



HAL
open science

Catégorisation et formalisation des exigences d'interopérabilité dans les processus collaboratifs

Sihem Mallek, Nicolas Daclin, Vincent Chapurlat

► To cite this version:

Sihem Mallek, Nicolas Daclin, Vincent Chapurlat. Catégorisation et formalisation des exigences d'interopérabilité dans les processus collaboratifs. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information* - Série ISI: Ingénierie des Systèmes d'Information, 2010, 15 (5). hal-00588823

HAL Id: hal-00588823

<https://hal.science/hal-00588823>

Submitted on 31 May 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Catégorisation et formalisation des exigences d'interopérabilité dans les processus collaboratifs

Sihem Mallek, Nicolas Daclin, Vincent Chapurlat

Laboratoire de Génie Informatique et d'Ingénierie de Production - LGI2P - site de Nîmes de l'Ecole des Mines d'Alès - Parc Scientifique Georges Besse, 30035 Nîmes cedex 1, France

{Sihem.Mallek, Nicolas.Daclin, Vincent.Chapurlat}@mines-ales.fr

RÉSUMÉ. L'interopérabilité revêt un enjeu important pour l'industrie et son absence peut être vue comme un des principaux freins à un travail collaboratif aussi bien inter-entreprises que intra-entreprise. Il paraît donc pertinent d'analyser et de détecter d'éventuels manques ou défauts d'interopérabilité dans l'organisation ou le comportement des entreprises impliquées dans un processus collaboratif. Ces travaux de recherche proposent, dans un contexte d'ingénierie de processus guidée par les modèles, d'utiliser des techniques de vérification formelle pour détecter différents types de problèmes ou de présomption de problèmes d'interopérabilité. Ceci implique, dans un premier temps, de définir les besoins particuliers en interopérabilité devant être pris en compte dans un contexte collaboratif. Dans un second temps, il est nécessaire de formaliser ces besoins en un ensemble d'exigences d'interopérabilité, de manière aussi formelle que possible. Enfin, ces exigences doivent être vérifiées en se référant aux modèles du ou des processus étudiés. Cet article présente la définition et la formalisation des exigences d'interopérabilité sous forme de propriétés prouvables de manière formelle ou analysables selon d'autres techniques.

ABSTRACT. Interoperability is becoming a crucial issue for industry and a lack of interoperability can be seen as an important barrier to a collaborative work. Indeed, interoperability characterises the ability of any enterprises to interact within a collaborative process. Prior to any effective collaboration, it is necessary to inform enterprises, that aim to work together, if they are able to interoperate. This research work proposes to use formal verification techniques to detect interoperability problems. On the one hand, this induces to be able to define the particular needs to consider. On the other hand, it requires to formalise these needs as a set of unambiguous and, as formal as possible, requirements. Finally, interoperability requirements must be checked thanks to target process model. This paper focuses on the definition and the formalisation of interoperability requirements into interoperability properties that can be formally checked.

MOTS-CLÉS : interopérabilité, exigences, compatibilité, interopération, réversibilité, vérification, propriétés, processus collaboratif

KEYWORDS: Interoperability, requirements, compatibility, interoperation, reversibility, verification, properties, collaborative process

1. Introduction : positionnement et problématique

Dans le contexte de mondialisation actuel, les entreprises se trouvent impliquées de plus en plus dans des projets communs, temporaires ou au contraire durables pour la réalisation d'une mission commune (Kvan, 2000). Elles peuvent ainsi se concentrer sur leur savoir-faire, leur cœur de métier et améliorer notablement leur positionnement et leur compétitivité face à des marchés devenus instables et plus difficiles à appréhender isolément. Pour évoluer sereinement dans ce contexte, les entreprises doivent cependant réfléchir, améliorer et optimiser leurs capacités à collaborer et interagir avec d'autres partenaires. Cette collaboration, représentée au moyen de processus collaboratifs, implique différentes unités organisationnelles (acteurs, équipes, départements de l'entreprise). Un processus collaboratif public impliquant différentes unités organisationnelles appartenant à différentes entreprises est défini par (Aubert *et al.*, 2002) comme : « *un processus dont les activités appartiennent à différentes organisations* ». Rajoutons simplement que ces différentes unités organisationnelles impliquées dans un processus collaboratif cherchent à atteindre à la fois des objectifs propres et des objectifs liés à la réalisation du projet. Il peut s'agir, par exemple, de rechercher des gains financiers, de nouveaux marchés ou d'améliorer les capacités de l'entreprise à l'innovation. La réalisation effective de ce processus repose donc sur (1) la synchronisation et la coordination de ces unités organisationnelles, (2) la définition de leurs rôles au regard de leurs objectifs internes et communs, leurs capacités, aptitudes et ressources métier, (3) leurs aptitudes et leurs capacités à interagir avec les autres c'est-à-dire à leurs capacités à être interopérables. En effet, l'interopérabilité est devenue un enjeu important pour les entreprises (European Community report, 2008), (Cabrel *et al.*, 2006) et se définit comme « *l'habilité de deux (ou plus) systèmes ou composants à échanger des informations et à utiliser les informations échangées* » (IEEE, 1990). Les différentes interactions possibles entre les unités organisationnelles au cours d'un processus collaboratif, non nécessairement limitée à l'échange de données (*e.g.* échange de matières, énergies...), peuvent induire des comportements non cohérents et quelquefois inattendus. Des dysfonctionnements apparaissent alors trouvant leurs origines, par exemple, dans une stratégie d'allocation des charges et des ressources de chaque partenaire déraisonnable avec la réalité du terrain. Il s'ensuit dans ces cas des risques de dépassement de délais, de baisse de qualité de service, et, plus globalement, des pertes de performance. L'interaction entre deux unités organisationnelles, c'est-à-dire l'interopérabilité de ces unités, doit donc être analysée finement avant même qu'elle ne soit mise en œuvre. Le but est en effet de détecter ces éventuels problèmes et dysfonctionnements d'une manière anticipative pour au final faciliter la collaboration.

Ce travail de recherche se concentre sur l'aide à fournir à des entreprises pour qu'elles puissent réfléchir et structurer les besoins auxquels elles doivent répondre pour être interopérables, et ce en fonction de leurs organisations, de leurs métiers et

de leurs objectifs. Il faut ensuite accompagner ces entreprises pour détecter si elles satisfont ou non ces attentes. Il faut enfin aider ces entreprises à définir quelles actions d'amélioration peuvent alors être pertinentes.

L'interopérabilité est donc envisagée ici comme une exigence globale que tout ou partie d'une entreprise doit être en mesure de satisfaire pour un objectif de collaboration. Une exigence est formalisée classiquement à partir de l'expression de besoins émis par un acteur, un service, un partenaire, en d'autres termes une partie prenante. Le langage naturel est alors utilisé. Il peut entraîner des ambiguïtés, absences, redites, incohérences et incomplétudes. De plus, les besoins, une fois identifiés, ne sont pas forcément vérifiables de manière tangible et argumentée. Il faut donc formaliser ces besoins sous forme d'exigences en levant les ambiguïtés, en les structurant et en s'assurant de leur cohérence. L'idée est de s'appuyer sur des modèles de processus collaboratifs qui vont être analysés pour savoir si une série d'exigences n'est pas respectée. Cet article présente en premier lieu, la démarche de formalisation et de construction de la notion d'exigences d'interopérabilité, et en second lieu, comment il devient alors possible d'utiliser des techniques de vérification formelle afin d'analyser l'interopérabilité sur des modèles de processus collaboratifs. En effet, l'objectif n'est pas de mesurer l'interopérabilité mais de détecter et d'anticiper d'éventuels problèmes dans un processus collaboratif afin de les résoudre par la suite.

Cet article présente une approche de formalisation et d'analyse des exigences d'interopérabilité. Un état de l'art sur quelques points essentiels de l'interopérabilité et de la preuve d'exigences en relation avec ce travail de recherche est introduit en section 2. Cette section introduit également les notions et les concepts nécessaires à la démarche proposée pour détecter et anticiper des problèmes d'interopérabilité. Les besoins en interopérabilité, présentés en section 3, sont structurés puis exprimés au moyen d'un modèle d'exigences sous forme d'un arbre causal dont les concepts sont présentés dans la section 4. Ces exigences sont d'abord exprimées à l'aide du langage naturel. Elles sont ensuite formalisées dans la section 5 en propriétés -au moyen d'un langage formel- pour permettre leur vérification *via* des techniques de vérification formelle. Enfin, une illustration du modèle d'exigences d'interopérabilité sous forme d'un arbre causal est présentée en section 6.

2. Etat de l'art

Plusieurs travaux s'intéressant à l'évaluation et à l'amélioration de l'interopérabilité d'une entreprise ont été développés ces dernières années. Notamment, les modèles de maturité tels que LCIM, OIM, LISI et EIMM (Tolk *et al.*, 2003), (Clark *et al.*, 1999), (C4ISR, 1998) et (ATHENA, 2005) permettent de mettre en évidence et d'évaluer le niveau de maturité, c'est-à-dire les forces et faiblesses de tout ou partie d'une entreprise lorsqu'elle doit interopérer avec des partenaires, puis proposent des recommandations d'amélioration. Cependant, il faut

noter que ces modèles ne permettent pas de traiter simultanément les aspects intra-entreprise et inter-entreprises. De même, ces différents modèles de maturité se focalisent généralement sur un des aspects de l'interopérabilité (conceptuelle, technologique ou organisationnelle) définis dans les cadres d'interopérabilité (INTEROP, 2007), (ISO/DIS 11354, 2010). Il n'existe, à ce jour, aucun modèle prenant en compte ces trois aspects. Enfin, ces différents modèles restent peu formels donc difficilement automatisables en termes de mise en œuvre et ne fournissent pas d'outil pour mesurer réellement la performance d'une unité organisationnelle en terme d'interopérabilité.

Pour cela, d'autres travaux de recherche ont été développés. Par exemple, une méthodologie a été développée dans (Daclin *et al.*, 2008) pour mesurer l'interopérabilité des entreprises. Cette mesure inclut une mesure de compatibilité et une mesure de performance de l'interopération, c'est-à-dire de la phase durant laquelle les acteurs sont impliqués dans une action commune pour remplir une mission identifiée. La mesure de la compatibilité s'effectue à l'aide d'une matrice de compatibilité pour informer les entreprises de la présence (ou pas) de problèmes d'interopérabilité. Des critères de coût, délai et qualité sont ensuite utilisés pour mesurer la performance d'interopération. Les travaux de (Blanc *et al.*, 2007) proposent quant à eux, une caractérisation de l'interopérabilité. Cette caractérisation identifie cinq « règles d'interopérabilité ». Cependant, ces règles restent relativement génériques et donc difficiles à exploiter. De même, et dans tous les cas, il reste difficile de localiser précisément les problèmes d'interopérabilité rencontrés pour les solutionner localement.

Il s'agit donc de développer une démarche de formalisation et d'analyse des exigences d'interopérabilité. Cette analyse s'applique sur des modèles intra comme inter-entreprise. Le but étant la détection des situations ou problèmes liés à un défaut ou une lacune d'une unité organisationnelle à interopérer harmonieusement et efficacement avec d'autres au cours du processus collaboratif.

Cette démarche s'appuie sur des concepts issus à la fois des domaines de la modélisation de processus collaboratifs (Touzi, 2007) et d'entreprise (Chen, 2005), (Vernadat, 2006), de l'Ingénierie des Exigences (Van Lamsweerde *et al.*, 1991) et de la vérification d'exigences sur des modèles de système (Bérard *et al.*, 2001).

Ces travaux de recherche sont basés sur les travaux issus de (Roque *et al.*, 2009) pour la modélisation d'entreprise, où une extension du langage BPMN (BPMN, 2009) a été proposée pour prendre en compte les notions d'exigences et de preuve.

Ensuite, une approche d'ingénierie des exigences guide l'utilisateur pour trouver, définir et structurer les exigences d'interopérabilité de manière claire, non ambiguë et cohérente. L'ingénierie des exigences concerne la gestion des exigences durant tout le cycle de vie d'un système, ici des processus collaboratifs inter et intra entreprises. Ce travail s'inspire des approches pour l'ingénierie des exigences qui concernent à la fois la modélisation des exigences et la démarche à suivre pour obtenir ces exigences. Il s'agit dans un premier temps de définir et de formaliser ce

qu'est une exigence d'interopérabilité puis de définir une démarche aidant l'utilisateur à décrire ses propres exigences. La méthode KAOS (Keep All Objectives Satisfied) (Van Lamsweerde *et al.*, 1991) part du principe qu'une exigence peut s'exprimer sous forme d'objectifs à atteindre. Ces objectifs peuvent ensuite être raffinés en sous objectifs jusqu'à obtention d'exigences prouvables et vérifiables sur un modèle. En complément, la démarche REGAL¹ (Requirement Engineering Guide for All) liste et structure un certain nombre de bonnes pratiques en ingénierie des exigences.

Enfin, toute activité de vérification tend à répondre à la question : « *construisons nous le modèle correctement ?* ». Le but étant de prouver essentiellement la cohérence du modèle (Chapurlat, 2007). Par définition, la vérification est "*la confirmation par examen et apport de preuves tangibles que les exigences spécifiées ont été satisfaites*" (ISO 8402, 1994). Pour réaliser cette vérification, plusieurs techniques sont disponibles. Certaines sont considérées comme informelles ou seulement structurées comme l'expertise, la simulation, le test ou la démonstration par l'application. D'autres sont considérées comme des techniques formelles comme le model checking (Edmund *et al.*, 1999), (Bérard *et al.*, 2001) ou le theorem proving (Duffy, 1991).

L'approche proposée cherche à permettre la vérification par la preuve formelle des exigences d'interopérabilité sur un modèle du processus collaboratif. Cette démarche est basée sur la mise en œuvre de plusieurs étapes à savoir :

- La récolte des besoins d'interopérabilité en s'inspirant des travaux existant sur l'interopérabilité et l'analyse d'un questionnaire à destination des industriels afin de formuler les exigences d'interopérabilité. Par conséquent, un référentiel d'exigences d'interopérabilité est développé. Ces exigences sont par la suite formalisées par le biais d'un langage formel en propriétés pour permettre leur vérification *via* des techniques de vérification formelle.

- La modélisation du processus collaboratif en prenant en considération la description des exigences d'interopérabilité. La modélisation se fait *via* le langage BPMN enrichi qui intègre les concepts liés à la description des exigences d'interopérabilité pour permettre la vérification.

- La détection des problèmes d'interopérabilité en vérifiant si le processus collaboratif respecte les exigences d'interopérabilité. Des techniques de vérification formelle ainsi que l'expertise sont alors utilisées à cet effet.

Ces différentes étapes de l'approche proposée sont représentées en Figure 1. Les premières étapes de l'approche sont présentées dans la suite de l'article en s'appuyant sur un exemple illustratif reflétant la collaboration entre deux partenaires dans une activité commune. L'étape de vérification proprement dite des propriétés avec des techniques de vérification formelle n'est pas abordée ici.

¹ REGAL : Requirements Engineering Guide for All, <http://www.incose.org/REGAL>

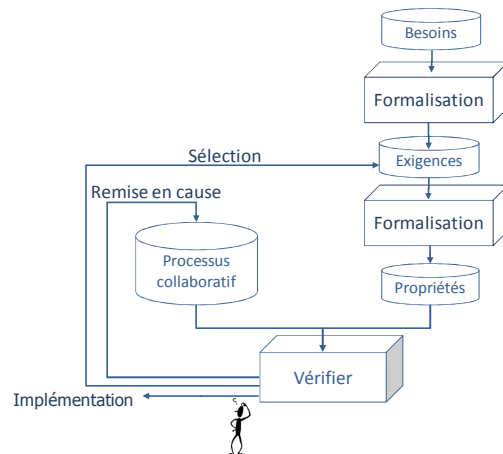


Figure 1. Approche anticipative de détection de problèmes d'interopérabilité

3. Besoins d'interopérabilité

A partir des différents travaux de recherche introduits en section 2, un premier référentiel des besoins en interopérabilité est identifié. Pour cela, ils ont été positionnés dans le cadre d'interopérabilité développé dans le Réseau d'Excellence INTEROP (INTEROP, 2007). Ce cadre tient compte de deux aspects fondamentaux adoptés au cours de ce travail pour structurer les besoins d'interopérabilité. Il s'agit d'abord des barrières d'interopérabilité (conceptuelle, technologique et organisationnelle) qui décrivent la typologie des problèmes à l'origine d'une insuffisance en terme d'interopérabilité. Les problèmes conceptuels concernent les incompatibilités syntaxiques et sémantiques des flux échangés. Les problèmes technologiques sont concernés par l'incompatibilité des technologies de l'information (plateformes et application informatiques) pour communiquer et échanger des flux. Les problèmes organisationnels sont liés aux incompatibilités de structures organisationnelles et des techniques de management implémentées. Il s'agit ensuite des niveaux d'interopérabilité (business, processus, services, et données) qui permettent de mieux identifier, structurer et localiser ces problèmes. L'interopérabilité des données se réfère à faire opérer ensemble différentes données et à l'utilisation de différents langages de modélisation. L'interopérabilité des services permet d'identifier, composer et faire opérer ensemble différentes applications ou fonctions d'entreprises en réseaux. L'interopérabilité des processus vise à faire travailler ensemble divers processus. Enfin, l'interopérabilité au niveau business se rapporte à l'harmonisation de l'organisation globale. A terme, ce référentiel doit permettre aux entreprises de collaborer efficacement, en levant les barrières d'interopérabilité pour chaque niveau d'interopérabilité.

De plus, afin de consolider ces besoins, et pour enrichir ce premier référentiel, une enquête a été faite auprès d'industriels sous forme de questionnaire. Ce questionnaire met en avant des besoins de collaboration intra et inter-entreprise et se focalise pour cela sur les barrières d'interopérabilité. L'aspect performance est également considéré pour permettre aux industriels de faire un bilan de leurs expériences passées.

A titre d'exemple, l'expression des besoins d'interopérabilité est illustrée dans le cas d'une collaboration entre deux partenaires impliqués dans une activité commune. Les besoins exprimés par les partenaires et issus de l'analyse de l'enquête peuvent être exprimés comme suit :

– Besoin 1 : « *Il faut pouvoir envoyer et recevoir des données exploitables, et être sûr de leur réception par l'autre partenaire pendant le déroulement de l'activité* ».

– Besoin 2 : « *Homogénéiser la communication quelle qu'en soit la forme, donc disposer d'une sémantique comprise et partagée entre les deux partenaires* ».

– Besoin 3 : « *Rester aussi performant en terme de coût, de qualité (produit et service) et de délais après le partenariat que ce que l'on était performant avant même que nous n'y soyons impliqués* ».

Ces besoins, exprimés en langage naturel, restent cependant ambigus, voire abstraits de par la nature et la complexité de l'expression des besoins eux-mêmes. Ils évoquent souvent d'autres besoins plus concrets et distincts mais généralement difficiles à percevoir. Afin d'exprimer de manière plus claire et non ambiguë ces besoins, il est proposé de les formuler sous forme d'une série d'exigences (INCOSE, 2007), (ISO/IEC 15288, 2008). Ces exigences sont également exprimées en langage naturel mais épurées de tout blanc, redite (objective ou subjective) et ambiguïté grâce à leur formulation : « sujet, verbe, complément ». Une exigence est définie comme « *un énoncé qui prescrit une fonction, une aptitude ou une caractéristique à laquelle doit satisfaire un produit ou un système dans un contexte donné* » (Scukanec *et al.*, 2008). Ainsi, l'interopérabilité est vue, ici, comme une exigence globale, pouvant être raffinée en exigences plus simples, que des unités organisationnelles en interaction doivent satisfaire pour être les plus efficaces possible durant cette interaction.

4. Exigences d'interopérabilité : catégorisation et modèle

L'objectif est d'obtenir un référentiel d'exigences d'interopérabilité pouvant être utilisé comme noyau de base. Pour ce faire, un modèle d'exigences d'interopérabilité et une catégorisation de celles-ci sont décrits dans la suite.

Il existe trois catégories d'exigences d'interopérabilité. Tout d'abord, l'interopérabilité est généralement liée à la notion de *compatibilité*. Dans ce cas, il s'agit d'harmoniser les systèmes (comportement, organisation, méthode de travail...)

entre eux. Par exemple, des données hétérogènes échangées doivent être comprises et exploitées sans effort d'interfaçage important. Cependant, le développement de l'interopérabilité ne se limite pas uniquement à la notion de compatibilité. En effet, pendant une collaboration des problèmes d'autres natures, liés essentiellement à la dynamique de la collaboration, peuvent apparaître. Par exemple, certains moyens ou ressources sont indisponibles ou s'avèrent incapables de mener à bien leur mission dans les conditions actuelles. Cette notion dynamique de l'interopérabilité au cours de l'interaction, *i.e.* lors des échanges, est plus connue sous le nom d'*interopération*. Enfin, à l'issue d'une collaboration, chaque partenaire souhaite en général reprendre son autonomie et retrouver ses performances originelles. Cependant, toute collaboration peut entraîner, consciemment ou non, de légères perturbations voire des modifications plus ou moins profondes dans le système (organisation, comportement, modes de décision et de gouvernance...). Ces modifications sont réalisées par les entreprises pendant l'interaction pour qu'elles puissent s'adapter voire anticiper les événements. Ce souhait de retour à l'autonomie, et à une certaine idée de leur performance passée, peut être vu comme un besoin par le partenaire. Celui-ci s'intéressera donc à des exigences de *réversibilité* (INTEROP, 2007). La réversibilité représente la capacité et l'aptitude d'un système (unité organisationnelle, équipe, entreprise...) à pouvoir retourner à son état d'origine en terme de performance et d'autonomie décisionnelle et opérationnelle à la fin d'une collaboration, ou tout au moins à parvenir à un état stable et acceptable en terme de performance et de gouvernance. En résumé, les exigences d'interopérabilité peuvent être catégorisées en :

– Exigence de compatibilité définie par « *un énoncé qui prescrit une fonction, une aptitude ou une caractéristique, indépendant du temps (aspect statique) et lié aux barrières d'interopérabilité pour chaque niveau d'interopérabilité, que les entreprises doivent satisfaire avant toute collaboration* ».

– Exigence d'interopération définie par « *un énoncé qui prescrit une fonction, une aptitude ou une caractéristique, dépendant du temps (aspect dynamique) et lié à la performance de l'interaction, que les entreprises doivent satisfaire lors de la collaboration* ».

– Exigence de réversibilité définie par « *un énoncé qui prescrit une fonction, une aptitude ou une caractéristique, lié à la capacité qu'a l'entreprise à reprendre son autonomie et à retourner à son état d'origine (en terme de ses propres performances), que l'entreprise doit satisfaire à la fin de la collaboration* ».

Ces trois catégories d'exigences sont cohérentes avec le cycle de vie d'un processus collaboratif comme représenté pour l'Entreprise Virtuelle (*cf.* Figure 2) qui met en avant les étapes de création, opération et dissolution (Camarinha-Matos *et al.*, 2003). En effet, deux entreprises qui désirent collaborer ensemble doivent, (1) créer le processus collaboratif (exigences de compatibilité), (2) exécuter le processus collaboratif (exigences d'interopération), et (3) arrêter le processus collaboratif (exigences de réversibilité).

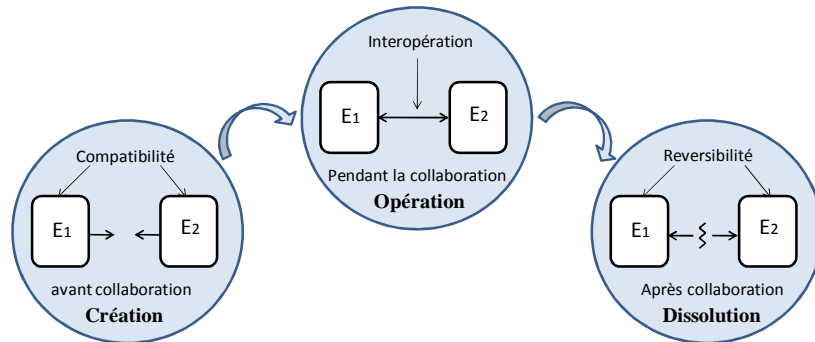


Figure 2. Les trois catégories d'exigences d'interopérabilité liées au cycle de vie de l'entreprise virtuelle [adaptée de (Camarinha-Matos et al., 2003)]

Cependant, de par le nombre et la difficulté de description des exigences, il est nécessaire de disposer d'un modèle d'exigences structurant et guidant l'acteur humain dans sa spécification. L'objectif est d'obtenir un modèle d'exigences d'interopérabilité avec différents niveaux d'abstraction. Ce modèle permet de raffiner, manipuler et enfin facilement formaliser les exigences à des fins d'analyse sur un modèle du système visé (un processus collaboratif, des entreprises, des équipes...). Il repose sur le principe de causalité : une exigence se raffine à partir de la combinaison d'exigences considérées comme des causes primaires. Le résultat est un arbre causal orienté (cf. Figure 3) qui permet de structurer et de raffiner les exigences d'interopérabilité.

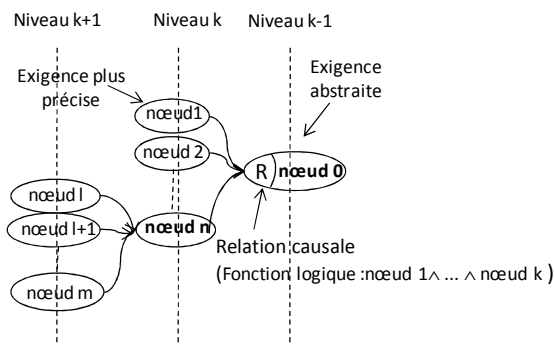


Figure 3. Raffinement des exigences à l'aide d'un arbre causal

Chaque nœud représente une exigence d'un niveau d'abstraction ou de causalité donné. Les arcs liants un nœud d'un niveau d'abstraction à d'autres nœuds de niveaux d'abstraction moins élevés représentent la relation de raffinement sous

forme d'une relation causale entre ces nœuds. A titre d'exemple, le modèle (partiel) des exigences d'interopérabilité résultant est représenté Figure 4. Le nœud racine (ellipse grise) représente l'exigence d'interopérabilité globale la plus abstraite. Exprimer et prouver cette exigence revient à exprimer et à prouver la capacité et l'aptitude d'une unité organisationnelle (d'une entreprise ou d'une équipe) à pouvoir inter opérer. Ce nœud racine est raffiné par les trois catégories d'exigences présentées précédemment. Chaque catégorie est raffinée, par la suite, à l'aide des concepts introduits par le cadre développé dans le Réseau d'Excellence INTEROP (barrières d'interopérabilité et niveaux d'interopérabilité) (INTEROP, 2007). Chaque catégorie est raffinée par les quatre niveaux d'interopérabilité (business, processus, services et données) qui sont eux même raffinés par les trois barrières d'interopérabilité (conceptuelle, technologique et organisationnelle). L'arbre causal est ensuite complété avec des exigences extraites des travaux présentés en section 2 et des résultats de l'enquête effectuée auprès d'industriels. Par conséquent, d'éventuels enrichissements avec de nouvelles exigences d'interopérabilité se font sur les derniers niveaux d'abstraction de l'arbre causal.

Le principe de raffinement de l'arbre causal permet de décomposer une exigence abstraite d'un niveau k sous forme d'un ensemble d'exigences de niveau d'abstraction moindre ($k+1$). La relation qui lie un nœud cible (niveau k) à ses nœuds causes appelés aussi sources (niveau $k+1$) est de type implication, équivalence ou influence. Elle est ensuite contrainte par une fonction logique permettant d'exprimer comment les nœuds causes sont associés et pris en compte dans le raffinement du nœud cible.

A titre d'exemple, pour l'arbre causal présenté Figure 4, les fonctions logiques utilisées proposées sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Interopérabilité} &= \text{Compatibilité} \wedge \text{Interopération} \wedge \text{Réversibilité} & [1] \\ \text{Compatibilité} &= \text{Business}_{\text{comp}} \wedge \text{Processus}_{\text{comp}} \wedge \text{Services}_{\text{comp}} \wedge \text{Données}_{\text{comp}} & [2] \\ \text{Services}_{\text{comp}} &= \text{Conceptuelle} \wedge \text{Technologique} \wedge \text{Organisationnelle} & [3] \\ \text{Conceptuelle} &= \text{Syntaxe} \vee \text{Sémantique} & [4] \end{aligned}$$

En d'autres termes, pour atteindre la pleine interopérabilité, les exigences de compatibilité, d'interopération et de réversibilité doivent être respectées comme indiqué par l'équation [1]. Pour que l'exigence de compatibilité soit respectée, il faut que les exigences reliées aux niveaux d'interopérabilité soient à leur tour respectées comme représenté sur l'équation [2]. Les exigences de chaque niveau d'interopérabilité sont respectées si et seulement si chaque barrière d'interopérabilité est respectée à ce niveau comme le montre l'équation [3] avec le niveau $\text{services}_{\text{comp}}$. C'est trois premières équations représentent les trois premiers niveaux de l'arbre causal et sont invariants (utilisation systématique de la fonction logique ET). Les barrières d'interopérabilité sont respectées comme le montre l'équation [4], qui se focalise ici seulement sur les concepts liés à la barrière conceptuelle, si les exigences les raffinant sont respectées. Cette exigence conceptuelle est respectée si une des deux exigences « *syntaxe* » ou « *sémantique* » est satisfaite. En conclusion, le choix de la fonction logique utilisée au delà des trois premiers niveaux revient à

l'utilisateur. De ce fait, les exigences de chaque niveau peuvent être analysées séparément. Cette analyse, indiquant la satisfaction ou non d'une exigence, repose sur l'usage de mécanismes de preuve ou sur l'expertise.

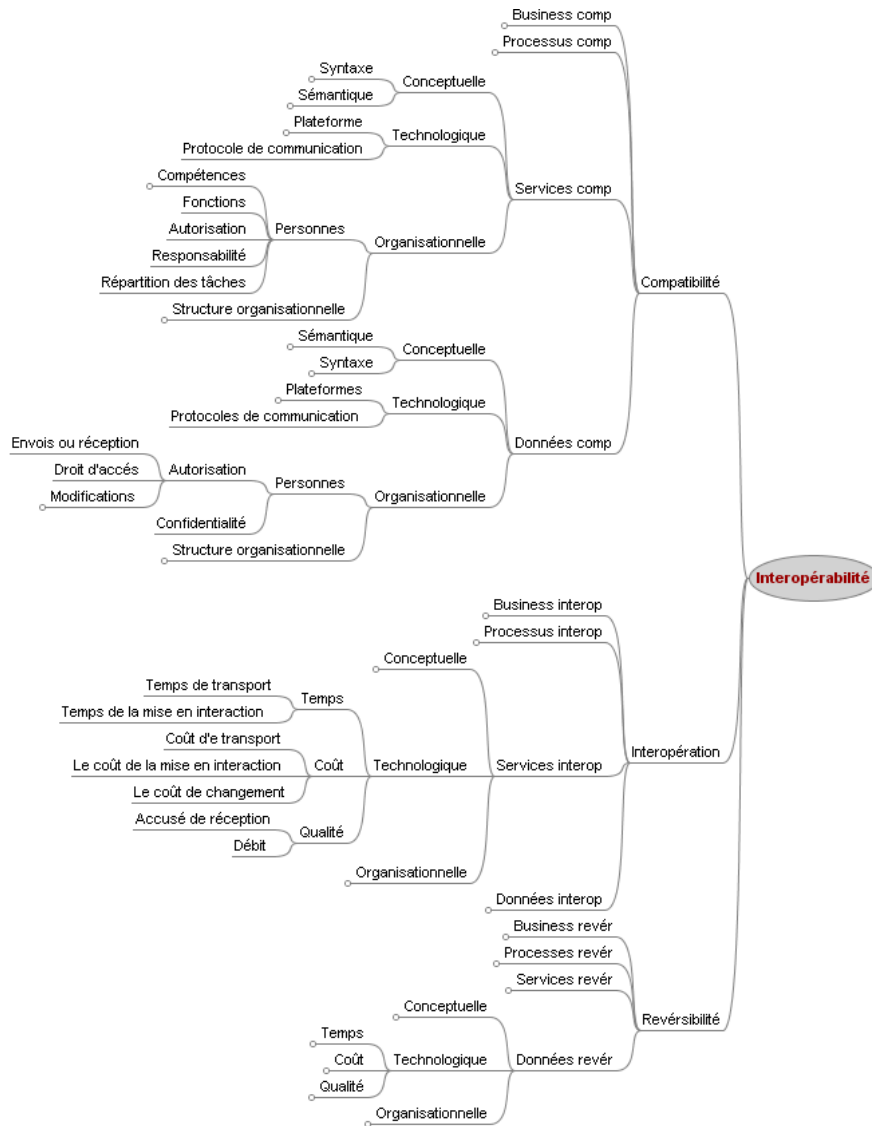


Figure 4. Vue partielle de l'arbre causal des exigences d'interopérabilité

D'une manière plus formelle, l'arbre causal présenté Figure 4 est formalisé en adoptant les conventions d'écriture suivantes et selon le modèle suivant :

m = nombre de nœuds (N) de l'arbre

n = nombre d'arcs (E) de l'arbre

T représente l'ensemble des instants de l'échelle temporelle choisie. Par hypothèse, $T = \mathbb{N}$ dans le cas d'une échelle de temps discret ou $T = \mathbb{R}$ dans le cas d'une échelle de temps continu.

Un arbre causal est noté : $G ::= (E, N, N_0)$ avec :

- $E = \{E_j / j \in [0, n]\}$; $E_j ::= (SourceN, CibleN)$ avec $(SourceN, CibleN) \in N \times N$, $SourceN \neq CibleN$ et $niveau_{SourceN} > niveau_{CibleN}$

- $N = \{N_i / i \in [0, m]\}$; $N_i ::= (nom_i, description_i, relation_i, fait_i, niveau_i, valeur_i)$ où :

- $(nom_i, description_i) \in \text{String} \times \text{String}$

- $fait_i = \{\text{variables, paramètres et prédicats de modélisation extraits de modèle}_i\}$

- $niveau_i \in [0 ; +\infty [$

- $relation_i ::= (\text{quantificateur}, T, \theta, \theta_c)$ avec :

- $quantificateur \in \{\forall, \exists\}$

- $T \subseteq T /$ Ensemble des moments possibles

- $\theta : fait_i \cup T \rightarrow \{0, 1\}$

- $\theta_c : N_{N_i} \rightarrow \{0, 1\}$ avec $N_{N_i} ::= \{N_j \in N / j \in [0, m], j \neq i, \exists E_k(N_i, N_j) / k \in [0, n]\}$ est appelé l'ensemble des nœuds sources de N_i

- $valeur_i \in \{\text{true}, \text{false}\}$ est le dernier résultat de vérification du nœud, false par défaut.

- $\exists ! N_0 = (nom_0, description_0, modèle_0, relation_0) \in N$ et appelé exigence racine. Il correspond à l'exigence d'interopérabilité la plus abstraite qui soit.

Une exigence peut être caractérisée par une hypothèse temporelle. Elle peut être statique, c'est-à-dire considérée comme indépendante du temps i.e. considérée comme vérifiable à chaque instant (l'ensemble T est vide). Elle peut être dynamique, c'est-à-dire devant être vérifiée seulement à certaines phases du cycle de vie de la collaboration. Le choix des techniques de vérification alors employées sera différent comme décrit plus loin.

Le principe d'interprétation de cet arbre en phase d'analyse est tel que pour qu'une exigence (nœud N_i) soit respectée, toutes les exigences (nœuds N_j dits nœuds sources de N_i) qui la raffinent (pour $j = 1$ à n , n = nombre d'exigences raffinant l'exigence représentée par le nœud N_i) doivent être respectées en tenant compte de la relation qui lie N_i à ses nœuds sources. Certaines de ces exigences peuvent être :

– décrites *via* un langage formel permettant une vérification par preuve formelle comme présenté en section 5.

– décrites au moyen d'un langage naturel structuré (sujet, verbe, complément). Dans ce cas précis, leur vérification restera à la charge de l'expert puisqu'elle est impossible à mener sur le modèle du processus collaboratif.

Enfin, certaines des exigences présentes dans le référentiel et certaines exigences spécifiées par l'utilisateur peuvent ne pas être satisfaites et donc en apparence gêner la collaboration. Elles peuvent cependant être considérées comme négligeables ou représenter une gêne et des risques acceptables par l'utilisateur.

Quelques exigences peuvent être formulées à partir des trois besoins présentés en section 3 (ces exigences sont représentées sur l'arbre causal de la Figure 4).

Plusieurs exigences peuvent être formulées à partir du besoin 1 : « *Il faut pouvoir envoyer et recevoir des données exploitables, et être sûr de leur réception par l'autre partenaire pendant le déroulement de l'activité* » (nous en présentons uniquement trois ici). La première est une exigence de compatibilité au niveau des données pour la barrière technologique. Elle est décrite telle que « *le partenaire récepteur dispose des moyens nécessaires de traduction des données* ». Cette exigence traduit le besoin du partenaire récepteur par rapport à la traduction de données homogènes ou hétérogènes avant de commencer la collaboration. La seconde exigence est liée à la compatibilité au niveau des données et pour l'aspect organisationnel. Elle est exprimée telle que : « *le partenaire émetteur possède les autorisations nécessaires d'effectuer des échanges* ». La troisième exigence concerne l'interopération au niveau des données pour la barrière technologique. Elle est décrite comme : « *le partenaire récepteur accuse réception des données à l'émetteur* ».

Ensuite, une exigence de compatibilité au niveau des données pour la barrière conceptuelle est formulée à partir du besoin 2 : « *Homogénéiser la communication quelle qu'en soit la forme, donc disposer d'une sémantique comprise et partagée entre les deux partenaires* ». Cette exigence est exprimée telle que : « *Le partenaire récepteur a la maîtrise du sens de l'information émise par l'émetteur* ».

Enfin, plusieurs exigences de réversibilité peuvent être formulées à partir du besoin 3 : « *Rester aussi performant en terme de coût, de qualité (produit et service) et de délais après le partenariat que ce que l'on était performant avant même que nous n'y soyons impliqués* ». A titre d'exemple, une exigence liée au temps d'interopération peut être citée et décrite telle que « *Le temps d'exécution d'une activité donné après la collaboration doit correspondre au temps d'exécution d'avant la collaboration en considérant une variation positive acceptable* ».

Avant de vérifier si ces exigences sont satisfaites, elles doivent être formalisées en propriétés.

5. Propriétés d'interopérabilité : formalisation

Différents mécanismes sont mis en avant dans ces travaux pour vérifier les exigences d'interopérabilité sur un modèle de processus collaboratif (cf. Figure 5). Il s'agit, selon le type (aspect statique ou dynamique) et le niveau de détail de l'exigence, soit de techniques de vérification formelle (model checking et theorem proving), soit d'une technique basée sur l'expertise par un acteur humain. Les graphes conceptuels (Sowa, 1992) sont utilisés pour la vérification formelle d'exigences statiques (a-temporelle) (Roque *et al.*, 2009). L'outil Uppaal (Bengtsson *et al.*, 2004), (Behrmann *et al.*, 2004) est utilisé pour ses capacités de model checking pour la vérification des exigences dynamiques. Les techniques d'expertise sont enfin utilisées pour analyser des exigences difficilement formalisables ou non vérifiables sur le modèle du processus collaboratif.

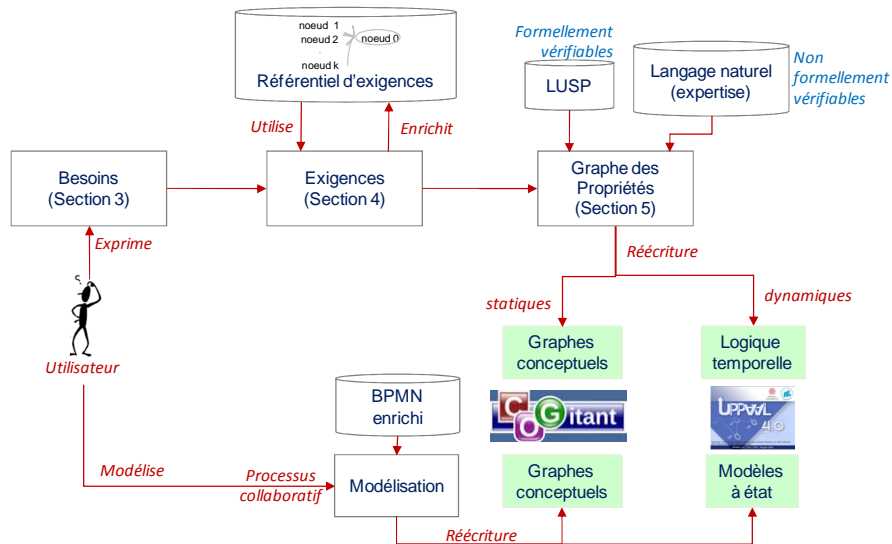


Figure 5. Mécanismes utilisés pour la vérification des exigences d'interopérabilité

Pour permettre la mise en œuvre de techniques de vérification formelle, les exigences d'interopérabilité sont formalisées en propriétés via un langage de spécification de propriétés. Pour cela, le langage LUSP a été choisi (Lamine, 2001), (Chapurlat, 2007). Ce langage décrit une propriété à savoir « une connaissance que l'on a du système ou d'un modèle qui traduit une exigence, une finalité ou une caractéristique à satisfaire ». Une propriété est décrite sous forme d'une relation causale, typée et contrainte entre deux ensembles de faits extraits d'un modèle. Ce modèle de propriétés peut ensuite être transformé pour respecter les langages utilisés par les outils de vérification.

Afin d'analyser un modèle de processus décrit au moyen de l'extension du langage BPMN proposée, les exigences d'interopérabilité présentées en section 4 peuvent être traduites en propriétés *via* le langage LUSP ou bien en langage naturel. Ces propriétés sont représentées sur l'arbre causal de la Figure 6.

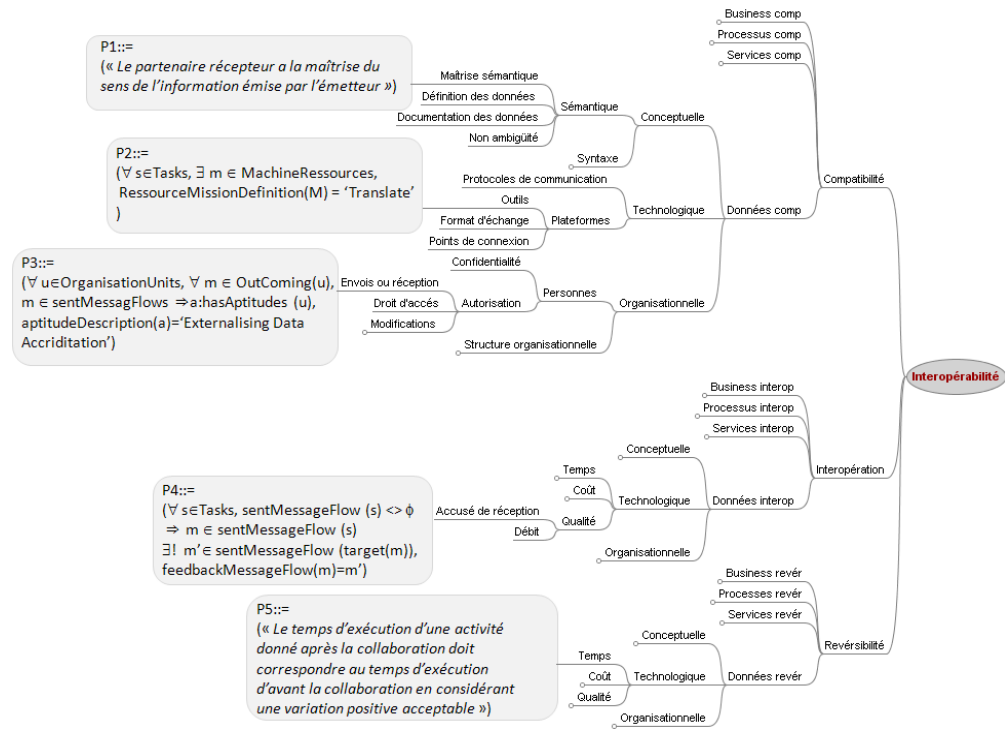


Figure 6. Propriétés d'interopérabilité structurées dans un arbre causal

Les exigences pouvant être vérifiées avec une technique de vérification formelle (graphes conceptuels ou model checker) sur le modèle du processus collaboratif sont traduites en LUSP.

– La propriété P2 est la traduction en langage LUSP de l'exigence nommée « outils » décrite comme : « le partenaire récepteur dispose des moyens nécessaires de traduction des données ». Cette propriété est statique et la technique de vérification utilisée est basée sur les graphes conceptuels.

– L'exigence de compatibilité nommée « autorisation d'envois et de réception », et exprimée telle que : « l'émetteur possède les autorisations nécessaires d'effectuer des échanges » peut être traduite avec le langage LUSP par la propriété P3 qui sera vérifiée de la même manière.

– L'exigence d'interopération nommée « *accusé de réception* » traduite comme : « *le récepteur accuse réception des données à l'émetteur* » est traduite par la propriété P4 avec le langage LUSP. Cette exigence d'interopération dynamique peut être vérifiée en utilisant le modèle checker Uppaal.

Les exigences non formalisables avec LUSP restent énoncées en langage naturel et sont destinées à l'expertise. De ce fait, les exigences nommées « *sémantique* » et « *temps d'exécution* » sont traduites respectivement par les propriétés P1 et P5.

Afin de détailler les exigences déduites et formulées dans l'arbre causal, une illustration de ce dernier est présentée dans la section suivante.

6. Illustration

Le référentiel des exigences de compatibilité obtenu suite à la récolte des besoins est présenté dans cette section. Comme proposé, des exigences d'ordre conceptuel, technologique et organisationnel sont formulées pour chaque niveau d'interopérabilité (données, services, processus et business).

Au niveau des données : une vue partielle du référentiel est donnée Figure 7.

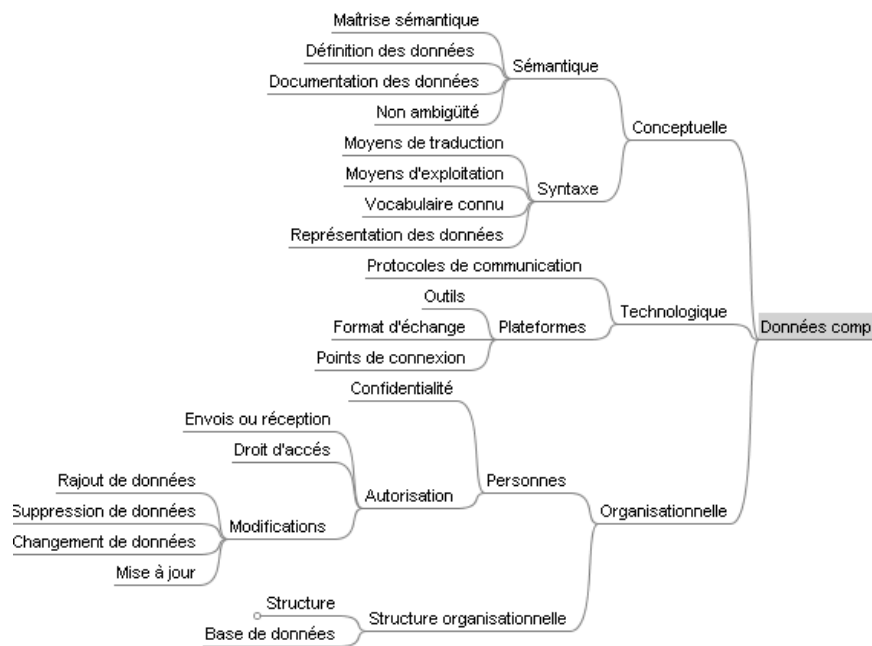


Figure 7. Exigences de compatibilité du niveau Données

Exigences d'ordre conceptuel : elles sont liées à la compatibilité nécessaire entre deux entités organisationnelles en termes de syntaxe et de sémantique des données.

- Syntaxe :
 - DCsync1. Moyens de traduction : Les partenaires disposent des moyens nécessaires de traduction des données échangées.
 - DCsync2. Moyens d'exploitation: Les partenaires disposent des moyens nécessaires d'exploitation des données échangées.
 - DCsync3. Le vocabulaire : Les partenaires (récepteur et émetteur) connaissent le vocabulaire utilisé pour l'expression des données.
 - DCsync4. La représentation des données : Les partenaires disposent d'une représentation claire de leurs données.
- Sémantique :
 - DCsém1. Maîtrise sémantique : Les partenaires ont la maîtrise du sens des données.
 - DCsém2. Définition des données : Les partenaires disposent d'une définition claire de leurs données.
 - DCsém3. Documentation : Les partenaires disposent d'une documentation de leurs données.
 - DCsém4. Non ambiguïté : Les partenaires disposent de données non ambiguës.

Exigences d'ordre technologique : elles sont liées à la nécessaire compatibilité des protocoles de communication et des plateformes.

- Protocole de communication :
 - DTprot1. Protocole de communication : Les partenaires disposent d'un protocole de communication
- Plateformes :
 - DTplat1. Outils : Les partenaires disposent des mêmes outils (plateformes, normes, interfaces).
 - DTplat2. Outils de connexion : Les partenaires disposent d'outils permettant la connexion entre des outils incompatibles.
 - DTplat3. Format d'échange : Les partenaires ont le même format d'échange des données
 - DTplat4. Format de traduction : Les partenaires possèdent un format de traduction.
 - DTplat5. Points de connexion (d'entrée et de sortie) : Les partenaires disposent de points de connexion entre les bases de données (hétérogènes ou homogènes).

Exigences d'ordre organisationnel : elles sont liées à la définition des autorisations et des responsabilités des personnes et à la compatibilité des structures organisationnelles.

- Personnes :
 - DOper1. Confidentialité : Les partenaires gardent leurs données internes confidentielles.
 - DOper2. Autorisation de modification (rajout): Les partenaires procurent une autorisation pour le rajout de données.
 - DOper3. Autorisation de modification (suppression): Les partenaires procurent une autorisation pour la suppression de données.
 - DOper4. Autorisation de modification (changement): Les partenaires procurent une autorisation pour le changement de données.
 - DOper5. Autorisation de modification (mise à jour): Les partenaires procurent une autorisation pour la mise à jour de données.
 - DOper6. Droits d'accès : Les partenaires autorisent un droit d'accès à leurs données échangées et partagées.
 - DOper7. Envoi ou réception : Les partenaires autorisent l'envoi ou la réception de données.
- Structure organisationnelle :
 - DOstr1. Base de données : Les partenaires disposent d'une base de données regroupant et organisant toutes leurs données.
 - DOstr2. Structure : Les partenaires disposent d'une structure organisationnelle (des données) connue et explicite.

Au niveau services : les exigences de compatibilité du niveau Services sont représentées sur l'arbre causal comme suit :

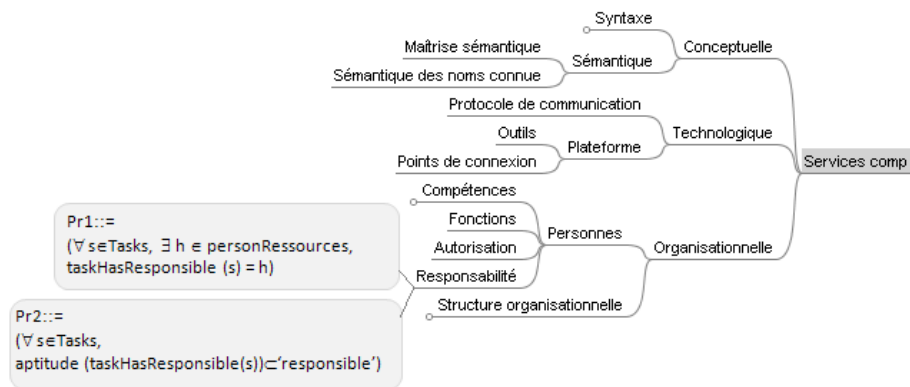


Figure 8. Exigences de compatibilité du niveau Services

Exigences d'ordre conceptuel

- Syntaxe :
 - SCsync1. Description : Les partenaires disposent d'une description claire des services à fournir.
- Sémantique :
 - SCsém1. Maîtrise sémantique : Les partenaires ont une maîtrise du sens du service.
 - SCsém2. Maîtrise de la structure : Les partenaires ont une maîtrise de la structure du service.
 - SCsém3. La sémantique des noms : Les partenaires connaissent le sens des noms des services.

Exigences d'ordre technologique

- Protocole de communication :
 - STprot1. Protocole de communication : Les services disposent d'un protocole de communication.
- Plateforme :
 - STplat1. Outils : Les services disposent des mêmes outils (plateformes, normes, interfaces).
 - STplat2. Outils de connexion : Les services disposent d'outils de connexion permettant la connexion entre des outils incompatibles.
 - STplat3. Points de connexion (d'entrée et de sortie) : Les services disposent de points de connexion.

Exigences d'ordre organisationnel

- Personnes :
 - SOper1. Compétences : Les personnes impliquées dans un service ont les compétences nécessaires (connues et bien définies).
 - SOper2. Ressources humaines : Les ressources humaines possèdent les compétences requises.
 - SOper3. Ressources techniques : Les ressources possèdent les caractéristiques techniques requises.
 - SOper4. Fonctions : Les fonctions de chaque service sont connues et clairement identifiées.
 - SOper5. Autorisation : L'accès aux services est accordé par une autorisation.
 - SOper6. Responsabilité : Chaque service dispose d'un responsable clairement identifié.
- Structure organisationnelle :
 - SOstr1. Structure : Les services disposent d'une structure organisationnelle connue et explicite.

Au niveau processus : quelques exigences de ce type sont représentées sur l'arbre causal en Figure 9

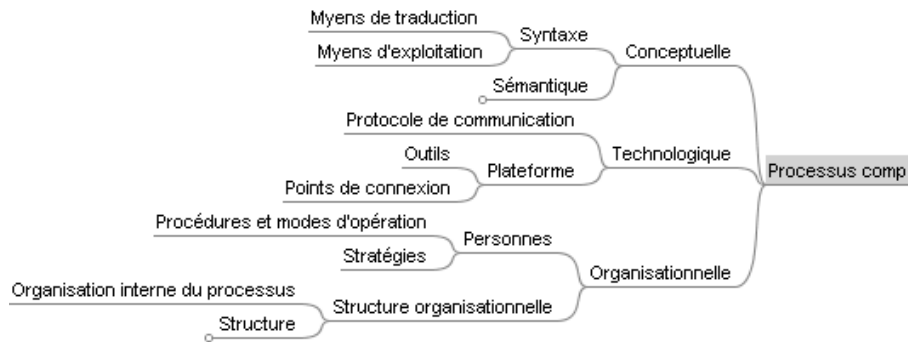


Figure 9. Exigences de compatibilité du niveau Processus

Exigences d'ordre conceptuel

- Syntaxe :
 - PCsync1. Moyens de traduction: Les partenaires disposent de moyens de traduction des processus.
 - PCsync2. Moyens d'exploitation : Les partenaires disposent de moyens d'exploitation des processus.
- Sémantique :
 - PCsém1. Maîtrise sémantique : Les partenaires ont une maîtrise de la structure des processus.

Exigences d'ordre technologique

- Protocole de communication :
 - PTprot1. Protocole de communication : Les processus disposent d'un protocole de communication.
- Plateforme :
 - PTplat1. Outils : Les processus disposent des mêmes outils (plateformes, normes, interfaces).
 - PTplat2. Outils de connexion : Les partenaires disposent d'outils de connexion permettant la connexion entre des outils incompatibles.
 - PTplat3. Points de connexion (d'entrée et de sortie) : Les processus disposent de points de connexion.

Exigences d'ordre organisationnel

- Personnes :

- BTprot1. Protocole de communication : Les partenaires disposent d'un protocole de communication.
- Plateforme :
 - BTplat1. Outils : Les partenaires disposent des mêmes outils (plateformes, normes, interfaces).
 - BTplat2. Outils de connexion : Les partenaires disposent d'outils permettant la connexion entre des outils incompatibles.

Exigences d'ordre organisationnel

- Personnes :
 - BOper1. Responsabilité : Un partenaire possède un responsable identifié.
 - BOper2. Décision : Le responsable est le seul habilité à prendre des décisions.
 - BOper3. Visions et stratégies : Les partenaires possèdent des visions et des stratégies clairement définies.
 - BOper4. Méthodes de travail : Les partenaires ont des méthodes de travail clairement définies et explicites.
- Structure organisationnelles :
 - BOstr1. Structure : Les partenaires possèdent une structures organisationnelle connue et explicite.
 - BOstr2. Organisation interne : Les partenaires possèdent une organisation interne connue et évaluée de leurs processus et activités.

Ce référentiel partiel est issu de la récolte des besoins. Afin d'illustrer la démarche proposée, des besoins exprimés par un partenaire engagé dans un processus collaboratif peuvent refléter des exigences présentes dans le référentiel présenté. Par exemple, un besoin peut être exprimé par un partenaire avant d'envoyer sa commande comme suit : « *Connaître le responsable auquel il faut s'adresser pour envoyer les commandes* ». Ce besoin exprimé par le partenaire est lié à l'exigence de compatibilité au niveau des services pour la barrière organisationnelle et nommée « *responsabilité* » appartenant au référentiel des exigences de compatibilité. Cette exigence est décrite par : « *un service possède un responsable clairement défini* ». Cette exigence est formalisée par les deux propriétés Pr1 et Pr2 présenté sur l'arbre causal en Figure 8. La propriété Pr1 implique qu'un service ou une tâche doit avoir un responsable. La propriété Pr2, quant à elle, représente l'aptitude qu'a le responsable à diriger le service. De ce fait, la relation liant l'exigence aux propriétés est définie telle que : $\text{responsabilité} = \text{Pr1} \wedge \text{Pr2}$. En admettant que la fonction logique utilisée par le partenaire tout au long de l'arbre causal soit le Et logique (\wedge), la non vérification de cette exigence entraîne la non vérification de l'exigence racine baptisée « *interopérabilité* ».

Le choix de devoir vérifier chacune des exigences relève d'une stratégie propre à chaque utilisateur. En effet, une exigence non satisfaite ne signifie pas que le système n'est pas interopérable. Cela peut révéler une erreur de modélisation dans le

cas où le modèle du système étudié n'a pas été au préalable vérifié et validé. De plus, un utilisateur peut choisir et imposer qu'une exigence soit satisfaite par défaut en appliquant sa propre expertise, ou qu'une exigence non vérifiée n'entraîne pas nécessairement une détérioration de la collaboration

7. Conclusion

L'interopérabilité prend, de nos jours, une place importante pour les entreprises voulant évoluer de façon pérenne dans un environnement de globalisation. Les entreprises cherchent à trouver leurs problèmes d'interopérabilité pour les résoudre et arriver à une collaboration efficace. Par conséquent, la formalisation et la vérification des exigences d'interopérabilité s'avère être une solution pour aider les entreprises à identifier leurs problèmes d'interopérabilité. Cet article s'articule autour des définitions des exigences d'interopérabilité et de leur formalisation en propriétés avec le langage LUSP. Pour enlever l'ambiguïté pouvant exister, les exigences sont structurées sur un arbre causal permettant le raffinement des exigences abstraites en exigences claires. Ces exigences sont par la suite formalisées en propriétés pour permettre leur vérification.

Les perspectives de ces travaux concernent d'abord l'outillage destiné à la vérification des exigences d'interopérabilité *via* des techniques formelles dépendant de la nature des exigences (statiques ou dynamiques). Ensuite, la stratégie de vérification de l'utilisateur qui peut alterner l'usage de techniques de preuves ou l'usage d'expertise, impose de s'assurer de la traçabilité (gestion des conflits, suivi et mémorisation, résultats de vérification) de toutes les exigences (compatibilité, interopération et réversibilité) tout au long de la collaboration. Enfin, une autre perspective est de proposer des solutions pour remédier aux problèmes d'interopérabilité suite à leur mise en évidence *via* l'approche proposée.

8. Bibliographie

- ATHENA, Framework for the establishment and management methodology, Integrated Project ATHENA, deliverable A1.4, 2005.
- Aubert B., Dussart A., Système d'Information Inter-Organisationnel, Rapport Bourgogne, CIRANO, Mars 2002.
- Behrmann G., David A., Larsen K. G., A tutorial on Uppaal. Department of Computer Science, Aalborg University, Denmark, 2004.
- Bengtsson, J., Yi, W., Timed Automata: Semantics, Algorithms and Tools, In Lecture Notes on Concurrency and Petri Nets. W. Reisig and G. Rozenberg (eds.), LNCS 3098, Springer-Verlag, 2004.

- Bérard B., Bidoit M., Finkel A., Laroussinie F., Petit A., Petrucci L., Schnoebelen Ph., McKenzie P., *Systems and Software verification: model checking techniques and tools*, Springer, 2001.
- Blanc S., Ducq Y., Vallespir B., « A Graph based approach for interoperability evaluation », *Interoperability for Enterprise Software and applications – IESA 2007*, Madeira, Portugal, 2007.
- BPMN, Business Process Modeling Notation, V1.2, 2009. <http://www.bpmn.org/>
- C4ISR, Levels of Information Systems Interoperability (LISI), Architecture Working Group, United States of America, Department of Defence, 1998.
- Cabrel R., Doumeingts G., Li M. S., Popplewell K., *Enterprise Interoperability Research Roadmap, Version 4.0*, 2006.
- Camarinha-Matos L. M., Afsarmanesh H., Rabelo R. J., « Infrastructure developments for agile virtual enterprises », *Journal of Computer Integrated Manufacturing*, ISSN 0951-192X, Vol. 16, N. 4-5, juin-Août 2003.
- Chapurlat V., *Vérification et validation de modèles de systèmes complexes: application à la Modélisation d'Entreprise, habilitation à diriger des recherches de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc (USTL) Montpellier II*, 2007.
- Chen, D., *Modélisation d'entreprise pour l'intégration et l'interopérabilité des systèmes industriels, Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches, Université Bordeaux 1, Bordeaux, France, 14 décembre 2005*.
- Clark T., Jones R., « Organisational Interoperability Maturity Model for C2. », *Proc of Command and Control Research & Techn. Symposium*, Newport, USA, 1999.
- Daclin N., Chen D., Vallespir B., « Methodology for enterprise interoperability », *17th IFAC World Congress (IFAC'08)*, Seoul, Corée, 6-11 juillet 2008.
- Duffy David A., *Principles of Automated Theorem Proving*, John Wiley & Sons, 1991.
- Edmund M. Clarke Jr., « Orna Grumberg, Doron A. Peled, Model checking », *The MIT Press*, 1999.
- European Community report, *Unleashing the potential of the European Knowledge Economy, Value Proposition for Enterprise Interoperability, Final Version (Version 4.0)*, 21 janvier 2008. (http://cordis.europa.eu/fp7/ict/enet/ei/ei-isg_en.htm)
- IEEE, « A compilation of IEEE standard computer glossaries », *Standard computer dictionary*, New York, 1990.
- INCOSE, System Engineering (SE) Handbook Working Group, *System Engineering Handbook, A « How To », Version 3.1, Guide For All Engineers* (voir <http://www.incose.org>), 2007
- INTEROP, *Enterprise Interoperability-Framework and knowledge corpus - Final report, INTEROP NoE, FP6 – Contract n° 508011, Deliverable DI.3*, 21 mai 2007.
- ISO/DIS 11354-1 - *Advanced automation technologies and their applications - Part 1: Framework for enterprise interoperability*, Technical report, 2010.
- ISO/IEC 15288:2008(E) / IEEE Standards 15288.2008 – *Systems engineering – System life cycle processes (2nd edition)*, Février 2008.

- ISO 8402, Quality management and quality assurance: Vocabulary, Second edition 1994-04-01, International Standard Organization, 1994.
- Kvan T., « Collaborative design: what is it? », *Automation in Construction*, Volume 9, 2000.
- Lamine E., Définition d'un modèle de propriété et proposition d'un langage de spécification associé : LUSP, Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2, Décembre 2001.
- Roque M., Chapurlat V., « Interoperability in collaborative processes: Requirements characterisation and proof approach », *PRO-VE'09, 10th IFIP Working Conference on VIRTUAL ENTERPRISES*, Thessaloniki, Grèce, 7-9 Octobre 2009.
- Scucanec S. J., Van Gaasbeek J. R., « A day in the life of a verification requirement. », *U.S Air Force T&E Days*, Los Angeles, Californie, février 2008.
- Sowa J.F., « Conceptual Graphes as A Universal Knowledge Representation », *Computers Math. Applic.*, Vol. 23, N° 2-5, p. 75-93, 1992.
- Tolk A., Muguira J.A., « The Levels of Conceptual Interoperability Model », *Proceedings of Fall Simulation Interoperability Workshop (SIW)*, Orlando, USA, 2003.
- Touzi, J., Aide à la conception de Système d'Information Collaboratif support de l'interopérabilité des entreprises, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Novembre 2007.
- Van Lamsweerde A., Dardenne A., Delcourt B., Dubisy F., « The KAOS Project: Knowledge Acquisition in Automated Specification of Software », *Proceedings AAAI Spring Symposium Series, American Association for Artificial Intelligence*, Stanford University, pp. 59-62, Mars 1991
- Vernadat, F., B., « Interoperable enterprise systems : architecture and methods », *Proceedings of 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM'06)*, Saint-Etienne, France, 17 – 19 mai 2006.