

Direction Générale

**ARTS
ET MÉTIERS**
ParisTech

151, boulevard de l'hôpital

75013 Paris

Tél. : + 33 (0)1 44 24 62 76

Fax : + 33 (0)1 44 24 63 26

DIPLOME DE DOCTORAT DE L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARTS ET MÉTIERS

RAPPORT DE SOUTENANCE

(Arrêté du 07 août 2006)

Thèse soutenue par : **Monsieur PINQUIÉ Romain**

Spécialité : Conception

Date : 7 octobre 2016

Sujet : Proposition d'un environnement numérique dédié à la fouille et à la synthèse collaborative d'exigences en ingénierie de produits

Le jury a apprécié la présentation synthétique et très didactique de Mr PINQUIÉ qui a su bien mettre en avant les éléments essentiels de ses contributions scientifiques. La gestion des exigences constitue en effet un enjeu industriel majeur dans la mesure où leurs qualités conditionnent l'ensemble du cycle de développement, y inclus les tests. Ce travail présente la caractéristique d'aborder toutes les étapes de la gestion des exigences, avec une approche académique et industrielle : il offre ainsi un ensemble cohérent de propositions d'amélioration dans la gestion des exigences.

Le jury a pu apprécier lors de cette présentation le remarquable périmètre des alternatives explorées, ainsi que le volume des expérimentations, appuyé sur un travail de prototypage logiciel très conséquent. Les conclusions en tirent une force scientifique incontestable. Le candidat a su, lors de ces années de thèse, se montrer constamment force de proposition et faire preuve d'initiative en s'appropriant le champ scientifique au service des processus de gestion des exigences.

Les nombreuses questions soulevées par ce travail ont permis des échanges riches entre le jury et Monsieur Romain PINQUIÉ, mettant en évidence sa maîtrise du domaine investigué, tant sur les aspects scientifiques qu'industriels, l'intérêt réel des contributions proposées pour l'entreprise et des voies de recherche prometteuses pour la communauté scientifique.

Pour toutes ces raisons, le jury a décidé de décerner, à l'unanimité à Mr PINQUIÉ le grade de Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, spécialité Conception. Par ailleurs, le jury propose également à l'unanimité de présenter ce travail au prix de thèse Pierre BEZIER de l'ENSAM.

L'Ecole nationale supérieure d'arts et métiers ne délivre pas de mention.

Signatures des membres du jury (Rapporteurs et Examineurs) - Souligner le nom du Président du jury

Abdelaziz BOURAS <i>en vidéoconf PLO</i> 	Isabelle MIRBEL 	Frédéric SEGONDS 
Michel TOLLENAERE 	Philippe VERON 	

DIPLOME DE DOCTORAT DE L'ENSAM

RAPPORT COMPLEMENTAIRE DU PRESIDENT DE JURY

Sur la thèse soutenue par Monsieur **Romain PINQUIE** le 7 octobre 2016

Pour concourir au prix de thèse Pierre BEZIER

Monsieur Romain PINQUIE a effectué sa thèse de doctorat dans le laboratoire LSIS du campus d'Aix-en-Provence de l'ENSAM sous la direction de Philippe VERON avec un co-encadrement de thèse par Frédéric SEGONDS du laboratoire LCPI de l'ENSAM à Paris.

Les travaux de recherche de Romain PINQUIE ont porté sur la gestion des exigences dans le développement de produits industriels. Il s'agit là d'un enjeu industriel majeur dans la mesure où leurs qualités conditionnent l'ensemble du cycle de développement, y compris les tests. Ce travail présente la caractéristique d'aborder toutes les étapes de la gestion des exigences, avec une approche globale basée sur un ensemble cohérent de propositions de progrès dans la gestion des exigences en ingénierie systèmes.

A noter que ce travail de recherche a été financé et réalisé pour le compte d'un industriel, la société KEONYS, une PME spécialisée dans le déploiement de solutions PLM et qui souhaite se constituer une offre différenciante dans le domaine de l'ingénierie des exigences. Les travaux de Romain PINQUIE ont largement contribué à cet objectif avec la fourniture d'un démonstrateur logiciel opérationnel que l'entreprise peut exploiter pour faire des tests clients et passer à une phase d'industrialisation logiciel.

Romain PINQUIE a su se montrer constamment force de proposition et faire preuve d'initiative en s'appropriant le champ scientifique au service des processus de gestion des exigences. Il a également démontré sa capacité à mener des travaux pluridisciplinaires de haut niveau. Monsieur PINQUIE a fait preuve d'une excellente maîtrise des techniques intervenant dans les différents domaines qu'il a dû aborder et son mémoire, d'une très grande clarté, a mis en avant le caractère pertinent et novateur de l'approche proposée.

Plusieurs publications effectuées dans le cadre de cette thèse (2 articles de revues internationales, 1 chapitre d'ouvrage et 4 articles et présentations dans des congrès internationaux) attestent d'un intérêt certain de la communauté scientifique pour ses travaux.

Lors de la soutenance, le jury a proposé à l'unanimité la candidature de Romain PINQUIE pour le prix BEZIER de l'ENSAM et c'est sans réserve que je soutiens sa candidature.



Michel TOLLENAERE,
Professeur des Universités – Grenoble Université
Président du jury de thèse de Romain PINQUIE

Rapport sur le mémoire de thèse de

Romain PINQUIE

intitulé

**Proposition d'un environnement numérique dédié à la
fouille et à la synthèse collaborative d'exigences en
ingénierie de produits**

Les travaux de Romain Pinquie s'inscrivent dans le domaine de l'ingénierie des exigences. Ils ont pour contexte l'ingénierie système et proposent un point de vue technologique sur le sujet. Plus précisément, ils portent sur la proposition d'une méthode outillée de synthèse de plusieurs centaines ou milliers d'exigences.

Le mémoire est découpé en trois parties soit 8 chapitres. La première partie, consacrée à la problématique, rassemble une introduction générale et un état de l'art. La deuxième partie, décrivant en détail la proposition, rassemble un chapitre dédié à l'architecture de l'outil proposé, un chapitre consacré à l'extraction des exigences, un chapitre sur la fiabilité des exigences et enfin un dernier chapitre consacré à l'exploration des exigences. La troisième et dernière partie du mémoire rassemble un court chapitre de validation et une conclusion. De façon générale, le manuscrit est très bien structuré, très bien écrit, très pédagogique et étayé de nombreux exemples.

Chapitre 1 et 2 : Le premier chapitre présente le contexte des travaux et le positionnement scientifique des contributions. Le deuxième chapitre est consacré à l'état de l'art. Ce dernier est décomposé en trois parties : un état de l'art industriel, un état de l'art technologique et un état de l'art académique. Il s'agit de présentations relativement générales permettant de situer les propositions présentées dans la suite du manuscrit. Des états de l'art plus précis au sujet de l'extraction, de la fiabilité et de l'exploration des exigences sont présentés dans chacun des chapitres concernés dans la suite du mémoire.

Le contexte des travaux et le positionnement scientifique des contributions sont présentés de façon très claire. L'état de l'art est également présenté de façon très agréable à lire et très synthétique. La maîtrise du sujet transparaît au travers de l'étendue des connaissances présentées ainsi que des

travaux cités et mis en perspective.

Chapitre 3 : Ce chapitre décrit l'architecture de la solution numérique proposée pour permettre la synthèse des exigences. Cette architecture est présentée selon le point de vue opérationnel (description des parties prenantes), fonctionnel (descriptions des services assurés) et technique (composants, technologies et modèle de données).

Cette partie du manuscrit met bien en valeur l'effort de développement logiciel réalisé durant le travail de thèse qui transparait d'ailleurs tout au long du mémoire. Un modèle de données orienté graphe est présenté comme le modèle de données sur lequel repose le prototype mais dans la suite du mémoire ce modèle n'est finalement exploité que par parties et de façon combinée avec d'autres représentations de données, tout aussi nécessaires.

Chapitre 4 : Ce chapitre porte sur l'extraction des exigences et sur l'identification des références entre recueils d'exigences. Les objectifs d'extraction détaillés dans cette partie du manuscrit sont très ambitieux puisqu'ils portent sur l'extraction, notamment depuis des documents non structurés, de tout énoncé prescriptif sans contrainte de structure grammaticale et cela à partir de formats de documents variés. Le processus d'extraction a été décomposé en 4 étapes : identification du format du document, extraction du contenu, traitement du langage naturel et identification des exigences. En ce qui concerne le traitement des documents non structurés, seuls les formats Word, Excell et les documents pdf générés à partir de Word ou Excell sont traités. Pour ce qui est des phases d'extraction du contenu et de traitement du langage naturel, l'effort a ici porté sur l'aspect développement logiciel à partir de briques déjà existantes (Apache Tika, Stanford CoreNLP). La contribution scientifique essentielle dans cette partie du manuscrit a porté sur (i) la mise en oeuvre d'un algorithme d'apprentissage machine pour identifier les exigences (autrement dit pour classifier chaque phrase comme une exigence ou comme une information) et (ii) la mise en oeuvre d'un algorithme d'apprentissage machine pour l'identification de références transversales entre documents (exigence avec ou sans référence transversale). Ces références sont ensuite explicitement établies manuellement par l'utilisateur de l'environnement numérique.

Ce chapitre présente une contribution logicielle significative et rare dans le domaine académique de l'ingénierie des exigences. De même, les évaluations qui ont été faites des mises en oeuvre d'algorithmes d'apprentissage machine sont remarquables de part la quantité et la qualité des jeux d'essais utilisés. Enfin, au delà des solutions finalement mises en oeuvre, les différents essais concernant les façons de faire finalement abandonnées parce que limitées sont également des contributions scientifiques précieuses dans le domaine de l'ingénierie des exigences.

Chapitre 5 : Ce chapitre rassemble les contributions en matière de fiabilité des exigences. La première contribution a consisté à proposer une méthodologie outillée pour identifier des défauts intrinsèques aux exigences et ainsi améliorer leur fiabilité. Trois catégories de défauts majeurs sont

généralement décrites dans la littérature : la présence de connecteurs, la présence de termes vagues et les exigences incomplètes. Les contributions présentées dans ce mémoire se concentrent sur cette troisième catégorie. La méthodologie proposée consiste à transformer chaque exigence exprimée en langage naturel en un graphe sémantique puis à l'interpréter selon le concept théorique de Property Based Requirement (identification des conditions, des termes prescriptifs et des modificateurs numériques). Les exigences sont ensuite classées en fonction des défauts constatés (pas de condition, pas d'unité, ...). Les différentes classes de défaut sont visualisées dans un tableau de bord. La taille de chaque classe y est proportionnelle au nombre d'exigences qu'elle renferme.

La deuxième contribution dans ce chapitre a porté sur la détection de défauts relationnels. Parmi les sept types de contradictions identifiées dans le langage naturel, les contributions présentées dans ce mémoire se concentrent sur la détection des contradictions dues à une négation, un antonyme ou des valeurs numériques différentes. Les défauts relationnels sont visualisés sous dans un graphe non connexe. Une validation des propositions est également décrite dans ce chapitre.

La méthodologie d'identification de défauts intrinsèques proposée permet de façon originale de ne pas contraindre l'expression d'une exigence à une grammaire prédéfinie. La validation de cette méthodologie est en elle même très significative. En effet, elle montre que la majorité des exigences du jeu d'essai étudié sont ambiguës. Ce résultat est intéressant puisqu'il permet, dans une certaine mesure, d'expliquer, de justifier et surtout de quantifier la notion relativement subjective d'ambiguïté en ingénierie des exigences.

La méthodologie d'identification des défauts relationnels est un point de départ intéressant en matière de qualité d'un ensemble d'exigences. Elle n'a cependant pas pu être véritablement validée. La constitution d'un cas de test manuel n'était pas envisageable du fait de la quantité de données à examiner. La technique inverse de validation proposée permet une validation partielle : les défauts détectés sont considérés comme potentiels (aucun expert du domaine métier n'a confirmé ou infirmer chaque défaut identifié faute de connaissances suffisantes) ; De plus, il n'est pas possible de connaître la proportion de défauts relationnels détectés sur le nombre total de défauts relationnels (ni rappel ni précision).

Chapitre 6 : Ce chapitre porte sur l'exploration des exigences. Il s'agit ici de proposer une façon de segmenter les exigences en sous-ensembles pertinents et de taille permettant à un humain de les analyser. Trois techniques de segmentation ont été envisagées : classification supervisée fonction du métier, partitionnement sémantique et segmentation de graphe. La première proposition (classification supervisée) a été abandonnée car non pertinente pour le partenaire industriel. La deuxième (classification non supervisée) a été implémentée à l'aide de l'algorithme *Linlog*. La validation montre que cette technique ne permet pas d'identifier des catégories pertinentes. Ces deux premières techniques de segmentation s'appuient sur des similarités lexicales. Une troisième et dernière technique, cherchant à prendre en considération différents types de similarités, est abordée :

la segmentation de graphes. Trois manières de segmenter ont été plus particulièrement étudiées : La recherche de sous graphes particuliers locaux, le partitionnement et la détection de communautés. La recherche de sous graphes particuliers locaux détecte des communautés trop petites (et donc trop nombreuses) ; le partitionnement nécessite de déterminer *a priori* le nombre et la taille des catégories. Enfin, la détection de communautés est réalisée à partir d'un graphe dans lequel sont représentées les relations transversales entre exigences, le champ lexical des mots contenus dans les exigences (à l'aide de WordNet) et les relations ontologiques issues de ConceptNet5. Les choix technologiques concernant le prototype n'ont pas permis de construire un tel graphe pour une centaine d'exigences. La proposition n'a donc pu être testée qu'avec un jeu d'essai de quatorze exigences. Le chapitre se termine par la proposition d'un tableau de bord résumant les avis des experts concernant les exigences segmentées en catégories.

Ce chapitre montre, comme les précédents, beaucoup de travail et d'efforts de validation des éléments méthodologiques proposés. Concernant la classification supervisée, peut-être aurait-il été opportun de connaître le besoin du partenaire industriel avant d'entamer ce travail sur cette technique de classification. La mise en oeuvre de l'algorithme Linlog est intéressante puisqu'elle montre les limites des approches non supervisées pour l'exploration d'exigences. La validation de la technique de détection de communautés est surprenante. En effet, le grand nombre d'exigences à prendre en considération fait partie des objectifs affichés dès le départ dans le mémoire et le terme de big data est employé dès l'introduction du mémoire. Aussi, il est surprenant de constater que la validation n'a pas été possible à cause des choix technologiques qui ont été faits. Au delà de la synthèse très claire de l'état des connaissances en matière de segmentation des exigences et de la présentation très étayée des mises en oeuvre qui ont été tentées, ce chapitre montre clairement que l'exploration des exigences reste un problème ouvert.

Chapitres 7 et 8 : Le chapitre 7 présente une rapide validation du travail décrit dans le mémoire. Il est étudié sous l'angle de sa structure et des performances qui lui sont associées. Les aspects théorique et empirique y sont discutés. Enfin, dans le chapitre 8 qui conclut le mémoire, l'ensemble des contributions est rappelé et des perspectives à court, moyen et long termes sont proposées.

La diversité des perspectives proposées confirme l'ampleur du travail réalisé. Les développements logiciels et les expérimentations à poursuivre à court terme soulignent le soucis de proposer une méthodologie outillée. La recherche de scénarios opérationnels dans l'industrie à moyen terme rappelle que ce travail s'inscrit dans le domaine de l'ingénierie système. Enfin, les perspectives à long terme attestent la qualité scientifique du travail réalisé, les limites qui ont été clairement établies et les problèmes intéressants qu'elles permettent d'aborder.

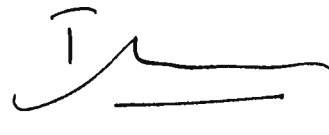
Synthèse

Le travail de Romain Piquié présenté dans ce manuscrit a porté sur la proposition d'une méthode outillée de synthèse de plusieurs centaines ou milliers d'exigences. Le mémoire, très bien écrit, décrit un travail conséquent réalisé avec beaucoup de rigueur scientifique.

Les questions de recherche abordées dans cette thèse sont très ambitieuses. Romain Piquié a su y poser des limites, clairement explicitées dans le manuscrit, afin de proposer des contributions de qualité à la fois au niveau scientifique et au niveau pratique. La multitude et la cohérence des contributions ainsi que l'effort de développement logiciel sont à souligner. De même, la validation des algorithmes proposés avec des données réelles et industrielles est aussi à noter.

Compte tenu de l'ensemble des remarques qui ont été faites, je donne un avis très favorable à la soutenance de ce travail de thèse.

Fait à Sophia-Antipolis, le 26 août 2016.



Isabelle Mirbel
Maître de Conférences, HDR,
Université Côte d'Azur, Inria, CNRS, I3S, France

SOUTENANCE DE THÈSE DE DOCTORAT

FICHE D'EVALUATION DU TRAVAIL ECRIT

La présente fiche, complétée par le rapporteur, sera retournée au bureau du doctorat en même temps que le rapport si le rapporteur estime que la thèse mérite d'être soutenue.

Nom et prénom du candidat : **PINQUIE ROMAIN**

Titre de la thèse : **PROPOSITION D'UN ENVIRONNEMENT NUMERIQUE DEDIE
A LA FOUILLE ET A LA SYNTHÈSE COLLABORATIVE D'EXIGENCES EN
INGENIERIE DE PRODUITS**

♦ Evaluation générale de la thèse : Par comparaison avec les thèses de doctorat récentes que vous avez eu à juger ou dont vous avez personnellement connaissance, cette thèse vous paraît-elle digne d'être soutenue en vue de l'obtention du grade de Docteur :

☒ OUI ☐ NON

♦ Présentation écrite des travaux : (1)

☒ Excellente à
exceptionnelle

☐ Bonne à
très bonne

☐ Satisfaisante

♦ Niveau scientifique de la thèse : (2)

☒ Excellent à
exceptionnel

☐ Bon à
très bon

☐ Satisfaisant

Date : **26.08.2016**

Nom du rapporteur : **MIRBEL Isabelle**

Signature :



- (1) Cette présentation comprend non seulement la qualité du texte, mais également certains aspects de son contenu : exposé du contexte du sujet de recherche, état de l'art, bibliographie, conclusions et perspectives.
- (2) Le niveau scientifique sera évalué par rapport à l'originalité et à la rigueur de la contribution personnelle du candidat. La qualité de cette contribution, théorique et/ou expérimentale, est le premier élément de jugement. La quantité des travaux fournis par rapport à la durée de préparation constitue un autre élément d'appréciation. Le jugement pourra s'appuyer (outre le manuscrit) sur les articles et communications publiés ou acceptés, sur les brevets, sur les réalisations et les retombées industrielles acquises ou potentielles.

Rapport sur le mémoire intitulé

Proposition d'un environnement numérique dédié à la fouille et à la synthèse collaborative d'exigences en ingénierie de produits

Présenté par **Romain PINQUIÉ**

en vue de l'obtention du
Grade de Docteur de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
École Doctorale Sciences des Métiers de l'Ingénieur
Spécialité : **Conception**

Romain PINQUIÉ a effectué ses travaux de recherche au sein du laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS UMR CNRS 7296) de Arts et Métiers ParisTech, campus d'Aix-en-Provence. Sa thèse a été dirigée par Philippe VÉRON, Professeur, et co-encadrée par Frédéric SEGONDS, Maître de Conférences.

Les travaux de la thèse s'intéressent à l'ingénierie des systèmes, sujet récurrent et complexe, dont la conception oblige à surmonter des challenges liés à la complexification technique, le foisonnement des textes légaux et réglementaires, et le contexte de l'entreprise étendue. Ceci engendre une prolifération des exigences que les entreprises, en particulier les sous-traitants, ont du mal à appréhender dans les coûts et délais impartis. Cette thèse se base sur les sciences des données (fouilles de données, etc.) et d'environnements numériques, constitués de briques théoriques et technologiques issues de ces sciences des données afin de supporter les entreprises à faire la synthèse de centaines ou milliers d'exigences. En clair, l'ambition des travaux décrits dans le document de thèse est de contribuer au passage d'informations non structurées et difficilement inexploitable vers des modèles orientés graphe exploitables dans lesquels les exigences, leurs propriétés et certaines de leurs interdépendances sont formellement modélisées.

Le rapport est structuré en trois grandes parties : la problématique (Partie I), la proposition, (Partie II) et la validation et conclusion (Partie III).

Dans la **Partie I**, le **Chapitre 1 (introduction)** explique le contexte général et les objectifs de la thèse ainsi que la place qu'occupe les travaux présentés au sein de la communauté scientifique. Elle permet de comprendre les motivations scientifiques et l'articulation du document de thèse ainsi que les hypothèses et les contributions du candidat.

Le **chapitre 2** décrit le cadre bibliographique de la thèse et positionne l'environnement actuel de la conception et l'ingénierie dans les grandes entreprises (i.e. Airbus, Volvo Aéro, Rolls-Royce, Nasa). Il rappelle les méthodes, outils et modèles support pour la gestion des exigences et permettant l'élaboration de la démarche suivie en les explorant suivant trois

voies : *voie historique*; *voie numérique* avec l'arrivée massive des outils numériques dédiés à la conception au sein des bureaux d'études (modélisation géométrique, simulation, etc.); et enfin *voie recherche* avec l'exploration des démarches de conception proposées de ces dernières années (systématique, axiomatique, intégrée, ingénierie système, etc.) et leurs modèles sous-jacents.

Ce chapitre effectue une bonne synthèse des approches et modèles existants. Il permet de constituer un bilan/référentiel intéressant et confirme qu'aucune solution commerciale ou académique ne répond aujourd'hui au problème récurrent de traitement de gros volumes d'exigences.

La **Partie II** commence par le **chapitre 3** qui a pour objectif de présenter une démarche et un cadre méthodologique qui résulte de son application. La démarche en question s'appuie sur la définition d'une solution selon trois perspectives conceptuelles (AFIS) : opérationnelle (extraire, fiabiliser et explorer), fonctionnelle (décomposition en fonctions techniques) et organique (solutions techniques).

Ce chapitre donne un aperçu intéressant sur la démarche de l'auteur à travers une triple perspective opérationnelle/fonctionnelle/organique. Un aperçu des outils sous-jacents et de l'architecture support est également donné. L'objectif de la démarche proposée est de contribuer évidemment au passage du chaos non structuré quasi-inexploitable du monde des exigences vers un modèle exploitable dans lequel les exigences, leurs propriétés et certaines de leurs interdépendances sont formellement modélisées. Ceci fait l'objet des chapitres suivants.

Le **chapitre 4** propose une méthode d'extraction des exigences. Pour extraire les exigences spécifiées dans des documents semi-structurés et structurés, le chapitre propose un chaînage numérique constitué, d'une part, de divers parseurs et, d'autre part d'un modèle de classification basé sur un ensemble de règles qui bénéficient des techniques de traitement du langage naturel. Une fonction de classification, basée sur l'apprentissage machine, identifie automatiquement les exigences qui font référence à des documents applicables.

La solution proposée dans ce chapitre permet la mise en œuvre de méthodes d'apprentissage supervisé pour identifier les exigences qui font référence à des documents externes. L'originalité est qu'elle propose un ensemble de caractéristiques utiles à l'identification des références transversales, ainsi qu'une comparaison des performances obtenues avec les principaux algorithmes d'apprentissage supervisé. Pour les documents non-structurés, la méthode propose de passer par des balises HTML afin de mieux appréhender l'extraction des phrases en considérant la structure du document. Mais un tel balisage est vite limité quand un texte est rédigé sans utiliser les fonctionnalités de l'éditeur qui a produit le texte (Word par exemple). Les critères de performance obtenus pour chaque algorithme d'apprentissage montrent la supériorité de l'approche proposée. Cependant, la limite, comme le souligne la conclusion du chapitre, est liée au fait que l'approche en

question ne traite que du texte, or certaines exigences ne sont pas que textuelles, mais font référence à des graphiques, des croquis, des tableaux, etc.

Le **chapitre 5** se focalise sur la fiabilisation des exigences. En effet, un énoncé doit limiter les ambiguïtés afin d'éviter des interprétations différentes par un ou plusieurs agents. En ingénierie des exigences, de telles ambiguïtés peuvent avoir des effets négatifs sur le reste du cycle de vie d'un produit donné (non certification du produit, dépenses imprévues, etc.). Deux expérimentations avec des données industrielles ont été réalisées pour évaluer les performances des deux modules destinés à identifier les défauts de qualité intrinsèques et relationnels (entre exigences).

Un état de l'art notable des solutions de fiabilisation des exigences a été rappelé, allant des modèles de qualité aux techniques analytiques. D'autres approches auraient pu être soulignées, notamment celles basées sur la logique floue ou l'analyse de régression, ou encore des approches intégrées, combinant des évaluations floues avec des réseaux de neurones. Dans des cas extrêmes d'ambiguïté, pourquoi ne pas passer par des transformations ou des mappings des exigences afin de retrouver une cohérence sémantique ? voir même de transformer une exigence qualitative en attributs numériques exploitables plus facilement dans les diverses phases du cycle de vie. Les deux expérimentations présentées sont pertinentes et permettent de mieux cadrer les résultats escomptés.

Le **chapitre 6** concerne l'exploration des exigences. Une première partie synthétise et critique les solutions proposées pour supporter la prise de décisions en ingénierie des exigences. Une classification selon trois catégories a été présentée (techniques d'aide à la décision mono/multicritères, méthodes de résolution de problèmes sous contraintes, techniques de fouille de données). Ensuite un ensemble d'éléments permettant d'explorer l'espace prescriptif en vue de prendre des décisions informées a été détaillé. Pour explorer un gros volume d'exigences, ce chapitre propose de segmenter les exigences en communautés, basées sur trois alternatives de segmentation : la classification automatique, le partitionnement et la détection des communautés. Par exemple, une nouvelle fonction de classification basée sur l'apprentissage machine classe les exigences dans des catégories qui correspondent à des métiers (mécanique, électronique, etc.). Le thésaurus WordNet et l'ontologie ConceptNet 5 ont été ensuite exploités pour enrichir le graphe d'exigences avec des relations sémantiques et conceptuelles. Ce graphe enrichi sert à segmenter les exigences en communautés pour assurer le passage à l'échelle. Une plateforme collaborative de sondage a été mise à disposition des experts pour estimer les critères d'aide à la décision qui sont associés à chacune des communautés d'exigences. Un tableau de bord est également mis à disposition des managers, leur permettant de prospecter l'espace prescriptif via des résumés statistiques qui synthétisent les estimations réalisées par les experts.

Les diverses expérimentations décrites dans ce chapitre sont pertinentes. Elles permettent de bien suivre les étapes des méthodes proposées (partitionnement des exigences, détection de communauté, etc.). L'utilisation d'un algorithme issu de la théorie des graphes pour

segmenter les exigences est intéressante.

Enfin, la **Partie III** concerne la validation. Le **chapitre 7** suit une matrice de validation préconisant de diviser l'exercice en validation théorique de la structure, validation théorique de la performance, validation empirique de la structure, et enfin validation empirique de la performance.

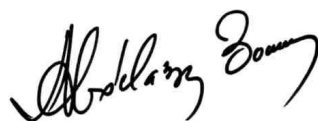
Le diagramme de flux de la Figure 7.1 résume parfaitement la méthode outillée de synthèse des exigences et la démarche suivie. Cependant une spécification UML du modèle présenté tout au long de la thèse, basé sur des diagrammes standardisés et des Use-Cases, aurait pu compléter et améliorer la formalisation de la démarche. Ceci n'enlève rien à la vision de l'auteur pour résoudre le problème posé, ni à la qualité des résultats obtenus.

Le **chapitre 8** est une **Conclusion** qui résume les principales contributions de l'auteur et rappelle brièvement les démarches et les solutions innovantes apportées par la thèse. Globalement la thèse démontre la nécessité d'un environnement numérique de synthèse, car le nombre d'exigences tend à croître de manière exponentielle (qualifiables de « big data ») à partir desquelles il est difficile de prendre des décisions stratégiques argumentées. La conclusion rappelle également les limites de l'étude, tel que celles liées à la construction de graphes d'exigences, au temps de calcul souvent important, etc. Des perspectives à court, moyen et long terme clôturent ce chapitre.

Une **Bibliographie** d'une quinzaine de pages permet de situer ce travail de recherche par rapport à d'autres études dans le domaine. Le document ne présente pas d'Annexes. La bibliographie personnelle de l'auteur montre une bonne diffusion des résultats de ce travail (deux articles dans la revue internationale IJPLM ainsi que 3 conférences internationales).

Romain PINQUIÉ a présenté un travail de qualité, présentant un panorama de l'état actuel de la gestion des exigences, et démontrant la validité des techniques et approches proposées. Compte tenu de ces éléments et en s'appuyant sur la démonstration de la bonne maîtrise des modèles proposés, j'é mets un avis **Très Favorable** à sa soutenance, en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, spécialité « Conception ».

Fait à Doha, le 13 Septembre 2016



Abdelaziz BOURAS
Professeur à Qatar University,
College of Engineering,
abdelaziz.bouras@qu.edu.qa

SOUTENANCE DE THÈSE DE DOCTORAT

FICHE D'ÉVALUATION DU TRAVAIL ÉCRIT

La présente fiche, complétée par le rapporteur, sera retournée au bureau du doctorat en même temps que le rapport si le rapporteur estime que la thèse mérite d'être soutenue.

Nom et prénom du candidat : **Romain PINQUIÉ**

Titre de la thèse : **Proposition d'un environnement numérique dédié à la fouille et à la synthèse collaborative d'exigences en ingénierie de produits**

♦ Évaluation générale de la thèse : Par comparaison avec les thèses de doctorat récentes que vous avez eu à juger ou dont vous avez personnellement connaissance, cette thèse vous paraît-elle digne d'être soutenue en vue de l'obtention du grade de Docteur :

☒ OUI ☐ NON

♦ Présentation écrite des travaux : (1)

☒ Excellente à
exceptionnelle

☐ Bonne à
très bonne

☐ Satisfaisante

♦ Niveau scientifique de la thèse : (2)

☒ Excellent à
exceptionnel

☐ Bon à
très bon

☐ Satisfaisant

Date : _____ 13 Septembre 2016 _____

Nom du rapporteur : A. Bouras

Signature :



- (1) Cette présentation comprend non seulement la qualité du texte, mais également certains aspects de son contenu : exposé du contexte du sujet de recherche, état de l'art, bibliographie, conclusions et perspectives.
- (2) Le niveau scientifique sera évalué par rapport à l'originalité et à la rigueur de la contribution personnelle du candidat. La qualité de cette contribution, théorique et/ou expérimentale, est le premier élément de jugement. La quantité des travaux fournis par rapport à la durée de préparation constitue un autre élément d'appréciation. Le jugement pourra s'appuyer (outre le manuscrit) sur les articles et communications publiés ou acceptés, sur les brevets, sur les réalisations et les retombées industrielles acquises ou potentielles.