

---

# Techniques de modélisation et d'analyse d'exigences spatiotemporelles

Mounir Touzani<sup>1</sup>, Christophe Ponsard<sup>2</sup>

1. Académie de Toulouse, Rue Saint-Roch 75, 31400 Toulouse, France  
mounir.touzani@ac-toulouse.fr

2. Centre d'Excellence en Technologies de l'Information et de la Communication,  
Av. Jean Mermoz 28, Gosselies, Belgique  
christophe.ponsard@cetic.be

---

*RÉSUMÉ. L'Ingénierie des Exigences (IE) est une étape-clé dans tout projet d'évolution d'un système d'information (SI). Les développements actuels, notamment sur les systèmes mobiles et cyber-physiques, combinent des exigences spatiales et temporelles complexes. Ceci nécessite des méthodes plus systématiques s'appuyant aussi sur des techniques utilisées pour des systèmes d'information géographique (SIG). Cet article présente de manière détaillée un cadre de référence permettant de systématiser l'identification, la structuration et le raisonnement sur ce type d'exigences, y compris l'argumentation par rapport à des alternatives de décisions. Outre des techniques spécifiques combinant des contributions dans les domaines de l'IE et les SIG, un processus guidant l'analyste est également détaillé. Ce processus a été outillé et validé sur plusieurs cas d'étude, dont un traité en profondeur tout au long de l'article.*

*ABSTRACT. Requirements Engineering (RE) is a key step in any project aiming at evolving an information system (IS). Current developments, on mobile or cyber-physical systems for example, combine both spatial and temporal dimensions, often reserved to Geographic Information Systems (GIS). This requires more systematic methods for capturing and reasoning about the spatial and temporal nature of requirements. This paper presents a framework for systematically identifying, structuring and reasoning about such requirements, including the selection among alternative designs. In addition to specific techniques combining RE and GIS contributions, a guidance process is also detailed. The process has a dedicated tool support and was also validated on different cases. One of them is used as running example to illustrate our extensions.*

*MOTS-CLÉS : ingénierie des exigences, exigences spatiotemporelles, orientation but, argumentation, traçabilité, guidance, aide à la décision.*

*KEYWORDS: requirements engineering, spatio-temporal requirements, goal orientation, argumentation, traceability, process guidance, design decision.*

---

DOI:10.3166/ISI.22.2.43-75 © 2017 Lavoisier

## 1. Introduction

L'Ingénierie des Exigences (IE) est le processus qui a pour objet d'établir et de maintenir un accord avec les parties prenantes sur les exigences du système à construire (ISO29148, 2011). Il s'agit de dégager des responsabilités qui seront confiées à différents agents : des êtres humains, des dispositifs matériels ou des systèmes d'information. La collaboration de ces agents permet de réaliser les objectifs du système dans son ensemble. De tels objectifs peuvent être identifiés, structurés, analysés et documentés à l'aide de méthodes d'IE orientées buts (van Lamsweerde, 2009).

L'IE est une étape cruciale pour le succès d'un projet : de nombreuses études montrent qu'omettre celle-ci est une cause majeure d'échec de projets (Hughes *et al.*, 2015). Des méthodes ont été développées afin d'assurer des propriétés-clés de complétude, précision, non-ambiguïté et testabilité. Ces méthodes peuvent être de nature très générique (classification d'exigences, listes de contrôles, techniques de raffinements de buts) ou spécifiques à des domaines (par exemple les exigences de sécurité). Les premières sont utiles mais n'apportent que des garanties limitées, tandis que les secondes permettent une grande précision mais ne s'appliquent que sur des domaines pointus. Il est donc intéressant de considérer des classes de propriétés intermédiaires partagées par de nombreux systèmes et permettent un bon compromis entre leur applicabilité et leur apport. Plus précisément, on s'intéresse ici aux propriétés liées aux caractéristiques physiques spatiales et temporelles du système analysé.

Les propriétés temporelles ont été largement étudiées dans le cadre de l'analyse de systèmes à base de logiciels, notamment au niveau de systèmes réactifs et temps réels, pour lesquels des logiques spécifiques ont été proposées (Manna, Pnueli, 1992). A l'inverse, les propriétés spatiales ont été abordées de manière limitée en IE (Touzani *et al.*, 2015) et ont surtout été étudiées au niveau de l'analyse de systèmes d'information géographique (SIG), notamment sur la base de formalismes objets (Kosters *et al.*, 1996) et conceptuels/graphiques (Bédard, Larrivée, 2008 ; Pinet, 2012).

Ceci devient limitatif pour la spécification d'un nombre croissant de systèmes reposant de plus en plus intensivement sur un logiciel toujours plus fortement ancré et connecté avec le monde réel. On peut citer les systèmes mobiles, cyber-physiques, l'internet des objets et des champs d'applications comme les villes intelligentes, les usines du futur ou la logistique. Ces systèmes nécessitent de disposer d'une perception précise du monde réel et donc des exigences spatiales et temporelles sur celui-ci.

Notre proposition est centrée autour de la prise en compte de la dimension spatiotemporelle (ST). Les objectifs sont de mettre à disposition des extensions de langage mais aussi des techniques de modélisation et d'analyse permettant de construire plus systématiquement des spécifications de qualité. Il s'agit aussi de

garder un bon compromis avec l'utilisabilité, donc de définir des notations simples et expressives mais sans la volonté de leur associer de sémantique formelle à ce stade.

Notre travail est ancré dans une approche d'IE orientée buts, répondant déjà aux questions du « POURQUOI/COMMENT » (les buts et leurs opérationnalisations), du « QUOI » (les opérations/les objets) et du « QUI » (les agents). Nous abordons ici plus précisément et de manière liée, les questions du « QUAND » et du « OÙ ». S'appuyer sur une telle fondation assure également de solides bases en matière d'argumentation *via* les arbres de buts et de traçabilité grâce au typage riche fourni par les liens tels que les raffinements de buts, l'opérationnalisation, la résolution d'obstacles, etc. Il permet aussi d'identifier de manière précoce différentes alternatives de conception et guider l'analyste à convenir d'un bon compromis à faire entre des ensembles d'exigences qui ne peuvent jamais être entièrement satisfaites simultanément. Nous ne traitons cependant pas la phase de collecte des exigences auprès des parties prenantes au projet.

Notre travail s'articule autour de deux axes de recherche. Le premier axe part de l'IE et transpose à la dimension spatiale des techniques déjà définies en matière de propriétés temporelles. Le second prend en considération des notations largement utilisées dans les SIG pour les intégrer dans les primitives d'IE et faciliter ainsi la capture d'exigences spatiotemporelles. Afin de disposer d'un ancrage concret, nous avons utilisé le référentiel KAOS d'IE orienté buts (van Lamsweerde, 2009) et avons réalisé un prototype à l'aide de l'outil Objectiver (Respect-IT, 2005) sans cependant exclure d'autres référentiels et outils.

Ce travail a pour fil conducteur une étude de cas concrète et riche en termes d'exigences spatiales et temporelles : il s'agit de la fusion de deux établissements universitaires bien connus des auteurs. Les effets de cette fusion créent une dynamique dans l'espace et une évolution dans le temps, mettant en évidence le mouvement des personnes en tant qu'entités de l'espace ainsi que tout l'aspect organisationnel entraînant des changements spatiotemporels (ST) majeurs au niveau des différentes composantes et directions déjà existantes des deux universités. Outre cette étude de cas, plusieurs autres spécifications développées avec nos extensions de langages et méthodes d'IE seront également discutées.

Le présent article propose des fondations pour la modélisation d'exigences spatiales et temporelles, guidées par une démarche systématique pour enrichir les modèles KAOS (Dardenne *et al.*, 1993) et raisonner sur ce type d'exigences, avec l'utilisation de notations graphiques que nous illustrons sur notre étude de cas. Cet article est organisé comme suit : dans la section 2 nous dressons un état de l'art autour de la dimension spatiotemporelle et des spécificités de l'information géographique (IG), des formalismes de représentation des objets ST et quelques concepts de l'ingénierie des exigences, et plus spécifiquement de la méthode orientée buts KAOS servant de cadre de base pour ce travail. La section 3 présente l'étude de cas utilisée pour illustrer notre propos tout au long de l'article. La section

4 présente nos extensions aux différentes dimensions de la modélisation des exigences, afin de faciliter la capture des dimensions ST. Ensuite, la section 5 propose des extensions méthodologiques permettant de raisonner qualitativement sur celles-ci. L'outil développé est rapidement présenté à la section 6 avant de discuter quelques cas qui ont permis de valider notre approche à la section 7. Enfin, la section 8 conclut par une analyse critique de notre contribution et propose quelques perspectives et travaux futurs.

## **2. État de l'art**

Dans cette section, nous passons en revue les approches spatiotemporelles en pointant les principaux types de relations spatiales et temporelles ainsi que les formalismes qui ont été développés pour les représenter. Nous décrivons également les mécanismes d'IE pour identifier, structurer et raisonner sur des exigences en +s d'espace et de temps.

### **2.1. L'approche spatiotemporelle**

#### *2.1.1. Spécificités de l'information géographique*

Selon (Becker *et al.*, 1990), l'information géographique (IG) décrit un objet, un phénomène ou encore une action dans le monde réel qui est localisable. Elle fournit, pour chaque objet concerné, des informations sur le nom, le type, les caractéristiques thématiques, la forme, la localisation ou même des informations relatives à des objets en relation de proximité.

L'acquisition des données liées à l'IG peut être réalisée *via* l'utilisation de capteurs tels que le GPS, la numérisation, l'utilisation de protocoles Internet normés ou de Web Services. Elle est ainsi devenue la matière première qui a permis le développement de systèmes d'information géographique (SIG) (Laurini, Thompson, 1992). Les SIG sont cependant restés confinés à ce domaine et réservés à des applications spécialisées. La volonté de partager une IG a conduit à l'émergence de plate-formes de mutualisation (Bailly *et al.*, 2011), par le développement d'infrastructures de données géographiques (IDG) (Desconnets, Kazmierski, 2015), qui permettent une meilleure intégration de la donnée géographique au sein d'un SI. Ce type d'infrastructure web organise le contenu et les services (outils de recherche, téléchargements de données, etc.) ainsi que l'information de la communauté (Maguire, Longley, 2005), permettant non seulement d'échanger des données géographiques mais aussi des compétences sur les pratiques développées pour les collecter, les produire et les exploiter.

Les logiciels des SIG sont, quant à eux, spécifiques à des travaux d'analyse spatiale et cartographique, tandis que le cadre plus large des SI envisagés demande de pouvoir prendre en compte certaines informations qualitatives relatives à des

données géographiques et induisant des descriptions particulières, comme par exemple : *cette personne travaille à côté du point de rassemblement de la cafétéria.*

### 2.1.2. Relations spatiotemporelles

L'analyse spatiotemporelle introduit concomitamment les notions d'espace et de temps. L'espace fait référence aux informations géographiques de localisation et permet de définir des relations spatiales entre les objets. Ces relations sont aussi importantes que les entités elles-mêmes (Papadias, Kavouras, 1994 ; Clementini, 2009 ; Egenhofer, Franzosa, 1991). Beaucoup de directions ont été prises pour les définir en trois classes : topologiques (Randell *et al.*, 1992) (p. ex. adjacence : la pharmacie est collée au laboratoire d'analyses), métriques (distance) (Pullar, Egenhofer, 1988) (par ex. la ville est située à 5 km de la plage) ou par projection (orientation) (Zimmermann, Freksa, 1996 ; Ligozat, 1998) (p.ex. Paris est au nord de Toulouse). La figure 1 représente les relations spatiales qui peuvent exister entre deux objets.

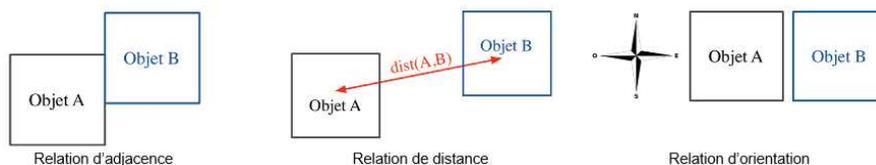


Figure 1. Relations spatiales entre deux objets

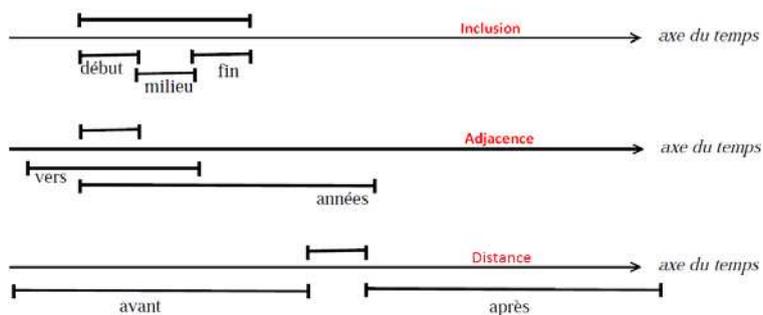


Figure 2. Relations temporelles entre deux objets

L'introduction du temps vise la dimension temporelle (Allen, Yabushita, 1984 ; Frank, 1994) qui peut correspondre à des événements se produisant soit à un instant ou à une période, soit à des changements intervenant sur plusieurs instants voire sur plusieurs périodes.

La perception des relations entre objets dans l'espace d'une part, et objets dans le temps d'autre part, montre une forte analogie. (Le Parc-Lacayrellee *et al.*, 2007) a décrit dans son article trois types de relations : l'adjacence (exemple, autour du 15 novembre 2015), l'inclusion (exemple, au milieu de l'année) et la distance (par exemple, deux semaines avant la fin de l'année). La figure 2 représente les relations temporelles qui peuvent exister entre deux objets.

2.1.3. Représentation conjointe de l'espace et du temps à travers le mouvement

Le changement de propriétés topologiques des objets fait appel à la notion de « mouvement » qui exprime des liens étroits unissant l'espace et le temps. La représentation du mouvement se traduit par une succession de localisations spatiales évoluant au cours du temps. Modéliser la continuité d'un mouvement permet de caractériser par exemple dans la théorie d'Allen, des changements au niveau des relations spatiales par l'existence d'états intermédiaires pour certaines. En spatial, ce sont des relations de voisinage étudiées par (Galton, 1993) mais qui restent conceptuelles quant il s'agit du temps (Le Ber *et al.*, 2007).

Temporel Spatial	identique à	avant / après	rencontre	chevauche	durant	début	termine
identique à							
adjacent à							
inclus dans							
contient							
recouvre							
recouvert par							
chevauche							
disjoint de							

Figure 3. Combinaison de relations spatiales et temporelles

Les notions ST peuvent bien sûr être considérées simultanément. Un exemple d'événement ST est « Le camion entre dans la zone d'approche d'un dépôt ». Des configurations spatiales peuvent aussi évoluer au cours du temps. Un exemple parlant est la récente fusion des régions en France. Des typologies complètes de concepts ST pouvant être combinées sont détaillées notamment dans (Claramunt,

Jiang, 2001 ; Mathian, Sanders, 2014). La figure 3 montre toutes les combinaisons possibles de relations spatiales et temporelles.

#### 2.1.4. Formalismes de représentation des objets spatiotemporels

En termes de modélisation, l'objectif a toujours été de rendre l'IG moins complexe, d'où le besoin de formaliser les propriétés spatiales et temporelles, et ce, afin de rendre facile la description de la géométrie (dimension, position, taille, forme et orientation) ainsi que la temporalité pour une meilleure communication. Le mode de représentation résulte en fait d'une abstraction liée à l'objectif ciblé, ainsi, une route sera considérée comme un objet linéaire au sein d'un graphe si le but est de gérer le trafic, mais comme un volume si le but est de gérer la répartition de réseaux d'eau et de gaz.

La représentation des objets spatiaux nécessite une modélisation adaptée aux phénomènes spatiotemporels. En ce sens, des formalismes de représentation ST, via l'utilisation de pictogrammes spatiaux et temporels dans les modèles, ont été proposés et affinés par Yvan Bédard depuis Modul-R puis PVL (*Plugin for Visual Language*) (Bédard, Larrivée, 2008) et son évolution plus récente Pictograf<sup>1</sup>. De nombreux formalismes de type entité-relation ou orienté objet, ont été aussi proposés par d'autres auteurs afin de faciliter la modélisation de l'information spatiale et les aspects temporels associés. Une étude exhaustive est disponible dans le mémoire de (Pinet, 2012). La figure 4 présente des pictogrammes spatiaux et temporels.

	0D	1D	2D	3D
Spatial (abstraction 2D)				N/A
Spatial (abstraction 3D)				
Temporel			N/A	N/A

Figure 4. Exemples de pictogrammes spatiaux et temporels

Après avoir donné un aperçu de l'approche spatiotemporelle et les spécificités liées à l'information géographique, nous introduisons dans la section suivante quelques concepts clés de l'ingénierie des exigences (IE) et une présentation de la méthode KAOS, que nous avons retenue pour notre étude.

1. <http://pictograf.scg.ulaval.ca>

## 2.2. L'ingénierie des exigences

Une **exigence** peut être définie comme étant une condition ou capacité dont l'utilisateur a besoin pour résoudre un problème ou parvenir à un objectif. Elle doit être satisfaite par un système ou un composant d'un système pour satisfaire un contrat, une norme, une spécification, ou autres documents formellement imposés (IEEE, 1990).

Pour structurer les besoins relatifs aux systèmes à développer, un processus d'IE peut être décomposé en quatre étapes de développement : élicitation, analyse, spécification et validation. Ces étapes sont coordonnées par un processus de gestion des exigences. Nous nous limiterons ici à l'étape d'analyse.

Parmi les méthodes d'IE existantes, les méthodes orientées buts se démarquent par les garanties de complétude et de précision qu'elles peuvent apporter (Rolland, Salinesi, 2005). Outre la notion centrale de but, elle dispose d'une typologie riche de concepts dont la terminologie varie suivant les méthodes mais qui couvre aussi les notions clefs de tâche/opération, de responsabilité, de lien de raffinement/contribution, d'acteur/rôle/agent. Parmi les variantes, on peut citer : KAOS (Dardenne *et al.*, 1993), i\* (Yu, Mylopoulos, 1997) ou URN/GRL (Amyot, Mussbacher, 2011). Ces méthodes sont capables de fournir de forts « Design Rationales » au niveau de l'IE, c'est-à-dire de capturer les raisons qui sont derrière les choix de conception (Jarczyk *et al.*, 1992).

Un **but** est un objectif que le système considéré devrait atteindre. Les formulations de buts se réfèrent à des propriétés destinées à être assurées (van Lamsweerde, 2009). Les buts peuvent être exprimés à différents niveaux d'abstraction, depuis des buts stratégiques de haut niveau, comme « Optimiser la vision enseignement et recherche sur la région » jusqu'à des buts opérationnels tels que « Unifier l'utilisation des infrastructures de l'université » (voir figure 8).

Les buts de haut niveau peuvent être progressivement raffinés en buts plus concrets et finalement opérationnels au moyen de relations liant un but parent à plusieurs buts fils, avec des conditions de satisfaction différentes soit « ET » (tous les fils sont nécessaires) soit « OU » (un des fils est suffisant : c'est-à-dire des alternatives sont possibles). Des alternatives « OU » peuvent être marquées par un identifiant global. Ces ensembles d'alternatives forment des configurations cohérentes qui peuvent être évaluées et comparées au sein d'un processus d'aide à la décision. C'est typiquement le cas pour arbitrer sur le meilleur compromis entre différents types d'exigences potentiellement conflictuelles (van Lamsweerde *et al.*, 1998).

La décomposition s'arrête quand on atteint un but contrôlable par un **agent**, c'est-à-dire qui répond à la question « QUI » déterminant la responsabilité. Cela correspond soit à une **exigence** sur le logiciel, soit à une **attente** sur le comportement d'agents de l'environnement. Un exemple concret d'exigence est le

contrôle d'accès à un bâtiment de l'université : « Le système autorise l'ouverture d'un point d'accès à tout utilisateur disposant des droits d'accès ».

Des propriétés du domaine peuvent également entrer en ligne de compte pour justifier un raffinement. De telles propriétés sont intrinsèquement valides. Un exemple est la propriété spatiotemporelle suivante : « un objet physique ne peut se trouver qu'à un endroit à un instant donné ».

La figure 5 représente l'articulation de ces concepts au sein du méta-modèle KAOS. Il est composé des quatre sous-modèles suivants :

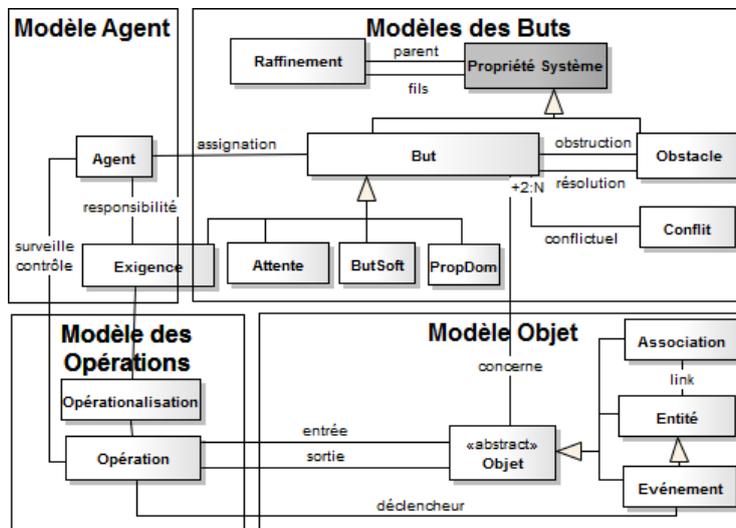


Figure 5. Le méta-modèle KAOS

Le **modèle des Objets** décrit le domaine (entités, relations, événements) utilisé pour exprimer les buts. Leur représentation se base sur les diagrammes de classe UML.

Le **modèle des Buts** structure les buts fonctionnels et non fonctionnels que le système doit atteindre par la coopération d'agents. Il permet aussi d'identifier et raisonner sur les conflits entre les buts ainsi que les obstacles susceptibles de bloquer leur réalisation. Il est représenté graphiquement par un arbre de buts.

Le **modèle des Agents** identifie les agents du système, les informations échangées (interfaces) et les exigences sous leurs responsabilités, qui sont reprises dans les arbres de buts. Des flux entre agents peuvent aussi être représentés.

Le **modèle des Opérations** décrit comment les agents coopèrent fonctionnellement afin d'assurer la réalisation des exigences qui leur sont confiées ainsi que les buts du système.

### 2.3. Aspect temporel dans KAOS

Les buts dans KAOS sont classés selon deux types de critères relativement indépendants : la catégorie et le comportement temporel. La catégorie est une classification basée sur des aspects fonctionnels et non fonctionnels tels que la satisfaction, l'information, la sécurité et la précision. Le comportement temporel d'un but peut être aussi divisé en quelques grandes classes qui peuvent être caractérisées en utilisant des mots-clefs spécifiques comme « toujours », « finalement », « avant une échéance », « tant que », etc. Une quantification temporelle peut être également utilisée pour représenter la durée pendant laquelle une propriété temporelle doit être respectée ou son échéance. Au final, on distingue généralement les quatre grandes classes suivantes pour les schémas de formulation de buts (Dardenne *et al.*, 1993 ; van Lamsweerde, 2009) :

- *Achieve* : la propriété doit finalement être satisfaite à un moment donné du futur,
- *Cease* : la propriété doit finalement être violée à un moment donné du futur,
- *Maintain* : le but demande que tous les états du système vérifient une propriété durant un certain temps ou indéfiniment,
- *Avoid* : le but demande que tous les états du système évitent de satisfaire une propriété durant un certain temps ou indéfiniment.

Sur cette base, (Mahaux, 2004) a proposé un système de spécification allégée. Il est basé sur un ensemble structuré de patrons de formulation. Une telle classification est illustrée à la figure 6. Celle-ci guide la spécification de contraintes temporelles de façon rigoureuse, cohérente et non ambiguë. Elle est aussi expressive et aisée à comprendre.

La logique temporelle peut être utilisée pour donner une sémantique mathématique précise, permettant d'utiliser des outils de vérification automatique ou de preuve de modèles (Manna, Pnueli, 1992). Par exemple, l'exigence de contrôle d'accès peut s'exprimer:

$$\forall u : User, c : AccessControl \square(authorised(u, c) \rightarrow \nabla_{15s}open(c))$$

Les différents prédicats sont des entités, relations ou attributs du modèle objet. Ils peuvent être combinés à des opérateurs temporels :  $\square$  signifie « tout le temps » et  $\nabla_{\leq 15s}$  indique que l'ouverture se produit dans un délai maximal de 15 secondes. Ce niveau formel est très précis mais peu aisé à comprendre. Ceci motive l'introduction des patrons de spécification ainsi que des notations spécifiques que nous proposons.

Des patrons de raffinements basés sur le temps peuvent être utilisés pour structurer les buts. Le patron le plus connu est le « jalon temporel » qui décompose une propriété devant être « finalement » atteinte en plusieurs étapes intermédiaires. Ces patrons peuvent être formalisés et prouvés une fois pour toutes. Une bibliothèque très élaborée de raffinements a été proposée par (Darimont, van Lamsweerde, 1996). L'utilisation de ces patrons de raffinement fournit une aide

précieuse pour s'assurer de manière systématique de la complétude et de la correction d'un raffinement.

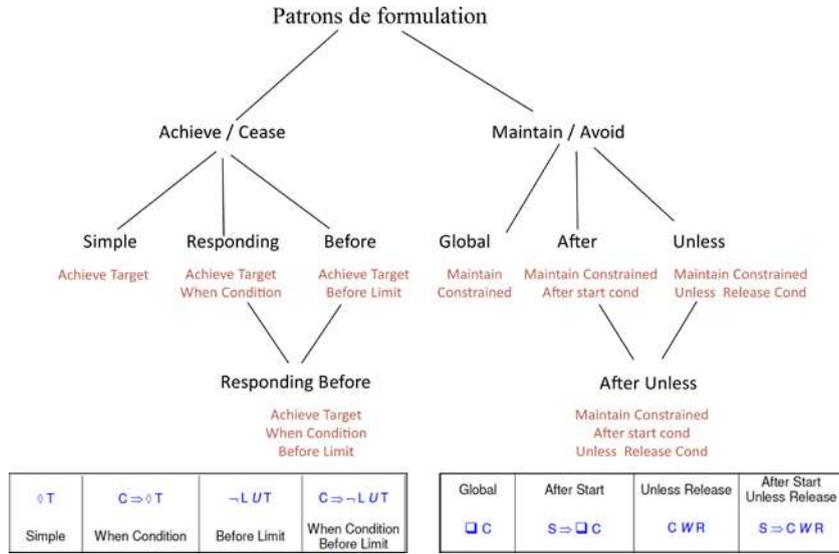


Figure 6. Exemple de patrons de formulation

### 3. Description de l'étude de cas : fusion de deux universités



Figure 7. Situation géographique des principaux sites concernés par la fusion

Notre étude de cas est largement inspirée de la fusion récente des deux universités de Montpellier 1 (UM1) et Montpellier 2 (UM2). Il s'agit d'un processus initié en 2012 (Cholley-Gomez, 2015) et qui a abouti à la naissance de l'université

de Montpellier en janvier 2015<sup>2</sup>. Les principaux sites concernés pas la fusion sont illustrés de manière cartographique sur la figure 7.

### **3.1. Spécificités de chaque partenaire**

Pour une raison d'abstraction et de simplification, nous considérons deux établissements universitaires indépendants et situés dans une même région mais pas à proximité immédiate.

A partir de notre connaissance des deux fonctionnements, même si les buts de chaque partenaire sont globalement semblables, il faut noter diverses hétérogénéités :

– sur le plan de la formation, l'UM2 dispose d'une UFR<sup>3</sup>, d'une composante Polytech, et de trois IUT<sup>4</sup> ; l'UM1 gère 7 UFR et deux instituts. Les deux universités utilisent le logiciel APOGEE pour la gestion de la scolarité avec des disparités notamment dans les règles d'évaluation des ECTS<sup>5</sup> ;

– sur le plan de l'organisation, les deux partenaires disposent de logiciels. SIFAC (gestion financière et comptable) est commun mais avec des structures budgétaires différentes. Les ressources humaines sont gérées par HARPEGE (UM2) et SIHAM (UM1) ;

– sur le plan de la recherche, les laboratoires sont des sites dispersés géographiquement pour les deux partenaires.

### **3.2. Les buts de la fusion**

Sous l'impulsion du ministère de l'Enseignement supérieur, notamment lors des appels aux initiatives d'excellence, un mouvement national de rapprochement des centres universitaires se fait jour et donne lieu à diverses opérations de fusion. Sur Montpellier, l'objectif initial était de renforcer et optimiser la vision de l'enseignement et de la recherche sur la région. Il s'agit d'optimiser la gestion, d'augmenter le potentiel de la formation et de stimuler la recherche par de multiples synergies entre les laboratoires afin d'accroître le rayonnement international.

Sur cette base, des buts plus précis de regroupement de services, d'unification de l'infrastructure et d'intégration des programmes de cours sont illustrés à la figure 8.

---

2. A noter que d'un point de vue spatiotemporel, l'université de Montpellier a existé de manière unifiée entre 1289 et 1793, puis entre 1896 et 1970. Il s'agit donc d'une renaissance.

3. Unité de formation et de recherche.

4. Institut universitaire de technologie.

5. European Credits Transfer System : système de points développé par l'Union européenne dans le but de faciliter la lecture et la comparaison des programmes d'études des différents pays européens

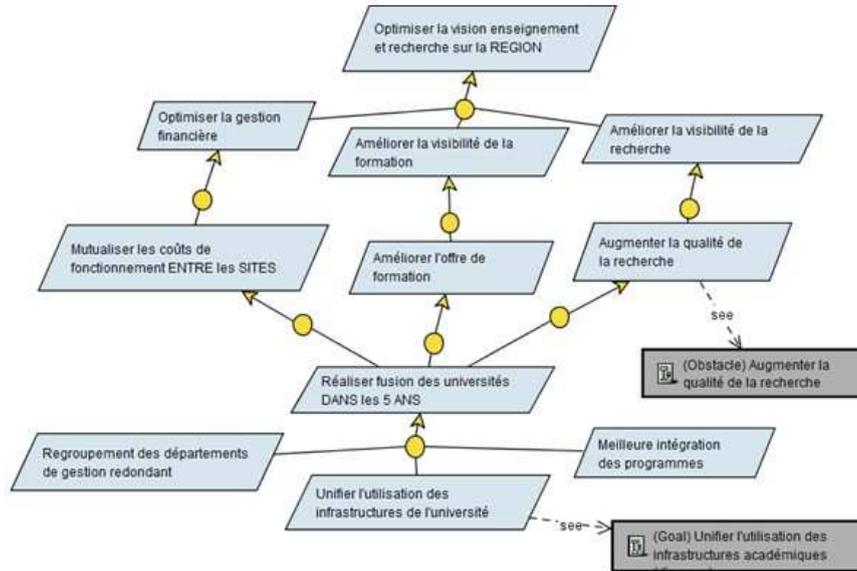


Figure 8. Buts stratégiques de la fusion illustrés dans l'outil Objectiver

La distance qui sépare les établissements, de l'ordre d'une dizaine de kilomètres, est suffisamment faible pour permettre une mobilité mais suffisamment élevée pour nécessiter de repenser les affectations géographiques et la mobilité des personnes dans la cadre de la fusion. Les grandes questions qui émergent sont :

- la nécessité du rapprochement de certains services (administratifs, financiers et de gestion de ressources humaines, etc.) ayant des missions similaires et qui devront mettre en commun leurs activités, voire réunir leurs compétences en un seul lieu.
- l'amélioration de l'organisation et la planification de la circulation des étudiants sur le nouveau campus commun : deux cours qui se suivent ne peuvent pas se dérouler dans deux salles distantes de plus de 500 mètres par exemple, ou encore un local de recherche en biologie doit être situé à proximité de salles avec des paillasses pour les travaux pratiques, etc.

#### 4. Extension des modèles d'IE avec des notations spatiales et temporelles

Dans cette section, nous présentons les extensions ST sur la base de la méthode KAOS. Nous détaillons les extensions que nous avons apportées au méta-modèle des objets et des buts présentés à la figure 5. Nous présentons aussi la syntaxe utilisée, principalement basée sur la syntaxe graphique et sur les patrons de formulation présentés dans la section 2.

#### 4.1. Extensions du méta-modèle des objets (domaine)

Les extensions que nous proposons dans le méta-modèle objet sont illustrées dans la figure 9. Tous les méta-concepts du méta-modèle objet sont enrichis avec des caractéristiques spatiales et temporelles en les associant au méta-concept abstrait *Objet*. Par héritage, les méta-concepts *Entité*, *Association* et *Événement* en bénéficient aussi.

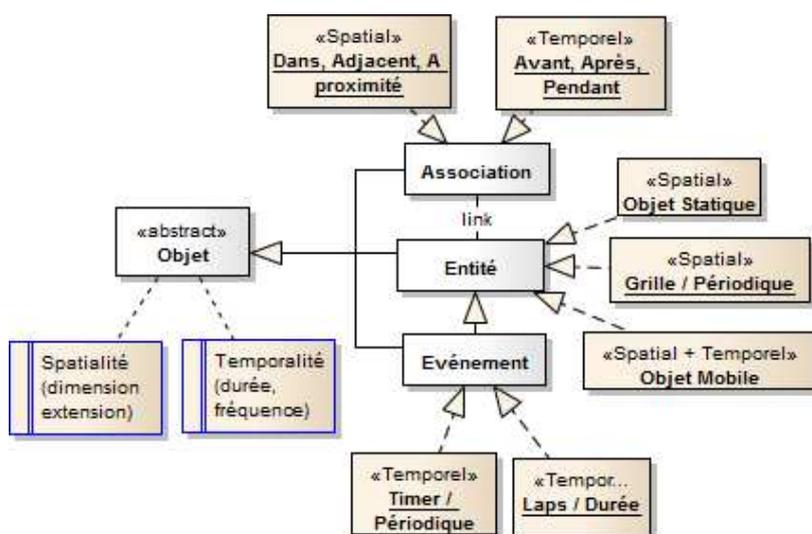


Figure 9. Méta-modèle objet étendu

En outre, des caractéristiques plus précises peuvent être identifiées, notamment :

- des entités spatiales purement ou principalement statiques (du point de vue du problème considéré) comme, par exemple, des bâtiments et des villes ;
- des entités spatiales ayant aussi une composante temporelle telles qu'une personne qui se déplace, un véhicule ou un téléphone mobile géolocalisé ;
- des entités spatiales ayant des caractéristiques périodiques. Par exemple, des allées d'arbres ou une disposition en grille ;
- des entités immatérielles ayant une dimension temporelle correspondant à la notion déjà présente d'événement. On peut par exemple les caractériser plus précisément par des événements répétitifs (« Timer ») ou ayant une durée (« Laps ») ;
- des associations peuvent aussi disposer de caractéristiques spatiales plus précises en utilisant les typologies déjà établies tant au niveau spatial (dans, adjacent, disjoint, etc.) que temporel (avant, après, pendant, etc.) (Claramunt, Jiang, 2001) ;

– certains types de relations plus spécifiques définis dans UML peuvent prendre une signification en fonction du contexte spatial ou temporel. Ainsi une agrégation liée à une entité spatiale peut être interprétée comme une composition spatiale. Par exemple, un site est composé de plusieurs bâtiments.

Au niveau de la syntaxe graphique, la spatialité a un type relatif à sa dimension (exemple : point, ligne, polygone) et est symbolisée par un pictogramme. Par simplicité, nous ne considérons que la spatialité 2D. La temporalité a également un type relatif à sa dimension (exemple : ponctuelle, durée, permanente, périodique) et est symbolisée aussi par un pictogramme.

Pour les rendre faciles à approprier, des pictogrammes sont visualisés au niveau des modèles des objets. A cet effet, nous nous sommes alignés sur le système de notations « PictograF » détaillé à la section 2.1.4 et qui a atteint un bon niveau de maturité et de standardisation, notamment par le moyen de stéréotypes UML. La valeur ajoutée au niveau de l'IE permet de capturer facilement et systématiquement des caractéristiques du domaine d'application.

La figure 10 illustre l'application de ces notations à notre exemple au sein du modèle objet. En effet, certains de ces objets ont une dimension spatiale implicite. La partie gauche du modèle représente une structure agrégative d'entités de nature spatiale (site, bâtiment, amphithéâtre, etc.). Le pictogramme utilisé ici évoque une géométrie de type polygonal. Notons aussi l'agrégation utilisée pour le site dont la géométrie englobe celle des bâtiments.

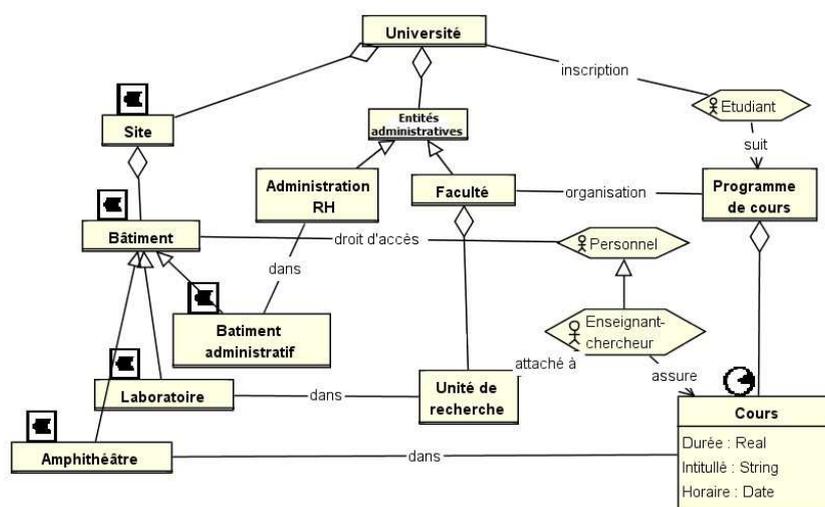


Figure 10. Modèle objet du domaine dans Objectiver étendu

La partie centrale du modèle représente des structures de l'organisation (facultés, unités de recherches, etc.) situées dans ces espaces.

Enfin la partie de droite représente les agents humains « étudiant » et « enseignant-chercheur » ainsi que les relations qu'ils entretiennent via les activités de cours. Les cours ont une dimension temporelle exprimée ici par un pictogramme de durée et ont un lien direct avec la dimension spatiale *via* l'amphithéâtre dans lequel ces cours sont assurés.

#### 4.2. Extension du méta-modèle des buts

Le méta-modèle des buts est étendu selon une logique similaire au méta-modèle des objets, afin que les notions de buts et d'obstacles ainsi que leurs spécialisations (exigences, attentes, etc.) disposent de caractéristiques spatiales et temporelles, celles-ci sont définies au niveau d'un méta-concept abstrait commun : la *Propriété Système*.

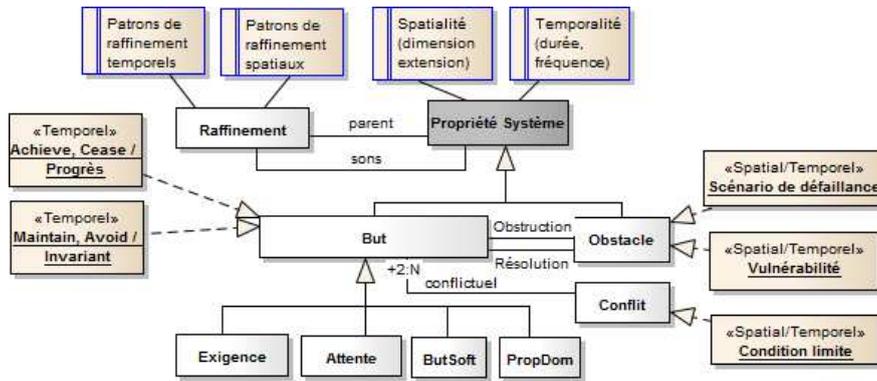


Figure 11. Méta-modèle des buts étendu

Une *propriété système* (but ou obstacle) pourra être marquée comme ayant une dimension spatiale et/ou temporelle spécifique si :

- des éléments spatiaux et temporels qu'elle référence ont ces dimensions. Il s'agit d'une règle de cohérence entre les annotations du modèle objet et celui des buts. Ainsi, un but référençant un bâtiment aura la dimension spatiale correspondante ;

- des exigences propres à ce but sont de nature spatiale ou temporelle. Rappelons ici l'exigence « Deux cours qui se suivent ne peuvent pas se dérouler dans deux salles distantes de plus de 500 mètres » (bien que la notion de salle apporte déjà la dimension spatiale dans ce cas). Au niveau temporel, on pourrait l'exprimer par « un enseignant-chercheur ne passera pas plus de 3 h en déplacement entre différents sites ».

En ce qui concerne la syntaxe graphique, au niveau spatial, les représentations 1D ou 2D de PictograF sont privilégiées quand elles sont suffisantes, dans un esprit d'abstraction. Au niveau temporel, nous avons introduit des notations graphiques liées aux différentes catégories de buts correspondant aux principaux patrons de formulations déjà définis dans KAOS (cf. état de l'art, section 2.3).

Le méta-modèle initial permettait de spécifier des contraintes temporelles de type *Achieve*, *Avoid*, *Cease* et *Maintain*. *Achieve* et *Cease* sont soumis à une contrainte de type ponctuel (instant) tandis que *Maintain* et *Avoid* sont soumis à une contrainte de type durée. En réalisant la synthèse des notations de type PictograF et de ces catégories, nous avons identifié le besoin d'introduire des notations complémentaires pour couvrir le cas de la répétition et de la permanence :

– Un but de progression « **Achieve** » exprime que celui-ci sera généralement réalisé à un instant du futur spécifique (qui peut être exprimé par un pictogramme ponctuel) mais de nombreux systèmes peuvent également arriver à échéance de manière répétitive avec une certaine fréquence temporelle. Afin de pouvoir caractériser cette classe fréquente, généralement associée à la notion d'événement, nous introduisons alors un pictogramme de fréquence  $\otimes$ . Graphiquement, il réalise une répétition de l'événement ponctuel de PictograF. On pourra ainsi par exemple exprimer une exigence telle que « Les dispositifs de contrôles d'accès doivent faire l'objet d'une maintenance **TOUS** les ans ».

– Un but de maintien « **Maintain** » exprime une propriété qui doit être vraie tout le temps ou de manière plus précise sur une durée bien déterminée.

**Exemple 1 :** « **TOUS** les accès doivent être unifiés », permet d'exprimer que des propriétés de sécurité doivent être maintenues en permanence. Pour ce cas, nous avons introduit le pictogramme  $\bullet$  qui signifie « tout le temps » ;

**Exemple 2 :** « **AUCUN** accès aux étudiants n'est autorisé entre 22 h et 7 h du matin ». La propriété accès interdit, dans ce second cas, n'est maintenue que sur une période exprimée par le pictogramme de durée.

Les raffinements de buts et d'obstacles peuvent également se décliner selon des stratégies spatiales et temporelles. Des patrons temporels pour le raffinement de buts disponibles dans la littérature ont été présentés à la section 2.3. Des patrons spatiaux peuvent également être développés. A cette fin, nous avons procédé par analogie avec les patrons temporels en identifiant des dualités entre le domaine spatial et le domaine temporel. Ces dualités peuvent être exploitées pour transférer certains mécanismes de raisonnement tels que des patrons de raffinement entre les deux domaines. Le tableau 1 illustre les principales dualités identifiées. Les mécanismes de raisonnements qui les exploitent seront détaillés dans la section 5.

Les modèles présentés aux figures 12 et 13 illustrent l'utilisation de nos notations sur plusieurs diagrammes raffinant des buts stratégiques de l'UM.

Tableau 1. Dualité entre les primitives temporelles et spatiales

	Domaine temporel	Domaine spatial
Dimension	1	0, 1, 2 ou 3
Quantificateur existentiel	Une fois (dans le passé, le futur)	A un endroit (dans une direction/dimension donnée)
Quantificateur universel	Tout le temps (dans le passé, le futur)	Partout (dans une direction/dimension donnée)
Mesure absolue	Temps « universel »	Coordonnées « GPS »
Mesure relative	Temps par rapport à un événement de référence	Distance, surface, volume d'un objet référencé
Fréquence	Périodicité temporelle (ex. toutes les secondes)	Notion de régularité spatiale (ex. tous les X mètres, à tous les étages, etc.)
Raisonnement qualitatif	Positions relatives d'événements, d'intervalles	Positions relatives d'objets (topologie)
Raisonnement quantitatif	Comptage d'événements métiers dans un intervalle donné	Capacité d'un espace en termes de métier

Dans le modèle de la figure 12 :

– le but principal est annoté d'un pictogramme spatial (en référence à la spatialité de la région). Le sous-but « Réaliser la fusion des universités DANS les 5 ans » est annoté d'un pictogramme spatial (spatialité des universités) et temporel (DANS les 5 ans) ;

– le but (ou l'exigence opérationnalisable) peut référencer des objets annotés spatialement ou temporellement. De ce fait, ce but (ou exigence) serait annoté à son tour. Il s'agit d'une règle de cohérence entre les annotations du modèle objet et celui des buts. Ainsi le sous-but « unifier l'utilisation des infrastructures de l'université » fait référence aux infrastructures (bâtiments) qui sont déjà annotées par le pictogramme spatial.

Dans le modèle de la figure 13, les buts dédiés au contrôle d'accès sont annotés de pictogrammes spatiaux (l'université, les sites, les bâtiments) et temporels. La plupart sont permanents pour assurer la sécurité, à l'exception du but « assurer un contrôle géographique et temporel unifié » qui vise à réévaluer périodiquement l'évolution de l'unification.

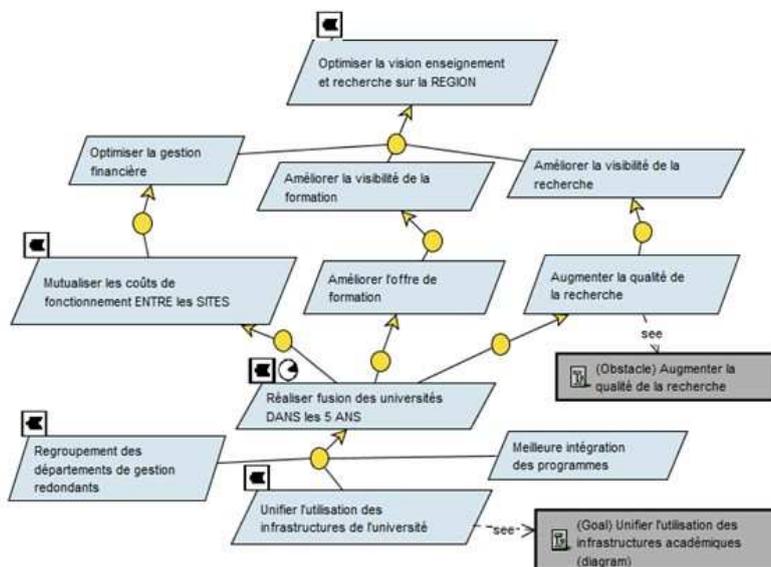


Figure 12. Buts stratégiques de la fusion illustrés dans l'outil Objectiver étendu

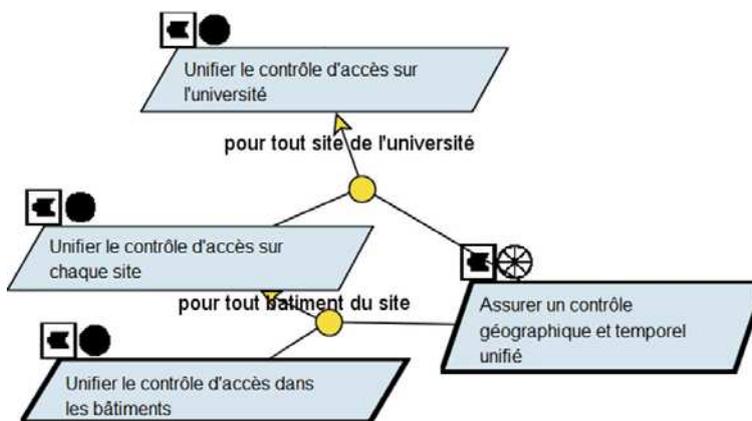


Figure 13. Modèle de buts décoré avec des pictogrammes permanents et périodiques

## 5. Extension du processus de construction du modèle des exigences via les aspects spatiaux et temporels

L'enrichissement des modèles d'IE avec les notations ST décrites dans la section précédente, permet d'améliorer la **précision**. Il permet aussi d'expliciter des

techniques permettant l'identification, la structuration, le raffinement et le raisonnement sur des exigences apportant des bénéfices supplémentaires en termes de **complétude** et de **robustesse** face à des risques liés aux propriétés ST. Cette section présente le processus étendu de construction de modèles objets et de buts intégrant ces techniques avant de les détailler de manière plus précise en les illustrant sur notre étude de cas.

### 5.1. Vue générale du processus d'IE étendu

La figure 14 présente une vue étendue du processus d'IE relative à la modélisation du domaine et des objectifs (van Lamsweerde, Letier, 2000 ; van Lamsweerde, 2009). Les activités en traits épais sont les activités classiques tandis que les activités supplémentaires sont représentées en trait normal et sont les suivantes :

- sur la base de la formulation des buts, le vocabulaire de nature spatiale et temporelle peut être plus systématiquement identifié afin de guider la construction du modèle du domaine ;

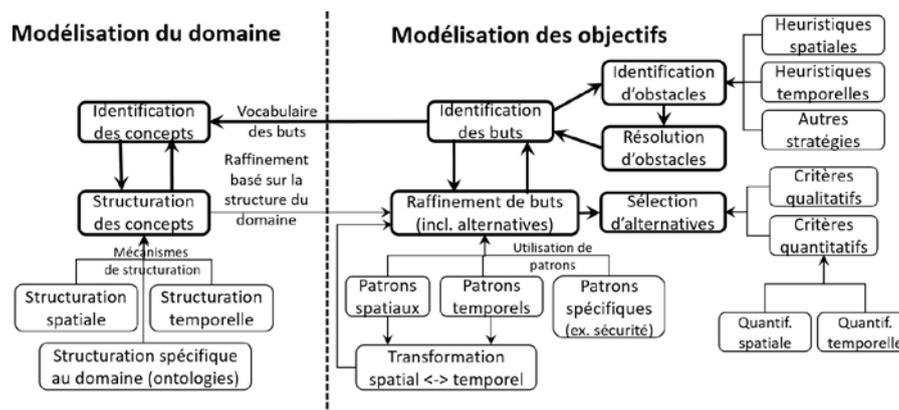


Figure 14. Vue générale du processus d'IE étendu avec les techniques ST

- au niveau de la modélisation du domaine, des mécanismes de structuration spatiale et temporelle peuvent être mis en place sur la base d'extensions de notations décrites à la section 4 ;

- des stratégies plus spécifiques de raffinement de buts exploitant des propriétés ST peuvent être utilisées, notamment sur la base de patrons spatiaux ou temporels. Il est aussi possible d'exploiter la structure spatiale ou temporelle décrite dans le modèle du domaine afin de guider le processus de raffinement ;

– au niveau du processus de sélection parmi des alternatives, les critères de sélection peuvent notamment impliquer des quantifications portant sur les attributs de nature spatiale et temporelle référencés dans les modèles ;

– au niveau de l'analyse d'obstacles, des heuristiques spécifiques aux aspects spatiaux et temporels peuvent être utilisées afin de générer des obstacles à différents niveaux de raffinement (exemples : une échéance peut causer un risque de retard, une contrainte de capacité spatiale peut causer un risque d'indisponibilité).

Observons que les nouveaux opérateurs de processus permettent non seulement d'améliorer la modélisation du domaine et des buts séparément mais aussi d'améliorer la manière dont ces modèles s'enrichissent mutuellement.

## 5.2. Raffinement de buts guidé par les exigences spatiotemporelles

On peut considérer un raffinement dirigé par la dimension spatiale et/ou temporelle, avec des interactions possibles entre ces dimensions. Les principales stratégies suivantes ont pu être identifiées pour tirer partie de nos extensions ST :

– **L'application de patrons de raffinement temporels et spatiaux.** Des schémas de décomposition de buts ont déjà été proposés (Darimont, van Lamsweerde, 1996 ; van Lamsweerde, 2009). Le plus connu est le patron « jalon » (« milestone » en anglais), qui décompose un but à accomplir en étapes logiques intermédiaires. Ces étapes peuvent être temporelles, par exemple : décomposer une tâche d'une durée d'une heure en trois étapes successives de 20 minutes. Au niveau spatial, ces « jalons » peuvent se traduire par une progression spatiale unidimensionnelle ou en 2 voire 3 dimensions. On peut par exemple, définir des exigences sur un transport de marchandises, sur un processus d'évacuation progressive d'un bâtiment ou encore définir une stratégie de rénovation d'un site afin d'assurer une certaine continuité des services. La figure 15 illustre un jalon temporel au niveau du raffinement du but « réaliser une réorganisation spatiale ». Celui-ci est composé de trois étapes successives dans le temps : une première étape « immédiate » de planification, où le fonctionnement est comme par le passé, une deuxième étape « à moyen terme », où une réorganisation se fait dans les infrastructures existantes utilisables en l'état, et une troisième étape « à plus long terme » qui demande de rénover, voire construire de nouvelles infrastructures.

**La propagation d'une exigence spatiale ou temporelle sur une structure du domaine.** La figure 16 illustre cette propagation plus concrètement sur le sous-but d'unification de la sécurité. Cette figure montre comment différents sous-buts sont liés à des structures de nature spatiale. Des raisonnements quantitatifs sont également possibles. Par exemple, l'exigence de capacité d'accueil totale de l'université doit être préservée par la fusion. La capacité peut se calculer (récursivement) comme une *somme* des capacités de toutes les sous-entités de cette entité (en faisant l'hypothèse d'un attribut *capacité*). On peut aussi raisonner sur la capacité maximale et plus généralement imaginer d'autres opérateurs arithmétiques.

Des algorithmes de propagation sont disponibles pour réaliser de tels calculs et peuvent être mis en œuvre (Darimont, Ponsard, 2015).

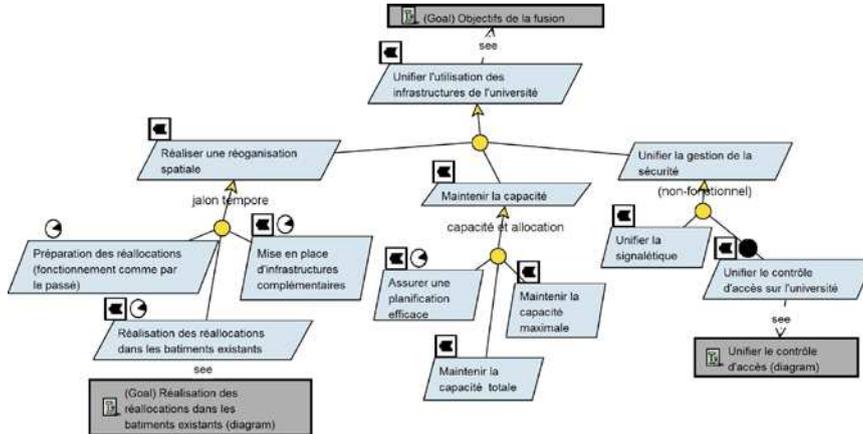


Figure 15. Raffinement du but d'unification de l'utilisation des infrastructures

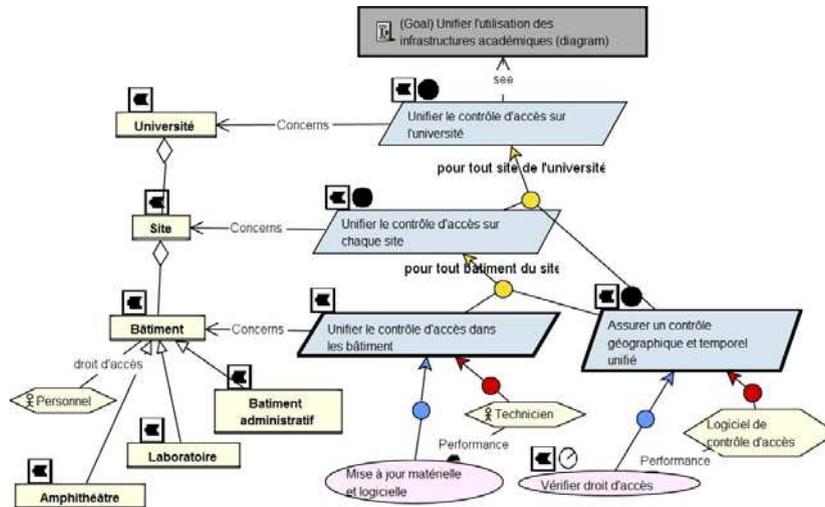


Figure 16. Propagation d'une exigence temporelle sur une structure spatiale

**La transformation d'exigences spatiales en exigences temporelles.** Par exemple pour des déplacements, les distances spatiales sont généralement plus pertinentes à exprimer de manière temporelle parce qu'elles sont liées à d'autres contraintes (comme un rendez-vous, une tolérance maximale sur un temps accep-

table). La conversion entre distance et temps peut faire apparaître des alternatives, par exemple liées au mode de déplacement considéré, voire des contraintes de planning (éviter les heures de pointe). Un exemple est présenté dans la figure 18.

### 5.3. Sélection parmi des alternatives

Lors de raffinement de buts, plusieurs alternatives peuvent être produites sur la base de plusieurs stratégies de raffinements ou patrons applicables. Cet espace d'alternatives pourrait être laissé ouvert mais il est souvent utile de le restreindre au plus tôt afin d'éliminer des alternatives peu intéressantes qui risquent au fil des raffinements de se multiplier de manière combinatoire. Le critère de sélection va typiquement se faire à partir d'un ensemble d'exigences non fonctionnelles qui déterminent des critères de sélection. Des critères quantitatifs sont préférables car ils peuvent être combinés sur une échelle permettant de les comparer, typiquement en termes de coût. Cette quantification peut impliquer des mesures de nature spatiale (par exemple la capacité des auditoriums) ou temporelle (les temps de transfert entre les sites). Ces mesures peuvent être prises en compte dans les évaluations qui mèneront à une décision sur l'alternative à retenir.

Dans le cadre de notre étude de cas, on peut examiner plus en détail le but d'affectation des auditoriums disponibles. La fusion va engendrer le besoin de gérer des cours similaires impliquant des étudiants et des professeurs initialement localisés sur des sites distincts. La figure 17 illustre deux solutions possibles : celle de gauche organise la mobilité de l'enseignant tandis que celle de droite organise le regroupement des étudiants sur le même site où l'enseignant est également affecté. Des critères d'évaluation possibles sont la facilité de mise en œuvre qui est en faveur de la première solution. Cependant celle-ci garde le cours dupliqué et exige donc plus d'enseignants que la seconde. Par contre, la seconde exige des auditoriums de plus grande taille et est aussi plus complexe notamment si les regroupements ne peuvent pas se faire sur le même site pour tous les cours et impliquent aussi une certaine mobilité des étudiants. Le processus de décision va donc demander la prise en compte de contraintes spatiales de capacité voire de temps de transfert. D'ailleurs, ces alternatives ne doivent pas être considérées comme exclusives mais complémentaires et en fonction du contexte. Ainsi, s'il s'agit d'un cours très peuplé sur les deux sites, la première alternative sera sans doute préférable tandis que pour un cours avec un public plus nombreux sur un site que sur l'autre, le regroupement sur le site le plus peuplé semble recommandé. Cependant, dans ce cas, la prise de décision ne se fait plus au moment de la spécification mais se traduit véritablement par deux possibilités qui seront explorées par le logiciel de planification.

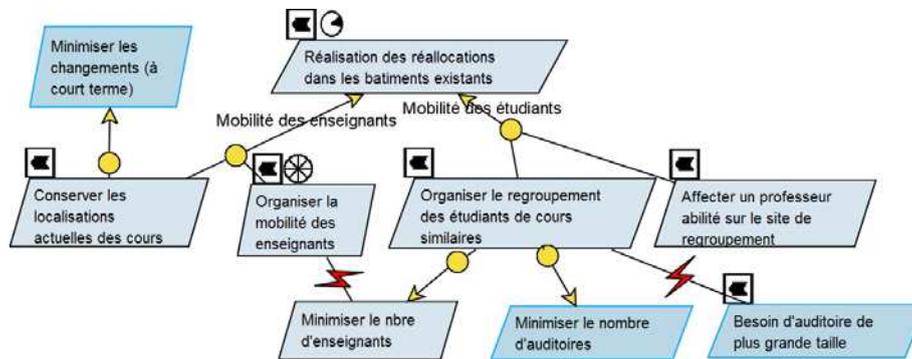


Figure 17. Evaluation de deux alternatives relatives au problème du regroupement

#### 5.4. Analyse d'obstacles selon des critères spatiotemporels

Les buts sont souvent formulés de manière trop idéalisée. Afin de les raffiner en exigences robustes, il faut les mettre à l'épreuve de conditions adverses (risques) qui peuvent empêcher leur réalisation. Des techniques d'IE ont été définies pour générer des obstacles à des buts en commençant par des obstacles monolithiques puis en permettant de les décomposer en causes élémentaires, pouvant alors être contrôlées (van Lamsweerde, Letier, 2000).

Parmi les techniques de raffinement d'obstacles, les techniques heuristiques se révèlent les plus utiles en pratique. Celles-ci s'appuient sur des dégradations des contraintes exprimées par l'exigence (par exemple un message qui est altéré) et dont les causes peuvent être explorées (par exemple en lien avec sa transmission, son stockage, son traitement, etc.). La présence de contraintes ST permet de générer des obstacles spécifiques. Il en découle une modélisation plus réaliste des exigences ST.

La figure 18 illustre plusieurs heuristiques utilisées pour générer des obstacles relatifs à des contraintes ST : un délai peut être causé par un temps de déplacement à une vitesse inférieure à celle planifiée, un temps d'attente (p.ex. bouchon), la nécessité de faire un détour, etc. Au niveau spatial, le terme d'obstacle peut reprendre son sens premier. Par exemple, des caractéristiques d'un bâtiment peuvent le rendre impraticable pour des personnes à mobilité réduite (pente trop forte, escalier, etc.). Ce point est traité dans une étude plus spécifique présentée à la section 7.

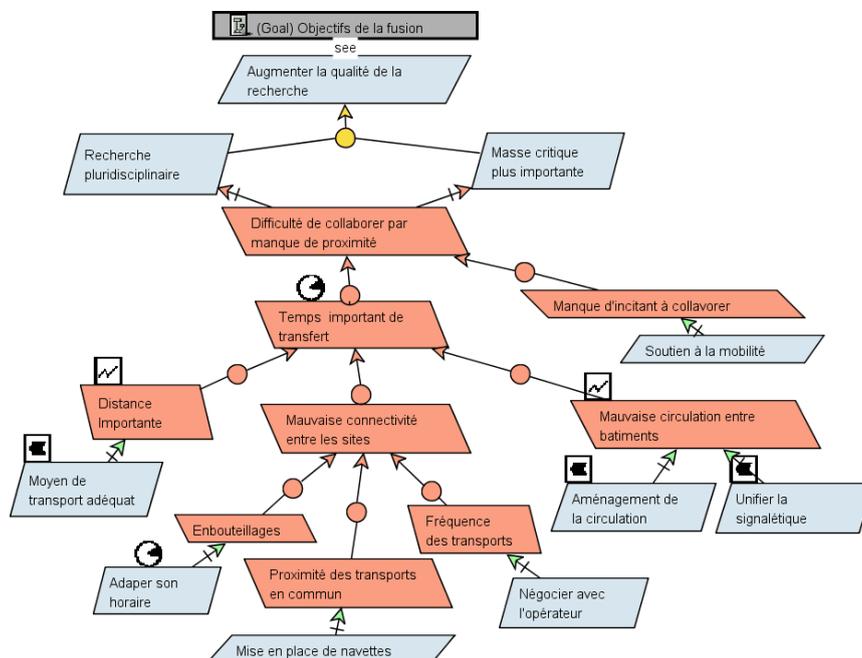


Figure 18. Analyse d'obstacles spatiaux et temporels

### 5.5. Raisonnement sur les agents

Nous distinguons ici les agents de l'environnement (utilisateurs humains, autres logiciels ou systèmes interagissant avec le système) et les agents logiciels du SI.

#### 5.5.1. Agents de l'environnement du SI

Pour les agents de l'environnement, certaines responsabilités peuvent être déclinées suivant des modalités spatiales et temporelles, selon différents modèles :

Modèle de délégation :

- spatiale, par exemple, un responsable informaticien par unité de recherche ;
- temporelle, par exemple, un étudiant-chercheur assurant la première moitié d'un cours et un autre assurant l'autre moitié ;
- mixte, par exemple, une permanence administrative assurée alternativement entre deux sites selon un schéma convenu.

Modèle collaboratif :

- coordination temporellement synchrone, *via* des réunions physiques ou virtuelles périodiques ;
- coordination temporellement asynchrone, *via* des messages ou un *workflow* ;

- spatialement centralisé, une organisation rassemblée en un lieu unique ;
- spatialement distribué (*crowdsourcing*), par exemple pour collecter des données.

### 5.5.2. Agents logiciels du SI

Pour les agents logiciels du SI, les informations de nature spatiotemporelle permettent, bien sûr, de mieux en déterminer les fonctionnalités. Les propriétés, si elles sont bien formalisées, peuvent aussi être exploitées directement dans des composants spécifiques.

Ces composants peuvent être développés *via* un processus classique en utilisant des mécanismes de traçabilité vers les propriétés en question. Cependant des systèmes plus élaborés peuvent être mis en œuvre afin de garder un lien de traçabilité plus fort avec les décisions qui ont été prises et d’ainsi permettre d’être plus flexible dans la gestion de leur évolution. Il s’agit notamment :

- *des systèmes de gestion de règles métier ou BRMS*<sup>6</sup> permettant de spécifier, gérer et exécuter les règles métier (Diouf, 2007). Certains BRMS tels que Drools disposent d’un mécanisme de raisonnement spatial aisé à mettre en œuvre (Merilina, 2014). Des stratégies d’intégration de règles métiers géomatiques dans un système d’information de gestion sont décrites dans (Touzani *et al.*, 2016). L’implémentation par BRMS d’une partie de notre étude de cas y est présentée. Celle-ci est discutée dans la section 7 ;

- *le traitement d’événements complexes* permettant le traitement réactif de flux de données et notamment utilisé pour traiter des alertes, par exemple de vitesse ou de proximité dans les flottes de véhicules (Rathnayake, Senarath, 2014) ;

- *des systèmes experts* capables d’apporter une aide à la décision en reproduisant des mécanismes cognitifs plus complexes que les BRMS en s’appuyant sur des bases de connaissances (Laurini, Thompson, 1992). De tels systèmes ont été utilisés dans des domaines ayant une dimension temporelle tels que les diagnostics médicaux (Berzuini *et al.*, 1991) mais aussi spatiale, notamment pour des processus d’évaluation de l’affectation territoriale (Kalogirou, 2002) ;

- *des techniques de Data Mining* et de *d’analyse Big Data* infèrent directement des propriétés à partir de données structurées ou non, grâce à des techniques spécialisées d’analyse statistique et d’apprentissage automatique (Soltanpoor, Sellis, 2016).

Les contraintes ST alimentent aussi des exigences non fonctionnelles telles que :

- la réactivité de l’application, en permettant de préciser des temps de réponse et de mettre en place des stratégies efficaces de réplication spatiale des données ;

---

6. BRMS : *Business Rules Management System*.

- des contraintes de sécurité en formalisant les aspects d'un contrôle d'accès (lieu et temps autorisé) et pour certaines applications, des contraintes de localisation (notamment concernant la localisation des données dans le Cloud) ;
- des notions de fiabilité et de maintenance, en précisant des durées maximales d'indisponibilité, des horaires où des interventions de maintenance sont possibles, etc.

## 6. Implémentation des extensions spatiotemporelles

L'approche proposée a été implémentée sous la forme d'une extension (ou plugin) à l'outil Objectiver, qui est dédié à la méthode KAOS (Respect-IT, 2005). L'implémentation a nécessité l'accès au SDK de la plateforme et prend la forme d'un fichier « jar » aisé à déployer. Le plugin développé est disponible en ligne<sup>7</sup>.

Ce plugin propose les fonctionnalités suivantes, illustrées à la figure 19 :

- une extension du méta-modèle KAOS pour les attributs spatiotemporels ;
- des décorateurs au sein des diagrammes pour afficher ces attributs ST ;
- un panneau de contrôle du plugin pour en contrôler le fonctionnement.

### *Validation des extensions ST*

Outre l'étude de cas déjà présentée qui a servi de moteur à l'élaboration de nos extensions, plusieurs autres spécifications ont permis de valider celles-ci. Cette section en donne un bref aperçu, ainsi que les principales leçons tirées notamment en matière d'argumentation, de traçabilité et d'aide à la décision. Les modèles plus détaillés (en anglais) sont disponibles dans les références mentionnées.

**Une spécification générique des exigences de prévention-sécurité pour les bâtiments publics** a été développée (Touzani, Ponsard, 2016). Elle a mis en évidence l'apport des contraintes spatiales et des mécanismes de raffinement basés sur celles-ci. Ainsi des exigences de sûreté des locaux peuvent se décliner en fonction de caractéristiques spécifiques à ceux-ci (auditoires, locaux techniques, stockages de produits dangereux, etc). Une couverture spatiale globale peut ainsi être assurée en prenant en compte le contexte. Des exigences temporelles sont également présentes, notamment relativement aux différents types de contrôles périodiques (exercices d'évacuation, contrôles des alarmes, etc).

**Une méthode d'évaluation de l'accessibilité aux bâtiments ouverts au public pour les personnes à mobilité réduite**, initialement développée sans les extensions (Ponsard, Snoeck, 2006), a été revisitée (Ponsard, Darimont, 2017). Les techniques d'analyse d'obstacles sont utilisés systématiquement pour la mise en évidence d'obstacles spatiaux dans les bâtiments correspondant à des exigences spécifiques de certains utilisateurs (par : des limites de pente pour une personne en chaise roulante).

---

7. Le plugin est téléchargeable depuis : <http://www.objectiver.com/packages/plugins/STPlugin.jar>

Elle dicte aussi la présence d'alternatives à des infrastructures inaccessibles, par exemple, le besoin d'installer une rampe ou un ascenseur comme alternative à un escalier pour ce même type d'utilisateur. Une méthode générale d'évaluation quantitative est proposée et illustrée sur ce cas. Comme dans le cas des alternatives discutées dans la figure 17, nous envisageons ici aussi des instances concrètes, afin de mener le processus de décision qui permettra de déterminer le niveau d'accessibilité et des actions d'amélioration à mener.

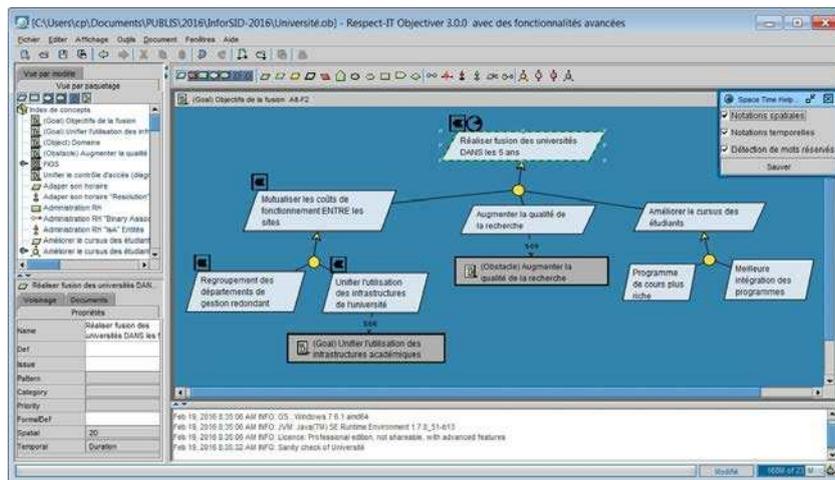


Figure 19. Illustration de l'extension spatiotemporelle au sein de l'outil Objectiver

**Les systèmes de cadastre et d'administration du territoire** sont des systèmes complexes dont l'organisation est très variable suivant les pays avec souvent une forte dimension historique. La volonté de l'Europe est d'amener les systèmes nationaux à une certaine convergence. Des caractéristiques spatiales et temporelles y jouent un rôle clef (notions de parcelle, de droit de propriété dans le temps). En l'absence de modèle d'exigences pour ce type de systèmes, nous en avons développé un (Ponsard, Touzani, 2017). Notre modèle capture différents types d'alternatives, notamment les systèmes basés sur les actes ou les titres, les déploiements centralisés ou non, ainsi que l'intégration ou la séparation des composants de cadastre et d'enregistrement. En fonction de la décision de sélection d'alternatives, le modèle peut être mis en correspondance avec un système national donné ou rencontrer des besoins spécifiques à la mise en place d'un nouveau système, par exemple, dans le contexte d'un pays émergent ne disposant pas de système bien établi.

**Une mise en œuvre par BRMS du système de contrôle d'accès** a été décrite dans notre étude de cas et a été réalisée (Touzani *et al.*, 2016). L'avantage du BRMS est de permettre une traduction aisée des contraintes spatiales et temporelles et donc de les faire évoluer. Cela permet aussi de définir des règles correspondant à des

alternatives de conception et de les mettre en œuvre de manière contextuelle. Ceci s'est avéré particulièrement utile dans le contexte de la fusion des universités, en permettant de garder des spécificités historiques de certains sites avant de les faire converger.

## 7. Conclusion et perspectives

Sur la base d'un attirail de notations et de méthodes qui existent déjà autour de la dimension ST et répertoriées dans notre état de l'art, nous avons proposé un cadre unifié de modélisation d'exigences spatiotemporelles. Nous mettons en œuvre des notations graphiques parlantes ainsi qu'une formulation basée sur des mots clefs spécifiques aux exigences spatiales et temporelles. Le tout est guidé par une série de règles méthodologiques permettant de produire des exigences plus précises, complètes et robustes. Notre travail se situe dans un cadre de référence d'ingénierie des exigences orienté but, qui permet déjà de spécifier le « QUOI » et de justifier le « POURQUOI ». Nous proposons de l'étendre pour mieux traiter le « QUAND » et le « OÙ ». Nous gardons l'utilisateur au cœur d'un processus d'IE en favorisant une bonne communication entre les parties prenantes *via* une vision explicite et graphique.

Le cadre proposé étend également le support aux problématiques de décisions, d'argumentation et de traçabilité. Tout d'abord, la modélisation du domaine est mieux justifiée et intégrée avec celle des buts afin de prendre en compte les propriétés ST. Ensuite, le processus d'identification et de sélection d'alternatives est étendu à la fois au niveau de la démarche de raffinement de buts mais aussi *via* l'identification et la résolution d'obstacles. Enfin, outre la traçabilité riche offerte par le méta-modèle de buts, la mise en œuvre est possible au moyen de composants puissants et flexibles tels que les systèmes de gestion de règles métiers ou de gestion d'événements complexes.

Nos travaux ont été appliqués à plusieurs cas d'étude et sont supportés par un outil pointu du domaine. Ils ne prétendent cependant pas être exhaustifs car ils se sont principalement concentrés sur la définition d'un cadre unifié et sur sa validation. Afin d'être utilisables plus largement, nos travaux doivent approfondir les axes suivants :

- Au niveau des notations, des patrons ST spécifiques peuvent également être identifiés pour le modèle des responsabilités et des opérations, afin d'apporter une guidance supplémentaire.

- Le cadre proposé doit être valable dans d'autres domaines d'application que les SIG, notamment des systèmes mobiles et cyber-physiques. Ceci permettra de déterminer le niveau de généralité et la nécessité éventuelle de définir des règles ou patrons plus spécifiques à un domaine d'application. Cette démarche est soutenue par des études de cas supplémentaires.

– Une sémantique formelle peut être envisagée à la fois pour les logiques temporelles (p.ex. logique temporelle linéaire) et spatiales (p.ex. algèbre d’Allen). Ceci permettrait de réaliser des vérifications automatiques ou des transformations vers des notations plus spécifiques à un domaine (p.ex. pour configurer un SIG).

– Enfin, nous réfléchissons à l’intégration des notations à d’autres outils, en particulier libres, tels que StarUML et ArgoUML qui disposent déjà d’extensions spécifiques, respectivement à l’IE et à l’IG.

### Remerciements

*Ce travail a été financé en partie par le projet PIT de la Région wallonne (conv. nr. 7481). Nous remercions Respect-IT pour la mise à disposition du SDK de son outil.*

### Bibliographie

- Allen A., Yabushita S. (1984). On galaxy interactions during violent relaxation of clusters. *The Astrophysical Journal*, vol. 278, p. 468-468.
- Amyot D., Mussbacher G. (2011). User requirements notation: The first ten years, the next ten years. *JSW*, vol. 6, n° 5, p. 747-768.
- Bailly J., Méliet B., Pornon H. (2011). *Sig: La dimension géographique du système d’information*. Dunod.
- Becker R. et al. (1990). Network visualization. *4th International Symposium on Spatial Data Handling*, Zurich, Switzerland, 23-27 juillet.
- Berzuni C., Quaglini S., Bellazzi R. (1991). Belief Network Representations of Temporal Knowledge for Medical Expert Systems. In *Proc. of the Workshop “System Engineering in Medicine”*, Maastricht, March 16-18. Springer Berlin Heidelberg.
- Bédard Y., Larrivé S. (2008). Modeling with pictogrammic languages. *Encyclopedia of Geographic Information Sciences*, Shekar S., Xiong H. (Eds), p. 716-725.
- Cholley-Gomez M. (2015, 24 Janvier). *Nouvelle Université de Montpellier : une fusion réussie*. <http://www.lenouveaumontpellier.fr/nouvelle-universite-montpellier-fusion-reussie>.
- Claramunt C., Jiang B. (2001). An integrated representation of spatial and temporal relationships between evolving regions. *Journal of Geographical Systems*, vol. 3, n° 4, p. 411-428.
- Clementini E. (2009). *A Conceptual Framework for Modelling Spatial Relations*. Thèse de doctorat en informatique, INSA Lyon.
- Dardenne A., van Lamsweerde A., Fickas S. (1993). Goal-directed requirements acquisition.
- Darimont R., Ponsard C. (2015). Supporting quantitative assessment of requirements in goal orientation. In *23rd IEEE International Requirements Engineering Conference*.

- Darimont R., van Lamsweerde A. (1996). Formal refinement patterns for goal-driven requirements elaboration. In *Proceedings of the 4th acm sigsoft symposium on foundations of software engineering*, p. 179-190. New York, NY, USA, ACM.
- Desconnets J.-C., Kazmierski M. (2015). Mutualiser des données spatiales et des traitements en environnement. *Revue des sciences et technologies de l'information*, vol. 20, n° 3, p. 89-115.
- Diouf M. (2007). *Spécification et mise en oeuvre d'un formalisme de règles métier*. Thèse de doctorat non publiée.
- Egenhofer M. J., Franzosa R. D. (1991). Point-set topological spatial relations. *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 5, n° 2, p. 161-174.
- Frank A. U. (1994). Qualitative temporal reasoning in gisordered time scales. *Proc. of the 6th Int. Symposium on Spatial Data Handling*, Waugh T. C. et R.C.H. (Ed.).
- Galton A. (1993). Towards an integrated logic of space, time, and motion. *IJCAI*, vol. 93, p. 1550-1555.
- Hughes D. L., Dwivedi Y. K., Simintiras A. C., Rana N. P. (2015). *Success and failure of is/it projects: A state of the art analysis and future directions* (1<sup>re</sup> éd.). Springer Int. Publishing.
- IEEE. (1990). *Standard glossary of software engineering terminology*.
- ISO29148. (2011, Dec). Systems and software engineering – life cycle processes – requirements engineering. *ISO/IEC/IEEE 29148:2011(E)*, p. 1-94.
- Jarczyk A.P.J., Löffler P., Iii F. M. S. (1992). Design rationale for software engineering: A survey. In *25<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Sciences*, p. 577-586. Press.
- Kalogirou S. (2002). Expert systems and gis: an application of land suitability evaluation. *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 26, n° 2-3, p. 89-112.
- Kosters G., Pagel B.-U., Six H.-W. (1996). Geoooa: object-oriented analysis for geographic information systems. In *Proc. of the 2<sup>nd</sup> int. conf. on requirements engineering*, p. 245-253.
- Laurini R., Thompson D. (1992). *Fundamentals of geographic information systems*. Academic Press Limited. 0-12-438380-7.
- Le Ber F., Ligozat G., Papini O. (2007). *Raisonnements sur l'espace et le temps : des modèles aux applications*. Lavoisier. Consulté sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00126022>
- Le Parc-Lacayrelle A. et al. (2007). *Entreposage de documents et données semistructurées*. Hermes, Lavoisier.
- Ligozat G. (1998). Reasoning about cardinal directions. *Journal of Visual Languages and Computing*, vol. 9, n° 1, p. 23-44.
- Maguire D. J., Longley P. A. (2005). The emergence of geoportals and their role in spatial data infrastructures. *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 29, n° 1, p. 3-14.
- Mahaux M. (2004). *Vers une Spécification Allégée pour l'Analyse des Besoins Orientée-Objectifs*. Mémoire de fin d'étude, EPL, Université catholique de Louvain.

- Manna Z., Pnueli A. (1992). *The temporal logic of reactive and concurrent systems*. New York, NY, USA, Springer-Verlag New York, Inc.
- Mathian H., Sanders L. (2014). *Objets géographiques et processus de changement*. London, ISTE.
- Merilinn J. (2014). A mechanism to enable spatial reasoning in jboss drools. In *Int. Conf. on Industrial Automation, Information and Communication Technology*.
- Papadias D., Kavouras M. (1994). Acquiring, representing and processing spatial relations. In *Presented at sixth international symposium on spatial data handling*. Taylor & Francis.
- Pinet F. (2012, juillet). Entity-relationship and object-oriented formalisms for modeling spatial environmental data. *Environ. Model. Softw.*, vol. 33, p. 80-91.
- Ponsard C., Darimont R. (2017). Quantitative Assessment of Goal Models within and beyond the Requirements Engineering Tool: A Case Study in the Accessibility Domain. In *Proc. of the 10th International i\* Workshop, Essen, Germany, June 12-13*, p. 13-18.
- Ponsard C., Snoeck V. (2006). Objective accessibility assessment of public infrastructures. In *Computers helping people with special needs, 10<sup>th</sup> int. conf. linz, Austria, July*, p. 314-21.
- Ponsard C., Touzani M. (2017). Extending land administration domain models with a goal perspective. In *Proc. of the 3rd Int. Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management, Porto, Portugal, 27-28 April*, p. 244-249.
- Pullar D. V., Egenhofer M. J. (1988). Towards the defaction and use of topological relations among spatial objects. In *Proc. of the 3<sup>rd</sup> Int. Symposium on Spatial Data Handling*.
- Randell D., Cui Z., Cohn A. (1992). A spatial logic based on regions and connection. In *Proc. 3rd Int. Conf. on Knowledge Representation and Reasoning*. San Mateo, Morgan Kaufmann.
- Rathnayake Y., Senarath A. (2014). *Developing and maintaining a fleet management system with wso2 cep*. <http://wso2.com/library/articles/2014/09/fleet-management-with-wso2-cep>.
- Respect-IT. (2005). *Objectiver Requirements Engineering Tool*. <http://www.respect-it.com>.
- Rolland C., Salinesi C. (2005). *Engineering and managing software requirements*. A. Aurum, C. Wohlin (Eds.), Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, p. 189-217.
- Soltanpoor R., Sellis T. (2016). Prescriptive Analytics for Big Data. *Databases Theory and Applications: 27<sup>th</sup> Australasian Data- base Conference, Sydney, M. A. Cheema, W. Zhang, L. Chang (Eds.)*, September 28-29, p. 245-256. Springer International Publishing.
- Touzani M., Anne L., Libourel T., Quinqueton J. (2015). Towards Geographic Requirements Engineering. In *KMIKS'15*. Hammamet, Tunisia.
- Touzani M., Ponsard C. (2016). Towards Modelling and Analysis of Spatial and Temporal Requirements. In *24th IEEE International Requirements Engineering Conference, RE 2016, Beijing, China, September 12-16*, p. 389-394.

- Touzani M., Ponsard C., Laurent A., Libourel Rouge T., Quinqueton J. (2016). Stratégies ouvertes d'intégration de règles métiers géomatiques dans un système d'information de gestion. In *SAGEO: Spatial Analysis and GEomatics*. Nice, décembre, France.
- van Lamsweerde A. (2009). *Requirements engineering - From system goals to UML models to software specifications*, Wiley.
- van Lamsweerde A., Letier E. (2000). Handling obstacles in goal-oriented requirements engineering. *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 26, n° 10, octobre, p. 978-1005.
- van Lamsweerde A., Letier E., Darimont R. (1998). Managing Conflicts in Goal-Driven Requirements Engineering. *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 24, n° 11, p. 908-926.
- Yu E. S. K., Mylopoulos J. (1997, avril). Enterprise modelling for business redesign: The i\* framework. *SIGGROUP Bull.*, vol. 18, n° 1, p. 59-63.
- Zimmermann K., Freksa C. (1996). Qualitative spatial reasoning using orientation, distance, and path knowledge. *Applied Intelligence*, vol. 6, p. 49-58.

