

Sémantique et Internet des objets : d'un état de l'art à une ontologie modulaire

Nicolas Seydoux^{1,2}, Mahdi Ben Alaya^{2,3}, Nathalie Hernandez¹, Thierry Monteil^{2,3}, Ollivier Haemmerlé¹

¹ IRIIT Équipe MELODI, Toulouse, France
nicolas.seydoux@irit.fr
hernande@univ-tls2.fr
ollivier.haemmerle@irit.fr

² CNRS, LAAS, 7 avenue du Colonel Roche, F-31400 Toulouse, France

³ UNIV DE TOULOUSE, INSA, LAAS, F-31400 Toulouse, France
ben.alaya@laas.fr
thierry.monteil@laas.fr

Résumé : La notion d'Internet des Objets désigne un réseau d'objets connectés entre eux et communiquant de manière automatique. Les notions de sémantiques y ont une place croissante, car plus que jamais elles apparaissent comme une solution aux problèmes d'interopérabilité et d'interprétation des données et des services par des machines. La diversité des applications possibles à l'intersection de l'internet des objets et du web sémantique a poussé de nombreuses équipes de recherche à travailler à l'interface entre ces deux disciplines. Nous souhaitons dans ce papier faire un inventaire de leurs propositions. Nous cherchons également à contribuer à l'évolution de ce domaine de recherche en proposant une ontologie pour décrire les réseaux d'objets connectés.
Mots-clés : Ontologies, Internet des Objets, Interopérabilité, Enrichissement de données

1 Introduction

Au cours des dernières années, l'Internet des objets (IoT en anglais¹) a évolué à une vitesse exceptionnelle, connectant un nombre important d'objets hétérogènes (capteurs, actionneurs, smartphones, applications, etc.). L'IoT contribue largement à la production de données dans le cadre du Big Data, avec une estimation de 4,4 milliards de Go produits en 2013, certaines estimations projetant l'existence de plus de 26 milliards d'appareils IoT connectés à l'horizon 2020². L'un des principaux concepts de l'internet des objets est la communication machine à machine (Machine-to-Machine en anglais, abrégé M2M). Le M2M est l'association des technologies de l'information et de la communication, avec des machines communicantes dans le but de fournir à ces dernières les moyens d'interagir sans intervention humaine. Les domaines d'applications sont ainsi très larges : gestion de l'énergie, domotique, aide au diagnostic médical, confort de vie, etc. Le M2M a souffert d'une fragmentation verticale des approches adoptées pour couvrir les besoins des différents domaines d'application. Pour résoudre ce problème, l'Institut Européen de standardisation (ETSI) a développé en 2012 une spécification de standard d'une plate-forme de services horizontale M2M dont une première implementation a été fournie par le LAAS. Celle-ci permet de collecter des données et de piloter des objets variés de manière transparente. Le défi se situe maintenant au niveau de l'utilisation de ces données. La meilleure approche semble être d'associer de la sémantique à ces données par le biais d'ontolo-

1. Internet of Things

2. <http://tinyurl.com/le-monde-informatique-IoT>

gies dans le but de faciliter leur réutilisation et de permettre la mise en œuvre des mécanismes de raisonnement.

De récents travaux visent donc à proposer des ontologies permettant de représenter les données recueillies par des objets connectés ainsi que les interactions entre ces objets [Barnaghi et al. \(2012\)](#), [L. Atzori & Morabito \(2010\)](#). Ces approches sont, pour la plupart, spécifiques aux types d'objets pour lesquels elles sont conçues ainsi qu'aux données qu'ils recueillent. Un réel enjeu consiste à définir une approche générique pour la sémantisation des données dans un double objectif : favoriser l'interopérabilité entre objets, et rendre les données exploitables automatiquement. On pourrait alors les intégrer à des plates-formes mettant en œuvre des mécanismes de diagnostic et de supervision automatiques, ce qui est crucial pour le M2M.

L'objectif de ce papier est double. Nous dressons d'abord un panorama des besoins auxquels peuvent répondre les ontologies dans le domaine de l'IoT et nous présentons les ontologies actuellement disponibles dans le domaine. À partir de cette analyse, nous proposons ensuite une ontologie visant à capitaliser d'une part les travaux faits dans le domaine et d'autre part à prendre en compte les avancées matures dans le domaine de l'Ingénierie des Connaissances.

Le papier est organisé de la façon suivante : la section 2 présente un état de l'art de l'utilisation des ontologies dans l'IoT, la section 3 décrit l'ontologie IoT-O que nous proposons et la section 4 illustre son intérêt à partir d'un cas réel.

2 État de l'art

Différents projets d'IoT s'appuient sur la sémantique : [openiot³](#), [semsorgrid4env⁴](#), [sensei⁵](#)... Les ontologies qu'ils utilisent répondent à des besoins spécifiques au domaine de l'IoT que nous décrivons dans la section 2.1. Ces ontologies se distinguent ensuite par les domaines qu'elles couvrent. Nous en dressons un panorama dans la section 2.2. Finalement, dans la section 2.3, nous listons les manques que nous avons identifiés dans les propositions existantes.

2.1 Les axes d'applications du web sémantique en IoT

2.1.1 Axe orienté données

Le premier apport du web sémantique en IoT se situe au niveau de la transformation des données collectées par les objets. Sémantisées, ces données peuvent prendre le statut d'informations porteuses de sens hors de l'application d'où elles sont collectées. Une fois remises dans un contexte global et interprétées, ces informations peuvent être transformées en connaissances.

La première transformation, de donnée vers information, consiste en l'enrichissement des données par des annotations faisant le lien avec des ontologies. Cet enrichissement peut se faire à différentes étapes du cycle de vie de la donnée : à la création, avant ou après stockage, comme décrit dans [Corcho & Gray \(2010\)](#). Dans certains cas, on peut même prendre le parti d'enrichir des données entreposées dans des bases relationnelles classiques, et dont la sémantisation n'avait pas été envisagée au moment de la collecte, à l'aide de langages tels que R2RML décrit dans [Das et al. \(2012\)](#).

3. <http://openiot.eu/>

4. <http://tinyurl.com/semsorgrid4env>

5. <http://www.sensei-project.eu/>

Par cet ajout de métadonnées, les données ne sont plus spécifiques à l'application les ayant collectées, et il y a alors un sens à l'intégration de ces informations au web de données liées. C'est d'ailleurs un autre aspect important de la place du web sémantique dans l'IoT [Patni et al. \(2010\)](#), [Barnaghi & Presser \(2010\)](#). Lier ses propres données à des entrepôts distants permet d'en augmenter la valeur, en faisant des données "5 étoiles" ⁶.

On est ici dans un paradigme proche du Big Data : les données sont certes collectées dans le but d'une application, mais une fois enrichies elles acquièrent une valeur intrinsèque qui les rend exploitables dans des contextes non-envisagés a priori, par exemple via des mashups comme dans SensorMasher ⁷. Cette approche nécessite cependant une structuration sémantique des données, et une ouverture à des requêtes "libres" de la part d'utilisateurs distants, l'ouverture d'endpoint SPARQL sur une base de connaissance RDF étant la proposition classique.

Enfin, une fois sémantisées les informations générées par le réseau d'objet peuvent être enrichies par un moteur d'inférence s'appuyant sur les formalismes du W3C. Cette approche peut être utilisée par exemple pour détecter des événements caractérisés par un ensemble d'éléments observables par le système, à la manière de [Taylor & Leidinger \(2011\)](#). On peut ainsi actualiser une représentation du monde via les informations issues d'un réseau de capteurs [Henson et al. \(2012\)](#), mais on peut aussi envisager de détecter des pannes chez lesdits capteurs, afin de ne pas accumuler d'informations erronées issues d'un capteur dysfonctionnel.

2.1.2 Axe orienté services

La description d'objets comme des services lève encore une fois des problématiques d'interopérabilité : même si tous les fabricants proposaient une API pour leurs objets, il est évident que même pour des objets comparables (deux ampoules intelligentes de marques distinctes par exemple), les API présentent des disparités. Pour contrer cette difficulté, une solution est d'abstraire l'interface du service en la sémantisant, ce qui permet un accès aux fonctions non plus uniquement par le nom mais par la description porteuse de sens que l'on en a. Les services seraient donc interprétables automatiquement, et on pourrait envisager de les découvrir "à chaud" sans les avoir spécifiés a priori, sans même avoir à tenir compte du modèle ou de la marque de l'objet les implémentant. Cette approche permet d'envisager la décorrélation entre les applications s'appuyant sur des objets connectés et les fabricants desdits objets, et de permettre la création de programmes génériques capables de découvrir et d'exploiter des services sémantisés, comme dans [Hachem et al. \(2011\)](#).

De plus, approcher un réseau d'objets connectés comme un ensemble de services permet d'y intégrer des objets physiques (implémentant des services), mais aussi des entités virtuelles, des purs webservices. La notion d'objet virtuel peut alors faire son apparition. Illustrons-la par l'exemple d'un capteur de température ressentie : la température ressentie étant composée de la température, de la vitesse du vent et de l'humidité ambiante, tout réseau disposant de ces 3 types d'informations (fournies par des capteurs physiques) peut proposer l'accès à un capteur virtuel, composant ces 3 informations pour indiquer la température ressentie comme décrit dans [Compton et al. \(2009\)](#). On introduit en fait ici la possibilité de composer les services. Cette composition peut être faite manuellement, mais on peut aussi envisager qu'une descrip-

6. <http://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html>

7. <http://sensormasher.deri.org/>

tion sémantique suffisamment riche de chaque service permette (dans une certaine mesure) la composition automatique [Compton et al. \(2009\)](#).

2.1.3 Axe orienté système

Dans ce cas, les ontologies ont pour rôle la description du réseau de capteurs lui-même plutôt que du phénomène observé. L'ontologie SSN est un bon exemple de cette utilisation, puisqu'elle fait le lien entre capteur et observations sans rien préciser sur la nature de celles-ci. Cette description des capteurs peut être associée à la description des données, pour adresser la problématique de la provenance en liant une donnée au capteur dont elle est issue, avec sa localisation, sa précision...

La nature changeante des réseaux d'objets connectés pose aussi problème : pour que la description du système reste correcte dans la durée, il est nécessaire qu'elle soit dynamique. En effet, les objets sont amenés à être en mouvement, et le réseau dans sa globalité n'est pas statique : ajouts ou retraits d'objets, déplacements au sein du réseau...

La question du dynamisme va de pair avec la configuration automatique. En effet, il est souhaitable que l'ajout ou le retrait d'objets dans un réseau existant ne nécessite que peu d'intervention de la part d'un opérateur humain, et surtout qu'elle ne demande pas une reconfiguration manuelle de l'ensemble du réseau. L'intégration par les fabricants d'une "datasheet électronique" décrivant l'objet à l'intérieur de celui-ci peut permettre que la découverte du capteur par le réseau soit automatisée, comme proposé dans [Kotis et al. \(2012\)](#). Ce domaine particulier d'application est fortement lié aux moteurs d'alignement automatique, car il est difficilement envisageable que l'ensemble des constructeurs s'accordent sur un modèle de représentation unique. Cependant, des outils d'alignement assez fins pourraient permettre de faire le pont entre l'ontologie embarquée par le capteur et celle utilisée par le système auquel on le relie, facilitant l'interopérabilité entre des objets hétérogènes. À l'inverse, les objets consommateurs de services pourront aussi bénéficier de la description du système pour découvrir les autres objets et les éventuels fournisseurs des services qu'ils recherchent : la configuration automatique aurait alors deux aspects, et se ferait à la fois du côté système et du côté objet. On parle de "plug and play", approche visant à minimiser la configuration manuelle avant utilisation par l'utilisateur final, abordée dans [Bröring et al. \(2009\)](#).

2.1.4 Utilités fondamentales de la sémantique en IoT

Parmi les trois axes précédemment décrits, on repère des éléments communs, qui sont les apports fondamentaux de la sémantique à l'IoT.

1. **Interopérabilité** : La création d'information à partir de données a pour vocation première l'interopérabilité. Les formalismes de représentation des connaissances proposés par le W3C dans le cadre du web sémantique jouent dans l'IoT un rôle de masque de l'hétérogénéité, en proposant une abstraction riche de sens de l'implémentation spécifique sous-jacente. La représentation non-ambiguë de ressources à travers différents formalismes permet aussi de faire fonctionner l'ensemble des systèmes reposant sur des informations comparables mais dans des formats différents, comme proposé dans [Page et al. \(2009\)](#). Les travaux sur l'alignement ont aussi pour vocation de permettre la compréhension mutuelle entre des systèmes sémantisés reposant sur des ontologies différentes.

2. **Intégration** : Sémantiser les données permet d'envisager l'intégration de données hétérogènes au sein d'une même structure, le web de données liées, et d'y permettre un accès transparent. Chaque application peut alors s'appuyer sur les données collectées dans son but spécifique, mais aussi sur des données collectées dans d'autres contextes. Cette approche peut mener par exemple à la création de "mashups", services dont le but est spécifiquement d'intégrer des données et services déjà existants afin de les synthétiser en un seul. Un exemple en est donné dans [Phuoc & Hauswirth \(2009\)](#). Ceci n'est possible qu'en sortant du modèle fermé ou seuls les constructeurs peuvent intégrer les données à l'application sans passer par un état où l'information est rendue disponible.
3. **Interprétation** : La création de connaissance peut avoir deux sources : soit la remise de l'information dans un contexte global, soit l'action de règles de déduction sur des connaissances déjà existantes. La première approche demande l'existence d'ontologies faisant référence, qui permet de mettre en regard des informations issues de diverses sources pour en faire des connaissances. C'est par ce biais que l'on peut créer de la connaissance grâce à SSN [Barnaghi et al. \(2011\)](#) depuis des réseaux de capteurs, SSN étant suffisamment réutilisée pour que l'information y faisant référence soit intégrée à un contexte plus général que celui local à sa collecte. C'est là aussi qu'interviennent les ontologies de haut niveau, qui situent les concepts les uns par rapport aux autres d'une manière indépendante de l'application. La seconde approche consiste pour sa part à déduire de la connaissance à partir de règles ainsi qu'en raisonnant sur d'autres connaissances. Cette approche permet de générer de la connaissance difficile à obtenir directement et automatiquement : un événement est souvent la corrélation d'un ensemble d'éléments, et ceux-ci doivent donc être considérés dans un contexte global pour prendre leur sens. Le raisonnement à base de règles permet aussi d'envisager la composition automatique de services, ou le diagnostic de pannes.

2.2 Les ontologies de l'IoT

2.2.1 Ontologies d'objets connectés

Le domaine le plus évident est celui de l'IoT lui-même. Plusieurs ontologies, comme l'iot-ontology proposée par [Kotis & Katasonov \(2013\)](#), SAREF⁸, ou openiot-ontology⁹, visent à décrire le domaine de l'IoT dans sa globalité.

Il est intéressant de mettre à part le domaine des capteurs connectés. Ceux-ci sont les objets connectés les plus "simples", et permettent des applications assez directes, par de la collecte et du traitement de données en masse (comme Semsorgrid4env¹⁰ par exemple). Ces caractéristiques ont fait des réseaux de capteurs sémantisés un sujet d'étude privilégié pour la communauté du web sémantique, menant le W3C à créer un groupe de travail qui a proposé une ontologie des capteurs connectés, SSN, décrite en détail dans [Barnaghi et al. \(2011\)](#). Celle-ci a maintenant une valeur de standard, et elle est intégrée dans de nombreux projets reposant sur des réseaux de capteurs, mais aussi dans la plupart des ontologies d'objets connectés en général.

8. <https://sites.google.com/site/smartappliancesproject/ontologies>

9. <http://openiot.eu/ontology>

10. <http://mayor2.dia.fi.upm.es/oeg-upm/index.php/en/activeprojects/56-semsorgrid>

La volonté de proposer des ontologies généralistes de l'IoT a conduit à des travers que connaissent d'autres domaines pour lesquels un effort de sémantisation est mené. Aucune ontologie ne fait référence : de projet à projet, peu de réutilisation des concepts définis par des acteurs extérieurs sont effectives et de nombreux concepts sont redéfinis. Ceci pose un problème majeur dans le domaine de l'IoT où la volonté première de la sémantisation est de favoriser l'interopérabilité, l'intégration et l'interprétation. Par exemple, les ontologies *iot-ontology* et *openiot* définissent leur propre notion de service ad hoc. Dans l'ontologie SAREF, la notion de capteur est redéfinie alors qu'elle est présente dans SSN. Au lieu de la réutiliser, les auteurs conseillent dans un document séparé¹¹ de faire un mapping entre leur ontologie et SSN, ce qui ne nous paraît pas être une bonne pratique.

2.2.2 Ontologies de service

L'IoT est fortement lié aux architectures orientées services¹² (SOA en anglais), avec des travaux comme *Abangar et al. (2010)* ou *De et al. (2011)*. Les objets connectés dans un réseau peuvent être vus comme autant de fournisseurs et/ou consommateurs de services, et leurs fonctionnalités peuvent donc être décrites comme des interfaces de webservices. Or l'ajout de sémantique dans la description des webservices est un domaine en soi, et des ontologies qui lui sont spécifiques ont été proposées comme WSMO¹³ ou MSM¹⁴. Celles-ci visent à la description des méthodes accessibles via l'interface du service, des paramètres qu'elles attendent, et des réponses qu'elles renvoient. Encore une fois, le W3C a joué un rôle dans ce domaine en fédérant les recherches autour de OWL-S¹⁵, puis de WSMO.

2.2.3 Ontologies de haut niveau

Les ontologies de haut niveau sont des ontologies très générales qui décrivent des concepts abstraits transversaux à de nombreuses applications. Leur intérêt dans le cadre de l'IoT est de faciliter l'interopérabilité des ontologies différentes qui les spécialisent. Par exemple, certains concepts de SSN spécialisent ceux de DUL, *OntoSensor* spécialise *SUMO*...

2.2.4 Les ontologies spécifiques

Le déploiement d'un réseau d'objets connectés n'est pas toujours une fin en soi ; il peut également viser une application qui peut elle aussi être modélisée sémantiquement. On retrouvera donc par exemple des ontologies de la maison dans le cadre de projets de domotique *Ricquebourg et al. (2006)*, ou des ontologies de phénomènes météorologiques pour les des réseaux de capteurs météo¹⁶. À chaque fois, le choix de l'ontologie relève de besoins métier spécifiques.

11. <https://docs.google.com/file/d/0B2nnxMhTMGh4UnVFMTh1S2R2cGc/edit>

12. Architecture logicielle visant à faciliter l'intégrabilité et l'interopérabilité en proposant des services réutilisables, dont l'utilisateur ne connaît pas l'implémentation afin de garantir la souplesse de modification.

13. <http://www.wsmo.org/>

14. <http://iserve.kmi.open.ac.uk/ns/msm/msm-2014-09-03.html>

15. <http://www.w3.org/Submission/OWL-S/>

16. http://www.w3.org/2005/Incubator/ssn/wiki/Agriculture_Meteorology_Sensor_Network

De plus, les ontologies au domaine spécifique mais transversaux, comme la représentation du temps (OWL-Time dans SSN), de la géolocalisation (Geonames...) ou des unités de mesure (SWEET, QUDT...) jouent aussi un rôle important dans l'interopérabilité en permettant une représentation non-ambiguë de métadonnées essentielles à l'interprétation des données issues d'un réseau d'objets connectés.

2.3 Besoins non satisfaits par les ontologies d'IoT

Pour répondre aux enjeux de l'utilisation d'ontologies dans le domaine de l'IoT présenté dans la sous-section 2.1, nous retenons plusieurs manques au niveau des représentations existantes présentées en sous-section 2.2.

2.3.1 Une notion précise d'actionneur

Comme on l'a dit plus haut, SSN est une ontologie non pas d'objets connectés, mais de capteurs connectés, qui sont un sous-ensemble des objets connectés. Un actionneur est un objet qui peut avoir un effet sur le monde physique, soit par son mouvement (moteur, servomoteur), soit par un changement de propriété (température, luminosité, affichage). Les actionneurs sont essentiels à un réseau d'objets connectés dès qu'il a vocation à être actif, et pourtant leur très grande variété a été un frein à l'existence d'une ontologie aussi incontournable que SSN les décrivant. La notion d'actionneur (actuator en anglais) est présente de manière ad-hoc dans plusieurs ontologies, notamment *iot-ontology*¹⁷, mais pas toujours détaillée, ni unifiée.

2.3.2 Une notion précise de service

IoT et SOA étant fortement liées, il nous paraissait impossible de ne pas intégrer la notion de service à une ontologie de l'IoT. Cependant, là encore, la grande diversité des services a compliqué leur représentation uniforme, et les ontologies ont tendance à s'appuyer sur des définitions ad-hoc, difficiles à accorder entre elles.

2.3.3 Minimiser le nombre de redéfinitions

Nous avons pu constater que certaines ontologies de l'IoT redéfinissaient des concepts déjà existants dans d'autres ontologies plutôt que d'y faire référence, quitte à recommander des équivalences par la suite. L'IoT repose sur des domaines divers, et il nous paraît donc primordial de donner priorité à l'import d'ontologies conçues par des experts de chacun de ces domaines plutôt que d'effectuer des redéfinitions partielles propres à chaque application.

3 Proposition de IoT-O, une ontologie pour les objets connectés

3.1 Vue d'ensemble

L'IoT comprend un large panel de concepts, allant de "système" à "valeur observée", en passant par "unité de mesure" et "instant". Leur extrême diversité rend impossible leur descrip-

17. <http://ai-group.ds.unipi.gr/kotis/ontologies/IoT-ontology>

tion par une seule ontologie, et c'est pourquoi l'ontologie IoT-O que nous étendons, dont une première version a été proposée dans [Ben Alaya et al. \(2015\)](#), est constituée d'un ensemble de modules ontologiques couvrant correctement les domaines sous-jacents. Une autre volonté de notre conception est d'intégrer des relations entre les notions représentées dans les modules. Nous souhaitons ainsi mettre en œuvre les bonnes pratiques de conception arrivées à maturité dans le domaine de l'Ingénierie des Connaissances [d'Aquin \(2012\)](#). Le schéma 1 propose une vue d'ensemble de l'ontologie mettant en évidence les modules et les relations les liant. IoT-O est constituée de 5 modules principaux, les modules de service, de capteur, d'observation, d'actionneur et d'action. L'ontologie IoT-O est disponible en ligne ¹⁸

Nous nous appuyons sur DUL pour structurer la description de haut niveau de nos concepts, afin de faciliter la réutilisation d'une application à une autre. Nous réutilisons l'ontologie SSN déjà présentée comme module de capteur et d'observation. En l'absence d'ontologie spécialisée dans la description d'actionneurs, nous proposons dans la partie 3.2 l'ontologie Semantic Actuator Network, calquée sur SSN, décrivant les actionneurs connectés. Ces deux ontologies sont alignées avec DUL. Nous avons choisi de nous appuyer sur l'ontologie et le vocabulaire QUDV pour représenter les unités de mesure, les quantités, les dimensions et leurs valeurs. OWL-time nous sert à représenter les propriétés temporelles de nos événements (durées, instants, datation). Enfin, nous avons choisi de nous appuyer sur MSM comme ontologie décrivant les services ; elle est présentée plus en détail dans la section 3.3.

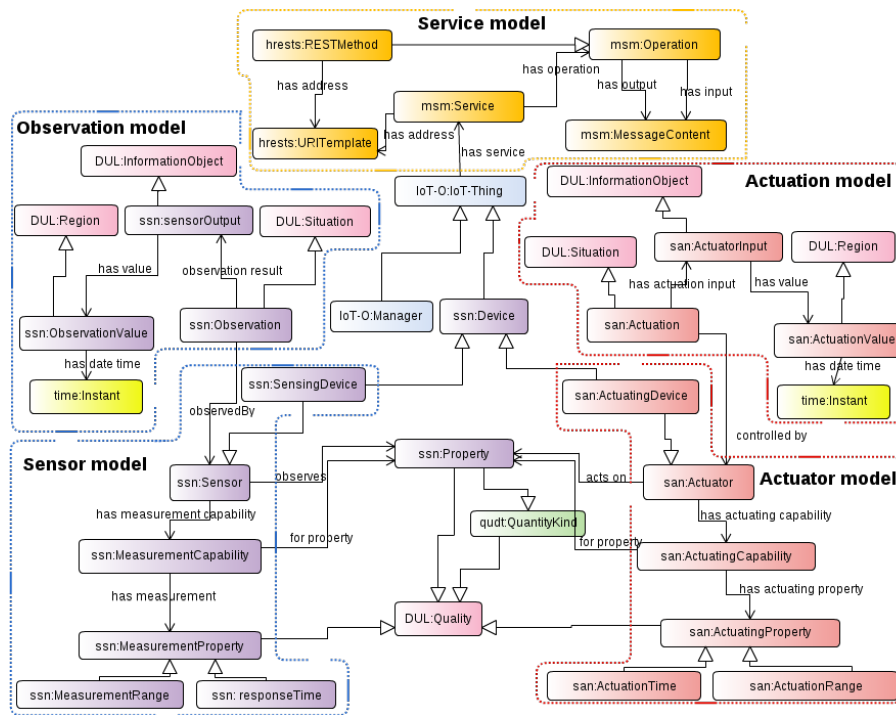


FIGURE 1 – Vue des différents modules constituant l'ontologie IoT-O

18. www.irit.fr/recherches/MELODI/ontologies/IoT-O.owl

3.2 Définition de la notion d'actionneur

Un des principaux apports de l'ontologie IoT-O que nous proposons est une définition riche de la notion d'actionneur. Nous sommes partis de deux constats : SSN est une ontologie très bien intégrée et faisant référence, et les parallèles entre les définitions de capteur et d'actionneur sont nombreux. Nous avons donc défini l'ontologie Semantic Actuator Network (SAN) en la mettant dès que possible en regard avec SSN. On remarquera d'ailleurs la symétrie dans le schéma 1. Nous avons adapté le patron de conception Stimulus-Sensor-Observation détaillé dans Janowicz (2010), structurant SSN, en Actuation-Actuator-Effect, résumé dans la figure 2. Dans le cas de SSN, c'est l'environnement qui est moteur, et c'est une modification de celui-ci (Stimulus) qui va conduire à une représentation par le système (Observation). Au contraire, dans le cas de SAN, c'est la représentation abstraite qui vient la première (Actuation) et qui conduit à avoir un impact sur le monde (Effect).

L'emploi de patrons de conception clairement identifiés est un élément important de l'interopérabilité, et est une bonne pratique aussi bien en ingénierie logicielle qu'en ingénierie des connaissances. Notre objectif est ici de définir une ontologie de capteurs connectés qui sera employée de la manière la plus large possible, et nous pensons que la forte intégration de SSN facilitera la réutilisation de notre ontologie de par leurs similitudes. De plus, on notera que SAN n'importe pas l'intégralité de SSN, mais seulement les concepts sur lesquels elle s'appuie, pour permettre à une application uniquement constituée d'actionneurs connectés de ne pas avoir un grand nombre de concepts non-utilisés dans leur ontologie. Ce choix est motivé par les capacités de raisonnement limitées de beaucoup d'objets de l'IoT.

Notre définition d'actionneur permet donc de représenter un objet ayant des effets sur des propriétés physiques du monde l'entourant suite à des commandes qu'il reçoit, d'une manière complètement indépendante de notre application particulière et pouvant être instanciée d'une manière très similaire à SSN.

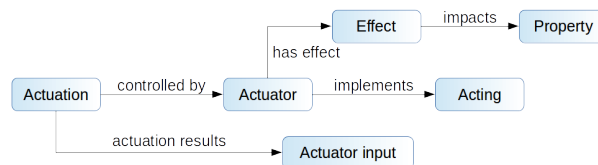


FIGURE 2 – Détail du patron de conception Actuation-Actuator-Effect

3.3 Intégration de la notion de service

La sémantisation de services est une problématique récurrente dans la communauté du web sémantique, et a fait l'objet de nombreux travaux. C'est pourquoi nous avons fait le choix de nous appuyer sur une ontologie existante permettant de représenter les services, proposée dans le cadre du projet SOA4ALL¹⁹ par Jacek Kopecký (2008). Cependant, même si nous avons conservé globalement la forme des ontologies wsmo-lite, msm et hrefs, nous avons souhaité y apporter quelques enrichissements pour les rendre plus faciles à intégrer dans d'autres projets.

19. <http://projects.kmi.open.ac.uk/soa4all/>

Notre choix s'est porté sur MSM notamment pour la légèreté de sa définition, qui la rend facilement intégrable à tout projet et à tout type de webservices. En particulier, il nous a été difficile d'identifier une ontologie de service permettant à la fois la description des webservices de style REST (Representational State Transfer) et ceux de style RPC (Remote Procedure Call). Ici, nous ne décrivons que les webservices REST grâce à l'extension hRESTS, mais une intégration d'une ontologie de webservices RPC est tout à fait envisageable.

3.4 IoT-O, ontologie de synthèse

Comme on le voit sur le schéma 1, l'ontologie IoT-O comporte peu de définitions de concepts. Elle a plus pour but de faire la synthèse et les liens entre les diverses ontologies évoquées précédemment, et d'offrir une vision d'ensemble des concepts de l'IoT. On remarquera notamment le lien entre `iot-o :IoT-Thing` et `msm :Service`, qui indique que tout élément connecté peut fournir un service, qu'il soit un objet physique (`ssn :Device`) ou une application (`iot-o :Manager`).

4 Mise en application : le jeu de données ADREAM

Le projet ADREAM (Architectures for Dynamic Resilient Embedded Autonomous and Mobile systems) financé par l'Union Européenne et la région Midi-Pyrénées, porté par le LAAS, comprend un bâtiment intelligent servant aux expérimentations sur les réseaux de capteurs²⁰. Il comprend en effet un très grand nombre de capteurs qui mesurent notamment la température, la luminosité, la consommation d'énergie. Dans sa version actuelle, la plate-forme de gestion n'arrive pas à détecter les capteurs dysfonctionnels. Les propositions faites dans cet article ont pour objectif la sémantisation des données de ce bâtiment. Nous illustrons dans cette section l'intérêt de notre ontologie sur un cas simplifié de diagnostic de panne.

4.1 Notion de rétrocontrôle

Le principe d'un actionneur pur est de convertir une commande reçue en un effet physique. Cependant, si on prend l'exemple d'un radiateur intelligent (notre actionneur), il est clair que l'absence de capteurs de température rend impossible son autonomie. Une relation primordiale apparaît donc entre capteurs et actionneurs, la relation de rétrocontrôle. Par celle-ci, un capteur mesure l'effet de l'action d'un actionneur pour en permettre une commande plus fine. Cette notion fait naître un nouveau type de système, un système asservi, dans lequel on mesure par des capteurs la mise en œuvre des commandes envoyées à un actionneur. Pour reprendre l'illustration précédente, asservir le radiateur à une sonde de température permet d'établir une loi de commande de la température du radiateur en fonction de la température de la pièce, assurant un contrôle de la température plus fin qu'en l'absence de la sonde.

4.2 Utilisation du rétrocontrôle dans le diagnostic de panne

Associer un capteur et un actionneur dans un même système asservi permet d'indiquer les actionneurs et les capteurs ayant effet sur/observant la même propriété du milieu. De ce fait,

20. <https://www.laas.fr/public/fr/adream>

si une action de l'actionneur n'est pas suivie de l'effet attendu mesuré par le capteur, on peut en déduire un dysfonctionnement du système global, sans pour autant pouvoir indiquer où se situe précisément la panne. Il est possible que le capteur ne donne pas une mesure correcte, que l'actionneur ne se comporte pas conformément aux ordres qu'il reçoit, qu'un phénomène extérieur perturbe le système. Le système dans sa globalité est perçu en dysfonctionnement, et une intervention humaine est nécessaire pour prendre les mesures qui s'imposent.

Dans notre implémentation, nous avons proposé un jeu de données simpliste décrivant deux systèmes bouclés minimaux, constitués par une ampoule intelligente et par un capteur de luminosité. Nous avons ensuite écrit une règle SWRL indiquant la déficience d'un système comme un dépassement de sa tolérance de consigne par la différence entre son action et l'observation qui en est faite : un système est déclaré défectueux si son action n'a pas de répercussion sur la propriété observée. Dans le cas de notre implémentation, nous avons donc simulé deux comportements : un comportement nominal pour le système 1, dans lequel la luminosité augmente quand on allume la lampe, et un comportement défectueux pour le système 2, dans lequel la luminosité reste très faible alors qu'on demande un allumage de la lampe. Face à cet état de fait, le raisonneur Pellet va inférer que le système 2 est un système défectueux, et pas le système 1. Il est important de noter qu'on s'est appuyé sur Pellet car il supporte les BuiltinAtoms de swrl, nécessaires à notre définition de système défectueux. La base de connaissance considérée ainsi que la règle SWRL sont disponibles en ligne ²¹.

5 Conclusion

Dans ce papier, nous avons exposé une synthèse des travaux de l'état de l'art visant à introduire des ontologies dans l'internet des objets. En s'appuyant sur nos observations, nous avons proposé une ontologie de l'IoT intégrant différents modules réutilisant et enrichissant les ontologies existantes. Enfin, nous avons illustré l'intérêt de notre ontologie sur un cas réel pour montrer la validité et l'intérêt de notre proposition pour le diagnostic de panne. Actuellement, nous cherchons à comparer notre ontologie aux ontologies existantes à partir des méthodes de la littérature. Nous souhaitons étudier plus en détail les alignements entre les différents modules. Notre objectif à moyen terme est de réaliser un passage à l'échelle en traitant un grand volume de données issues du bâtiment intelligent ADREAM. Nos travaux s'inscrivent dans le cadre du projet OneM2M ²², nouvelle proposition faite conjointement par l'ETSI et d'autres organismes de standardisation internationaux ²³, qui vise à intégrer la sémantique au niveau de la norme.

Références

ABANGAR H., BARNAGHI P., MOESSNER K., NNAEMEGO A., BALASKANDAN K. & TAFAZOLLI R. (2010). A service oriented middleware architecture for wireless sensor networks. In *Future Network & MobileSummit 2010 Conference Proceedings*.

21. www.irit.fr/recherches/MELODI/ontologies/IoT-O-InstSystemesBoucles.owl

22. <https://www.brighttalk.com/webcast/11949/134201>

23. <http://onem2m.org/about-onem2m/partners>

- BARNAGHI P., COMPTON M., CORCHO O., CASTRO R. G., GRAYBEAL J., HERZOG A., JANOWICZ K., NEUHAUS H., NIKOLOV A. & PAGE K. (2011). *Semantic Sensor Network XG Final Report*. Rapport interne, W3C.
- BARNAGHI P. & PRESSER M. (2010). Publishing linked sensor data. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Semantic Sensor Networks (SSN10)*.
- BARNAGHI P., WANG W., HENSON C. & TAYLOR K. (2012). Semantics for the internet of things : early progress and back to the future. *International Journal on Semantic Web and Information Systems, special issue on sensor networks, Internet of Things and smart devices*, **8**.
- BEN ALAYA M., MEDJIAH S., MONTEIL T. & DRIRA K. (2015). Towards semantic data interoperability in onem2m standard. *IEEE Communications Magazine*.
- BRÖRING A., JANOWICZ K., STASCH C. & KUHN W. (2009). Semantic challenges for sensor plug and play. In *Proc. Web & Wireless Geographical Information Systems 2009*.
- COMPTON M., NEUHAUS H., TAYLOR K. & TRAN K. (2009). Reasoning about sensors and compositions. In *Proc. Semantic Sensor Networks*.
- CORCHO J.-P. C. O. & GRAY A. J. G. (2010). Enabling ontology-based access to streaming data sources. In *ISWC 2010*.
- DAS S., SUNDARA S. & CYGANIAK R. (2012). *R2RML : RDB to RDF Mapping Language*. Rapport interne, W3C.
- DE S., BARNAGHI P., BAUER M. & MEISSNER S. (2011). Service modelling for the internet of things. In *FedCSIS 2011 proceedings*.
- D'AQUIN M. (2012). Modularizing ontologies. In M. C. SUÁREZ-FIGUEROA, A. GÓMEZ-PÉREZ, E. MOTTA & A. GANGEMI, Eds., *Ontology Engineering in a Networked World*, p. 213–233. Springer Berlin Heidelberg.
- HACHEM S., TEIXEIRA T. & ISSARNY V. (2011). Ontologies for the internet of things. In *International Middleware Conference*.
- HENSON C., SHETH A. & THIRUNARAYAN K. (2012). Semantic perception : Converting sensory observations to abstractions. In *IEEE Internet Computing 16*.
- JACEK KOPECKÝ, KARTHIK GOMADAM T. V. (2008). hrests : an html microformat for describing restful web services. In *International Conference on Web Intelligence*.
- JANOWICZ, K. C. M. (2010). The stimulus-sensor-observation ontology design pattern and its integration into the semantic sensor network ontology. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Semantic Sensor Networks (SSN10)*.
- KOTIS K. & KATASONOV A. (2013). Semantic interoperability on the internet of things : The semantic smart gateway framework. In *International Journal of Distributed Systems and Technologies*.
- KOTIS K., KATASONOV A. & LEINO J. (2012). Aligning smart and control entities in iot. In *The 5th Conference on Internet of Things and Smart Spaces 2012*, St. Petersburg, RU : Springer Springer.
- L. ATZORI A. I. & MORABITO G. (2010). The internet of things : A survey. *Computer Networks*, **54**.
- PAGE K., ROURE D. D., MARTINEZ K., SADLER J. & KIT O. (2009). Linked sensor data : Restfully serving rdf and gml. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Semantic Sensor Networks*.
- PATNI H., HENSON C. & SHETH A. (2010). Linked sensor data. In *International Symposium on Collaborative Technologies and Systems, 2010*.
- PHUOC D. & HAUSWIRTH M. (2009). Linked open data in sensor data mashups. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Semantic Sensor Networks*.
- RICQUEBOURG V., MENGA D., DELAHOUCHE L., MARHIC B., DURAND D. & LOGÉ C. (2006). Architecture de perception de contexte orientée service pour l'habitat communicant. In *Troisièmes Journées Francophones : Mobilité et Ubiquité*.
- TAYLOR K. & LEIDINGER L. (2011). Ontology-driven complex event processing in heterogeneous sensor networks. In *The Semantic Web : Research and Applications (2011)*.