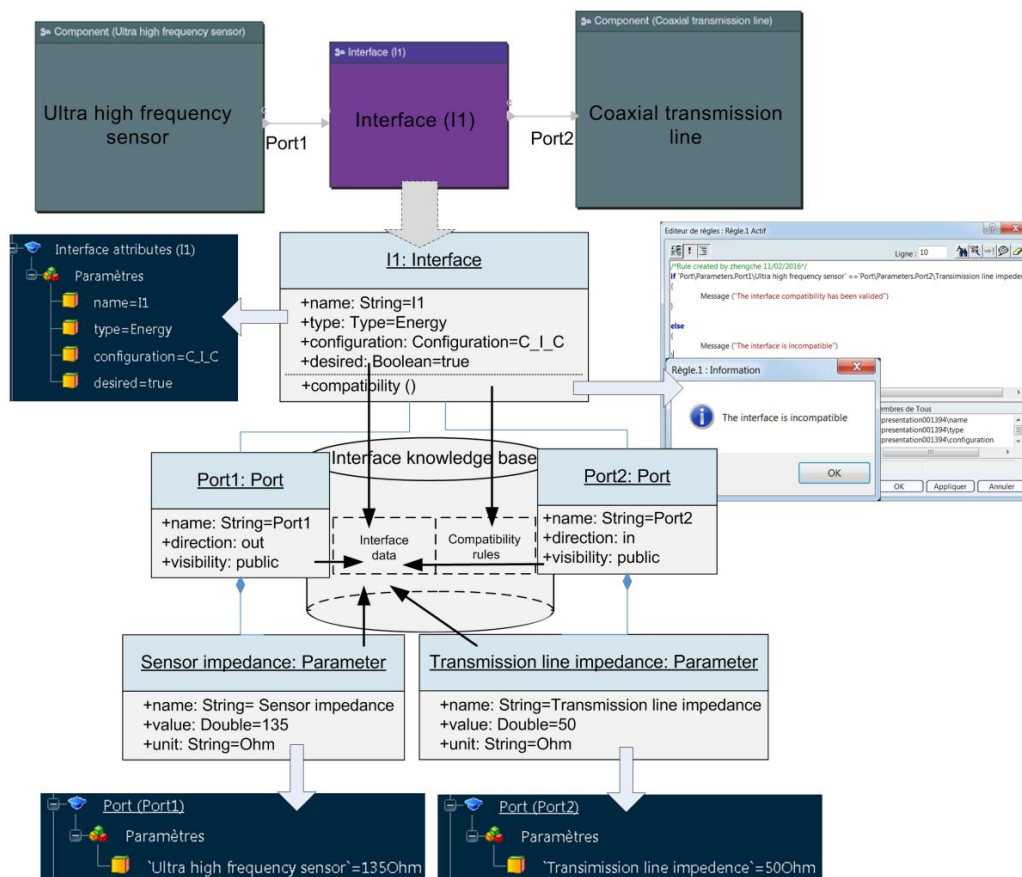


Figure 4. INSTANCIATION DU MODELE D'INTERFACES ET LA BASE DE CONNAISSANCE D'INTERFACES

V. CONCLUSION

Cet article présente une méthode d'ingénierie à base de connaissances -KBE pour aider l'intégration multidisciplinaire au cours du processus de la conception de systèmes complexes. La base de connaissances exploitant le modèle d'interfaces est implémentée dans un KBE avec la méthode support. Les données de conception liées aux interfaces peuvent être capitalisées et stockées dans la base afin de faciliter la réutilisation des connaissances. Cette méthode fournit également un test automatisé de compatibilité pour garantir une intégration cohérente entre différents composants. Enfin, la méthode d'ingénierie est implémentée par l'intermédiaire d'une maquette logicielle exploitant la plateforme 3DEXPERIENCE. Un système de détection de DP est utilisé afin de démontrer et de valider la méthode KBE en termes d'amélioration de l'intégration multidisciplinaire des expertises métier lors de la conception des systèmes complexes.

VI. RÉFÉRENCES

- [1] J.E. CARRYER, R.M. OHLIN, T.W. KENNY."Introduction to Mechatronic Design", Prentice Hall, N°ISBN: 8131788253, 2011.
- [2] P. MARWEDEL. "Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems", Springer, N°ISBN: 9789400702578, 2011.
- [3] P. HEHENBERGER, VOGEL-HEUSER B., BRADLEY D., EYNARD B., TOMIYAMA T., ACHICHE S., "Design, modelling, simulation and integration of cyber physical systems: methods and applications", Computers In Industry, Vol. 82, 2016, pp. 273-289
- [4] C. ZHENG, M. BRICOGNE, J. LE DUGOU, B. EYNARD."Survey on mechatronic engineering: a focus on design methods and product models", Advanced Engineering Informatics, Vol.2, N°3, 2014, pp. 245-257.
- [5] E. FOSSE, C. L. DELP."Systems engineering interfaces: a model based approach", Actes de: IEEE Aerospace Conference, pp 1-8. Big Sky, 2013.
- [6] V. C. LIANG, C. J. J. PAREDIS."A port ontology for conceptual design of systems", Journal of Computing and Information Science in Engineering, Vol. 4, N°3, 2004, pp.206-217.
- [7] J. LEFÈVRE, S. CHARLES, M. BOSCH-MAUCHAND, B. EYNARD, E. PADIOLLEAU."Multidisciplinary modelling and simulation for mechatronic design", Journal of Design Research, Vol.12, N°1-2, 2014, pp. 127-144.
- [8] A. BIAHMOU, A. FROHLICH, J. STJEPANDIC."Improving interoperability in mechatronic product development", Actes de: Proceedings of the International Conference on Product Lifecycle Management, pp 510-521, Bremen, 2010.
- [9] J. KULON, P. BROOMHEAD, D. J. MYNORS. "Applying knowledge-based engineering to traditional manufacturing design", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 30, N° 9-10, 2006, pp. 945—951.
- [10] P.NOWAK, R.POSTANSQUE, P.LAFON, B. EYNARD, "Implémentation de KBE : Etude de cas en conception mécanique", Document Numérique, vol. 8, n° 1, pp. 107-121, 2004
- [11] S.G. SHINA. "Knowledge-based engineering", Concurrent Engineering and Design for Manufacture of Electronics Products. Vol.22, N° 8, 2014, pp. 687-695.
- [12] C. B. CHAPMAN, M. PINFOLD."The application of a knowledge based engineering approach to the rapid design and analysis of an automotive structure", Advances in Engineering Software, SpringerUS, N°ISBN:9781468465204, 1991.
- [13] H. Z. YANG, J. F. CHEN, N. MA, D. Y. WANG."Implementation of knowledge-based engineering methodology in ship structural design", Computer-Aided Design, Vol. 44, N° 3, 2012, pp. 196-202.
- [14] A. AURUM, R. Jeffery, C. Wohlin, M. Handzic. "Managing software engineering knowledge", Springer Science & Business Media, N°ISBN: 9783662051290 , 2013.
- [15] K. S. WANG, J. LIN, J. CHENG, L. H. JI. "Investigation on the development of knowledge-based engineering and its application in rapid design of process chamber of IC equipment", Applied Mechanics and Materials. Vol.373, 2013, pp. 2147-2255.
- [16] Y. CHEN, Z. L. LIU, Y. B. XIE. "A knowledge-based framework for creative conceptual design of multi-disciplinary systems", Vol. 44, N° 2, 2012, pp. 146-153.
- [17] G. LA ROCCA, M. J. VAN TOOREN. "Knowledge-based engineering to support aircraft multidisciplinary design and optimization", IMechE Journal of Aerospace Engineering, Vol. 224, N° 9, 2010, pp. 1041-1055.
- [18] F. TIAN, M. VOSKUIJL. "Mechatronic design and optimization using knowledge based engineering applied to an inherently unstable and unmanned aerial vehicle", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 21, N° 1, 2016, pp. 542-554.
- [19] C. ZHENG, J. LE DUGOU, M. BRICOGNE, B. EYNARD."Multidisciplinary interface model for design of mechatronic systems", Computers in Industry, Vol. 76, 2016, pp. 24-37.
- [20] A. P. SAGE, W. B. ROUSE. "Handbook of systems engineering and management", John Wiley & Sons, N°ISBN: 9780470083536, 2009.

- [21] M. D. JUDD, L. YANG, I. B. B. HUNTER. Hunter, "Partial discharge monitoring of power transformers using UHF sensors", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 21, N° 2, 2005, pp. 5-14.