
EM-BPMN+X : Une Méthode Générique d'Aide à la Mise en Oeuvre des Extensions de BPMN Valides

Mariam Ben Hassen ¹, Faïez Gargouri ²

1. University of Sfax, ISIMS, MIRACL Laboratory - B.P. 242, 3021 Sfax, Tunisia
University of Gafsa, Higher Institute of Business Administration, 2112 Gafsa, Tunisia
mariam.benhassen@isims.usf.tn

2. University of Sfax, ISIMS, MIRACL Laboratory - B.P. 242, 3021 Sfax, Tunisia
faiez.gargouri@isims.usf.tn

RÉSUMÉ. La gestion des enjeux d'intégrité, de flexibilité et d'interopérabilité dans les systèmes d'information d'entreprise (EIS) est souvent freinée par les problèmes dits des « 3-Fit » : vertical, horizontal et transversal. Pour y remédier, cette recherche propose des solutions visant à structurer et enrichir la Vue Métier des EIS, en s'appuyant sur des approches avancées de modélisation des processus métier (BP). Bien que BPMN 2.0.2 soit un standard largement adopté pour modéliser et exécuter les workflows organisationnels, il reste peu adapté aux processus complexes, flexibles, hautement dynamiques, interactifs et à forte intensité de connaissances. Pour combler ces limites, nous introduisons EM-BPMN+X, une méthodologie rigoureuse pour développer des extensions valides de BPMN 2.0.2, spécifiques à des domaines, et fondées sur des ontologies noyaux de domaine. Cette approche fournit un cadre holistique articulant l'analyse du domaine d'extension, la modélisation conceptuelle et la mise en œuvre de méta-modèles, afin de renforcer la clarté, la cohérence et la réutilisabilité des modèles de BP.

ABSTRACT. The challenge of ensuring integrity, flexibility, and interoperability in Enterprise Information Systems (EISs) is hindered by the "three-fit" barrier, which encompasses vertical, horizontal, and transversal fit problems. This paper addresses these challenges by refining the Business View of EIS through the integration of advanced business process modeling (BPM) approaches. Among these, Business Process Model and Notation (BPMN 2.0.2) is widely recognized for structuring, executing, and analyzing organizational workflows. While BPMN enhances stakeholder communication and operational efficiency, it lacks the expressive power to model complex, flexible, highly dynamic, interactive, and knowledge-intensive processes. To bridge this gap, we introduce EM-BPMN+X (Methodology for the Development of BPMN Plus Extensions), a structured and rigorous approach for developing valid domain-specific BPMN 2.0.2 extensions grounded in core domain ontologies. This methodology provides a clear framework for linking domain analysis, conceptual modeling, and meta-model implementation, strengthening clarity, consistency, and reusability in BPM.

Mots-clés : Systèmes d'information d'entreprise, modélisation des processus métier, gestion des connaissances, processus métier sensibles, ontologies noyaux de domaine, BPMN 2.0.2, mécanisme d'extension, méthodologie de recherche en science de la conception.

KEYWORDS : Enterprise Information Systems, Business Process modeling, Knowledge Management, Sensitive Business Process, Core Domain Ontologies, BPMN 2.0.2, Extension Mechanism, Design Science Research Methodology.

1. Problématique et Motivation

Les entreprises contemporaines évoluent dans des environnements dynamiques, complexes et hautement concurrentiels. Pour renforcer leur performance, elles doivent adopter une approche centrée sur les processus métier (Business Process – BP),

favorisant l'agilité, l'optimisation des chaînes de valeur et l'efficacité opérationnelle. Leur compétitivité repose ainsi sur trois piliers essentiels : l'intégrité des BP, l'interopérabilité avec les parties prenantes externes, et la capacité d'adaptation aux évolutions du marché (Ben Hassen *et al.*, 2024a). Bien que les Systèmes d'Information d'Entreprise (EIS) soient conçus pour répondre à ces enjeux, ils rencontrent souvent des difficultés dues à l'hétérogénéité organisationnelle et à la rigidité de leurs architectures.

Pour y remédier, notre recherche s'appuie sur l'approche d'urbanisation (Fournier-Morel *et al.*, 2008), qui structure le développement des EIS selon quatre vues complémentaires (Ben Hassen *et al.*, 2024a) : (1) la *Vue Métier*, qui définit les événements et organise les activités métier; (2) la *Vue Fonctionnelle*, qui identifie les rôles, les connaissances et les objets métier ; (3) la *Vue Applicative*, qui spécifie les solutions logicielles nécessaires à l'exécution des processus ; et (4) la *Vue Physique*, qui couvre l'infrastructure technique (voir Figure 1). Cette architecture multicouche permet d'aligner efficacement les objectifs stratégiques, les processus opérationnels, les outils technologiques et les infrastructures physiques. Toutefois, il est souvent confronté aux problèmes dits des « trois-fit » (Figure 1) : (1) le « Fit vertical », résultant d'un désalignement entre les couches métier et technique, affectant l'intégrité et l'extensibilité du système ; (2) le « Fit horizontal », lié à une faible interopérabilité interne et une rigidité organisationnelle, limitant la flexibilité ; (3) le « Fit transversal », résultant d'un manque d'ouverture limitant l'interopérabilité externe. Ces obstacles découlent principalement d'un manque de spécifications formelles garantissant la cohérence, l'adaptabilité et l'intégration fluide des dimensions métier et technique. Leur dépassement exige la conception d'EIS intrinsèquement flexibles, ouverts et interopérables.

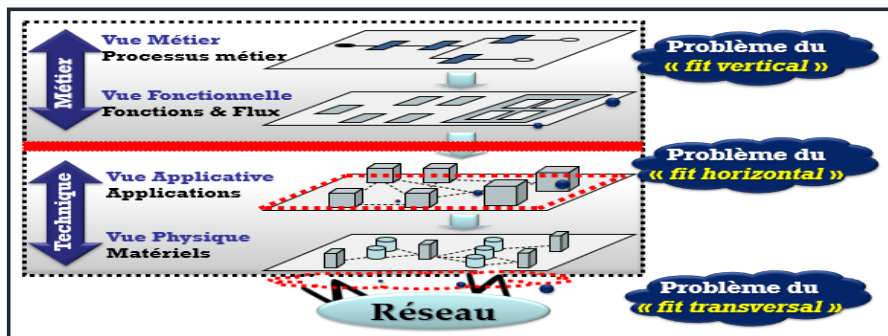


Figure 1. Modèle de référence de l'architecture des SIE : Problèmes de « 3Fit » (Ben Hassen *et al.*, 2024a)

Dans un contexte organisationnel de plus en plus axé sur la collaboration, l'agilité et la gestion des connaissances, les entreprises prennent conscience de la valeur stratégique des savoirs mobilisés au sein de leurs BP. L'identification, la formalisation, le partage et la réutilisation de ces connaissances — qu'elles soient tacites ou explicites, individuelles ou collectives — deviennent des leviers essentiels pour améliorer la performance et préserver un avantage concurrentiel durable. Les BP sensibles à forte intensité de connaissances englobent des activités critiques s'appuyant sur l'acquisition, la diffusion, le partage, la création et la réutilisation intensive des connaissances cruciales. Leur exécution requiert une collaboration étroite entre acteurs intra- et inter-organisationnels, impliquant transfert, création et application de connaissances pour atteindre des résultats à forte valeur ajoutée. Leur nature souvent partiellement ou non structurée, interactive, évolutive, et complexe rendent leur modélisation, leur exécution et leur pilotage particulièrement difficiles et critique (Ben Hassen *et al.*, 2024b).

Pour surmonter les problèmes des « trois-fit », cette recherche propose d'améliorer la *Vue Métier* des EIS par l'intégration d'approches solides de modélisation des BP (BPM). Dans le

domaine de *Business Process Management*, les modèles de BPs sont devenus des outils incontournables pour concevoir, exécuter, analyser et piloter les workflows organisationnels. Ils facilitent la compréhension et la communication entre parties prenantes, soutiennent la transformation numérique et favorisent l'amélioration continue. L'expressivité des modèles contemporains de BP repose sur six dimensions complémentaires (Ben Hassen *et al.*, 2024b) :

- (1) La *dimension fonctionnelle* : elle couvre les activités critiques à forte intensité de connaissances, les actions collectives, la collaboration, les conversions de connaissance, etc.
- (2) La *dimension connaissance* : elle distingue les données, informations et connaissances, catégorise les types de connaissances (individuels/collectifs, tacites/explicites, factuelles/procédurales, etc.), identifie les sources et différencie les flux d'information de ceux de connaissance.
- (3) La *dimension organisationnelle* : elle considère les entités agentives impliquées dans la réalisation des BP et leurs interactions axées sur le partage et la création des connaissances.
- (4) La *dimension informationnelle* : elle décrit les différents types d'information, leurs sources, et la dynamique des flux d'information au sein des activités.
- (5) La *dimension comportementale* : elle modélise les dynamiques de transfert et de conversion des connaissances et informations.
- (6) La *dimension intentionnelle* : elle intègre les informations contextuelles et les intentions (distales) guidant la planification, l'exécution et le contrôle des actions vers des objectifs stratégiques.

Pour enrichir la modélisation multi-dimensionnelle des BP, un langage approprié de BPM doit intégrer explicitement ces six dimensions issues de l'articulation entre BPM et Knowledge Management (KM). Aujourd'hui, BPMN 2.0.2 (OMG, 2013) est reconnu comme le standard de référence en BPM grâce à sa richesse sémantique, sa clarté, sa large adoption, la clarté de son méta-modèle, la disponibilité d'outils de modélisation, ainsi que sa flexibilité (Ben Hassen *et al.*, 2019). Toutefois, ses concepts restent trop génériques pour couvrir de manière exhaustive tous les aspects pertinents de modélisation des BP complexes, dynamiques et à forte intensité de connaissance. Afin de pallier les limitations actuelles de BPMN 2.0.2 et répondre efficacement aux problèmes des « trois-fit », cette recherche propose une méthodologie générique, rigoureuse et holistique pour concevoir des extensions spécifiques du langage BPMN. Ces extensions sont à la fois compréhensibles et pleinement conformes à sa spécification officielle. L'approche proposée, nommée **EM-BPMN+X** (*Methodology for the Development of BPMN Plus Extensions*), s'appuie sur des travaux de référence éprouvés (Stroppi *et al.*, 2011 ; Braun *et al.*, 2014 ; 2015 ; 2016 ; Ben Hassen *et al.*, 2017a ; 2017b ; 2022 ; 2024a ; 2024b ; Ben Hassen and Gargouri, 2024) et fournit un cadre structuré pour guider le processus de développement d'extensions adaptées à des domaines spécifiques, notamment ceux à forte intensité de connaissances. La méthode se décline en trois phases : (1) *Analyse et conceptualisation du domaine cible*, pour identifier les concepts clés et les exigences spécifiques (dans notre cas, la modélisation des BP sensibles (SBP) dans une perspective de KM) ; (2) *Préparation de l'extension*, en sélectionnant les éléments à intégrer et en définissant leur correspondance avec la méta-structure BPMN ; (3) *Définition des syntaxes abstraites et concrètes*, conformément au mécanisme d'extension de BPMN 2.0.2, assurant l'interopérabilité avec les outils existants. EM-BPMN+X garantit ainsi des extensions robustes, cohérentes et alignées avec le standard BPMN, facilement adaptables à divers domaines. En comblant l'écart entre l'analyse du domaine, la conceptualisation et l'implémentation du métamodèle étendu, elle renforce la clarté, la réutilisabilité et la cohérence des langages BPM spécifiques.

L'objectif visé est de permettre à BPMN de s'adapter efficacement à des contextes organisationnels complexes, dynamiques et à forte intensité d'informations et de connaissances, en comblant les insuffisances actuelles des outils de modélisation standards. Le développement de cette approche s'inscrit dans le cadre méthodologique rigoureux de la Design Science Research Methodology (DSRM) (Hevner and Chatterjee, 2010 ; Peffers *et al.*, 2018), assurant à la fois la rigueur scientifique et la pertinence pratique des artefacts conçus. Ce travail s'intègre dans un projet de recherche à long terme portant sur la spécification des BP sensibles dans une perspective de KM, fondé sur des exigences réelles et structuré en cycles itératifs de conception, d'évaluation et de validation expérimentale (Ben Hassen *et al.*, 2017a ; 2017b ; 2022 ; 2024a ; 2024b ; Ben Hassen and Gargouri, 2024). Il vise à fournir une solution innovante, flexible et évolutive pour la modélisation et la gestion des BP, notamment dans des domaines à haute

complexité tels que la santé, la finance, la biotechnologie, la cybersécurité, la gestion de crise, les télécommunications ou encore l'éducation. En proposant une approche rigoureuse, évolutive et conforme aux standards, EM-BPMN+X constitue un cadre méthodologique structurant et prometteur, permettant d'améliorer la modélisation, l'exécution et la performance des BP. Elle contribue ainsi à renforcer l'efficacité organisationnelle, la prise de décision stratégique et la maîtrise des risques, quels que soient les contextes d'application. Conformément aux phases de la méthode DSRM (Hevner and Chatterjee, 2010 ; Peffers *et al.*, 2018), le reste de l'article est structuré comme suit : introduit la problématique et les motivations de notre travail. Elle commence par un rappel des principes d'extensibilité de BPMN, suivi d'un aperçu des principales méthodes valides de conception d'extensions reconnues dans la littérature, notamment celles de Stroppi *et al.* et de Braun *et al.* Elle se poursuit par une revue systématique de la littérature, permettant d'établir l'état de l'art des extensions BPMN et d'en identifier les lacunes encore présentes dans ce champ de recherche. La section 3 définit nos objectifs de recherche et les solutions proposées face aux défis actuels du BPM. La section 4 présente la conception et le développement de l'artefact, à savoir la méthodologie EM-BPMN+X. La section 5 présente l'évaluation de notre contribution. Enfin, la section 6 conclut l'article en récapitulant les apports majeurs et en ouvrant sur des perspectives de recherche futures.

2. Extensibilité de la spécification BPMN : État de l'art

2.1. Mécanisme d'extension de BPMN 2.0.2 et ses lacunes

Dans l'optique d'étendre les cas d'utilisation de la spécification BPMN 2.0.2 à l'aide de concepts spécifiques à divers domaines, l'OMG (2013) a introduit un mécanisme d'extension par addition. Ce mécanisme permet d'ajouter des concepts et attributs propres à un domaine d'application, tout en garantissant la validité des éléments de base du langage BPMN. Reposant sur l'architecture MOF (OMG, 2014), ce mécanisme s'appuie sur des éléments d'extension génériques tels que : `ExtensionDefinition`, `ExtensionAttributeDefinition`, `ExtensionAttributeValue` et `Extension`.

Bien que ce mécanisme fournisse des structures et relations pertinentes pour l'extension du métamodèle BPMN, il présente néanmoins des ambiguïtés syntaxiques et lacunes formelles susceptibles de générer des incertitudes lors de sa mise en œuvre. Par exemple, la spécification ne définit pas clairement les types des nouveaux attributs à intégrer. Il demeure également flou si une extension BPMN doit être considérée comme une nouvelle version du métamodèle ou comme un profil, au sens des profils UML. De plus, la spécification ne fournit aucune directive méthodologique encadrant l'utilisation appropriée des éléments d'extension standard, ni pour le développement cohérent d'extensions, ni pour la définition de notations graphiques adaptées. En l'absence de telles recommandations, la compréhensibilité, la qualité et la capacité d'échange des modèles BPMN étendus se trouvent fortement compromises (Ben Hassen *et al.*, 2017a ; 2017b).

2.2. Fondements méthodologiques et premiers prolongements pour l'extension systématique de BPMN

À ce jour, peu de travaux ont traité en profondeur le développement méthodologique des extensions BPMN selon le mécanisme d'extension proposé par l'OMG. L'étude pionnière en la matière est celle de Stroppi *et al.* (2011), qui proposent une méthode fondée sur l'approche MDA, encadrant la création d'extensions valides depuis leur conceptualisation jusqu'à leur sérialisation. Elle se compose de trois phases principales : (1) la définition d'un modèle conceptuel de domaine de l'extension (CDME), distinguant les concepts standards de BPMN et ceux spécifiques à l'extension ; (2) la transformation du CDME en un modèle BPMN+X valide, à l'aide de profils UML, stéréotypes, et règles de transformation de modèles ; (3) la génération d'un schéma XML permettant la sérialisation du modèle et la création de workflows

exécutables. Cette méthode fournit une base structurée pour définir la syntaxe abstraite des extensions BPMN. Toutefois, elle présente certaines limites : les premières phases manquent de guidage, notamment pour l'analyse des exigences du domaine et la préparation du CDME. De plus, l'absence d'évaluation sémantique approfondie entre concepts du domaine et ceux de BPMN peut entraîner des redondances ou une sous-exploitation des éléments existants. Ces limites nécessitent une analyse préalable plus poussée de la spécification BPMN afin de garantir la pertinence des extensions.

Les travaux de Braun et al. (Braun et al., 2015 ; 2016) viennent enrichir ceux de Stroppi et al. pour mieux couvrir l'analyse du domaine et renforcer la conformité avec BPMN. Leur démarche, appliquée au domaine de l'E-Santé pour modéliser les processus cliniques (clinical pathways), s'articule en six étapes : (1) analyse des exigences du domaine, (2) justification de l'adéquation de BPMN et construction d'une ontologie de domaine des processus cliniques, (3) vérification de l'équivalence sémantique entre les concepts du domaine et ceux de BPMN, (4) définition du modèle CDME basé sur l'approche de Stroppi *et al.*, (5) génération d'un modèle BPMN+X valide et (6) élaboration de la syntaxe concrète via des notations graphiques. Malgré ces améliorations, plusieurs limites subsistent. L'analyse des exigences et la vérification sémantique demeurent superficielles, et le méta-modèle étendu manque de précision. L'ontologie proposée reste peu formalisée, avec des concepts flous sur le plan sémantique. Enfin, l'approche n'est pas implémentée, ce qui limite son opérationnalisation.

2.3. Une revue systématique de la littérature sur les extensions de BPMN

Comme mentionné précédemment, il n'existe pas de méthode scientifique détaillée pour appliquer les différents éléments d'extension définis par le méta-modèle de BPMN. Ainsi, le développement d'extensions BPMN reste largement « ad hoc », ce qui est insatisfaisant, notamment au regard de l'approche DSRM (Hevner and Chatterjee, 2010). En particulier, on note l'absence de directives pour la conceptualisation du domaine ainsi qu'un manque d'analyse sémantique approfondie entre les concepts du domaine et les éléments BPMN. Les approches précédemment évoquées tentent d'y répondre, mais présentent des lacunes : absence d'analyse de domaine (Stroppi *et al.*, 2011), manque de rigueur conceptuelle ou faible niveau de détail et d'applicabilité (Braun *et al.*, 2015). Dans ce contexte, le développement d'une démarche holistique pour des extensions BPMN valides s'avère essentiel. Elle doit garantir à la fois la conformité au standard, la clarté des modèles et une meilleure spécification graphique des SBP dans une perspective de gestion des connaissances cruciales. C'est pourquoi nous avons mené une revue bibliographique systématique et descriptive des travaux récents les plus représentatifs de l'état de l'art en matière d'extension de BPMN (versions 2.0 et 2.0.2).

2.3.1. Framework d'analyse des extensions de BPMN

À l'issue d'un processus rigoureux de collecte et de filtrage de la littérature (environ 80 publications parues entre 2011 et 2024), 60 propositions d'extension de BPMN ont été sélectionnées pour une analyse approfondie et comparative, selon un ensemble de critères définis. Cette analyse poursuit plusieurs objectifs : (i) Dresser un état de l'art exhaustif sur les extensions de BPMN, en identifiant les tendances d'évolution au cours de la dernière décennie ; (ii) Évaluer la conformité des extensions publiées à la suite de la spécification officielle du mécanisme d'extension BPMN par l'OMG ; (iii) Examiner les caractéristiques des extensions du point de vue de leur domaine d'application et de leur processus de conception méthodologique. Cela inclut notamment les questions suivantes : quels sont les secteurs ciblés et les objectifs visés ? quels formats de représentation sont adoptés ? les extensions proposées respectent-elles les exigences syntaxiques et sémantiques du standard BPMN ? comment sont-elles démontrées, implémentées et évaluées ? ; (iv) Enfin, mettre en évidence les principales lacunes et axes d'amélioration encore présents dans ce champ de recherche.

Nous avons distingué deux catégories de classification des extensions de BPMN selon leur finalité. La première catégorie « BPM spécifique à un domaine » concerne les extensions destinées à représenter ou à gérer les BP d'un domaine particulier, dont nous citons par exemple : l'E-santé et la modélisation des processus cliniques (e.g., Barun *et al.*, 2015; 2016), (Onggo *et al.*, 2018), (Neumann *et al.*, 2019), (Pufahl *et al.*, 2022), (Szelągowski *et al.*, 2022)), le système cyber-physique (Graja *et al.*, 2017), la gestion des interventions en cas de catastrophe (Betke et Seifert, 2017), le cybersécurité (Chergui et Benslimane, 2020), l'externalisation des BP vers le Cloud (e.g., (Louar *et al.*, 2018), le Cloud computing (e.g., (Dukaric and Juric, 2018), (Zarour *et al.*, 2019), l'IoT (e.g., (Vogel *et al.*, 2018)), le manufacturing (e.g., (Polderdijk *et al.*, 2018), (Abouzid et Saidi, 2019)), etc. Tandis que la deuxième catégorie « amélioration de BPM » englobe soit les extensions qui visent à améliorer le langage BPMN (e.g., expressivité (e.g., (Stroppi *et al.*, 2011 ; 2012), (Braun and Esswein, 2014), (Polančič, 2020)), complexité (e.g., (Onggo *et al.*, 2018), (Carvalho *et al.*, 2018), (Szelągowski *et al.*, 2022), (Strutzenberger *et al.*, 2024), (Skouti *et al.*, 2024)), variabilité et flexibilité (e.g., (Ben Said *et al.*, 2018)), soit les extensions qui spécifient les exigences de BPM en termes de différents critères (e.g., performance, coût, sécurité, conformité et qualité (e.g., (Heguy *et al.*, 2019), soit les extensions qui contribuent aux activités de gestion des BP (e.g., simulation (e.g., (Cartelli *et al.*, 2016), exécution (e.g., (Neumann *et al.*, 2019), (Strutzenberger *et al.*, 2024)), monitoring/surveillance (Ramos-Merino *et al.*, 2019), process mining (Strutzenberger *et al.*, 2024)). Ces différentes extensions sont indépendantes d'un domaine spécifique (i.e., qui peuvent être utilisées dans n'importe quel domaine).

Dans l'Annexe de ce papier (voir note de bas de page)¹, nous présentons un extrait de notre framework d'analyse et comparaison des principales extensions de BPMN. Nous avons évalué et comparé l'ensemble des extensions de BPMN identifiées selon un ensemble de dimensions et critères : Attributs de base de l'extension (auteur et année de la publication, titre de l'extension, domaine ciblé et objectif principal de l'extension (Descriptive, Analytique ou Exécution)) ; Conformité au mécanisme d'extension standard de BPMN (type de définition de l'extension (la façon dont l'extension est définie et expliqué), syntaxe abstrait de l'extension (définition d'un méta-modèle), syntaxe concrète de l'extension (définition de nouvelles notations), conflits sémantiques avec le standard BPMN); Méthode d'extension appliquée/les aspects méthodologiques et d'analyse de domaine (analyse des exigences, vérification de la correspondance sémantique des concepts de domaine avec les éléments BPMN, réutilisation des artefacts de domaine existants (ontologies, profils UML, concepts de modélisation de domaine, etc.), modèle de processus/ approche méthodologique appliquée) ; Extension spécifique à un domaine (toutes les extensions et les adaptations/personnalisations pour l'intégration des aspects spécifiques à un domaine dans BPMN (i.e., les nouvelles éléments, relations, propriétés et diagrammes ajoutés ainsi celles qui sont étendus ou adaptés/spécifiés et les styles de l'extension), les aspects d'implémentation et d'évaluation.

2.3.2. Synthèse de l'analyse bibliographique

Notre revue systématique des extensions existantes de BPMN révèle différentes constatations et limitations :

- **Spécification et validation limitées du méta-modèle** : Il existe peu d'extensions (moins de la moitié (33,33%)) qui expliquent le méta-modèle de l'extension envisagée et considèrent sa validité en termes de méta-modèle de BPMN étendu conçus conformément au mécanisme d'extension et aux préconisations spécifiées par l'OMG (OMG, 2013). Cela entrave la compréhensibilité des extensions développées (par les adopteurs de BPMN) et empêche l'interchangeabilité des modèles. Rappelons qu'une extension est considérée comme

¹https://github.com/mariem08790390/SBP-BPMNX-Supplementary-Material/blob/main/Annexes%201%262_%20Classification%20des%20extensions%20de%20BPMN%20dans%20la%20litt%C3%A9rature.pdf

conforme/valide si elle est représentée par un méta-modèle d'extension de BPMN ou un XML Schema défini dans la documentation officielle du langage BPMN (en termes d'utilisation du mécanisme d'extension du méta-modèle de BPMN 2.0). Parmi les travaux qui proposent des extensions valides, nous citons ceux de : (Stroppi *et al.*, 2012), (Braun and Esswein, 2015), (Braun *et al.*, 2015 ; 2016), (Ben Said *et al.*, 2018), (Betke et Seifert, 2017), (Heguy *et al.*, 2019), (Neumann *et al.*, 2019), (Zarour *et al.*, 2019), (Chergui and Benslimane, 2020), (Skouti *et al.*, 2024) (la plupart de ces extensions sont basées sur l'approche de Stroppi *et al.* (2011)). Évidemment, ce faible taux de conformité est dû, notamment, aux aspects syntaxiques du mécanisme d'extension et à l'absence d'une méthodologie standard et détaillée pour la mise en œuvre de ce mécanisme et des extensions envisagées dans la spécification du BPMN puisque l'OMG ne spécifie que les formats de représentation des extensions (*i.e.*, le méta-modèle MOF et le Schéma XML). Par ailleurs, compte tenu du nombre important des méta-modèles définis dans la documentation de BPMN, les auteurs ont du mal à trouver lequel doit être étendu. D'autres causes sont également possibles, comme la longueur de la documentation BPMN (plus de 500 pages) et le manque de clarté sur la manière d'étendre les méta-modèles.

- **Non-conformité avec le méta-modèle BPMN** : Seulement 28,33 % des extensions sont définies et spécifiées comme des méta-modèles de BPMN étendus en appliquant le mécanisme d'extension de BPMN. Les autres extensions ne sont pas conformes au méta-modèle de BPMN. Ces dernières sont définies soit par une approche de méta-modélisation dédiée (« Propre Ext ») (45%) utilisant UML ou des expressions OCL (*e.g.*, (Dukaric and Juric, 2018), (Ramos-Merino *et al.*, 2019), (Polančič, 2020)). Soit ces extensions ne sont pas conçues sous forme de méta-modèles et sont définies que graphiquement par de nouveaux éléments de notation (*e.g.*, par de nouvelles icônes) (« Notation Ext Propre ») (11,67%) (*e.g.*, (Ammann, 2012)), (Carvalho *et al.*, 2018), (Santra and Choudhury, 2018)). 15 % des extensions ne présentent aucune définition de l'extension (*e.g.*, (Supulniece *et al.*, 2010), (Polderdijk *et al.*, 2018)). En somme, la majorité des extensions ne sont pas conformes à la norme BPMN et les résultats fournis ne sont pas compréhensibles en termes de réutilisation.
- **Focus sur la syntaxe concrète** : Le développement de l'extension BPMN est actuellement axé sur la syntaxe concrète. 60% des extensions analysées présentent une syntaxe concrète étendue décrivant explicitement de nouvelles notations graphiques. 28,33 % des extensions présentent implicitement de nouveaux éléments graphiques démontrés par des exemples concrets dans des modèles de BP. Les autres extensions (11,67%) ne définissent ou n'expliquent aucun type d'extension graphique.
- **Compatibilité sémantique avec BPMN** : La majorité des extensions ne contiennent pas de conflits sémantiques avec le standard BPMN. La spécification BPMN prétend ne pas contredire la sémantique d'aucun élément.
- **Manque de rigueur méthodologique dans la conception** : Moins de priorité est accordée à la présentation méthodique claire du processus de conception. 36,67% n'appliquent aucune démarche méthodologique. Ces extensions sont développées de manière ad hoc, ce qui empêche l'évaluation de la reproductibilité et de la compréhensibilité. 31,67 % des extensions ont été conçues sur la base du modèle d'extension de BPMN (19 au total), où douze sont conçues et développées méthodiquement par application de la méthode de conception des extensions de BPMN de Stroppi *et al.* (2011) (*e.g.*, (Braun *et al.*, 2015), (Betke and Seifert, 2017), (Vogel *et al.*, 2018), (Neumann *et al.*, 2019), (Chergui et Benslimane, 2020), (Polančič, 2020)). Soulignons que les extensions de (Braun *et al.*, 2015) et (Neumann *et al.*, 2019) sont conçues par application de la méthode d'extension de BPMN intégré de (Braun and Schlieter, 2014) (qui est basée sur l'approche de Stroppi et étendu en ce qui concerne l'analyse de domaine et sa conceptualisation). Rappelons que la méthode de Stroppi *et al.* (2011) et la méthode de Braun and Schlieter (2014) sont conformes/valide puisqu'elles sont basées sur le méta-modèle MOF en spécifiant les correspondances avec ses méta-classes à travers des stéréotypes. 31,67 % d'extensions (19 extensions) ont été conçues sur la base de procédures décrites individuellement (*e.g.*, (Dukaric and Juric, 2018), (Santra and Choudhury, 2018), (Abouzid and Saidi, 2019), (Ramos-Merino *et al.*, 2019), (Zarour et

al., 2019)). Concernant le critère de l'*analyse des exigences*, environ 78,33% des extensions analysées fournit des exigences à l'extension. La moitié est explicitement mentionnée (*e.g.*, par un ensemble d'exigences E1 à En (Braun *et al.*, 2014). Le reste des travaux décrit les exigences implicitement dans l'introduction ou à travers une description du contexte d'application (*e.g.*, (Ben Said *et al.*, 2018), (Heguy *et al.*, 2019)). 80 % des publications ont conçu l'extension spécifique sans examen approfondi de la question de savoir si chaque exigence d'extension nécessite nécessairement un nouveau concept d'extension. Il n'y a aucune comparaison de correspondance entre la sémantique des éléments de domaine et des éléments standards de BPMN. Nous supposons que plusieurs extensions BPMN n'exploitent pas l'intégralité de l'expressivité de BPMN. 20 % ont mené une discussion pour chaque concept (*e.g.*, (Braun *et al.*, 2015), (Graja *et al.*, 2017), (Neumann *et al.*, 2019), (Polančič, 2020). En outre, 65,45% des extensions de BPMN utilisent/intègrent des artefacts spécifiques à un domaine. Par exemple, les profils UML (Pillat *et al.*, 2015), (Bocciarelli *et al.*, 2016), des concepts de modélisation de domaine (Supulniece *et al.*, 2010), ((Braun and Schlieter, 2014), (Ben Said *et al.*, 2018), des ontologies (Braun *et al.*, 2015 ; 2016), (Chergui and Benslimane, 2020) ou des exigences (Graja *et al.*, 2017), (Louar *et al.*, 2018), (Polančič, 2020 sont réutilisés dans la conception de l'extension.

- **Évaluation et mise en œuvre limitées** : Les extensions de BPMN sont rarement évaluées et peu implémentées malgré l'existence de plusieurs outils de modélisation extensibles.
- **Extensions BPMN pour KM (dans les BP à forte intensité de connaissances)** : Parmi les travaux analysés, très peu d'initiatives intègrent explicitement les aspects de KM dans les modèles étendus de BPMN, notamment ceux de Supulniece *et al.* (2010) et Ammann (2012). Ces propositions restent limitées, ne couvrant que partiellement certains éléments du domaine KM (comme les connaissances tacites ou les modes de conversion des connaissances), sans offrir une modélisation complète et cohérente de la dimension « connaissance » dans les BP à forte intensité de connaissances (comme les SBP (Ben Hassen *et al.*, 2024b). Les modèles représentés n'intègrent pas parfaitement et complètement les aspects pertinents de la dimension connaissance (*e.g.*, modélisation des connaissances mobilisées et produites par les activités organisationnelles, distinction entre les flux de connaissance et les flux d'information, modélisation des différentes typologies de connaissances, distinction entre les différentes sources de connaissances, etc.). De plus, ces extensions sont conçues de manière ad hoc, uniquement à travers des notations graphiques, sans définition formelle de la syntaxe abstraite. Certaines modifient même la sémantique de BPMN de manière non conforme (par exemple, l'intégration non autorisée d'éléments non-flux dans des séquences de flux), ce qui compromet leur validité au regard du standard BPMN.

En somme, l'analyse de la littérature révèle que la majorité des extensions de BPMN sont développées de manière peu structurée, souvent de façon « ad hoc », en se focalisant sur la syntaxe concrète sans démarche méthodologique claire. Cette approche limite leur compréhensibilité, leur réutilisation, ainsi que leur intégration dans les outils de modélisation. L'absence d'une méthode unifiée et rigoureuse pour guider la conceptualisation et la formalisation des extensions constitue un frein majeur à leur validité et à leur adoption. Ces constats motivent la proposition d'une méthodologie structurée, présentée dans la suite de ce manuscrit.

3. Objectifs de notre solution

Les travaux existants montrent une faible formalisation des premières étapes du développement des extensions BPMN, notamment l'analyse formelle des exigences spécifiques à un domaine et la conceptualisation. Ces étapes, pourtant fondamentales, manquent souvent d'une approche systématique et partagée, ce qui nuit à la clarté des modèles produits et limite la communication avec les experts métier. De plus, la phase de vérification d'équivalence entre les concepts du domaine et ceux du méta-modèle BPMN (cf. Braun and Schlieter, 2014 ; Braun *et al.*, 2015 ; 2016) est rarement détaillée, et repose sur des correspondances sémantiques peu

rigoureuses, compromettant la validité des extensions. Afin de répondre aux limites identifiées dans la littérature, nous proposons une méthodologie générique, cohérente et systématique, baptisée *EM-BPMN+X (Methodology for the Development of BPMN Plus Extensions)*. Cette approche, fondée sur le paradigme du Design Science Research (DSR) (Hevner and Chatterjee, 2010), vise à guider l'ensemble du processus de développement d'extensions BPMN valides, (adaptées à des domaines spécifiques), de la spécification des exigences jusqu'à leur implémentation dans un outil de modélisation. EM-BPMN+X étend les travaux de Stroppi *et al.* (2011) et de Braun *et al.* (2014–2016), en mettant un accent particulier sur la phase de préparation (analyse des exigences, conception d'un modèle CDME) et la définition rigoureuse du méta-modèle de l'extension (BPMN+X), tant du point de vue de la syntaxe abstraite que concrète. Notre proposition introduit également une analyse sémantique approfondie entre les concepts du domaine cible et les éléments standards de BPMN, en s'appuyant notamment sur des ontologies de domaine et des patrons conceptuels ontologiques. L'objectif principal est de renforcer les capacités de BPMN 2.0.2 pour modéliser des processus métier complexes, flexibles, collaboratifs et à forte intensité de connaissances. EM-BPMN+X se veut une réponse aux besoins émergents de secteurs tels que la santé, la finance, les services publics, la cybersécurité, la logistique ou encore l'éducation. En offrant un cadre méthodologique structuré et extensible, cette approche améliore l'expressivité de BPMN, tout en facilitant la collaboration, la prise de décision fondée sur les connaissances, et la gestion efficace des risques dans des environnements organisationnels complexes.

4. Présentation de la méthode EM-BPMN+X

Le développement de EM-BPMN+X s'inscrit dans un projet de recherche à long terme, basé sur une approche centrée sur les exigences et intégrant les principes du DSR ((Hevner and Chatterjee, 2010) ; (Peffer *et al.*, 2018)). Plusieurs itérations et évaluations pratiques ont permis de raffiner les artefacts produits ((Ben Hassen *et al.*, 2017a ; 2017b ; 2022) ; (Ben Hassen and Gargouri, 2024)). Pour valider la méthodologie, nous l'avons appliquée au domaine des processus métier sensibles (SBP), ce qui a conduit au développement de l'extension *BPMN4SBP*. Cette dernière permet la spécification graphique des SBP dans une perspective d'identification et la gestion des connaissances cruciales. L'extension illustre la pertinence de EM-BPMN+X pour répondre aux exigences des processus complexes, hautement dynamiques, collaboratifs et à forte intensité de connaissances. La Figure 2 illustre la structure de la méthode EM-BPMN+X et son application pour la modélisation des SBP. Pour démontrer la validité de notre méthode et en faciliter la compréhension, chaque étape est illustrée par son application à la modélisation des SBP. En raison des contraintes de longueur de l'article, l'ensemble des ressources complémentaires – figures, tableaux, spécification complète du métamodèle et exemple de modélisation – est mis à disposition en ligne, structuré selon les étapes méthodologiques : [<https://zenodo.org/records/15353258>].

4.1. Phase 1 : Analyse du domaine

4.1.1 Étape 1.1: Analyse des exigences du domaine de modélisation

L'objectif de cette étape consiste à identifier les exigences (fonctionnelles) spécifiques au domaine de modélisation, en se basant sur une description des cas/scénarios d'utilisation ou sur une étude exhaustive de la littérature dans le domaine. Ces exigences permettent de spécifier les capacités et les caractéristiques de l'artefact visé du point de vue objectif. Par ailleurs, elles sont utiles pour prouver et valider la pertinence et l'adéquation du langage de modélisation BPMN 2.0.2 (OMG, 2013) pour satisfaire l'objectif visé et les différentes exigences identifiées. Subséquemment, ces exigences de domaine se traduisent en des concepts clés de domaine qui peuvent être spécifiés sous forme d'une ontologie noyau (de domaine).

Pour la modélisation des SBP, nous avons défini 14 exigences spécifiques à ces différentes dimensions (E1–E14)² (cf. Ben Hassen *et al.*, 2020 ; 2024b). Ces exigences servent de base pour la représentation des aspects statiques et dynamique de SBP.

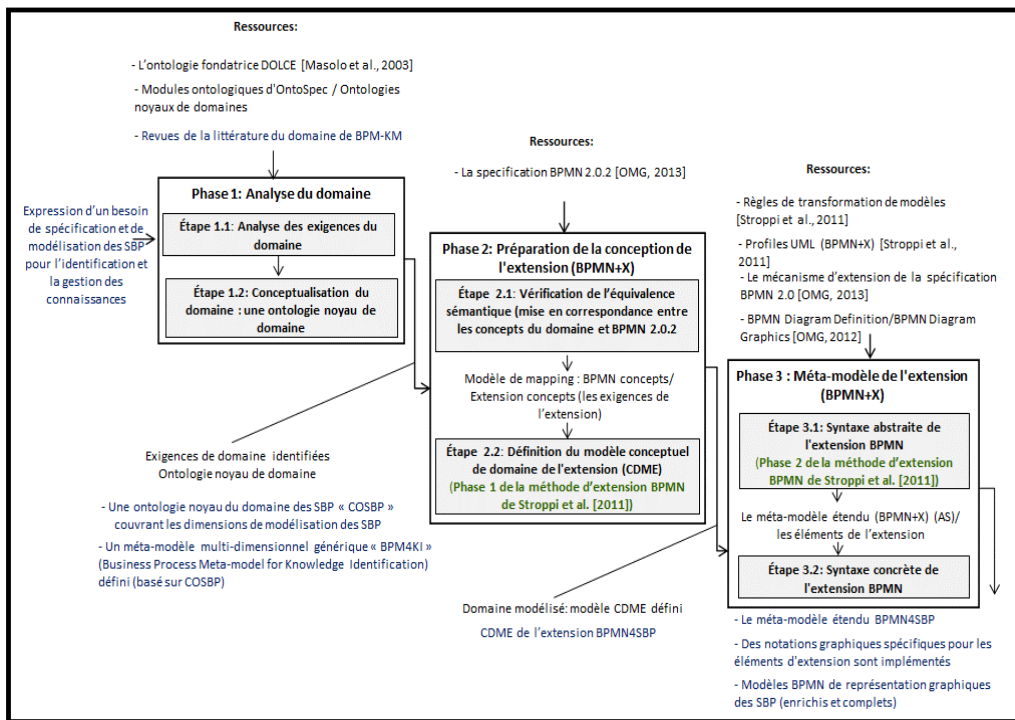


Figure 2. Méthode d'extension de BPMN 2.0.2 et son application pour la spécification des SBP

4.1.2. Étape 1.2: Conceptualisation du domaine : une ontologie noyau de domaine

Cette étape consiste à identifier les concepts, les propriétés, les relations, les règles et les contraintes du domaine. Ainsi, la réutilisation et l'intégration des ontologies s'avèrent utiles afin d'enrichir sémantiquement les différents modèles développés. Dans ce contexte, la conception d'une ontologie noyau de domaine (basée sur des ontologies fondatrices (e.g., DOLCE)) est la solution la mieux appropriée pour l'explicitation et la conceptualisation des connaissances du domaine de modélisation (et des extensions). En effet, l'ontologie spécifie un vocabulaire commun et précis du domaine qu'elle organise et formalise, afin de le rendre interprétable tant par les humains que par les machines. Ainsi, elle offre une sémantique formelle aux connaissances qu'elle explicite de sorte à permettre une application aisée du raisonnement. De ce fait, l'utilisation d'une ontologie est essentiellement liée pour répondre à deux objectifs essentiels : (i) représenter les connaissances d'un domaine ; et (ii) permettre de raisonner sur ces connaissances. Par ailleurs, la conception de l'ontologie noyau de domaine est très importante pour la deuxième phase de notre méthode d'extension de BPMN. En tant que référentiels offrant des définitions rigoureuses pour les concepts de domaine, cette ontologie permet de préparer le modèle conceptuel de domaine de l'extension « CDME » (Conceptual Domain Model of the Extension) en définissant une base vigoureuse pour l'étape de vérification de

²https://zenodo.org/records/15353258/files/Annexes%201&2_%20Classification%20des%20extensions%20de%20BPMN.pdf?download=1

l'équivalence sémantique des éléments. Les concepts clés et génériques de domaine définis rigoureusement doivent être examinés en ce qui concerne leur correspondance sémantique avec les éléments standards de BPMN.

Pour la conceptualisation du domaine des SBP, nous avons proposé une spécification conceptuelle rigoureuse intitulée COSBP (*Core Ontology of Sensitive Business Processes*) (Ben Hassen *et al.*, 2024a ; 2024b). Cette ontologie noyau de domaine a été élaborée selon une approche formelle multi-niveaux, reposant sur l'ontologie fondatrice DOLCE (Masolo *et al.*, 2003). COSBP réutilise et spécialise des concepts provenant de différentes ontologies noyaux de domaine lié aux BP, en vue de formaliser des concepts génériques pertinents pour les SBP. Elle offre une modélisation explicite, cohérente et rigoureuse des six dimensions fondamentales des SBP, à savoir les dimensions fonctionnelle, organisationnelle, comportementale, informationnelle, intentionnelle et connaissance, chacune représentée par une classe distincte de modules ontologiques³.

4.2. Phase 2 : Préparation de la conception de l'extension (BPMN+X)

4.2.1. Étape 2.1: Vérification de l'équivalence sémantique

Cette étape consiste à comparer l'ensemble des concepts ontologiques du domaine cible aux éléments standards de BPMN, sur la base de définitions sémantiques. L'objectif est de déterminer les besoins réels en matière d'extension, en identifiant les éléments BPMN à réutiliser, à adapter ou à étendre. Cette vérification est essentielle pour garantir une utilisation appropriée de BPMN et éviter la création d'extensions superflues. Nous recommandons que tout concept d'extension possède une correspondance sémantique raisonnable avec un concept standard de BPMN. Lorsqu'une telle correspondance existe, il est préférable de spécifier l'élément à l'aide de l'infrastructure existante de BPMN, plutôt que d'introduire un nouveau concept par extension du *BaseElement*. Cela permet de limiter le nombre d'éléments étendus et de préserver la cohérence du langage. Pour guider cette analyse, nous adoptons les règles de correspondance définies par Braun *et al.* (2015) :

- **Équivalence** : le concept du domaine a une correspondance sémantique directe dans le méta-modèle BPMN, que ce soit un élément unique ou une combinaison valide d'éléments. Dans ce cas, aucune extension n'est requise et le concept est représenté comme un concept BPMN dans le modèle CDME (\rightarrow CDME : *BPMN Concept*).
- **Équivalence conditionnelle** : il n'existe pas de correspondance explicite, mais une réflexion contextuelle permet d'évaluer si un élément BPMN peut représenter le concept du domaine. Il convient alors de justifier cette mise en correspondance, ou d'expliquer pourquoi elle n'est pas envisageable. Cette analyse est d'autant plus importante que le méta-modèle BPMN propose des éléments à la sémantique parfois très large (OMG, 2013). Partant de ce fait, le concept est traité soit comme un concept équivalent, soit comme étant un concept non équivalent.
- **Absence d'équivalence** : aucune correspondance ne peut être établie, ce qui peut s'expliquer par : (1) l'absence totale du concept dans BPMN \rightarrow CDME : *Extension Concept* ; (2) l'absence d'une relation entre deux concepts \rightarrow CDME : *Association entre concepts* ; (3) l'absence d'attributs spécifiques à un concept \rightarrow CDME : *Propriété spécifique d'un concept*.

En complément de ces règles, nous proposons deux types d'équivalences sémantiques enrichies (Ben Hassen *et al.*, 2017a ; 2022) :

- **Équivalence par composition** : un concept du domaine peut être représenté par une composition cohérente d'éléments standards de BPMN.

³ [https://zenodo.org/records/15353258/files/EM-BPMN+X_%C3%89tape%201-2_%20Conceptualisation%20du%20domaine%20-%20une%20ontologie%20noyau%20de%20domaine%20\(COSBP\).pdf?download=1](https://zenodo.org/records/15353258/files/EM-BPMN+X_%C3%89tape%201-2_%20Conceptualisation%20du%20domaine%20-%20une%20ontologie%20noyau%20de%20domaine%20(COSBP).pdf?download=1)

- **Equivalence par spécification** : le concept du domaine est une spécialisation d'un élément BPMN existant, par l'ajout de sémantique ou de propriétés propres au domaine étudié.

Les résultats de cette vérification peuvent être synthétisés dans un tableau d'analyse ou un modèle de mappage spécifique, servant de base à la préparation du modèle CDME et à la définition des stéréotypes correspondants (Ben Hassen *et al.*, 2022). Un extrait illustrant la vérification d'équivalence entre l'ontologie COSBP et les concepts de BPMN 2.0.2, ainsi que la dérivation des concepts du modèle CDME de l'extension BPMN4SBP, est également disponible en ligne⁴.

4.2.2. Étape 2.2: Définition du modèle conceptuel de domaine de l'extension (Conceptual Domain Model of the Extension- CDME)

Cette étape correspond à la modélisation du domaine de l'extension (BPMN+X), également désignée comme la construction du modèle CDME, tel que défini dans la phase 1 de la méthode d'extension BPMN proposée par Stroppi *et al.* (2011). Le CDME (Conceptual Domain Model of the Extension) a pour objectif de représenter l'ensemble des concepts spécifiques au domaine cible devant être intégrés à BPMN, ainsi que leurs relations sémantiques avec les éléments du méta-modèle BPMN existant. Ce modèle est élaboré sous forme d'un diagramme de classes UML, indépendamment des contraintes imposées par le mécanisme formel d'extension de BPMN. Cette indépendance permet de se concentrer avant tout sur la sémantique des concepts, sans se restreindre aux considérations techniques (imposées par le mécanisme d'extension de BPMN) liées à leur future implémentation dans BPMN. Dans ce modèle, les classes sont typées en amont selon deux catégories : (i) « *BPMN Concepts* » (concepts standards du langage BPMN pouvant être réutilisés) ; (ii) « *Extension Concepts* » (nouveaux concepts propres au domaine cible, absents du méta-modèle BPMN, et qui nécessitent une extension). Le modèle CDME constitue ainsi une base conceptuelle solide pour la définition rigoureuse de la syntaxe abstraite de l'extension BPMN+X. Il permet d'assurer une cohérence entre les exigences du domaine et les capacités d'expression offertes par le langage étendu (Ben Hassen *et al.*, 2022 ; Ben Hassen and Gargouri, 2024). Un extrait illustrant le modèle CDME de l'extension BPMN4SBP est disponible en ligne⁵.

4.3. Phase 3 : Méta-modèle de l'extension (BPMN+X)

4.3.1. Étape 3.1: Syntaxe abstraite de l'extension BPMN : le méta-modèle BPMN+X (AS)

Cette étape vise à concevoir le méta-modèle étendu (BPMN+X) à partir du modèle CDME préalablement élaboré. La sémantique et la syntaxe abstraite des éléments de BPMN+X s'appuient sur la spécification du mécanisme d'extension de BPMN. Ce méta-modèle est défini sous forme d'un profil UML, composé de plusieurs stéréotypes tels que *ExtensionModel*, *BPMNElement*, *ExtensionElement*, *ExtensionDefinition*, *ExtensionEnum*, *BPMNEnum* et *ExtensionRelationship* (Stroppi *et al.*, 2011). Ce profil BPMN+X permet ainsi de représenter graphiquement les extensions apportées à BPMN.

Le modèle d'extension (*ExtensionModel*) constitue le conteneur principal regroupant tous les éléments définissant une extension BPMN. Il repose sur plusieurs classes stéréotypées, chacune jouant un rôle spécifique dans la représentation des éléments du méta-modèle BPMN 2.0.2 et des concepts ajoutés. Les classes *BPMNElement* représentent les éléments standards du méta-modèle BPMN. Les classes *BPMNEnum* et *ExtensionEnum* permettent de définir

⁴ [https://zenodo.org/records/15353258/files/EM-BPMN+X_Etape%202-1-V%C3%A9rification%20d%C3%A9quivalence%20\(entre%20les%20concepts%20de%20COSBP%20et%20de%20BPMN%202.0.2\).pdf?download=1](https://zenodo.org/records/15353258/files/EM-BPMN+X_Etape%202-1-V%C3%A9rification%20d%C3%A9quivalence%20(entre%20les%20concepts%20de%20COSBP%20et%20de%20BPMN%202.0.2).pdf?download=1)

⁵ [https://zenodo.org/records/15353258/files/EM-BPMN+X_2tape%202-2_Le%20mod%C3%A8le%20CDME%20de%20l'E2%80%99extension%20BPMN4SBP%20\(un%20extrait\).pdf?download=1](https://zenodo.org/records/15353258/files/EM-BPMN+X_2tape%202-2_Le%20mod%C3%A8le%20CDME%20de%20l'E2%80%99extension%20BPMN4SBP%20(un%20extrait).pdf?download=1)

des ensembles de littéraux, respectivement issus du méta-modèle BPMN 2.0.2 et du modèle d'extension. La classe `ExtensionElement` est utilisée pour introduire un nouveau type d'élément absent du méta-modèle BPMN. Quant à `ExtensionDefinition`, elle regroupe un ensemble nommé d'attributs ajoutés à un élément BPMN existant, conformément au concept du même nom dans la spécification BPMN (OMG, 2013). Les attributs d'extension, correspondant à l'élément `ExtensionAttributeDefinition` du méta-modèle BPMN, sont modélisés via la métaclasse `Property` d'UML. Ils sont définis comme des propriétés UML appartenant à une `ExtensionDefinition` ou accessibles via des associations. Ces propriétés peuvent être typées comme suit : `BPMNElement`, `ExtensionElement`, `BPMNEnum`, `ExtensionEnum`, ou un type primitif UML. Un élément particulier, `ExtensionRelationship`, est utilisé pour établir un lien conceptuel entre un élément BPMN existant (`BPMNElement`) et une `ExtensionDefinition` censée l'étendre. Ce mécanisme, bien qu'inopérant sur la structure de l'extension générée, a une vocation conceptuelle. Il sert à guider la définition et la compréhension des extensions, notamment lors de l'adaptation du méta-modèle BPMN à un nouveau domaine. Par ailleurs, Stroppi *et al.* (2011) proposent un ensemble de contraintes OCL à intégrer au profil BPMN+X pour garantir la cohérence des extensions avec les mécanismes d'extension définis par la spécification BPMN.

Démarche de transformation du CDME en BPMN+X. Pour générer un modèle BPMN+X à partir du modèle conceptuel de domaine (CDME), nous nous appuyons sur la démarche en deux étapes proposées par Stroppi *et al.* (2011), visant à produire un profil BPMN+X valide :

1. **Création et peuplement du modèle BPMN+X** : Cette étape consiste à instancier le modèle `ExtensionModel` en intégrant : (i) Les `BPMNElement` et `BPMNEnum` correspondant aux *BPMN Concepts* identifiés dans le CDME ; (ii) Les `ExtensionElement`, `ExtensionEnum`, et `ExtensionDefinition` correspondant aux *Extension Concepts*.
2. **Application des règles de transformation** : Quinze règles définies par Stroppi *et al.* (2011) sont appliquées pour traduire les concepts d'extension du CDME en éléments BPMN+X. Ces règles se basent sur : (i) l'analyse des propriétés de classes et des associations (R1a, R1b, R2a, R2b, R2c, R3, R4a, R4b, R4c) ; (ii) les relations de généralisation entre concepts (R5, R6, R7a, R7b, R8a, R8b) (cf. Ben Hassen *et al.*, 2022 ; Ben Hassen and Gargouri, 2024). Elles garantissent une transformation rigoureuse et conforme aux mécanismes d'extension de BPMN 2.0.2 (OMG, 2013).

Cette démarche consolidée est à la fois robuste et générique, car elle permet de générer un modèle BPMN+X valide, même à partir de CDME hétérogènes. Elle garantit ainsi une formalisation cohérente et conforme des extensions du langage BPMN. Deux exemples illustrant l'application de ces règles à partir des *Extension Concepts* du CDME sont présentés en ligne⁶. En tant que profil UML, le méta-modèle BPMN4SBP se compose de plusieurs stéréotypes : `BPMN Element`, `Extension Element`, `Extension Definition`, `Extension Relationship` et `Extension Enum`.⁷

4.3.2. Étape 3.2: Syntaxe concrète de l'extension BPMN+X

En complément de la syntaxe abstraite, il est nécessaire de définir une syntaxe concrète normalisée, conformément aux directives de la spécification BPMN. Cette syntaxe graphique facilite l'échange des modèles et leur intégration dans des outils BPMN existants. Il s'agit ici de

⁶ [https://zenodo.org/records/15353258/files/EM-BPMN+X_%C3%89tape%203-1_Application%20des%20r%C3%A8gles%20de%20transformation%20\(CDME--BPMN4SBP\).pdf?download=1](https://zenodo.org/records/15353258/files/EM-BPMN+X_%C3%89tape%203-1_Application%20des%20r%C3%A8gles%20de%20transformation%20(CDME--BPMN4SBP).pdf?download=1)

⁷ [https://zenodo.org/records/15353258/files/EM-BPMN+X_Etape%203-1_D%C3%A9finition%20de%20la%20syntaxe%20abstraite%20de%20l'E2%80%99extension%20BPMN4SBP%20\(un%20extrait\).pdf?download=1](https://zenodo.org/records/15353258/files/EM-BPMN+X_Etape%203-1_D%C3%A9finition%20de%20la%20syntaxe%20abstraite%20de%20l'E2%80%99extension%20BPMN4SBP%20(un%20extrait).pdf?download=1)

spécifier de manière systématique la représentation graphique des nouveaux éléments introduits par BPMN+X. Pour cela, nous nous appuyons sur la spécification Diagram Definition (DD) de l'OMG (2012), en particulier sur le package Diagram Graphics (DG), instanciable via le sous-ensemble BPMN-DG. Ce dernier permet une représentation graphique conforme et extensible des éléments ajoutés. La réussite de cette démarche repose aussi sur la mise en œuvre de l'extension dans un outil BPMN adapté. Plusieurs plateformes peuvent être envisagées (Activiti, Bizagi, Cubetto, BPMN2 Modeler), à condition de répondre aux critères suivants : (i) compatibilité complète avec BPMN 2.0; (ii) développement en Java pour faciliter l'adaptation ; (iii) nature open source garantissant accessibilité et évolutivité; (iv) extensibilité graphique permettant l'ajout intuitif de nouveaux éléments ; (v) documentation claire, accessible aux développeurs non experts; (vi) accessibilité aux utilisateurs finaux sans compétences techniques avancées. Ainsi, cette étape garantit à la fois la cohérence formelle et l'opérabilité de l'extension dans un environnement orienté utilisateur. Pour la représentation graphique des SBP, Ben Hassen *et al.* (2019) ont développé BPMN4SBP-Modeler, un plug-in Eclipse basé sur BPMN2 Modeler. Cette extension permet de modéliser explicitement les dimensions fonctionnelle, organisationnelle, informationnelle, comportementale, intentionnelle et de connaissance, souvent négligées dans les outils classiques. Il vise à soutenir une modélisation multidimensionnelle des SBP tout en restant compatible avec la notation BPMN enrichie proposée. Un extrait de l'extension développée est disponible en ligne⁸.

5. Démonstration et évaluation

L'extension BPMN4SBP répond aux exigences de modélisation des processus sensibles à forte intensité de connaissances (SBP) dans les environnements de KM. La méthode EM-BPMN+X garantit la cohérence entre l'analyse du domaine, la conceptualisation ontologique et l'implémentation du méta-modèle validé. Cette approche a été appliquée et évaluée dans le domaine médical, notamment à l'Association de Sauvegarde des Handicapés Moteurs de Sfax (ASHMS), pour modéliser la prise en charge précoce des enfants atteints d'une infirmité motrice cérébrale (IMC) (Ben Hassen *et al.*, 2017a ; 2017b ; 2022 ; 2024a ; Ben Hassen & Gargouri, 2024). Un extrait du modèle relatif au « Processus d'évaluation initiale (neuro-moteur/neuro-musculaire et neuro-développemental) d'un enfant IMC » est présenté en ligne, illustrant l'utilisation de l'outil BPMN4SBP Modeler. L'évaluation a impliqué des experts BPM-KM, des ingénieurs en systèmes d'information et des professionnels de santé de l'ASHMS. Elle a été réalisée à travers des entretiens structurés et des sessions pratiques, avec les critères suivants : (i) *Compréhension et complétude* – Capacité à modéliser clairement les dimensions des SBP et à identifier les connaissances cruciales dans les processus. (ii) *Utilité de BPMN4SBP-Modeler* – Efficacité dans l'analyse et la représentation des SBP, en particulier dans des domaines sensibles comme la santé. (iii) *Facilité d'utilisation* – Intuitivité, clarté fonctionnelle et accessibilité pour les utilisateurs non experts. (iv) *Concordance méthode-outil* – Cohérence entre les concepts du méta-modèle et les fonctionnalités de l'éditeur BPMN4SBP. Les résultats quantitatifs (Figure 3) montrent des scores élevés sur tous les critères, confirmant une perception très positive parmi les participants. BPMN4SBP-Modeler s'avère être un outil efficace et bien aligné, particulièrement adapté pour la modélisation des SBP dans des environnements KM, comme celui de la santé. Les scores de concordance indiquent que l'outil traduit avec succès les principes théoriques de modélisation des SBP en une solution fonctionnelle et accessible.

En conclusion, les résultats confirment que BPMN4SBP améliore significativement l'expressivité de BPMN, tout en facilitant la modélisation de processus collaboratifs,

⁸<https://zenodo.org/records/15353258/files/Syntaxe%20concr%C3%A8te%20de%20l'extension%20BPMN4SBP%20et%20son%20application%20pour%20la%20mod%C3%A9lisation%20d'un%20SBP.pdf?download=1>

dynamiques, complexes et riches en connaissances. La validation de cette méthode atteste de son efficacité pour la gestion des SBP, en constituant un outil décisionnel précieux et un levier stratégique pour la gestion des processus métier contemporains.

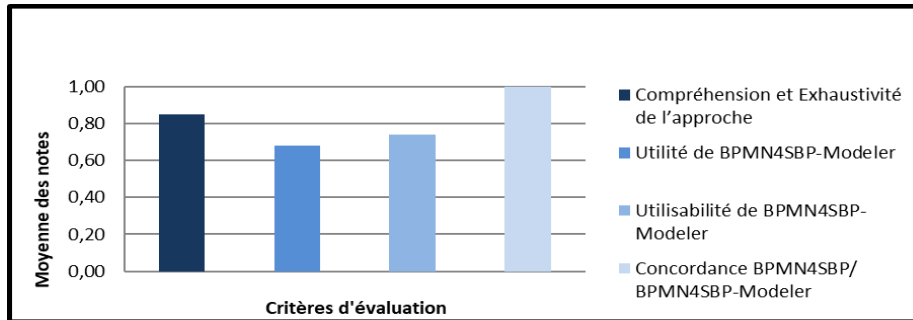


Figure 3. Résultat de l'évaluation des contributions

6. Conclusion

Cette recherche aborde les problèmes des « Trois Fit » – *Vertical, Horizontal et Transversal* – qui limitent l'intégrité, la flexibilité et l'interopérabilité des Systèmes d'Information d'Entreprise (EIS). Pour y répondre, nous proposons la méthode EM-BPMN+X, fondée sur la *Design Science Research* (Peffer et al., 2018), permettant de concevoir des extensions valides de BPMN 2.0.2 adaptées à des domaines spécifiques. Cette méthode comble l'écart entre l'analyse métier et la conception de méta-modèles BPMN, en s'appuyant sur deux phases principales : (1) L'intégration d'une ontologie de domaine, garantissant une représentation claire et partagée des concepts métier ; (2) Une comparaison sémantique avec les éléments standards de BPMN, pour n'introduire que les extensions réellement nécessaires. La notation BPMN+X enrichit ainsi BPMN 2.0.2 pour mieux représenter des processus complexes, flexibles, dynamiques, collaboratifs et à forte intensité de connaissances, caractéristiques des environnements modernes. Au-delà de ses apports théoriques, l'extension BPMN+X offre des bénéfices concrets dans divers domaines : elle facilite l'automatisation des BP, améliore l'utilisation des ressources et réduit les coûts opérationnels. Elle se révèle particulièrement pertinente dans des secteurs comme la santé. Elle met à disposition des outils pratiques pour modéliser et piloter des processus riches en connaissances, renforçant ainsi la prise de décision, la collaboration et l'efficacité organisationnelle. Alignée sur les standards BPMN, cette extension s'intègre aisément aux systèmes de gestion des processus (BPMS), ce qui simplifie son déploiement en contexte réel. Sur le plan éducatif, elle constitue un support d'apprentissage efficace pour l'enseignement de la gestion des BP, de KM et des systèmes d'information, notamment à travers des cas concrets telles que celles issues du secteur de la santé. Sur le plan sociétal, BPMN+X contribue à améliorer l'identification et le partage des connaissances, la localisation de l'information et la qualité des décisions, tout en favorisant l'apprentissage organisationnel et la prise de décision collaborative. Cette recherche ouvre également de nombreuses perspectives. Des travaux futurs pourront enrichir la méthode EM-BPMN+X en intégrant des ontologies de domaine en OWL, facilitant ainsi leur usage dans les EIS et les applications du Web sémantique. L'adoption de l'approche Model-Driven Engineering (MDE) permettra également d'automatiser la transformation des modèles BPMN+X en spécifications exécutables. La généralisation et la validation de la méthode dans d'autres domaines, tels que la finance, la logistique, l'éducation, renforceront sa portée. Enfin, des recherches pourront explorer son application dans des contextes critiques comme la gestion de crise ou la définition de politiques publiques, où réactivité et adaptabilité sont cruciales. À terme, l'objectif est de renforcer la flexibilité, l'agilité et les capacités d'automatisation de BPMN4SBP, pour en garantir une adoption élargie et pertinente dans la gestion des BP.

Bibliographie

- Abouzid, I. and Saidi, R. (2019). Proposal of BPMN extensions for modelling manufacturing processes. In the *5th International Conference on Optimization and Applications*, pp. 1-6.
- Ben Hassen, M., Turki M. and Gargouri, F. (2017a). Extending sensitive business process modeling with functional dimension for knowledge identification". In *Proceedings of the 14th International Conference on e-Business (ICE-B 2017)*, Madrid, Spain, Vol. 2, pp. 38-51.
- Ben Hassen, M., Turki M. and Gargouri, F. (2017b). BPMN4KM: Design and Implementation of a BPMN Extension for Modeling the Knowledge Perspective of Sensitive Business Processes. *Journal of Procedia Computer Science*, Vol. 121, pp.1119-1134.
- Ben Hassen, M., Turki M. and Gargouri, F. (2022). Extending BPMN 2.0 Models with Sensitive Business Process Aspects". In the *26th International Conference on Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems (KES'2022)*, Italy. Vol 207, 2022, pp. 2968-2979
- Ben Hassen, M and Gargouri, F. (2024). Graphical Specification of Sensitive Business Processes. *Procedia Computer Science*, Vol. 237, p.p. 96-106.
- Ben Hassen, M., Turki M. and Gargouri, F. (2019). A Multicriteria Evaluation Approach for Selecting a Sensitive Business Process Modeling Language for Knowledge Management. *Journal on Data Semantics (JODS)*, Vol.8 No.3, pp. 157-202.
- Ben Hassen, M., Zahaf. S., and Gargouri, F. (2024a). Resolving the “three-fit” problems in enterprise information systems: a design science approach with ontological solutions. *Business Process Management Journal*.
- Ben Hassen, M., Turki, M., and Gargouri, F. (2024b). Conceptual analysis of sensitive business processes. *Business Process Management Journal*, 30(5), 1501-1540.
- Ben Said, I., Chaâbane, M. A., Andonoff, E. and Bouaziz, R. (2018), “BPMN4VC-modeller: easy-handling of versions of collaborative processes using adaptation patterns”. *International Journal of Information Systems and Change Management*, 10(2), pp. 140-189.
- Betke and Seifert (2017), “BPMN for disaster response processes – a methodical extension”, *INFORMATIK Conference*, pp. 1311-1324.
- Braun, R., Schlieter, H., Burwitz, M. and Esswein, W. (2015). Extending a Business Process Modeling Language for Domain-Specific Adaptation in Healthcare. in: Thomas. O.; (Hrsg.): *Internationalen Tagung Wirtschaft (WI 2015)*, Osnabrück, S, pp. 468-481.
- Braun, R., Schlieter, H., Burwitz, M. and Esswein, W. (2016). BPMN4CP revised – extending BPMN for multi-perspective modeling of clinical pathways. *49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, Koloa, HI, USA, pp. 3249-3258.
- Cartelli, V., Di Modica, G. and Tomarchio, O. (2016), “Extending the BPMN specification to support cost-centric simulations of business processes”. *IC3K*, pp. 492-514.
- Carvalho, L.P., Cappelli, C. and Santoro, F.M. (2018), “AO-BPM 2.0: aspect-oriented business process modeling”, *Business Process Management Workshops*, pp. 719-731.
- Chergui, M. E. A. and Benslimane, S. M. (2020), “Towards a BPMN Security Extension for the Visualization of Cyber Security Requirements”. *IJ of Technology Diffusion (IJTD)*, 11(2), pp. 1-17.
- Dukaric, R. and Juric, M.B. (2018), BPMN extensions for automating cloud environments using a two-layer orchestration approach, *J. of Visual Languages and Computing*, 47, pp. 31-43.
- Fournier-Morel, X., Grojean, P., Rognon, C. (2008), *SOA le Guide de l'Architecture du SI*, Dunod, Paris.
- Hevner, A. and Chatterjee, S. (2010), “Design Research in Information Systems”: Theory and Practice. Springer, New York, 320.
- Heguy, X., Zacharewicz, G., Ducq, Y.. and Vallespir, B. (2019). A performance measurement extension for BPMN: one step further quantifying interoperability in process model. *Enterprise Interoperability VIII, Proceedings of the I-ESA Conferences*, pp. 333-345

- Intrigila, B., Della Penna, G., & D'Ambrogio, A. (2021). A lightweight BPMN extension for business process-oriented requirements engineering. *Computers*, 10(12), 171.
- Louar, F., Zarour, K. and Benmerzoug, D. (2018). Modelling Business Processes for Outsourcing into the Fog and Cloud Computing. In SIMPDA, pp. 18-31.
- Masolo, C., Borgo, S., Gangemi, A., Guarino, N., Oltramari, A., Schneider L. and Horrocks, I. (2003). The WonderWeb Library of Foundational Ontologies and the DOLCE ontology. WonderWeb Deliverable D18, Final Report (version 1.0, 31-12-2003).
- Neumann, J., Franke, S., Rockstroh, M., Kasparick, M. and Neumuth, T. (2019). Extending BPMN 2.0 for intraoperative workflow modeling. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol. 14 No. 8, pp. 1-11.
- Pufahl, L., Zerbato, F., Weber, B., & Weber, I. (2022). BPMN in healthcare: Challenges and best practices. *Information Systems*, 107, 102013.
- OMG (2012), *Diagram Definition (DD)*, Version 1.0. <http://www.omg.org/spec/DD/1.0/PDF/>.
- OMG (2013), *Business process model and notation (BPMN)*, available at: <http://www.omg.org/spec/BPMN/2.0.2> (accessed 10 April 2021).
- OMG (2014). *Meta Object Facility (MOF)*, Version 2.4.2. <http://www.omg.org/spec/MOF/>.
- Onngo, B., Proudlove, N., D'Ambrogio, S., Calabrese, A., Bisogno, S. and Levialdi Ghiron, N. (2018). A BPMN extension to support discrete-event simulation for healthcare applications: an explicit representation of queues, attributes and data-driven decision points. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 69 No. 5, pp. 788-802.
- Peffers, K., Tuunanen, and Niehaves, B. (2018), "Design Science Research Genres: Introduction to the Special Issue on Exemplars and Criteria and Applicable Design Science Research". *European Journal of Information Systems*, Vol.27(2), 129.
- Polančič, G. (2020), "BPMN-L: A BPMN extension for modeling of process landscapes". *Computers in Industry*, 121, 103276
- Polderdijk, M., Vanderfeesten, I., Erasmus, J., Traganos, K., Bosch, T., Rhijn, G. and Fahland, D. (2018). A visualization of human physical risks in manufacturing processes using BPMN. *Business Process Management Workshops*, pp. 732-744.
- Ramos-Merino, M., Santos-Gago, J. M., Álvarez-Sabucedo, L. M., Alonso-Roris, V. M. and Sanz-Valero, J. (2019), "BPMN-E 2: a BPMN extension for an enhanced workflow description". *Software & Systems Modeling*, 18(4), pp. 2399-2419
- Santra, D. and Choudhury, S. (2018). C-BPMN: A Context Aware BPMN for Modeling Complex Business Process. arXiv preprint arXiv:1806.01333.
- Skouti, T., Seiger, R., Furrer, F. J., & Strahringer, S. (2024). RBPMN: the value of roles for business process modeling. *Software and Systems Modeling*, 1-32.
- Stroppi, L.J.R., Chiotti, O. And Villarreal, P.D. (2011), "Extending BPMN 2.0: Method and tool support". In *Business Process Model and Notation*, Dijkman, R., Hofstetter, J., Koehler, J. (eds.) BPMN 2011. LNBI, vol. 95, pp. 59–73. Springer, Heidelberg.
- Strutzenberger, D., Mangler, J. & Rinderle-Ma, S. (2024), "Evaluating BPMN Extensions for Continuous Processes Based on Use Cases and Expert Interviews". *Bus Inf Syst Eng*.
- Szelałowski, M., Biernacki, P., Berniak-Woźny, J., & Lipinski, C. R. (2022), "Proposal of BPMN extension with a view to effective modeling of clinical pathways". *Business Process Management Journal*, 28(5/6), 1364-1390.
- Vogel, J., Zobel, B., Jannaber, S. and Thomas, O. (2018). BPMN4SGA: a BPMN extension for smart glasses applications to enable process visualisations. In *Workshops der INFORMATIK 2018-Architekturen, Sicherheit und Nachhaltigkeit*. Verlag GmbH.
- Zarour, K., Benmerzoug, D., Guermouche, N., & Drira, K. (2019). A BPMN extension for business process outsourcing to the cloud. In *New Knowledge in Information Systems and Technologies: Vol 1*. Springer International Publishing, pp. 833-843.