

Utilisation des standards du web sémantique pour la représentation et la gestion des connaissances spatio-temporelles

Une revue systématique de la littérature

Gérald Rocher

Master 2 IFI parcours IAM

Université de Nice Sophia-Antipolis

rocher.gerald@gmx.fr

Résumé

Dans les systèmes informatiques ambiants, les applications logicielles sont composées à partir d'une sélection de services logiciels intégrés à des dispositifs et des objets communicants de notre vie quotidienne. Ces applications logicielles évoluent dans un environnement physique hautement dynamique où la disponibilité des dispositifs, des objets et de leurs services logiciels évolue dans le temps et dans l'espace. Il est donc primordial que le mécanisme de sélection des services logiciels tienne compte de la dynamique spatio-temporelle des dispositifs et des objets.

Dans ce cadre, l'utilisation des standards du web sémantique est envisagée pour la représentation et la gestion des connaissances sur les services logiciels ainsi que leur évolution dans le temps et dans l'espace. Une revue systématique de la littérature a donc été menée sur ce sujet. La stratégie de recherche a permis d'identifier 24 publications considérées comme particulièrement pertinentes. Ce document présente et classe les différentes approches identifiées avec, pour chacune d'elle, leurs avantages et leurs inconvénients.

Mots clefs

RDF; OWL; Spatio-temporal knowledge representation and management.

1. INTRODUCTION

L'évolution technologique ces dernières années a permis la miniaturisation des composants informatiques de telle sorte que ceux-ci se trouvent aujourd'hui intégrés à une multitude d'objets et de dispositifs de notre vie quotidienne. Cette évolution technologique est à la base des SI dits "ambiants" qui visent à s'intégrer à des environnements physiques hautement dynamiques et hétérogènes composés d'une multitude d'utilisateurs, de dispositifs et d'objets communicants. Les applications logicielles, dans ces SI, sont composées à partir des services logiciels mis à leur disposition par les dispositifs et les objets dont la disponibilité peut évoluer dans le temps et dans l'espace et qui forment un contexte opérationnel. Les applications logicielles doivent donc s'adapter dynamiquement aux changements induits par les problématiques de mobilité et de variabilité de l'environnement physique (context aware computing).

D'après [1], La dimension temporelle caractérise les éléments du contexte dont l'existence est liée à un moment donné et la dimension spatiale, caractérise la localisation qui permet, par exemple, de décrire l'emplacement des utilisateurs, des dispositifs ou des objets. Les capacités d'adaptation d'une application "sensible au contexte" dépendent donc du modèle de contexte utilisé [2] et sa capacité à représenter et à gérer la dynamique spatio-temporelle des services logiciels.

Cette capacité d'adaptation est primordiale pour assurer la cohérence des applications logicielles avec le contexte opérationnel et se décompose en trois étapes distinctes qui forment un cycle d'adaptation dynamique:

1. Découverte des services logiciels disponibles et enrichissement d'une base de connaissance (BdC) avec leurs propriétés fonctionnelles,
2. Sélection des plus pertinents à partir de règles qui génèrent des requêtes sur la BdC,
3. Composition de l'application à partir de règles sur les services logiciels sélectionnés (composition de services).

Conceptuellement, deux types d'adaptations peuvent être considérés:

- a) A chaque instant l'application a une vue photographique du contenu de la BdC, synchronisée dans le temps et dans l'espace. Lorsque des requêtes sont émises, la disponibilité des services logiciels et la cohérence de la BdC avec le contexte opérationnel sont considérées comme implicites et acquises.
- b) L'ajout d'une représentation spatio-temporelle des connaissances sur les services logiciels permet de raisonner sur leur disponibilité dans le temps et dans l'espace. Lorsque des requêtes sont émises, la disponibilité des services logiciels et la cohérence de la BdC avec le contexte opérationnel sont considérées comme explicites.

La partie suivante expose les motivations qui justifient la mise en place du deuxième type d'adaptation. La troisième partie détaille les objectifs de cette revue systématique de la littérature. La quatrième partie décrit les méthodologies de recherche qui ont été appliquées. Les résultats sont présentés et commentés dans la cinquième partie. Enfin, la dernière partie clos ce travail en présentant une synthèse.

2. MOTIVATIONS

Comme cela a été expliqué précédemment, les services logiciels, peuvent ne pas être disponibles à chaque instant.

2.1.1 Scénario 1 : la dimension temporelle

Par exemple, un *lave linge*, dans un but d'économie d'énergie, ne peut être utilisé que dans certaines tranches horaires (ou *intervalles de temps*). Le premier type d'adaptation, à partir d'une vue photographique de la BdC, va autoriser le déploiement de l'application permettant le contrôle du *lave-linge une minute* avant la fin de la disponibilité du service logiciel associé. Le deuxième type d'adaptation va permettre de raisonner sur la disponibilité du service logiciel dans le temps et ne pas autoriser le déploiement de l'application permettant de contrôler le *lave-linge*.

2.1.2 Scénario 2 : la dimension spatiale

La localisation des services logiciels a une grande importance dans le processus d'adaptation de l'application à son contexte.

Prenons l'exemple d'un agent de contrôle d'un réseau de distribution d'eau. Il est muni d'une *télécommande* de contrôle et de pilotage d'ouverture et de fermeture de *vannes*. Durant son parcours il est possible que plusieurs *vannes* soient détectées en même temps. Le premier type d'adaptation, à partir d'une vue photographique de la BdC, va considérer toutes les *vannes* disponibles autour de l'agent. Le deuxième type d'adaptation va permettre de raisonner sur la position de l'agent par rapport aux *vannes* disponibles et sélectionner celle qui est *la plus proche*. L'application déployée alors permettra à l'agent de piloter l'ouverture ou la fermeture de cette vanne à partir de la *télécommande*.

3. OBJECTIFS DE CETTE REVUE

La BdC utilisée dans le cycle d'adaptation dynamique Conquer [3] se base sur les standards du web sémantique (RDF/RDFS, OWL et SPARQL) pour représenter les connaissances sur les services logiciels. Le but de cette revue systématique de la littérature est d'explorer et de regrouper les approches qui ont été étudiées et présentées dans la littérature qui permettent, à partir des standards du web sémantique, de représenter et de *gérer la dynamique spatio-temporelle des connaissances*.

4. METHODES DE RECHERCHE

4.1 Etapes de sélection des publications

Cette recherche a été effectuée en suivant le guide de Khalid S Khan [4] pour la conduite d'une revue systématique de la littérature en cinq étapes distinctes définies comme suit:

1. La définition des questions de recherche,
2. L'identification des publications pertinentes,
3. L'évaluation de la qualité des publications,
4. La synthèse des résultats des recherches,
5. L'interprétation des résultats.

Toutes les étapes ont été suivies dans le cadre de cette revue systématique de la littérature dont l'objectif est d'apporter une réponse aux questions suivantes:

Q1: *Comment représenter des connaissances sémantiques spatio-temporelles en utilisant les standards du web sémantique?*

Q2: *Comment contextualiser la gestion d'une BdC?*

4.2 Sources et stratégies de recherche

La recherche a été effectuée sur les publications en langue Anglaise et Française disponibles en ligne à partir de bases documentaires électroniques:

- IEEEExplore (www.ieeexplore.ieee.org/Xplore/)
- ACM Digital library (www.portal.acm.org/dl.cfm)
- SpringerLink (www.springerlink.com/)
- Elsevier Science Direct (www.sciencedirect.com/)
- Citeseerx (<http://citeseerx.ist.psu.edu>)
- HAL (<https://hal.archives-ouvertes.fr/>)
- Researchgate (<http://www.researchgate.net/>)
- Google Scholar (<http://scholar.google.com.au/>)

Dans un premier temps, les publications ont été recherchées selon les mots clefs définis dans la Table 1. L'étude des titres des publications retournées a permis de conserver 63 publications. La lecture des résumés de ces 63 publications a été alors utile pour déterminer des doublons et s'assurer de leur pertinence. Cette troisième étape a permis de conserver 37 publications. Enfin, pour la dernière étape, les publications ont été lues pour confirmer leur

pertinence et celle avec un faible nombre de citations (< 5) ont été retirées de la liste. Par ailleurs, la recherche a été complétée par l'étude des références citées par les publications retenues et qui n'avaient pas été détectées. Enfin, des recherches ciblées sur les concepts énoncés dans les publications ont été effectuées. Au final, il reste 24 publications considérées comme pertinentes.

Table 1. Termes utilisés pour la recherche

Catégorie	Mots clefs
Représentation des connaissances sémantiques spatio-temporelles à partir des standards du web sémantique	("Temporal" OR "Spatial") AND ("RDF" OR "OWL") AND ("Representation" OR "Modelisation")
Contextualisation et gestion de la BdC	("Contextualization" OR "Dimension") AND ("Ontology" OR "Knowledge" OR "Database")

5. RESULTATS

L'étude des publications sélectionnées permet de procéder à une classification des résultats en plusieurs catégories qui sont détaillées ci-après.

5.1 Les problématiques soulevées

Dans le domaine du web sémantique, les langages de représentation des connaissances tels que OWL (Web Ontology Language) sont utilisés pour construire des ontologies. Les ontologies offrent un moyen de représentation de concepts, de leurs propriétés et de leurs relations [29]. Cependant, la syntaxe de OWL limite les relations à des relations binaires ce qui ne permet pas la représentation de propriétés dynamiques qui nécessitent des relations ternaires (avec le temps, l'espace) [5]. Les publications étudiées apportent des solutions à ces problématiques que nous allons étudier dans le prochain paragraphe.

5.2 Les approches identifiées

5.2.1 La représentation des connaissances

La base de la représentation des connaissances à partir des standards du web sémantique est l'utilisation d'ontologies qui sont représentées à partir de la famille des langages OWL (OWL-Full, OWL-DL et OWL-Lite). Différentes ontologies sont spécialisées dans la représentations des connaissances temporelles [6] ou spatio-temporelles [7,8,9,10]. Ces ontologies mettent en oeuvre des propriétés pour définir la sémantique du temps et de l'espace que nous allons détailler dans le paragraphe 5.2.1.1, et des mécanismes pour les représenter dans les ontologies que nous allons présenter succinctement dans le paragraphe 5.2.1.2.

5.2.1.1 Sémantique temporelle et spatiale

L'étude des publications a permis d'identifier des propriétés qui sont utilisées pour définir la sémantique des connaissances temporelles et spatiale :

1. Sémantique temporelle

Représentation d'instant et d'intervalles de temps permettant de définir des périodes de validité des connaissances (timespan). Les 13 relations d'Allen [11] sont alors définies pour spécifier les relations entre les intervalles de temps.

Relation	Illustration	Interprétation
$X < Y$ $Y > X$		X se déroule avant Y
$X_m Y$ $Y_{mi} X$		X rencontre Y (<i>meets</i>) (<i>i</i> signifie <i>inverse</i>)
$X_o Y$ $Y_{oi} X$		X chevauche Y (<i>overlaps</i>)
$X_s Y$ $Y_{si} X$		X démarre Y (<i>starts</i>)
$X_d Y$ $Y_{di} X$		X se déroule pendant Y (<i>during</i>)
$X_f Y$ $Y_{fi} X$		X termine Y (<i>finishes</i>)
$X = Y$		X est égal à Y

Illustration 1: Les 13 relations d'Allen

La notion d'intervalle de temps est importante en particulier pour répondre à la problématique posée par le scénario#1 au paragraphe 2.1.1.

2. Sémantique spatiale

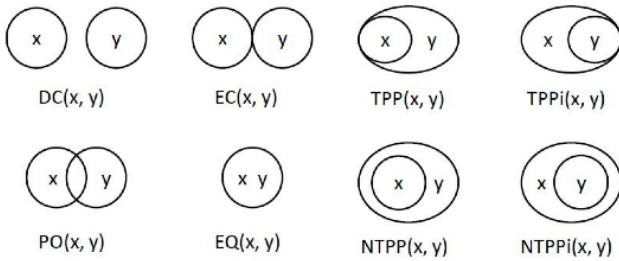


Illustration 2: Relations RCC-8 possibles entre deux régions x & y

Représentation d'entités spatiales (points, régions), de relations qualitatives pour la représentation de topologies (Region Connection Calculus RCC-8 [12], modèle 9-Intersections [13]), des directions (N, S,E,O,NO,NE,SE,SO) et quantitatives (A 10km,...).

La notion de région est importante en particulier pour répondre à la problématique soulevée par le scénario#2 au paragraphe 2.1.2.

5.2.1.2 Mécanismes de représentation

Différents mécanismes sont utilisés pour représenter les aspects temporels et/ou spatiaux dans les ontologies. Il ne ressort pas de mécanismes idéal, chacun ayant des avantages et des inconvénients qui vont être discutés par la suite.

1. Temporal-RDF

Cette approche consiste à ajouter un label temporel aux triplets RDF qui indique l'intervalle temporel durant lequel ces derniers sont valides [14,8]. L'inconvénient de cette approche est qu'il n'est pas possible de représenter des relations entre intervalles de temps (Allen) et qu'elle nécessite un langage de requêtes *ad-hoc* [14]. Cette approche a cependant l'avantage de ne pas engendrer de nouveaux objets en cas de modifications temporelles fréquentes (Pas de redondance).

2. Versioning

Le versioning d'ontologie suggère que l'ontologie a différentes versions au cours du temps [15]. A chaque changement, une nouvelle version de l'ontologie est créée. Cette approche a donc l'inconvénient de générer de la redondance. Par ailleurs, la recherche de tous les instants pour lesquels une relation est valide est complexe et coûteuse en temps puisqu'il est nécessaire de parcourir les différentes versions de l'ontologie.

3. Réification

Le mécanisme de réification des triplets RDF permet d'écrire des déclarations à propos d'autres déclarations [16]. Par exemple, si la relation R est vraie entre les objets A et B à l'instant t, cela peut être exprimé par un nouvel objet R(A,B,t). L'inconvénient de cette approche est qu'un nouvel objet est créé dès qu'une relation temporelle doit être représentée. Par ailleurs, la relation est représentée comme un objet et non pas comme une relation et il n'est alors pas possible de raisonner sur celle-ci.

4. Named graphs

L'approche des graphes nommés ("named graphs") [28] permet de contextualiser les connaissances [17,18]. Par exemple, le graphe nommé va représenter le contexte temporel d'une propriété par l'ajout d'un triplet dans le graphe représentant cette propriété. Le graphe RDF principal (*main*) contient la définition des intervalles de validité temporelle pour chaque graphe nommé ce qui permet de connaître la validité temporelle des propriétés référencées dans ces graphes. L'avantage de cette approche est qu'il s'agit d'un standard du web sémantique et qu'il peut être utilisé, sans modification, avec RDF et SPARQL. De plus, cette approche ne se limite pas à la représentation et à la gestion de la dimension temporelle des propriétés, en fait il est possible de gérer des contextes, les graphes nommés étant des sous-graphes identifiés.

5. 4D-Fluents

L'approche 4D-Fluents [10,19,20,21] représente une ontologie qui permet une approche perdurantiste de la représentation d'entités évoluant dans le temps (un objet perdurant est composé de parties temporelles qui ne persistent que pendant un instant). La représentation des entités est décomposée en *timeslices*, la représentation complète de l'entité au cours du temps correspondant à la somme de tous les *timeslices*. La représentation du changement des propriétés d'un objet est réalisée à travers l'utilisation de *fluents*, propriétés des *timeSlices*, qui sont valides uniquement durant un certain laps de temps. Ce type d'ontologie implique d'une part des requêtes SPARQL complexes et, d'autre part, les relations d'Allen entre intervalles ne sont pas représentées [10] (Cette ontologie est donc utilisée en conjonction avec l'ontologie OWL-Time [30]).

Des approches ontologiques hybrides mettent en oeuvre les mécanismes présentés précédemment pour représenter les aspects temporels et munissent les ontologies avec des classes et des relations qui permettent de définir les aspects spatiaux [10,8]. Certains mécanismes de représentation présentés précédemment permettent de représenter les aspects temporels et spatiaux. Il s'agit par exemple de l'approche 4D-Fluents, dans laquelle la localisation des objets dynamique peut être représentée par un *fluent* encore le cas de l'approche à partir de graphes nommés, avec laquelle les propriétés spatiales d'un objet peuvent être contextualisées.

Ce rapide tour d'horizon nous permet de conclure que la représentation des connaissances dynamiques spatio-temporelles à partir des standards du web sémantique est donc possible.

Mais cette représentation des connaissances temporelles et spatiales au travers d'ontologies n'est cependant pas suffisante sans la définition de règles et d'opérateurs *ad-hoc* pour:

1. Raisonner sur ces connaissances et inférer de nouvelles relations,
2. Faire des requêtes sur ces connaissances.

C'est ce que nous allons maintenant étudier dans les paragraphes 5.3 et 5.4.

5.3 Le raisonnement

Le processus de raisonnement consiste à déduire de nouveaux faits à partir des connaissances déjà acquises à partir de règles d'inférence. Les langages RDFS (RDF Schéma) et OWL fournissent un support pour le raisonnement en définissant des hiérarchies de classes et des relations entre elles et les propriétés.

Cependant, le fait d'ajouter des classes et des relations représentant les aspects temporels et/ou spatiaux dans les ontologies nécessite de définir de nouvelles règles d'inférences et des prédicats qui n'existent dans les standards du web sémantique.

De fait, Il ressort des publications étudiées l'utilisation de différents langages pour la définition de ces nouvelles règles et prédicats.

L'approche "event calculus" est mise en œuvre pour définir de nouveaux prédicats utilisés dans l'ontologies [22] ou SWRL (Semantic Web Rule Language) [10,16,23] pour la définition de règles à partir de tables de composition définissant les relations d'Allen pour l'aspect temporel. L'approche SWRL est également utilisée pour l'aspect spatial [10] et la définition de règles à partir des relations topologiques RCC-8 ou des directions (SWRL n'est pas un standard et est à l'état "submission" auprès du W3C).

5.4 Les requêtes

De la même manière que de nouvelles règles d'inférence et des prédicats doivent être ajoutées aux standards du web sémantique, de nouveaux opérateurs doivent être ajoutés pour effectuer des requêtes sur les connaissances spatio-temporelles. SPARQL ne supporte pas, de manière native, des opérateurs spatio-temporels. Ainsi, des développements ont été proposés [7,10,16] pour augmenter les capacités de requêtage de SPARQL.

Pour les aspects temporels, TOQL (Temporal Ontology Query Language) [24], peut être appliqué sur des ontologies de type 4D-Fluents, Versioning ou Named graphs et ajoute le support des opérateurs d'Allen et des opérateurs sur des intervalles de temps ouvertes ou semi-fermées.

Le langage SQWRL (Semantic Query-Enhanced Web Rule Language) [25] ajoute également les opérateurs Union, Différence et Intersection en plus des opérateurs sur les relations d'Allen.

L'approche "Temporal description logic" [26] ajoute à la logique de description (sur laquelle s'appuie OWL) des opérateurs temporels tels que "until", "always in the future",...

Les aspects spatiaux, de la même manière, nécessitent de mettre en oeuvre des solutions *ad-hoc* comme GeoSPARQL [27] qui implémente les opérateurs spatiaux relatifs à RCC-8 ou 9-Intersection.

Enfin les aspects spatio-temporels sont mis en oeuvre dans SOWLQL, qui utilise TOQL pour les aspect temporels et y ajoute le support des opérateurs spatiaux topologiques et de directionnels.

En conclusion, il n'est donc pas possible d'effectuer des requêtes sur les connaissances spatio-temporelles sans modifier des standards du web sémantique.

6. Conclusion sur les questions de recherche

Cette partie tente de comprendre comment les publications étudiées répondent aux questions de recherche.

Q1: Comment représenter des connaissances sémantiques spatio-temporelles en utilisant les standards du web sémantique?

La Table 2 propose une synthèse des solutions identifiées pour la représentation des connaissances à partir des publications sélectionnées.

Dimension	Représentation	Allen's relation support	RCC-8 support	Instants et intervalles de temps
Spatio-Temporelle	4D-Fluents (Les propriétés spatiales sont alors des fluents)	X (avec OWL-Time)	X	X
	Named-graphs (Les propriétés spatiales sont contextualisées)	X	X	X
	Temporal-RDF + ontologie spatiale	X	X	
Temporelle	4D-Fluents	X (avec OWL-Time)		X
	Named graphs	X		X
	Temporal-RDF	X		
Spatiale	Ontologique → Classes & Relations		X	

Table 2. Représentation des connaissances spatio-temporelles

Les publications permettent de dégager une représentation des capacités de chacune des approches. Les approches basées sur les mécanismes de réification et de versioning n'ont pas été prises en compte à cause de leurs inconvénients en terme d'empreinte mémoire et de performance. **Cette étude nous permet de conclure que la représentation des connaissances dynamiques spatio-temporelles à partir des standards du web sémantique est donc possible.** L'approche des graphes nommés semble la plus intéressante car elle permet une contextualisation des connaissances plus importante que les autres approches.

Par ailleurs, l'étude des publications a permis d'identifier les propriétés importantes qui permettent de donner une sémantique aux représentations des connaissances spatiales et temporelles et en particulier les relations temporelles d'Allen et les relations spatiales entre régions (RCC-8) qui, comme nous l'avons vu, permettent de répondre aux problématiques soulevées dans les scénarios des paragraphes 2.1.1 et 2.1.2.

Q2: Comment contextualiser la gestion d'une BdC?

La gestion de la BdC est très liée aux possibilités de raisonnement et de requêtes sur les propriétés qui évoluent dans le temps et dans l'espace. **Les publications étudiées démontrent qu'il n'est pas possible d'utiliser les standards du web sémantique pour raisonner et effectuer des requêtes sur les connaissances spatio-temporelles.** De fait, une multitude de solutions sont proposées qui permettent de contextualiser la gestion des connaissances spatio-temporelles. De ce point de vue, l'approche SWRL pour la définition des règles de raisonnement semble la mieux adaptée car elle est associée au langage SQWRL pour la définition de nouvelles opérations. Les publications nous montrent par ailleurs que ces approches sont compatibles avec les relations d'Allen et RCC-8.

7. Limitations de cette revue

Cette revue a certaines limitations qu'il est souhaitable de garder à l'esprit avant d'évaluer les conclusions sur les questions de recherche. La campagne de revue et de sélection des publications a été menée par une seule personne dans un temps relativement court. Le choix des publications n'est donc sans doute pas aussi optimum que si il avait été effectué par plusieurs personnes. De fait, certaines publications ont sans doute été retirées de la liste finale alors qu'elles seraient peut-être restées si il y avait eu une confrontation de points de vues.

8. Conclusion

Une revue systématique de la littérature a été menée sur l'utilisation des standards du web sémantique pour la représentation et la gestion des connaissances spatio-temporelles dans une BdC. Cette étude nous indique que les standards du web sémantique peuvent être utilisés pour représenter les connaissances spatio-temporelles mais pas pour raisonner et effectuer des requêtes sur celles-ci. L'étude des publications a enfin permis d'identifier les propriétés importantes qui permettent de donner une sémantique aux représentations des connaissances spatio-temporelles parmi lesquelles les relations temporelles d'Allen et les relations spatiales entre régions (RCC-8) qui, comme nous l'avons vu, permettent de répondre aux problématiques soulevées dans les scénarios des paragraphes 2.1.1 et 2.1.2. La suite du travail de recherche va être de confirmer l'utilisation des approches envisagées (graphes nommés + SWRL + SQWRL).

9. REFERENCES

- [1] Soylu, A., De Causmaecker, P., et Desmet, P. (2009). Context and Adaptivity in Context-Aware Pervasive Computing Environments. In *Symposia and Workshops on Ubiquitous, Autonomic and Trusted Computing (UIC-ATC)*, pp. 94–101.
- [2] Najjar, S (2009). Adaptation dynamique des services en fonction d'un contexte utilisateur en adoptant une approche intentionnelle. In *XXVIIème Congrès INFORSID : Informatique des Organisations et Systèmes d'Information et de Décision, TOULOUSE*, pp. 215–223., pp.461-462
- [3] [Benyelloul, 2010] Benyelloul, A. (2010). Conquer : an RDFS-based Model for Context Querying RDFS-based Context Model. *Ubimob10* (pp. 1–4).
- [4] [Guidance notes on planning a systematic review](#)
- [5] Welty, C., Fikes, R., & Makarios, S. (2006, May). A reusable ontology for fluents in OWL. In *FOIS (Vol. 150)*, pp. 226-236).
- [6] [Time Ontology in OWL](#)
- [7] Harbelot, B., Arenas, H., & Cruz, C. (2014). Un modèle sémantique spatio-temporel pour capturer la dynamique des environnements. *Fouille de données spatiales et temporelles*.
- [8] Perry, M. S. (2008). A framework to support spatial, temporal and thematic analytics over semantic web data (Doctoral dissertation, Wright State University).
- [9] Zhang, H., & Meng, C. (2014, June). A multi-dimensional ontology-based IoT resource model. In *Software Engineering and Service Science (ICSESS), 2014 5th IEEE International Conference on* (pp. 124-127). IEEE.
- [10] Batsakis, S., & Petrakis, E. G. (2010, September). SOWL: spatio-temporal representation, reasoning and querying over the semantic web. In *Proceedings of the 6th International Conference on Semantic Systems* (p. 15). ACM.
- [11] James F. Allen. Maintaining knowledge about temporal intervals. *Commun. ACM*, 1983.
- [12] Cohn, A. G., Bennett, B., Gooday, J., & Gotts, N. M. (1997). Qualitative spatial representation and reasoning with the region connection calculus. *GeoInformatica*, 1(3), 275-316.
- [13] Max J. Egenhofer and Herring John R. Categorizing binary topological relationships between regions, lines, and points in geographic databases. Technical report, Department of Surveying Engineering, University of Maine, Orono, 1991.
- [14] Gutierrez, C., Hurtado, C. A., & Vaisman, A. (2007). Introducing time into RDF. *Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on*, 19(2), 207-218.
- [15] Klein, M. C., & Fensel, D. (2001, July). Ontology versioning on the Semantic Web. In *SWWS* (pp. 75-91).
- [16] O'Connor, M. J., & Das, A. K. (2011). A method for representing and querying temporal information in OWL. In *Biomedical engineering systems and technologies* (pp. 97-110). Springer Berlin Heidelberg.
- [17] Stoermer, H., Bouquet, P., Palmisano, I., & Redavid, D. (2007). A context-based architecture for rdf knowledge bases: Approach, implementation and preliminary results (pp. 209-218). Springer Berlin Heidelberg.
- [18] Serafini, L., & Homola, M. (2012). Contextualized knowledge repositories for the semantic web. *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web*, 12, 64-87.
- [19] Welty, C., Fikes, R., & Makarios, S. (2006, May). A reusable ontology for fluents in OWL. In *FOIS (Vol. 150)*, pp. 226-236).
- [20] Milea, V., Frasincar, F., Kaymak, U., & Noia, T. (2007). An OWL-based approach towards representing time in web information systems. In *4th International Workshop of Web Information Systems Modeling (WISM 2007)* (pp. 791-802).
- [21] Zamborlini, V., & Guizzardi, G. (2010, October). On the representation of temporally changing information in OWL. In *Enterprise Distributed Object Computing Conference Workshops (EDOCW), 2010 14th IEEE International* (pp. 283-292). IEEE.
- [22] Baratis, E., Petrakis, E. G., Batsakis, S., Maris, N., & Papadakis, N. (2009). TOQL: temporal ontology querying language. In *Advances in Spatial and Temporal Databases* (pp. 338-354). Springer Berlin Heidelberg.
- [23] Katz, Y., & Grau, B. C. (2005). Representing qualitative spatial information in OWL-DL. In *In Proceedings of the OWL: Experiences and Directions Workshop*.
- [24] Baratis, E., Petrakis, E. G., Batsakis, S., Maris, N., & Papadakis, N. (2009). TOQL: temporal ontology querying language. In *Advances in Spatial and Temporal Databases* (pp. 338-354). Springer Berlin Heidelberg.
- [25] O'Connor, M. J., & Das, A. K. (2009, October). SQWRL: A Query Language for OWL. In *OWLED (Vol. 529)*.
- [26] Gutiérrez-Basulto, V., & Klarman, S. (2012). Towards a unifying approach to representing and querying temporal data in description logics (pp. 90-105). Springer Berlin Heidelberg.

- [27] Battle, R., & Kolas, D. (2011). Geosparql: enabling a geospatial semantic web. *Semantic Web J*, 3(4), 355-370.
- [28] Carroll, J. J., Bizer, C., Hayes, P., & Stickler, P. (2005, May). Named graphs, provenance and trust. In *Proceedings of the 14th international conference on World Wide Web* (pp. 613-622). ACM.

[29] <http://www.w3.org/TR/owl-features/>

[30] [Time Ontology in OWL](#)