
Vers une modélisation et une analyse des exigences spatio-temporelles

**Mounir Touzani¹, Christophe Ponsard², Anne Laurent^{1,3},
Thérèse Libourel^{1,3,4}, Joël Quinqueton^{1,5}**

1. LIRMM - Université de Montpellier, CNRS, Montpellier, France

touzani@lirmm.fr

2. CETIC - Centre de recherche, Gosselies, Belgique

christophe.ponsard@cetic.be

3. Université de Montpellier (UM), Montpellier, France

laurent@lirmm.fr

4. Espace-Dev (UM, UAG, UR, IRD), Université de Montpellier, Montpellier, France

therese.libourel@umontpellier.fr

5. Université Paul-Valéry (UPVM), Montpellier, France

jq@lirmm.fr

RÉSUMÉ. L'Ingénierie des Exigences (IE) est une étape clef dans tout projet d'évolution d'un système d'information (SI). Les développements actuels, sur les systèmes mobiles par exemple, impliquent de facto une dimension spatio-temporelle, souvent réservée aux SI géographiques (SIG). Ceci nécessite des méthodes plus systématiques pour capturer et raisonner sur des exigences de nature spatio-temporelle. Cet article propose un cadre de référence permettant de systématiser l'identification, la structuration et le raisonnement sur ce type d'exigences. Ce cadre proposé intègre des contributions dans les domaines de l'IE et de la géomatique. Nous l'avons outillé et nous l'illustrons à travers une étude de cas de fusion de deux universités.

ABSTRACT. Requirements Engineering (RE) is a key step in any project aiming at evolving an information system (IS). Current developments, on mobile systems for example, involve a spatial and temporal dimension, often reserved to geographic IS (GIS). This requires more systematic methods for capturing and reasoning about the spatial and temporal nature of requirements. This paper proposes a framework for systematically identifying, structuring and reasoning about such requirements. This proposed framework includes contributions in the fields of RE and geomatics. We illustrate it through a case study: the merger of two universities.

MOTS-CLÉS : Ingénierie des Exigences, Exigences spatio-temporelles, Raffinement par les buts

KEYWORDS: Requirements Engineering, spatio-temporal requirements, goal-driven refinement

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 des 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 (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'échecs 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 très spécifiques à des domaines (exemple de critères 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 permettant 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 assez restreinte en IE (Touzani *et al.*, 2015) et ont surtout été étudiées au niveau de l'analyse de système 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 spatio-temporelle (ST). Dans le cadre de cet article, nous restons focalisé sur des systèmes d'information géographique, en particulier au niveau de l'étude de cas présentée. Notre priorité est la définition de notations simples mais avec un bon pouvoir d'expression mais sans lui associer de sémantique formelle à ce stade. Le point d'ancrage est une approche d'IE orientée buts, répondant déjà aux questions du "POUR-QUOI/COMMENT" (les buts et leur raffinement en exigences), du "QUOI" (les opérations) et du "QUI" (les agents). Nous abordons ici plus précisément et de manière

liée, les questions du "QUAND" et du "OÙ". Nous utilisons pour ceci deux axes de recherche : d'une part, nous explorons la dualité dimensions spatiales/temporelles, afin de transposer à la dimension spatiale des techniques d'IE déjà définies. D'autre part, nous prenons en considération des notations largement utilisées dans les SIG, et ce, afin de les intégrer dans les primitives d'IE et faciliter ainsi la capture d'exigences spatio-temporelles. Nous avons utilisé le référentiel KAOS d'IE orienté buts (Lamsweerde, 2009) et avons réalisé un prototype à l'aide de l'outil Objectiver (Respect-IT, 2005). Cependant, nos résultats peuvent être appliqués à d'autres référentiels et des domaines plus large que la pure information géographique.

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'entité de l'espace ainsi que tout l'aspect organisationnel entraînant des changements ST majeurs au niveau des différentes composantes et directions déjà existantes des deux universités.

Cet article est organisé comme suit : dans la section 2 nous dressons un état de l'art autour de la dimension spatio-temporelle 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 de fusion de deux universités, qui sera utilisée pour illustrer notre propos tout au long de l'article. La section 4 présente le cadre de référence unifié en termes de notations ainsi qu'une proposition d'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. Enfin, la section 6 conclut par une analyse critique des apports de notre contribution, de ses limitations et propose quelques perspectives.

2. État de l'art

Dans cette section, nous passons en revue les approches spatio-temporelles 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 termes d'espace et de temps.

2.1. L'approche spatio-temporelle

2.1.1. Spécificités de l'information géographique

Selon (Becker, al, 23-27 juillet 1990), l'information géographique (IG) décrit un objet, un phénomène ou encore une action du monde réel. Elle fournit, pour chaque objet concerné, des informations sur le nom, le type, les caractéristiques thématiques,

la forme, la localisation géographique ou même des informations relatives à des objets en relation de proximité.

L'IG est devenue la matière première qui a permis le développement des Systèmes d'Information Géographique (SIG) (Laurini, Thompson, 1992). Les SIG sont cependant restés confinés à ce domaine et souvent réservés à des utilisateurs avertis.

Les logiciels SIG sont, quant à eux, spécifiques à des travaux d'analyse spatiale et de cartographie 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. Par exemple : *cette personne travaille à côté du point de rassemblement de la cafétéria.*

2.1.2. Relations spatio-temporelles

L'analyse spatio-temporelle 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) (p.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.

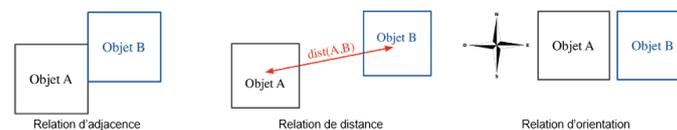


Figure 1. Relations spatiales entre deux objets

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 sur plusieurs instants voire périodiques.

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-Lacayrelle, AI, 2007) a décrit dans son article trois types de relations : l'adjacence (p.ex. autour du 15 novembre 2015), l'inclusion (p.ex. au milieu de l'année) et la distance (p.ex. deux semaines avant la fin de l'année). La figure 2 représente les relations temporelles qui peuvent exister entre deux objets.

Les notions ST peuvent bien sûr être toutes considérées simultanément. La notion du "mouvement" reste à notre sens la plus évidente, représentant une succession de localisations spatiales qui évoluent dans le temps. 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

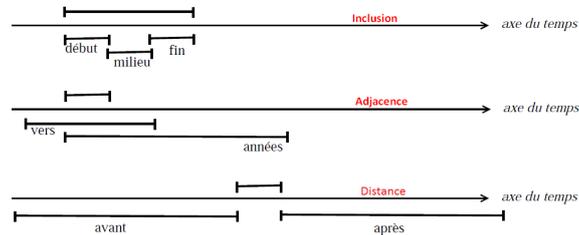


Figure 2. Relations temporelles entre deux objets

régions en France. Des typologies complètes de concepts ST pouvant être combinées sont détaillées notamment dans (Claramunt, Jiang, 2001 ; Mathian, Sanders, 2014).

2.1.3. Formalismes de représentation des objets spatio-temporels

En termes de modélisation, l'objectif des chercheurs a toujours été de rendre l'IG moins complexe (Zoghلامي, 2013), 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.

Par exemple, une route peut être considérée comme un objet linéaire au sein d'un graphe si le but est de gérer le trafic ou comme un volume si le but est de gérer la répartition de réseaux d'eau et de gaz. Deux modes de représentation interne existent selon la perception de l'IG : le mode raster (ensemble de pixels, généralement utilisés pour représenter une variable continue telle que la température) et le mode vecteur (ensemble de points, lignes et polygones, généralement utilisés pour décrire des objets avec une géométrie).

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

Figure 3. Exemples de pictogrammes spatiaux et temporels

La représentation des objets spatiaux nécessite une modélisation adaptée aux phénomènes spatio-temporels. En ce sens, des formalismes de représentation spatio-temporelle, via l'utilisation de pictogrammes spatiaux et temporels dans les modèles, ont été proposés et affinés par Bédard depuis Modul-R puis PVL (Plugin for Visual Language) (Bédard, Larrivée, 2008) et son évolution plus récente PictograF¹. 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 3 présente des pictogrammes spatiaux et temporels.

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 (IEEE1990, 1990).

Pour structurer les besoins relatifs aux systèmes à développer, un processus d'IE peut être décomposé en quatre étapes de développement: élucidation, analyse, spécification et validation. Ces étapes sont coordonnées par un processus de gestion des exigences. Nous nous limiterons ici aux étapes d'élucidation et 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). Un **but** est un objectif que le système considéré devrait atteindre. Les formulations de buts se réfèrent à des propriétés destinées à être assurées (Lamsweerde, 2009). Les buts peuvent être exprimés à différents niveaux d'abstraction, depuis des buts stratégiques de haut niveau, comme "réaliser la fusion des universités avec succès" jusqu'à des buts opérationnels tels que "planifier l'affectation des amphithéâtres pour les cours du semestre" (voir figure 5). 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 nécessaires) soit "OU" (un des fils suffisant : c.-à-d. des alternatives possibles). A partir d'un but donné, la question du « POURQUOI » permet d'identifier le but père, tandis que la question du « COMMENT » permet d'identifier un ensemble de buts fils permettant d'atteindre ce but. La décomposition s'arrête quand on atteint un but contrôlable par un **agent**, c.-à-d. qui répond à la question « QUI » déterminant la responsabilité. Ils correspondent soit à des **exigences** sur le logiciel soit à des **attentes** sur le comportement d'agents de l'environnement. Un exemple d'exigence concret 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 du droit d'accès". Des propriétés du domaine peuvent également entrer en ligne de compte pour justifier un raffinement. De telles propriétés sont intrinsèquement valables. Un exemple est la propriété spatio-temporelle suivante : "un objet physique ne peut se trouver qu'à un endroit à un instant donné".

La figure 4 représente l'articulation de ces concepts au sein du méta-modèle KAOS,². Il est composé des quatre sous-modèles suivants: 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

2. KAOS : Keep All Objectives Satisfied

sur les conflits entre les buts ainsi que des 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. Ces responsabilités 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. Nous utilisons ici le diagramme de flux fonctionnel.

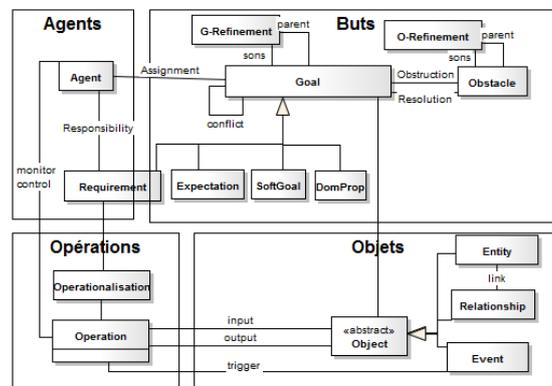


Figure 4. Le méta-modèle KAOS

Seule la dimension temporelle est explicitement traitée par les méthodes d'IE orientées buts, KAOS en particulier. Elle est présente sous les aspects suivants :

- les propriétés temporelles d'un but peuvent être exprimées en utilisant des mots-clés 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 ou son échéance doit être respectée. Ces *patterns* ont été répertoriés par (Dwyer *et al.*, 1999). Sur cette base, (Mahaux, 2004) a proposé un système de spécification allégée, basée sur un ensemble structuré de patrons de formulation. Cela encadre et guide la spécification de contraintes temporelles de façon cohérente, non-ambiguë, expressive et qui reste aisée à comprendre.

- la logique temporelle peut être utilisée pour donner une sémantique mathématique précise, permettant de mettre en œuvre des outils de vérification automatique ou de preuve de modèles. Dans ce travail, nous ne prenons pas en considération ce niveau formel très précis mais peu aisé à comprendre et qui peut être "occulté" par les patrons décrits au point précédent. A titre d'exemple, l'exigence de contrôle d'accès peut s'exprimer ainsi : $\forall u : User, c : AccessControl \cdot \square(authorised(u, c) \rightarrow \bullet open(c))$. Les différents prédicats sont des entités, relations ou attribut du modèles objets. Ils peuvent être combinés à des opérateurs temporels : \square signifie "tout le temps" et \bullet indique que l'ouverture se produit à l'état suivant.

– 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 sont prouvés une fois pour toutes et permettent typiquement de découvrir des sous-buts manquants. Une bibliothèque très élaborée de raffinements a été proposée par (Darimont, Lamsweerde, 1996).

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

Notre étude de cas est largement inspirée de la fusion récente des Universités de Montpellier 1 et 2. 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 2015³. Ce processus est encore en cours en 2016.

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. Les objectifs stratégiques auquel la fusion répond est de renforcer l'offre de formation, d'augmenter le potentiel de recherche par de multiples synergies entre les laboratoires et d'accroître le rayonnement international, sur cette base des buts plus précis de regroupement de services, unification de l'infrastructure et d'intégration des programmes de cours sont définis et illustrés à la figure 5. Certains de ces buts seront raffinés par la suite.

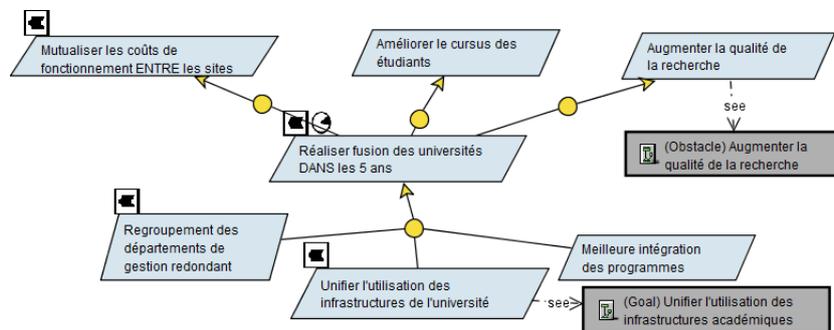


Figure 5. Buts stratégiques de la fusion illustrés dans l'outil Objectiver étendu

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,...) ayant des missions similaires et qui devront mettre en commun leurs activités, voire réunir leurs compétences en un seul lieu.

3. A noter que d'un point de vue spatio-temporel, 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.

– 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. Enrichissement des modèles d'IE avec des notations spatiales et temporelles

Dans cette section, nous présentons les extensions ST aux modèles des objets et des buts de la méthode KAOS. Ces extensions ont été implémentées et expérimentées à l'aide de l'outil "Objectiver" offre des possibilités d'extension à la fois de son méta-modèle et des visualisations par l'utilisation de connecteurs (ou plugins). Le plugin développé est disponible en ligne⁴.

4.1. Extension du modèle objet

Pour introduire les notions spatiales et temporelles dans le modèle objet, nous nous sommes basés sur le système de notations "PictograF". Ces notations développées depuis une vingtaine d'années ont atteint un bon niveau de maturité et de standardisation, notamment au niveau de leur intégration au moyen de stéréotypes UML. Leur valeur ajoutée au niveau de l'IE est de permettre de capturer facilement et systématiquement des propriétés du domaine qui seraient spécifiées de manière textuelle et généralement ponctuelle à des raffinements au sein du modèle. Ces propriétés seront utiles pour mener la démarche de raffinement de buts et vérifier leur cohérence et complétude.

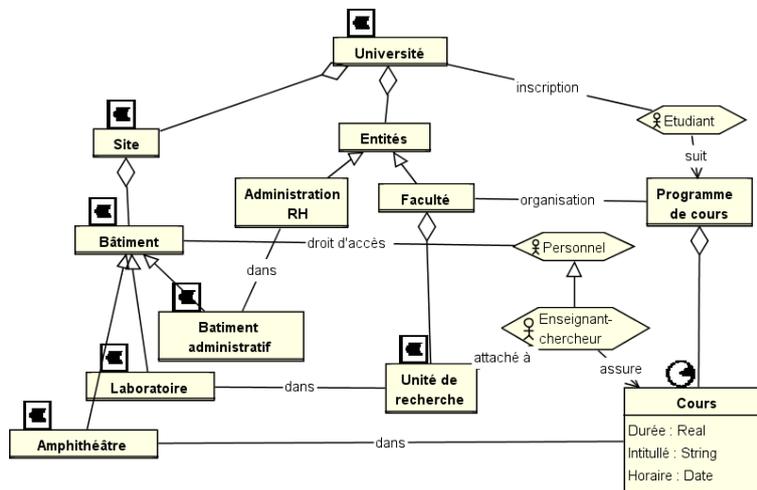


Figure 6. Modèle objet du domaine

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

La figure 6 illustre l'application de ces notations à notre exemple. La partie gauche du diagramme représente une structure de décomposition d'entités de nature spatiale (site, bâtiment, amphithéâtre, etc.). A noter que la relation d'agrégation prend également un sens spatial quand elle est associée à des entités de cette nature. La partie centrale représente des structures de l'organisation (facultés, unités de recherches, etc.) situé dans ces espaces. Enfin la partie de droite présente les agents humains "étudiant" et "enseignant-chercheur" ainsi que les relations qu'ils entretiennent via les activités de cours. Ces dernières ont une dimension temporelle (durée) mais ont un lien direct avec la dimension spatiale via l'amphithéâtre dans lequel elles sont assurées.

4.2. Extension du modèle des buts

Les notations "PictograF" peuvent se généraliser aux buts : un but pourra être marqué comme ayant une dimension spatiale et/ou temporelle spécifique si :

- des éléments spatiaux et temporels qu'il 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. On peut rappeler 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 3h en déplacement entre différents sites".

Au niveau spatial, nous nous sommes limité à un sous-ensemble de notations PictograF. Par simplicité, l'idée est de rester le plus souvent possible sur une abstraction 2D. Par exemple, à ce stade, nous n'avons pas considéré le cas des éléments linéaires dans un monde 3D. Au niveau temporel, par contre, nous avons ressenti le besoin d'étendre les notations PictograF sur base de la mise en correspondance avec les patrons de formulation déjà définis :

- Les buts de progrès "**Achieve**" expriment généralement l'occurrence d'un événement spécifique qui peut être exprimé par un pictogramme d'événement ponctuel mais de nombreux systèmes peuvent également exprimer une répétition pour laquelle nous avons introduit un pictogramme de fréquence \otimes . On pourra ainsi exprimer une exigence telle que "Les dispositifs de contrôles d'accès doivent faire l'objet d'une maintenance TOUS les ans".

- Les buts d'assurance "**Maintain**" quant à eux expriment une propriété qui doit être vraie tout le temps ou de manière plus précise sur une durée bien déterminée (p.ex. "Aucun accès aux étudiant n'est autorisé entre 22h et 7h du matin"). Le second cas est couvert par le pictogramme de durée. Pour le premier cas qui est important pour exprimer des propriétés de sûreté de fonctionnement, nous avons introduit un cercle "plein" qui est son extension naturelle \bullet . A noter que ce symbole ne doit pas être confondu avec le celui utilisé au sein des formules de logique temporelles qui signifie lui "l'instant d'après". Le contexte d'utilisation est cependant différent.

Des patrons de formulation peuvent être introduits pour aider à formuler des exigences spatiales. Certains principes de dualité peuvent être appliqués pour les mettre en évidence. Le tableau 1 illustre les principes que nous avons identifiés.

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

5. Raisonnement sur les exigences spatiales et temporelles

L'enrichissement des modèles d'IE avec les notations ST décrites dans la section précédente, permet d'en améliorer la **précision**. Il permet aussi d'envisager de nouvelles formes de raisonnement apportant des bénéfices supplémentaires en termes de **complétude** pour guider dans la découverte systématique d'exigences via des techniques de raffinement de buts spécifiques. Par ailleurs, ceci permet aussi d'aider à spécifier un système qui sera **robuste** face à des risques liés aux propriétés ST (exemple : une échéance peut causer un risque de retard, une contrainte de capacité peut causer un risque d'indisponibilité). Enfin on considérera aussi dans cette section des stratégies de **délégation de responsabilité d'agents** prenant en compte des contraintes ST.

5.1. Raffinement de buts guidé par les exigences spatio-temporelles

On peut considérer un raffinement dirigé par la dimension spatiale et/ou temporelle, avec des interactions possibles entre ces deux 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, Lamsweerde, 1996 ; 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 pour assurer une certaine continuité des services. La figure 7 illustre un jalon

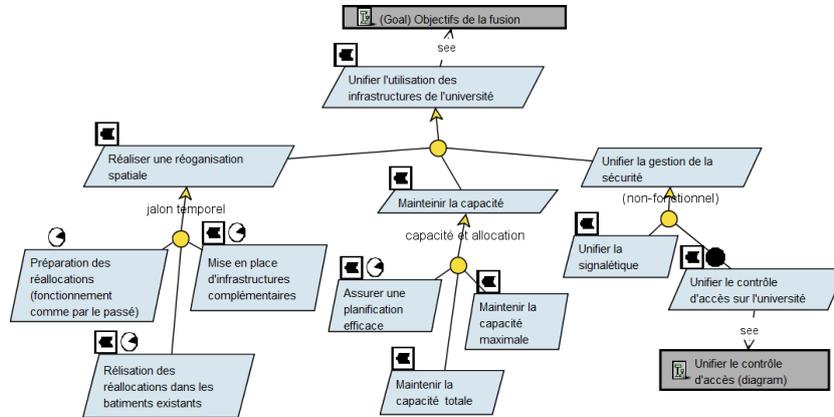


Figure 7. Raffinement du but d'unification de l'utilisation des infrastructures

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 "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 8 illustre cette propagation plus concrètement sur le sous-but d'unification de la sécurité.

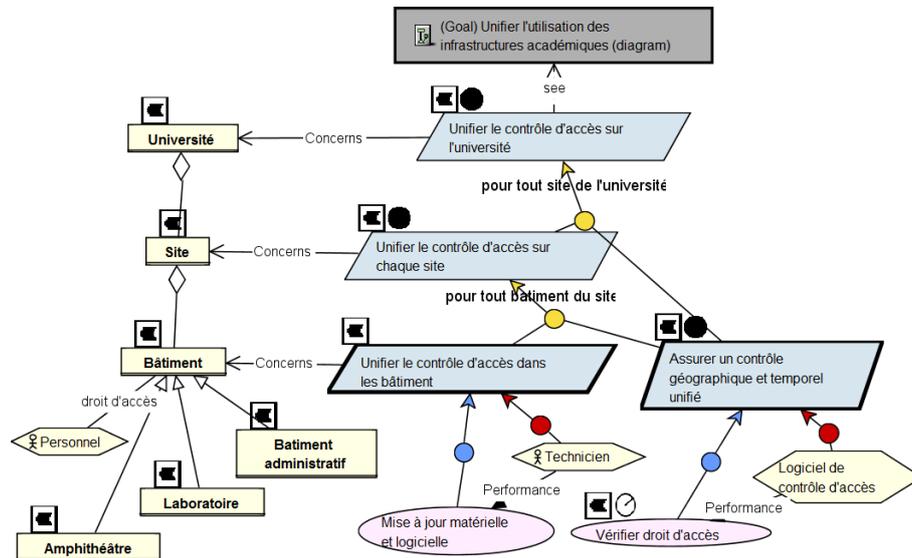


Figure 8. Propagation d'une exigence temporelle sur une structure spatiale

La 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).

– **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 acceptable). 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 présent dans la figure 9.

5.2. Analyse d'obstacles selon des critères spatio-temporels

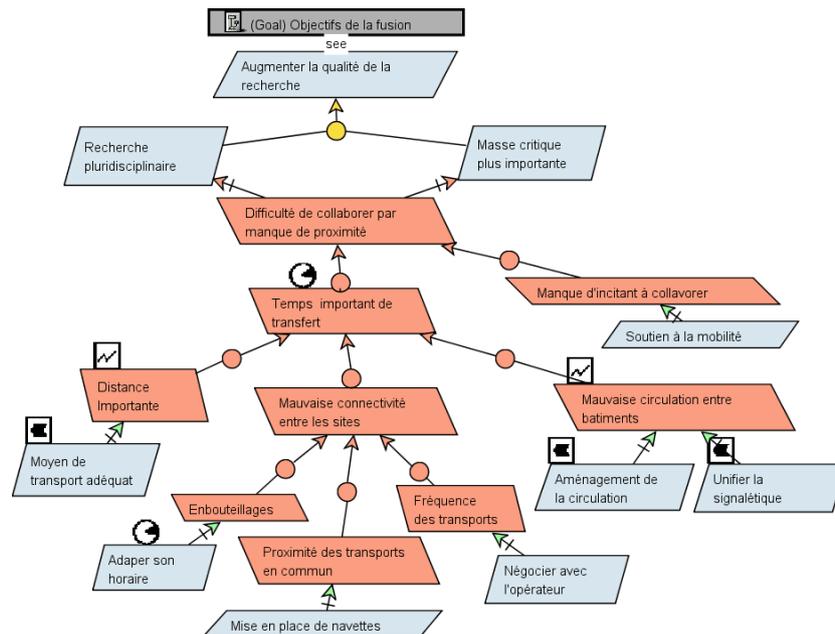


Figure 9. Analyse d'obstacles spatiaux et temporels

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 (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 altérations des contraintes exprimées par l'exigence, telle que l'altération d'une information reçue pour différentes causes et qui 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 des exigences ST plus réaliste.

La figure 9 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 (bouchon, attente d'une connexion), la nécessité de faire un détour, etc. Au niveau spatial, le terme d'obstacle peut reprendre son sens premier : l'absence de connexion physique entre deux bâtiments ou des caractéristiques les rendant impraticables pour des personnes à mobilité réduite (pente trop forte, escalier, etc.) (Ponsard, Snoeck, 2006).

6. 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, notre contribution propose d'établir des fondations pour un cadre unifié de modélisation d'exigences spatio-temporelles. 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 de développement des exigences en favorisant une bonne communication entre les parties prenantes via une vision explicite et graphique.

Nos travaux ont été appliqués à une étude de cas concrète et sont supportés par un outil pointu du domaine. Ce travail ne prétend cependant pas être exhaustif : à ce stade, il s'est principalement centré sur la définition d'un cadre unifié et sa validation. Afin d'être utilisable systématiquement, nos travaux se poursuivent dans les directions suivantes :

- 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). Le défi est cependant d'arriver à "cacher" ces logiques complexes derrière notre système de notations graphiques et patrons de formulation.

– Enfin, nous considérons l'adaptation 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.
- Becker R., al. (23-27 juillet 1990). Network visualization. *4th International Symposium on Spatial Data Handling, Zurich, Switzerland*.
- Bédard Y., Larrivée S. (2008). Modeling with pictogrammic languages. *Shekar S, Xiong, H. (ed(s)), Encyclopedia of Geographic Information Sciences*, 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.
- Darimont R., Lamsweerde A. van. (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.
- Darimont R., Ponsard C. (2015). Supporting quantitative assessment of requirements in goal orientation. In *23rd IEEE International Requirements Engineering Conference*.
- Dwyer M. B., Avrunin G. S., Corbett J. C. (1999). Patterns in property specifications for finite-state verification. In *Proc. of the 21st int. conf. on soft. eng.* ACM.
- 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 gis - ordered time scales. In *Waugh, T. C. et (eds.), R. C. H., éditeurs : Proc. of the 6th Int. Symposium on Spatial Data Handling*.
- 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^{re} éd.). Springer Int. Publishing.

- IEEE1990. (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.
- Kosters G., Pagel B.-U., Six H.-W. (1996). Geoooa: object-oriented analysis for geographic information systems. In *Proc. of the 2nd int. conf. on requirements engineering*, p. 245-253.
- Lamsweerde A. van. (2009). *Requirements engineering - from system goals to UML models to software specifications*. Wiley.
- Lamsweerde A. van, Letier E. (2000, octobre). Handling obstacles in goal-oriented requirements engineering. *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 26, n° 10, p. 978–1005.
- Laurini R., Thompson D. (1992). *Fundamentals of geographic information systems*. Academic Press Limited. 0-12-438380-7.
- Le Parc-Lacayrelle A., Al. (2007). *Entreposage de documents et données semiestructurées*. Hermes, Lavoisier.
- Ligozat G. (1998). Reasoning about cardinal directions. *Journal of Visual Languages and Computing*, vol. 9, n° 1, p. 23 - 44.
- 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.
- 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., Snoeck V. (2006, July). Objective accessibility assessment of public infrastructures. In *Computers helping people with special needs, 10th int. conf. linz, austria*, p. 314–321.
- Pullar D. V., Egenhofer M. J. (1988). Towards the defaction and use of topological relations among spatial objects. In *Proc. of the 3rd 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.
- Respect-IT. (2005). *Objectiver Requirements Engineering Tool*. <http://www.respect-it.com>.
- Rolland C., Salinesi C. (2005). Engineering and managing software requirements. In A. Aurum, C. Wohlin (Eds.), p. 189–217. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- Touzani M., Anne L., Libourel T., Quinqueton J. (2015, avril). Towards Geographic Requirements Engineering. In *KMIKS'2015*. Hammamet, Tunisia.
- Zimmermann K., Freksa C. (1996). Qualitative spatial reasoning using orientation, distance, and path knowledge. *Applied Intelligence*, vol. 6, p. 49–58.
- Zoghlami A. (2013). *Modélisation et conception de systèmes d'information géographique gérant l'imprécision*.