

Problématiques de recherche

2.1	Conception des offres techniques en situation non-routinière	16
2.1.1	Problème technique lié à la conception des offres techniques	16
2.1.2	Éléments généraux concernant la configuration	18
2.1.3	Configuration de systèmes et de processus	19
2.1.4	Formalisation des connaissances en configuration	20
2.1.5	Problématiques scientifiques	22
2.2	Caractérisation des offres techniques avec des indicateurs de confiance	22
2.2.1	Problème technique lié à la confiance en les offres techniques	23
2.2.2	Évaluation de la confiance en un système technique	24
2.2.3	Évaluation de la confiance en un processus de réalisation	26
2.2.4	Problématiques scientifiques	27
2.3	Sélection de l'offre technique la plus intéressante	28
2.3.1	Problème technique lié à la sélection de l'offre à soumettre	28
2.3.2	Aide à la décision multicritère sous incertitudes et imprécisions	29
2.3.3	Problématiques scientifiques	30
2.4	Synthèse du chapitre et contributions visées	31

L'objectif de nos travaux est de proposer des modèles, des méthodes et des outils pour aider les entreprises soumissionnaires dans leur Processus de Réponse à Appel d'Offres (PRAO). Plus précisément, nos travaux se situent dans la phase d'élaboration de l'offre technique, tel qu'illustré en figure 1.3 du chapitre 1, dans des situations de conception non-routinière ou ETO. Trois problèmes scientifiques et techniques majeurs, issus de problèmes industriels rencontrés par les entreprises répondant à des appels d'offres, ont été identifiés :

Problème 1 Comment concevoir des offres techniques dans des situations de conception non-routinière ?

Problème 2 Comment caractériser chaque offre technique avec des indicateurs de confiance qui reflètent l'aptitude de l'offre à être conforme aux attentes et aux objectifs fixés ?

Problème 3 Comment prendre en compte les incertitudes, les imprécisions et la confiance dans le choix de l'offre technique à considérer pour la proposition à transmettre au client ?

Les deux premiers problèmes sont associés à l'activité A2.1 de *Conception et évaluation des offres techniques* et le troisième, à l'activité A2.2 de *Sélection de l'offre technique la plus intéressante*. L'analyse des pratiques industriels et des travaux scientifiques ainsi que les problématiques scientifiques concernant chaque problème sont synthétisées dans les sections 2.1 (pour le problème 1), 2.2 (pour le problème 2) et 2.3 (pour le problème 3).

2.1 Conception des offres techniques en situation non-routinière

Nos contributions relatives à la conception des offres techniques (activité A2.1 *Conception et évaluation des offres techniques* du processus de réponse à appel d'offres présenté en figure 1.3 du chapitre 1) reposent sur plusieurs hypothèses fortes. Premièrement, nous considérons que nous ne pouvons pas étudier en détail l'offre à concevoir. Par conséquent, nous considérons que la conception se limite à une forme de « pré-conception » où seuls les choix clés (pour le système technique et le processus de réalisation) sont effectués pour réaliser un chiffrage. Deuxièmement, nous considérons que les conceptions à réaliser peuvent être qualifiées de fortement routinières à un « peu moins routinières », c'est-à-dire qu'il peut être nécessaire de concevoir de nouveaux sous-systèmes entrant dans la composition de l'offre technique. Troisièmement, nous considérons qu'en situation routinière ou AMTO, les progiciels de configuration constituent une aide importante [Kromker1998 ; Vanwelkenhuysen1998] permettant rapidement, sans erreur et avec une bonne précision de concevoir des offres techniques répondant aux attentes des clients. Notre but est de mettre au point des éléments de modélisation permettant d'étendre l'emploi de ces progiciels de configuration aux situations de conception non-routinière ou ETO et de pré-conception de l'offre.

En conséquence, cette section est décomposée en cinq parties qui abordent successivement le problème technique auquel les entreprises soumissionnaires font régulièrement face (sous-section 2.1.1), les éléments généraux concernant la configuration (sous-section 2.1.2), les définitions des problèmes de configuration de systèmes et de processus (sous-section 2.1.3), le formalisme CSP (*Constraint Satisfaction Problem*) que nous avons utilisé pour construire les modèles génériques (sous-section 2.1.4) et les problématiques scientifiques associées à ce problème technique (sous-section 2.1.5).

2.1.1 Problème technique lié à la conception des offres techniques

Les outils logiciels existants aujourd'hui permettent aux entreprises de concevoir des offres techniques dans des situations de conception très routinière. La majorité de ces outils s'apparente à des logiciels dits de configuration [Kromker1998 ;

[Vanwelkenhuysen1998]. Un logiciel de configuration est un système à base de connaissance qui, étant donné un modèle générique d'offre technique, permet à l'entreprise soumissionnaire d'instancier ou de concevoir une ou plusieurs offres satisfaisant les besoins exprimés par le client [Aldanondo+2008 ; Felfernig+2014 ; Mittal+1989]. Ce modèle générique contient les connaissances caractérisant la diversité (options et variantes) des offres techniques de l'entreprise. Les hypothèses de la configuration stipulent qu'un objet configurable est assemblé à partir d'éléments ou composants prédéfinis [Aldanondo+2008 ; Felfernig+2014 ; Mittal+1989]. Conformément à cela, les modèles génériques sont construits avec des connaissances relatives à des éléments totalement conçus [Aldanondo+2008 ; Felfernig+2014 ; Mittal+1989]. En outre, toute connaissance non formalisée dans le modèle ne peut être exploitée dans le logiciel de configuration lors de l'élaboration de l'offre. Par exemple, un sous-système « commande à distance » qui n'a pas été prédéfini dans le modèle générique ne peut être sélectionné ou défini à l'aide du logiciel de configuration pour concevoir un système technique.

En conséquence, lorsque l'élaboration de l'offre technique se déroule dans une situation de conception moins routinière où l'offre nécessite un sous-système qui n'a pas encore été conçu, les outils de configuration proposés ne sont plus adaptés [Felfernig+2014 ; Sylla+2018b]. En effet, certains éléments pertinents concernant aussi bien le système technique que le processus de réalisation n'étant ni conçus, ni prédéfinis dans le modèle générique ; ils ne peuvent pas être exploités dans un logiciel de configuration. Dans cette situation, de nombreuses entreprises, en fonction de l'importance des activités de conception à réaliser, conçoivent l'offre technique partiellement ou totalement manuellement [Haug+2013 ; Myrodi+2017]. C'est-à-dire, qu'une partie de l'offre, en général prépondérante, est définie avec un logiciel de configuration et l'autre partie manuellement. D'autres entreprises associent d'autres outils tels que des outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) aux logiciels de configuration [Haug+2013 ; Myrodi+2017]. Cela engendre des cycles de conception plus longs et des besoins en ressources supplémentaires pour l'élaboration des offres techniques.

De l'ensemble de ces éléments découle le premier problème technique auquel les entreprises soumissionnaires sont quotidiennement confrontées : *Comment définir des offres techniques satisfaisant les besoins exprimés par les clients dans des situations de conception non-routinière lors du processus de réponse à appel d'offres, tout en réduisant le temps et les quantités de ressources nécessaires ?*

Notre proposition consiste à étendre le champ d'application des logiciels de configuration aux situations moins routinières. Dans ce but et comme d'autres auteurs [Aldanondo+2003 ; Myrodi+2017 ; Yvar2009], nous distinguerons : (i) des éléments entièrement conçus ou prédéfinis comme des éléments standards, (ii) de ceux qui n'ont pas été conçus en détail comme des éléments non-standards. Il est en conséquence nécessaire de développer des modèles génériques permettant aux entreprises de formaliser des connaissances caractérisant des éléments standards et non-standards. Un travail d'identification et de caractérisation de ces deux types d'éléments est ainsi nécessaire.

2.1.2 Éléments généraux concernant la configuration

L'une des premières définitions du problème de configuration a été proposée par [Mittal+1989]. Les auteurs le décrivent comme étant un type de problème de conception où l'objet à concevoir est assemblé à partir d'un ensemble de composants prédéfinis et dont les modes d'assemblage ou d'intégration ont été aussi prédéfinis. Cette définition est reprise par la plupart des auteurs travaillant sur des problèmes de configuration [Aldanondo+2008 ; Felfernig+2014 ; Hvam+2007 ; Sabin+1998 ; Zhang2014].

Ce type de problème se rencontre dans de nombreuses industries, notamment dans le secteur automobile, de l'aéronautique ou celui de la micro-informatique [Felfernig+2014 ; Zhang2014]. En effet, très souvent, les produits ou les composants des produits doivent être choisis parmi un nombre considérable de types ou de variantes pour répondre aux besoins spécifiques exprimés par les clients [Felfernig+2014]. Ce type de problème combinatoire se retrouve aussi dans les entreprises qui répondent aux appels d'offres [Kromker1998 ; Vanwelkenhuysen1998]. Ces entreprises doivent proposer des offres personnalisées aux différentes sollicitations des clients pour mieux satisfaire leurs besoins [Arslan+2006 ; Kromker1998].

Pour aider les entreprises dans leurs processus de configuration, de nombreux modèles et approches ont été proposés dans les travaux scientifiques [Aldanondo+2008 ; Barták+2010 ; Dong+2011 ; Felfernig+2014 ; Haug+2012 ; Mida+2009 ; Soininen+1998 ; Yang+2008 ; Yvar2009 ; Zhang2014]. Les travaux portant sur les approches de configuration définissent des processus constitués des activités nécessaires à la résolution d'un problème de configuration [Felfernig+2014]. Ces activités correspondent d'une part à l'identification, l'analyse et la validation des connaissances du domaine (toutes les connaissances caractérisant la diversité (options et variantes) des produits, des processus et leurs relations) et, d'autre part, à leur formalisation pour permettre leur exploitation lors de la configuration et leur maintenance ultérieure [Djefel2010 ; Haug+2012]. Les travaux portant sur les modèles de configuration reposent sur le concept de modèle générique qui formalise l'ensemble des connaissances du système technique ou du processus à concevoir [Aldanondo+2008 ; Felfernig+2014 ; Zhang2014]. Ce modèle générique est ensuite exploité dans des logiciels de configuration pour instancier des solutions personnalisées satisfaisant les besoins exprimés par les clients. Un logiciel de configuration est constitué essentiellement d'une base de connaissance où sont stockés les modèles génériques et d'un module aidant à l'instanciation du modèle générique au regard des besoins exprimés par les clients [Aldanondo+2008 ; Felfernig+2014 ; Mittal+1989].

En ce qui concerne le problème technique suscité en sous-section 2.1.1, nos travaux se focalisent sur le développement de modèles génériques pour aider à la conception des offres techniques. En conséquence, l'analyse des travaux existants porte sur les travaux proposant des modèles. Plusieurs modèles de configuration de produits et de processus ont été proposés dans les travaux scientifiques [Aldanondo+2008 ; Barták+2010 ; Dong+2011 ; Felfernig+2014 ; Sabin+1998]. Ces modèles peuvent être distingués suivant deux points de vue : (i) le problème de configuration considéré (la configuration de systèmes ou de processus par exemple, objet de la sous-section 2.1.3), et (ii) le formalisme utilisé pour construire le modèle, objet de la sous-section 2.1.4.

2.1.3 Configuration de systèmes et de processus

Depuis les premiers problèmes de configuration définis par [Mittal+1989], de nombreux problèmes ont été définis dans les travaux de [Aldanondo+2008 ; Barták+2010 ; Dong+2011 ; Felfernig+2014 ; Sabin+1998 ; Zhang2014]. Les problèmes de configuration définissent tous les éléments nécessaires à la construction des modèles génériques de systèmes et/ou de processus à concevoir. La majorité des problèmes répertoriés dans les travaux scientifiques sont orientés sur la configuration de produits ou systèmes, et très peu sur la configuration de processus [Felfernig+2014 ; Zhang2014].

Configuration de systèmes

En ce qui concerne la définition de la configuration de produits, selon les problèmes recensés, différents aspects d'un produit sont considérés notamment les aspects physiques, les aspects descriptifs, les aspects fonctionnels [Aldanondo+2008 ; Djefel2010 ; Felfernig+2014 ; Mittal+1989 ; Zhang2014]. Parmi toutes ces définitions, nous considérons les éléments clés proposés par [Aldanondo+2008 ; Mittal+1989] et débouchons sur la définition suivante :

- Hypothèse : un produit configurable est un ensemble de composants ;
- Étant donné :
 1. une architecture générique de produit qui décrit une famille de produits,
 2. un ensemble de groupes de composants qui sont présents dans tous les produits,
 3. un ensemble de groupes de composants optionnels, qui ne sont pas présents dans tous les produits,
 4. un ensemble de propriétés qui caractérisent chaque composant,
 5. un ensemble de contraintes qui définissent les combinaisons possibles de composants et / ou de valeurs de propriétés,
 6. un ensemble d'exigences qui représentent les besoins client, où une exigence correspond à la sélection d'un sous-système composant dans un groupe ou d'une valeur de propriété.
- Objectif : La configuration consiste à trouver au moins un ensemble de composants satisfaisant toutes les contraintes et les exigences du client.

Dans le cadre de nos travaux, une modification mineure est faite pour adapter ce problème à la configuration de systèmes en substituant les notions de « produit » et de « composant » par celles de « système » et de « sous-système » respectivement. Sur cette base, un système est considéré comme un ensemble de sous-systèmes qui sont intégrés pour former l'architecture physique du système. Chaque sous-système est décrit par des propriétés qui le caractérisent. Ainsi, en considérant ce problème de configuration de systèmes, un modèle de configuration de systèmes considérant un seul niveau de décomposition (une décomposition de systèmes en sous-systèmes) a été développé dans [Sylla+2018b].

Configuration de processus

Concernant le problème de configuration de processus, peu d'auteurs ont proposé des définitions formelles. Cependant, une définition inspirée de l'approche utilisée pour les produits a été proposée par [Aldanondo+2008 ; Pitiot+2014]. Cette définition est considérée pour nos travaux et les éléments clés décrits ci-dessous sont repris :

- Hypothèse : un processus est un ensemble d'activités liées par des contraintes de précédence, une activité est un ensemble de ressources caractérisées par une quantité requise ;
- Étant donné :
 1. une architecture générique du processus qui décrit une famille de processus,
 2. un ensemble d'activités, avec pour chacune, un ensemble de ressources ayant des quantités requises,
 3. un ensemble de contraintes qui définissent les combinaisons possibles d'activités, de ressources et de quantités de ressources,
 4. un ensemble d'exigences correspondant à la sélection d'une activité, ou d'un couple (ressource, quantité de ressources),
- Objectif : La configuration de processus consiste à trouver au moins un ensemble d'activités avec les couples (ressource, quantité de ressource) satisfaisant toutes les contraintes et les exigences.

La plupart des problèmes de configuration répertoriés dans les travaux scientifiques font l'hypothèse que le système ou le processus à concevoir est assemblé à partir d'un ensemble de sous-systèmes ou d'activités prédéfinis ou totalement conçus (les éléments standards) et dont les modes d'assemblage ou d'intégration ont été aussi prédéfinis (assemblage ou intégration standards). Conformément à cela, les modèles de configuration proposés incluent uniquement des connaissances associées à des éléments standards (sous-systèmes ou activités standards) et des connaissances associées à des modes d'assemblage ou d'intégration standards. Ils n'incluent pas des connaissances associées à des éléments n'ayant pas été conçus en détail (des éléments non-standards). Ils ne permettent donc pas de sélectionner des sous-systèmes ou des activités non-standards pour configurer un système ou un processus non-standard [Aldanondo+2008 ; Felfernig+2014 ; Mittal+1989 ; Zhang2014]. Par exemple, lors de l'élaboration d'une offre technique dans un processus de réponse à appel d'offres, si les besoins du client requièrent la mise au point d'un sous-système ou d'une activité non-standard, ce sous-système ou cette activité ne peuvent être définis en utilisant ces modèles. En conséquence les modèles de configuration proposés aujourd'hui ne sont pas adaptés pour concevoir des offres techniques non-standards dans des contextes de conception non-routinière.

2.1.4 Formalisation des connaissances en configuration

Différents formalismes sont utilisés pour construire les modèles génériques, notamment les problèmes de satisfaction de contraintes ou les ontologies. Les problèmes de satisfaction de contraintes ou encore CSP (*Constraint Satisfaction Problem*) sont le formalisme le plus utilisé en formalisation des connaissances en configuration

[Felfernig+2014]. En effet, en raison de sa structure, le formalisme CSP s'adapte facilement aux problèmes de configuration [Sabin+1998].

Le formalisme *CSP* définit le problème comme un ensemble de contraintes (\mathbb{C}), qui établissent des relations entre les variables (\mathbb{V}) du problème où chaque variable ($v_i \in \mathbb{V}$) peut prendre une valeur unique dans un domaine fini (D_i) [Montanari1974]. En se référant à cette définition, [Aldanondo+2008 ; Felfernig+2014 ; Sabin+1998], d'autres auteurs ont montré que le problème de configuration de produit défini ci-dessus peut être modélisé ou formalisé comme un CSP. Dans nos travaux, nous utilisons ce formalisme pour la configuration des deux constituants des offres techniques : le système technique et le processus de réalisation.

Formalisation des systèmes techniques

En ce qui concerne la formalisation d'un système technique, chaque groupe de sous-systèmes et chaque propriété est associée à une variable du CSP. Une solution spécifique d'un groupe de sous-système ou une valeur spécifique d'une propriété correspond à une valeur dans le domaine de la variable correspondante. Les contraintes représentent les relations possibles entre les sous-systèmes et / ou les valeurs des propriétés. Pour modéliser les sous-systèmes optionnels, le cadre des CSP dynamiques ou CSP conditionnels noté DCSP (*Dynamic Constraint Satisfaction Problem*), introduit par [Mittal+1990], peut être utilisé. Dans ce cadre, les notions de variables actives / inactives et de contraintes actives / inactives sont rajoutées au cadre CSP, initialement présenté. Les variables et les contraintes sont partitionnées en sous-ensembles initialement actifs et inactifs. En se référant au problème de configuration défini ci-dessus, les groupes de sous-systèmes qui sont toujours présents dans un système sont associés à des variables initialement actives alors que les groupes de sous systèmes optionnels sont associés à des variables initialement inactives. L'activation des variables ou des contraintes inactives est effectuée en utilisant des contraintes d'activation qui peuvent ajouter au problème des variables et des contraintes qui étaient initialement inactives. Des contraintes peuvent également être utilisées pour lier des sous-systèmes ou lier le système à des caractéristiques telles que les performances techniques, le coût ou la confiance [Pitiot+2014 ; Sylla+2017c].

Formalisation des processus de réalisation

En ce qui concerne la formalisation d'un processus de réalisation, une approche similaire a été adoptée dans [Aldanondo+2008 ; Pitiot+2014]. La configuration du processus est formalisée comme un CSP, où chaque activité est décrite par un groupe de variables (certaines représentant les familles de ressources, leur quantité ou la durée de l'activité), reliées entre elles par des contraintes. Des contraintes temporelles sont aussi utilisées pour définir des relations de précedence entre les activités. De manière similaire aux systèmes techniques, la modélisation des activités optionnelles passent par l'utilisation des CSP dynamiques ou CSP conditionnels noté DCSP [Mittal+1990]. Les activités du processus de réalisation sont ainsi partitionnées en deux sous-ensembles disjoints, l'un regroupant les activités toujours présentes dans le processus tandis que l'autre regroupe celles qui sont optionnelles et activées à bon escient au cours du processus de configuration. L'activation des activités (variables et contraintes inactives) est, de manière similaire, supportée par des contraintes d'activation. Des contraintes peuvent également être utilisées pour lier les activités à des caractéristiques telles que le coût, la durée ou le niveau de risque.

2.1.5 Problématiques scientifiques

Au regard de tout ce qui précède, dans le cadre de l'élaboration de l'offre technique dans un processus de réponse à appel d'offres, nous considérons les éléments suivants : (i) les modèles de configuration proposés sont adaptés pour concevoir des systèmes techniques et des processus de réalisation dans des situations de conception routinière ou AMTO, (ii) ils ne sont pas utilisables en l'état dans des situations de conception non-routinière ou ETO. Nous proposons donc de réutiliser ces modèles et de les modifier pour étendre les possibilités d'emploi des logiciels de configuration à des situations de conception non-routinière.

En conséquence, les problématiques scientifiques soulevées sont les suivantes :

- identifier les différents cas de configuration de système et de processus dans des situations de conception non-routinière ;
- pour chaque cas, identifier les modifications nécessaires à l'extension de la configuration de système et de processus des situations de conception routinière à celles de conception non-routinière ;
- pour chaque cas identifié, proposer des éléments de modélisation pertinents en utilisant le formalisme CSP (en particulier les possibilités offertes par les DCSP) ;
- intégrer tous les éléments de modélisation proposés pour construire un modèle générique avec le formalisme CSP.

2.2 Caractérisation des offres techniques avec des indicateurs de confiance

Comme mentionné dans le chapitre précédent (en section 1.3), lors de l'élaboration de l'offre technique (activité A2.1 *Conception et évaluation des offres techniques* du processus de réponse à appel d'offres présenté en figure 1.3 du chapitre 1) dans un contexte de conception non-routinière et, en adoptant une approche de pré-conception, les incertitudes et les imprécisions sur les valeurs des caractéristiques des offres (coûts, performances techniques ou durées d'obtention) sont plus importantes. En conséquence, la confiance dans les offres varient suivant l'état de développement des éléments choisis (sous-systèmes et activités par exemple) et l'avis de la personne chargée de la conception des offres. Il est donc nécessaire de mesurer cette confiance en chaque offre pour savoir laquelle est la plus réalisable au regard des attentes du client et des objectifs du soumissionnaire afin de sélectionner celle à soumettre dans la proposition. Notre objectif est donc de proposer des indicateurs de confiance sur l'ensemble des constituants de l'offre technique (sous-systèmes, intégrations de sous-systèmes, système technique, activités et processus) ainsi qu'une méthode permettant de les évaluer.

En conséquence, cette section est décomposée en quatre parties qui abordent successivement le problème technique auquel les entreprises soumissionnaires font régulièrement face (sous-section 2.2.1), l'évaluation de la confiance dans le système technique (sous-section 2.1.2), l'évaluation de la confiance dans le processus de réalisation (sous-section 2.1.3) et les problématiques scientifiques associées à ce problème technique (sous-section 2.2.4).

2.2.1 Problème technique lié à la confiance en les offres techniques

Lors de l'évaluation des offres techniques dans un contexte de conception non-routinière où toutes les connaissances nécessaires ne sont pas disponibles, les incertitudes et les imprécisions sur les valeurs des caractéristiques des offres (coûts, performances techniques ou durées d'obtention) sont importantes. Ce phénomène est amplifié par le positionnement de nos travaux en pré-conception des offres techniques en réponse à appel d'offres. En conséquence, les activités d'élaboration de l'offre technique sont sujettes à des risques de différentes natures, notamment des risques de dépassement de coûts et de délais. Ces risques peuvent affecter la bonne réalisation de l'offre une fois que celle-ci a été acceptée par le client.

La plupart des outils d'élaboration d'offres techniques existants ont été proposés pour des situations de conception routinière où les valeurs des caractéristiques des offres techniques sont plus précises et plus certaines. Ces outils ne tiennent pas compte des problèmes d'incertitudes, d'imprécisions et de risques lors de l'élaboration de l'offre technique. Dans de nombreux cas, le choix de l'offre technique à considérer dans la proposition est fait par un expert sur la base de son expérience et de son ressenti [Sylla+2017b]. Ce choix subjectif peut conduire à une offre technique non réalisable au regard des attentes (coût, performances techniques ou délai de livraison) et donc au non respect des objectifs entraînant ainsi des pertes non-négligeables pour l'entreprise soumissionnaire [Sylla+2017b].

Dans le but de prendre en compte ces incertitudes et imprécisions, et pour mieux maîtriser et anticiper ces risques, nous proposons de caractériser chaque offre technique avec des indicateurs de confiance [Sylla+2017c]. Ces indicateurs reflètent une forme d'aptitude de chaque système technique associé à une offre à être conforme aux attentes du client et aux objectifs du soumissionnaire (coût, performances techniques ou durée d'obtention), après sa conception et sa réalisation [Sylla+2017c]. Autrement dit, ils permettront de caractériser l'incertitude liée aux valeurs des caractéristiques des offres à l'aide de niveaux de confiance. Ainsi, en représentant ces valeurs imprécises sous forme d'intervalles et en les associant à ces niveaux de confiance, une approche d'aide à la décision peut-être mise au point pour aider le soumissionnaire à choisir une offre technique réalisable au regard des attentes et objectifs, et donc à mieux maîtriser et anticiper les risques.

L'ensemble de ces propos permet de poser le deuxième problème technique auquel les entreprises soumissionnaires sont confrontées : *Comment caractériser, lors de son élaboration, chaque offre technique avec des indicateurs de confiance dans un processus de réponse à appel d'offres ?*

Notre proposition consiste à proposer des indicateurs de confiance ainsi qu'une méthode permettant de les évaluer. Ces indicateurs caractérisent d'une part les sous-systèmes, leurs intégrations et le système technique, et d'autre part, les activités et le processus de réalisation. Deux dimensions sont considérées. La première factuelle, utilise la maturité ou la faisabilité de ces éléments pour caractériser les incertitudes associées à leur état de développement. La seconde plus subjective, correspond à une forme d'intuition ou de ressenti concernant l'offre conçue, émise

par le soumissionnaire (ou plus précisément la personne chargée de la conception de l'offre).

2.2.2 Évaluation de la confiance en un système technique

L'indicateur de confiance doit permettre d'évaluer l'aptitude de chaque système technique associé à une offre à être conforme aux attentes du client et aux objectifs du soumissionnaire, après sa conception et sa réalisation. Il intègre à la fois une évaluation à visée factuelle de la maturité de ces éléments pour caractériser les incertitudes associées à leur état de développement mais également le point de vue subjectif ou l'avis de la personne qui les exploite lors de la conception de l'offre technique.

À notre connaissance, aucun travail scientifique n'aborde la notion de « confiance » dans un système technique. Parmi les concepts les plus proches de la confiance, celui de « maturité » a retenu notre attention. La maturité d'un système est la caractérisation de son état de développement pour une application et un environnement spécifique.

Dans les travaux scientifiques, deux types d'approches peuvent être distinguées pour l'évaluation de la maturité d'un système (ou d'un produit) : celle inspirée du modèle de maturité CMMI (*Capability Maturity Model and Integration*) et celle basée sur le TRL (*Technology Readiness Level*).

Maturité des systèmes techniques inspirée du CMMI

Le premier s'inspire du modèle CMMI (*Capability Maturity Model and Integration*) développé par le SEI (*Software Engineering Institute*). Le modèle CMMI est un modèle prescriptif qui permet aux entreprises d'évaluer leur niveau de maturité ou niveau de « *capabilité* » dans la gestion de leurs processus dans le but de les améliorer [Software Engineering Institute2006]. Quelques auteurs se sont inspirés de ce modèle pour développer des modèles ou approches pour évaluer la maturité d'un produit [Heck+2009 ; Weckenmann+2013]. Dans [Heck+2009], les auteurs proposent un modèle à cinq niveaux, développé durant des études de cas effectuées avec des entreprises dans le domaine de la certification de produits logiciels. L'évaluation de la maturité est basée sur l'absence d'erreurs dans le logiciel. Le logiciel est subdivisé en livrables qui constituent les résultats des différentes étapes de développement. Pour chaque livrable, un ensemble de propriétés réparties sur plusieurs objectifs sont définies. L'atteinte d'un niveau de maturité est ainsi conditionnée par la satisfaction d'un niveau défini pour chaque propriété.

Dans [Weckenmann+2013], les auteurs ont proposé une approche pour la mise en place d'un modèle de maturité pour un objet spécifique. Elle est constituée de plusieurs étapes durant lesquelles des indicateurs pertinents sont définis, catégorisés et hiérarchisés. Des exigences sont associées à chaque indicateur. Dans l'étape d'évaluation, selon la satisfaction des exigences, des scores sous forme de pourcentage sont attribués aux différents indicateurs. Ensuite, la maturité globale de l'objet est déterminée par l'agrégation des niveaux des différents indicateurs. Selon les auteurs, cette approche a été appliquée dans le cadre du développement de feuilles métalliques.

Le point commun de ces modèles ([Heck+2009 ; Weckenmann+2013]) est qu'ils ne supportent pas l'évaluation des systèmes composés de plusieurs sous-systèmes. En outre, les éléments considérés dans l'évaluation ne sont pas assez génériques pour être appliqués directement à d'autres types de systèmes.

Maturité des systèmes basée sur le TRL

Le second type est basé sur les notions de TRL (*Technology Readiness Level*). Le TRL est un indicateur factuel développé par [Mankins1995 ; Sadin+1989] à la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) pour mesurer la maturité des technologies. Il indique sur une échelle numérique, dans quelle mesure une technologie (ou un sous-système) est prête à être déployée pour une application et un environnement donnés [Mankins1995 ; Sadin+1989]. Il a été adopté par des organisations gouvernementales américaines et par plusieurs industries [Magnaye+2014 ; Tomaschek+2016]. Il a été associé à diverses méthodologies pour aider à gérer et maîtriser les risques et les incertitudes liés au développement des technologies et des systèmes [Tomaschek+2016]. Une étude empirique récente a montré que le développement de technologies guidé par des indicateurs de maturité de conception et de TRL permet de réduire les dépassements de délais et de coûts [Katz+2015].

Cependant, le TRL se limite à l'évaluation de la maturité d'une technologie spécifique, il ne supporte pas les intégrations de plusieurs technologies ou de plusieurs sous-systèmes. Il ne permet donc pas d'évaluer la maturité d'un système composé de plusieurs sous-systèmes [Sauser+2008 ; Tomaschek+2016]. C'est dans cette perspective que [Sauser+2008 ; Sauser+2010], sur la base du TRL, ont proposé deux nouveaux indicateurs : IRL (*Integration Readiness Level*) et SRL (*System Readiness Level*). Ces indicateurs permettent d'évaluer respectivement la maturité de l'intégration de deux sous-systèmes et la maturité globale d'un système [Sauser+2008]. Ils ont été utilisés dans plusieurs travaux scientifiques pour développer des méthodes pour évaluer la maturité de systèmes constitués de plusieurs sous-systèmes [Garett+2011 ; London+2014 ; McConkie+2013 ; Sauser+2008]. La méthode proposée par [Sauser+2008] est basée sur l'algèbre des matrices. Elle permet, à partir des TRLs des sous-systèmes et des IRLs des intégrations, de déterminer le SRL du système. Elle a été utilisée par [Magnaye+2010] dans un modèle de développement de systèmes destiné à minimiser et maîtriser les coûts. Elle a été également adoptée par le laboratoire national de technologie énergétique des États-Unis pour estimer la maturité de deux systèmes avancés d'exploitation d'énergie fossile [Knaggs+2015].

Dans nos travaux, nous proposons de développer des indicateurs de confiance qui permettent d'évaluer dans quelle mesure un système technique choisi pourra être conforme aux attentes après sa conception par l'entreprise soumissionnaire. Cette évaluation implique donc une évaluation de la maturité des éléments choisis, mais aussi l'avis de la personne qui les exploite. Nous utilisons donc les indicateurs TRL, IRL et SRL comme indicateurs factuels pour évaluer la maturité des sous-systèmes, des intégrations et des systèmes techniques, respectivement. La méthode proposée par [Sauser+2008] pour calculer le SRL du système technique est elle aussi retenue. Cependant ces indicateurs (TRL, IRL et SRL) se concentrent uniquement sur l'évaluation de l'état de développement des sous-systèmes, des intégrations et des systèmes. Ils sont évalués à partir de connaissances propres à ces éléments. Ils ne considèrent pas systématiquement le point de vue subjectif de la personne qui les

exploite en vue de mettre au point des systèmes techniques lors de l'élaboration de l'offre dans un processus de réponse à appel d'offres par exemple.

2.2.3 Évaluation de la confiance en un processus de réalisation

En ce qui concerne le processus, parmi toutes les définitions proposées dans les travaux scientifiques, celle de [Ramirez2009] nous semble la plus pertinente pour nos travaux. En effet, dans ses travaux de thèse [Ramirez2009], Ramirez définit la maturité d'un projet comme un indicateur caractérisant dans quelle mesure les objectifs fixés au projet pourront être atteints. Les approches ou méthodes proposées pour évaluer la maturité sont désignées dans les travaux scientifiques par « modèles de maturité ».

Le modèle de maturité CMMI (*Capability Maturity Model Integration*) est le plus utilisé dans l'industrie [De Bruin+2005 ; Grant+2006]. Comme mentionné dans la section 2.2.2, le modèle CMMI est un modèle prescriptif qui permet aux entreprises d'évaluer leur niveau de maturité ou niveau de « capacité » dans la gestion de leurs processus, dans le but de les améliorer [De Bruin+2005 ; Grant+2006 ; Software Engineering Institute2006]. Il couvre de nombreux processus, notamment les processus de gestion des risques, les processus de planification de projets et les processus de conception. Chaque processus est caractérisé par un ensemble de « bonnes pratiques » qui, lorsqu'elles sont implémentées collectivement, satisfont un ensemble d'objectifs nécessaires à l'amélioration du processus.

Deux échelles différentes sont proposées dans le modèle CMMI. L'une comporte six niveaux (0 à 5). Elle permet aux entreprises d'améliorer leur « capacité » pour un processus spécifique. L'autre comporte cinq niveaux (1 à 5) et permet d'évaluer la maturité globale de l'entreprise dans la gestion de tous ses processus. De nombreux autres modèles ont été proposés pour évaluer la maturité de la gestion des processus, des projets, des risques, des portefeuilles de projets [Andersen+2003 ; Kwak+2002 ; Oliva2016].

Le point commun de tous ces modèles, y compris le CMMI, est que l'évaluation porte sur l'organisation de l'entreprise. Le niveau de maturité estimé est donc celui de l'entreprise sur sa capacité à mettre en œuvre ses différents processus. Il est déterminé par l'évaluation des pratiques mises en œuvre, et ne change pas en fonction d'un processus de réalisation spécifique (par exemple la production d'une grue pour un client particulier). Par conséquent, ces modèles ne sont pas adaptés pour évaluer le niveau de maturité ou de faisabilité d'une activité spécifique lors de l'élaboration de l'offre technique dans un processus de réponse à appel d'offres. Cette remarque avait déjà été faite par [Ramirez2009] avant de proposer un modèle à cinq niveaux pour évaluer la maturité d'un projet spécifique. Plus précisément, ce modèle a pour but d'évaluer la maîtrise des processus d'un projet en cours de réalisation à chaque phase de son cycle de vie, afin de les améliorer continuellement. En outre, les éléments évalués sont des processus assez génériques, notamment la gestion des achats, la planification du projet et la gestion des risques.

Dans nos travaux, l'objectif est de développer des indicateurs de confiance qui permettent d'évaluer dans quelle mesure les objectifs fixés au niveau du processus de réalisation pourront être atteints. Ces indicateurs doivent associer d'une part la

maturité ou la faisabilité des activités du processus et, d'autre part, l'avis subjectif de la personne qui les exploite. En conséquence, tous les éléments présentés précédemment ne sont pas adaptés. Dans la suite, nous retenons le terme de « faisabilité » pour les activités ainsi que pour le processus de réalisation.

2.2.4 Problématiques scientifiques

Au regard de tous les éléments présentés, dans le cadre de l'élaboration de l'offre technique dans un processus de réponse à appel d'offres, nous considérons les éléments suivants : (i) les indicateurs TRL, IRL et SRL sont adaptés pour évaluer la maturité des sous-systèmes, des intégrations et des systèmes techniques, (ii) les éléments proposés dans les travaux scientifiques ne sont pas adaptés pour évaluer la faisabilité d'une activité ou d'un processus de réalisation, (iii) aucun élément n'a été trouvé pour prendre en compte l'avis subjectif de la personne qui exploite ces éléments lors de l'élaboration de l'offre et ainsi établir un indicateur de confiance pertinent.

En conséquence, pour caractériser chaque offre technique avec des indicateurs de confiance qui reflètent l'aptitude du système technique associé à l'offre, à être conforme aux attentes après sa conception et sa réalisation, nous proposons : (i) de considérer les deux éléments système technique et processus de réalisation séparément, (ii) de caractériser chaque élément avec deux types d'indicateurs : un factuel et un subjectif, (iii) sur la base de ces deux types d'indicateurs de construire un indicateur global de confiance pour chaque élément de l'offre technique. Comme mentionné en sous-section 2.2.2, nous utilisons, pour le système technique, les indicateurs TRL, IRL et SRL comme indicateurs factuels pour évaluer la maturité des sous-systèmes, de leurs intégrations et des systèmes techniques, respectivement. Nous utilisons également la méthode proposée par [Sausser+2008] pour calculer le SRL du système technique.

Conformément à cela, les problématiques scientifiques soulevées dans cette partie sont décrites comme suit :

- développer des indicateurs subjectifs qui reflètent le point de vue de l'entreprise soumissionnaire sur les sous-systèmes, sur leurs intégrations et sur les systèmes techniques, ainsi qu'une méthode pour les évaluer ;
- développer des indicateurs factuels pour caractériser la faisabilité des activités et la faisabilité des processus de réalisation, ainsi qu'une méthode pour les évaluer ;
- développer des indicateurs subjectifs qui reflètent le point de vue de l'entreprise soumissionnaire sur les activités et sur les processus de réalisation, ainsi qu'une méthode pour les évaluer ;
- développer une méthode permettant d'agréger les indicateurs factuels et subjectifs pour construire un indicateur global pour le système technique et pour le processus de réalisation.

2.3 Sélection de l'offre technique la plus intéressante

Même si ce n'est pas toujours le cas, la plupart des auteurs s'accordent sur le fait qu'en conception, il est toujours intéressant d'étudier plusieurs solutions et de les comparer pour choisir la plus pertinente. Nous nous plaçons dans cette situation et considérons qu'au regard de critères choisis parmi les caractéristiques, le soumissionnaire doit maintenant choisir une offre technique (activité A2.2 *Sélection de l'offre technique la plus intéressante* du processus de réponse à appel d'offres présenté en figure 1.3 du chapitre 1) pour ensuite élaborer son offre commerciale. Dans notre situation de conception non-routinière et de pré-conception de l'offre, les valeurs des caractéristiques des offres font l'objet d'incertitudes et d'imprécisions. De nombreux outils d'aide à la décision multicritère permettent de tenir compte des incertitudes ou des imprécisions associées aux valeurs des critères de décision. Cependant, aucun ne permet de prendre en compte à la fois les incertitudes et les imprécisions, et aucun n'aborde la notion de confiance. Notre but est de mettre au point une approche d'aide à la décision multicritère pour aider le soumissionnaire à sélectionner l'offre la plus intéressante, tout en tenant compte des incertitudes et imprécisions et de sa confiance dans chaque offre.

En conséquence, cette section est décomposée en trois parties qui abordent successivement le problème technique auquel les entreprises soumissionnaire font régulièrement face (sous-section 2.3.1), l'aide à la décision multicritère sous incertitudes et imprécisions (sous-section 2.3.2) et les problématiques scientifiques associées à ce problème technique (sous-section 2.3.3).

2.3.1 Problème technique lié à la sélection de l'offre à soumettre

Comme mentionné en introduction de la section 2.3, nous nous plaçons dans la situation où plusieurs offres techniques (des couples système technique / processus de réalisation) sont obtenues après l'activité de conception et de caractérisation des offres (activité A2.1 *Conception et évaluation des offres techniques* du processus de réponse à appel d'offres présenté en figure 1.3 du chapitre 1). Au regard de critères choisis parmi les caractéristiques, le soumissionnaire doit sélectionner une offre afin d'élaborer son offre commerciale et transmettre une proposition au client. Dans des situations de conception non-routinière et de pré-conception, les valeurs des caractéristiques des offres font l'objet d'incertitudes et d'imprécisions. Pour sélectionner l'offre la plus compétitive et réalisable, il est impératif de prendre en compte ces incertitudes et imprécisions mais également la confiance du soumissionnaire dans chaque offre.

Ce constat permet de définir le troisième problème technique abordé dans nos travaux : *Comment prendre en compte les incertitudes, les imprécisions et la confiance du soumissionnaire dans le choix de l'offre technique la plus intéressante lors de l'élaboration de l'offre technique dans un processus de réponse à appel d'offres ?*

Notre proposition consiste à proposer une approche d'aide à la décision multicritère sous incertitudes et imprécisions. Elle permettra à l'entreprise soumis-

sionnaire de sélectionner l'offre la plus intéressante sur la base de critères pertinents tels que le coût, les performances techniques et la durée d'obtention tout en tenant compte des incertitudes, des imprécisions et de la confiance du soumissionnaire dans les valeurs des critères. L'approche proposée est donc constituée : (i) d'une méthode permettant de modéliser simultanément l'incertitude, l'imprécision et la confiance du soumissionnaire caractérisant les valeurs des critères de décision, (ii) d'une méthode permettant de sélectionner l'offre la plus intéressante vis-à-vis de l'ensemble des critères, des incertitudes / imprécisions et de la confiance du soumissionnaire dans chaque offre potentielle.

2.3.2 Aide à la décision multicritère sous incertitudes et imprécisions

Dans le contexte d'un problème de décision multicritère, le décideur doit choisir la meilleure solution parmi un ensemble de solutions, sur la base de plusieurs critères de décision [Korhonen+1992]. Dans de nombreux cas réels, en raison d'un manque de connaissances, les valeurs des critères permettant de prendre des décisions (critères de décisions) sont imprécises et incertaines [Beg+2017 ; Durbach+2012 ; Zandi+2013]. Il en résulte que la comparaison des solutions est basée sur la comparaison de nombres dont les valeurs sont imprécises et incertaines [Nowak2004]. Dans cette perspective, différentes approches ont été développées afin d'aider le décideur dans son processus de décision. Elles peuvent se distinguer suivant deux aspects : (i) la méthode utilisée pour modéliser l'imprécision et l'incertitude, et (ii) l'approche utilisée pour comparer les solutions et modéliser les relations de préférence ou de dominance [Durbach+2012]. Les méthodes de modélisation des incertitudes et des imprécisions les plus utilisées dans l'aide à la décision multicritère sont la théorie des probabilités et la théorie des ensembles flous ou la théorie des possibilités [Broekhuizen+2015 ; Durbach+2012 ; Kangas+2004].

Méthodes utilisant la théorie des probabilités

Avec la théorie des probabilités, chaque valeur imprécise et incertaine d'un critère de décision pour une solution est modélisée avec une distribution de probabilité. Deux approches sont souvent utilisées pour comparer les solutions : (i) *Multi-Attributes Utility Theory* (MAUT) [Grabisch+2008 ; Neumann+1953 ; Wilson+2016] et (ii) *Stochastic Dominance* (SD) [DAvignon+1988 ; Nowak2004 ; Zhang+2010]. Dans l'approche MAUT, sur la base des distributions de probabilité de tous les critères, une fonction permet de calculer l'utilité espérée de chaque solution. Ainsi, une solution est préférée à une autre si et seulement si son utilité espérée est supérieure. Dans l'approche SD, une comparaison des distributions de probabilité est effectuée pour chaque paire de solutions au regard de chaque critère de décision pour établir des relations de préférence (ou de dominance) mono-critère entre les différentes solutions. Ensuite, une méthode est utilisée pour construire des relations de préférence (ou de dominance) déterministes ou stochastiques sur tous les critères de décision.

Méthodes utilisant la théorie des ensembles flous

Avec la théorie des ensembles flous, les valeurs imprécises et incertaines des critères de décision sont modélisées avec des nombres flous. Une méthode de comparaison de nombres flous est utilisée pour comparer les solutions et pour établir

les relations de préférence (ou de dominance) entre les solutions [Durbach+2012]. De nombreuses approches d'aide à la décision multicritère utilisent la théorie des ensembles flous pour traiter de l'imprécision et de l'incertitude [Chen+1992 ; Chuu2009 ; Kahraman+2007 ; Mardani+2015]. Selon la revue bibliographique présentée dans [Broekhuizen+2015], la méthode AHP (*Analytic Hierarchy Process*) est celle qui est le plus souvent associée à la théorie des ensembles flous. En effet, dans le cadre de la méthode AHP, l'estimation des poids et des valeurs des critères de décision est basée sur des jugements. Ces jugements ont un caractère qualitatif et peuvent être incohérents [Durbach+2012]. Par conséquent, la théorie des ensembles flous est très souvent utilisée : (i) pour modéliser le poids et / ou les valeurs des critères de décision sous forme de nombres flous, et (ii) effectuer l'agrégation de ces valeurs pour fournir un score global pour chaque solution. L'approche de Pareto-dominance floue (ou *Fuzzy Pareto-dominance*) est également utilisée pour aider à la décision lorsque les valeurs des critères de décision sont imprécises et incertaines [Ganguly+2013 ; Mario+2005 ; Sahoo+2012]. Elle est basée sur le principe de Pareto-dominance conventionnelle. La différence est que dans l'approche Pareto-dominance floue, un degré de dominance caractérise les relations de dominance entre deux solutions. Ainsi, les solutions peuvent être classées en fonction de leur degré de dominance mutuelle [Ganguly+2013].

2.3.3 Problématiques scientifiques

Dans nos travaux, les critères de décision sont supposés être indépendants et non compensables. De plus, une même importance est donnée à tous les critères. Par conséquent, des approches d'aide à la décision multicritère telles que AHP ou MAUT qui agrègent les valeurs de tous les critères de décision dans une valeur globale pour la comparaison des solutions, ne sont pas adaptées. En outre, comme mentionné dans la sous-section 2.3.1, notre objectif est de proposer une approche d'aide à la décision multicritère qui prend en compte les incertitudes, les imprécisions et la confiance du soumissionnaire. Nous n'avons trouvé aucune approche considérant ces trois aspects simultanément.

En conséquence, les problématiques scientifiques correspondant à la sélection d'une offre sont les suivantes :

- développer une méthode permettant de modéliser simultanément les incertitudes, les imprécisions et la confiance du soumissionnaire caractérisant les valeurs des critères de décision ;
- développer des relations de dominance pour comparer les différentes solutions (les offres techniques) au regard d'un seul critère de décision en tenant compte des incertitudes, des imprécisions et de la confiance du soumissionnaire ;
- sur la base des comparaisons mono-critère, développer une méthode pour comparer toutes les offres techniques au regard de tous les critères de décision afin de générer un ensemble restreint d'offres les plus intéressantes.

2.4 Synthèse du chapitre et contributions visées

Ce chapitre a permis de définir les problèmes techniques et les problématiques scientifiques associés à nos travaux. Trois problèmes techniques majeurs ont été identifiés. Ils couvrent toutes les activités associées à l'élaboration d'une offre technique dans un processus de réponse à appel d'offres, présenté en figure 1.3 du chapitre 1. Chaque problème technique a été affiné à l'aide d'une analyse des travaux scientifiques existants pour identifier les problématiques scientifiques pertinentes. Ces problématiques ont été étudiées et des solutions scientifiques ont été développées. Elles constituent les contributions de nos travaux, chacune associée à un article de journal.

Problème 1 Comment concevoir des offres techniques dans des situations de conception non-routinière ?

- Article associé : Configuration knowledge modeling : How to extend configuration from assemble/make to order towards engineer to order for the bidding process. *Computers in Industry, 2018, Volume 99, page 29-41*.
- Résumé : Cet article montre comment les modèles de configuration de produits utilisés dans des situations industrielles AMTO peuvent être modifiés et adaptés pour couvrir la configuration de systèmes techniques dans des situations industrielles ETO lors de l'élaboration d'offres techniques dans un processus de réponse à appel d'offres
- Contribution : Extension des modèles de configuration à base de contraintes aux situations non-routinières [Sylla+2018b].

Problème 2 Comment caractériser chaque offre technique avec des indicateurs de confiance qui reflètent l'aptitude de l'offre à être conforme aux attentes et aux objectifs fixés ?

- Article associé : Readiness, feasibility and confidence : how to help bidders to better develop and assess their offers. *International Journal of Production Research, 2017, Volume 55, Issue 23, page 7204-7222*.
- Résumé : Cet article propose des indicateurs de confiance ainsi qu'une méthode permettant de les évaluer afin de caractériser chaque offre technique (système technique et processus de réalisation) selon des niveaux de confiance lors de l'élaboration de l'offre technique.
- Contribution : Définition d'une métrique de confiance caractérisant les offres techniques basée sur des indicateurs factuels et subjectifs [Sylla+2017c].

Problème 3 Comment prendre en compte les incertitudes, les imprécisions et la confiance dans le choix de l'offre technique à considérer pour la proposition à transmettre au client ?

- Article associé : Possibilistic Pareto-dominance approach to support technical bid selection under imprecision and uncertainty in the bidding process. *Soumis à un autre journal*.
- Résumé : Cet article propose une approche d'aide à la décision multicritère basée sur le principe de Pareto-dominance pour aider à la sélection de l'offre technique

la plus intéressante tout en tenant compte des incertitudes et imprécisions sur les valeurs des critères de décision et également de la confiance dans chaque offre potentielle.

- Contribution : Proposition d'une approche d'aide à la décision multicritère basée sur le principe de la Pareto-dominance, tenant compte des incertitudes, des imprécisions et de la confiance dans chaque offre [Sylla+2018a].

Dans le chapitre 3, chaque axe de contributions est présenté par l'article de journal correspondant précédé d'un résumé en français.