



CASO et IRRIG deux ontologies pour le développement de systèmes contextuels : cas d'usage sur l'automatisation de l'irrigation

Quang-Duy Nguyen, Catherine Roussey, María Poveda Villalón, Christophe de Vault, Jean-Pierre Chanet, Camille Noûs

► To cite this version:

Quang-Duy Nguyen, Catherine Roussey, María Poveda Villalón, Christophe de Vault, Jean-Pierre Chanet, et al.. CASO et IRRIG deux ontologies pour le développement de systèmes contextuels : cas d'usage sur l'automatisation de l'irrigation. 31es Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances, Sébastien Ferré, Jun 2020, Angers, France. hal-02888201

HAL Id: hal-02888201

<https://hal.science/hal-02888201>

Submitted on 26 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CASO et IRRIG deux ontologies pour le développement de systèmes contextuels : cas d’usage sur l’automatisation de l’irrigation

Quang-Duy Nguyen¹, Catherine Roussey¹, María Poveda-Villalón²,
Christophe de Vault³, Jean-Pierre Chanet¹, Camille Nous⁴

¹ UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE, INRAE, UR TSCF, 63178 Aubière, France;
quang-duy.nguyen@inrae.fr, catherine.roussey@inrae.fr, jean-pierre.chanet@inrae.fr

² ONTOLOGY ENGINEERING GROUP, Universidad Politécnica de Madrid, Spain;
mpoveda@fi.upm.es

³ LABORATOIRE D’INFORMATIQUE, DE MODÉLISATION ET D’OPTIMISATION DES SYSTÈMES (LIMOS), UMR6158
UCA-CNRS, 63170 Aubière, France
christophe.devault@isima.fr

⁴ LABORATOIRE COGITAMUS
camille.nous@cogitamus.fr

Résumé : Nos travaux portent sur le développement d’un système contextuel automatisant les décisions d’irrigation en fonction des mesures des capteurs. Plus précisément, cet article présente le développement des ontologies intitulées CASO et IRRIG : CASO organise l’ensemble des données manipulées par un système contextuel. L’ontologie IRRIG est une spécialisation de CASO dédiée aux traitements des données nécessaires à l’automatisation d’une méthode d’irrigation manuelle nommée IRRINOV®. Ces ontologies réutilisent des ontologies connues telles que Semantic Sensor Network (SSN) et Smart Appliance REFERENCE (SAREF). Un ensemble de traitements sur les données concerne les règles permettant de déduire les décisions quotidiennes d’irrigation. Ce projet travaille avec des données d’expérimentation d’irrigation pour évaluer le résultat des règles.

Mots-clés : Ontologies, systèmes contextuels, inférences à base de règles, mesures de capteurs, décision d’irrigation, agriculture numérique.

1 Introduction

Le développement rapide des technologies de l’information et des réseaux de capteurs sans fil a transformé les pratiques agricoles. De nouveaux outils et méthodes sont développées pour faciliter les travaux agricoles. Nos travaux portent sur le développement d’un système contextuel dont l’objectif est d’automatiser les décisions d’irrigation en fonction des mesures des capteurs. L’ensemble de ces travaux a été publié en anglais dans la revue “Applied Science” (Nguyen *et al.*, 2020). L’article français est une traduction partielle de l’article anglais. La version française ne présente que le développement des ontologies intitulées CASO et IRRIG. Dans un système contextuel, les ontologies sont une solution pour résoudre le problème d’intégration des mesures de capteurs hétérogènes. Elles définissent un modèle de données partagé décrivant les mesures pour faciliter leurs interprétations. Ces descriptions sont réutilisables par n’importe quelle machine. Le système contextuel contient également un système d’aide à la décision basé sur un moteur d’inférence à base de règles. Ainsi, nous proposons deux nouvelles ontologies : l’ontologie CASO (Contexte Aware System Ontology) organise l’ensemble des données manipulées par un système contextuel en général. L’ontologie IRRIG est une spécialisation de la précédente. IRRIG modélise l’ensemble des résultats des traitements nécessaires à l’irrigation automatique. Pour ce faire, nous avons automatisé une méthode d’irrigation manuelle nommée IRRINOV®. Ces ontologies réutilisent des éléments d’ontologies connues telles que Semantic Sensor Network (SSN) (Janowicz *et al.*, 2018) et Smart Appliance REFERENCE (SAREF) (ETSI TS 103 264 - v2.1.1, 2017). L’outil d’aide à la décision que nous avons développé contient un moteur à base de règles pour déduire les

décisions quotidiennes d'irrigation. Ce projet travaille avec des données d'expérimentation d'irrigation. Ainsi, nous avons pu évaluer les résultats des règles à l'aide de données réelles.

L'article est organisé de la manière suivante. Tout d'abord, des connaissances préliminaires sont présentées pour comprendre notre cas d'usage de développement d'un système contextuel. Ensuite un état de l'art présente un aperçu des ontologies existantes dans le domaine de l'irrigation. Puis, nous détaillons les étapes de développement des ontologies et leurs principaux résultats. Enfin, une brève conclusion termine l'article.

2 Connaissances préliminaires

Pour clarifier le discours, nous allons dans un premier temps poser quelques définitions et présenter le cycle de fonctionnement d'un système contextuel. Nous présentons brièvement la méthode d'irrigation IRRINOV®.

2.1 Définitions

Dans nos travaux, nous adoptons la définition suivante d'un système contextuel : "un système contextuel est un système qui utilise le contexte pour fournir des informations et des services appropriés à l'utilisateur. Il convient de noter que la pertinence d'une information ou d'un service dépend de la tâche réalisée par l'utilisateur." (Abowd *et al.*, 1999)

Nous définissons le contexte dans ce type de système comme "l'ensemble des entités caractérisées par leur état, plus toute information permettant de dériver les changements d'états de ces entités"(Sun *et al.*, 2016). Deux types de contexte sont définis (Sun *et al.*, 2016) :

- le contexte de bas niveau contient des données quantitatives telles que les mesures issues de capteurs ou les résultats d'agrégation sur ces mesures.
- le contexte de haut niveau, quant à lui, est constitué des données qualitatives synthétisant la situation d'une entité. Un exemple de contexte de haut niveau est l'état "sol sec" d'une parcelle ou le stade de développement "5 feuilles" d'une culture de maïs.

Un système contextuel pour l'irrigation est composé de trois composantes spécifiques : un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) en charge de la surveillance de l'environnement ; un Outil d'Aide à la Décision (OAD) pour déterminer les dates d'irrigation en fonction des mesures de capteurs et enfin un dispositif d'arrosage constituant un actionneur capable d'agir sur l'environnement.

Le cycle de fonctionnement d'un système contextuel se découpe en quatre phases : (1) l'acquisition du contexte, (2) la modélisation du contexte, (3) l'analyse du contexte et (4) l'exploitation du contexte. La figure 1 illustre le cycle de fonctionnement d'un système contextuel dédié à l'irrigation.

- phase d'acquisition du contexte : au cours de cette phase, le système acquiert des données provenant de diverses sources. La principale source de données est le réseau de capteurs sans fil qui mesure, collecte et transmet ses mesures sous forme de flux. Les sorties de cette phase sont les mesures, leurs metadonnées et toutes données nécessaires à la prise de décision.
- phase de modélisation du contexte : les mesures sont annotées pour pouvoir être intégrées dans un modèle de données commun. Les ontologies sont la solution choisie pour définir ce modèle. Ces données stockées et organisées constituent le contexte de bas niveau.
- phase d'analyse : au cours de cette phase, le contexte est enrichi. Tout d'abord des agrégations temporelles et spatiales sont appliquées sur les mesures de capteurs. Ainsi, le contexte de bas niveau s'enrichit de nouvelles données. Ensuite, un raisonnement est appliqué sur le contexte de bas niveau afin de produire le contexte de haut niveau. Dans nos travaux, le raisonnement a été implémenté à l'aide du moteur à base de règles Drools¹. A la sortie de cette phase, toutes les décisions permettant de produire des actions doivent appartenir au contexte.

1. <https://www.drools.org/>

- phase d'exploitation du contexte : Les décisions sont prises à la phase précédente, il faut maintenant les mettre en application. Dans cette phase, le système exploite le contexte de haut niveau et le distribue à différents agents : des appareils connectés. Par exemple le contexte de haut niveau est transformé pour envoyer un message d'alerte au téléphone de l'agriculteur ou alors il est traduit en commande interprétable par le dispositif d'arrosage.

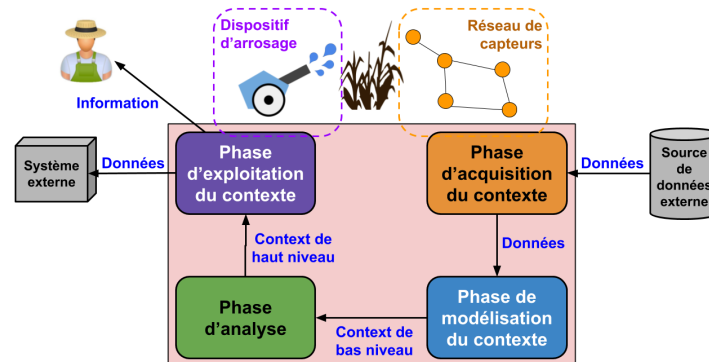


FIGURE 1 – Le cycle de fonctionnement d'un système contextuel dédié à l'irrigation automatique

2.2 La méthode IRRINOV® pour piloter manuellement l'irrigation

Cette section présente la méthode IRRINOV®² développée par l'institut technique Arvalis et ses partenaires. Cette méthode propose un guide de bonnes pratiques aux agriculteurs afin de décider des dates d'irrigation en fonction des mesures des tensiomètres et des pluviomètres. Autrement dit, la méthode fournit des conseils pour répondre à trois questions : (1) quand l'irrigation devrait-elle commencer ? C'est-à-dire quand l'agriculteur doit-il mettre en place son dispositif d'arrosage sur la parcelle (2) quand lancer un arrosage c'est-à-dire quand démarrer un tour d'eau³ ? (3) quand l'irrigation devrait-elle s'arrêter ? Autrement dit quand l'agriculteur peut retirer son dispositif d'arrosage de la parcelle ?

La méthode IRRINOV® est constituée d'un ensemble de tables de décision et de recommandations pour gérer l'irrigation d'une parcelle. Cette méthode propose de nombreuses variantes dépendant du type de sol de la parcelle et de sa culture. Dans le cadre de nos travaux (Nguyen *et al.*, 2020), la méthode IRRINOV® de la région Limagne pour la culture du maïs grain en sol argilo-calcaire (Arvalis *et al.*, 2007) a été retenue pour être mise en œuvre dans le système d'aide à l'irrigation.

Les équipements nécessaires pour réaliser des mesures avec la méthode IRRINOV® comprennent :

- une station de mesure IRRINOV® composée de 6 sondes Watermark pour mesurer l'humidité du sol (tensiomètre) : 3 sondes sont placées à 30 cm de profondeur et 3 sondes sont placées à 60 cm de profondeur.
- un pluviomètre pour mesurer la quantité d'eau reçue par la culture pendant un tour d'eau.
- une station météorologique comprenant un pluviomètre pour mesurer la quantité d'eau reçue par la culture pendant une pluie, et un thermomètre pour mesurer chaque jour la température minimale et la température maximale de l'air.

Des informations supplémentaires sur la méthode IRRINOV sont disponibles dans l'article (Poveda Villalón *et al.*, 2018).

2. <http://www.irrinov.arvalisinstitutduvegetal.fr/irrinov.asp>

3. temps entre deux arrosages d'une même parcelle

La méthode IRRINOV® (Arvalis *et al.*, 2007) propose plusieurs tables de décision pour déterminer le démarrage d'un tour d'eau. Ces tables dépendent du type de sol, de la durée du tour d'eau, de la culture et de son stade de développement.

Nous définissons la variable Probe30 (et Probe60) qui représente la mesure atteinte par deux sondes sur les trois sondes situées à 30 cm de profondeur (et respectivement à 60 cm de profondeur). Cette variable correspond à la médiane des mesures des 3 sondes.

La table de décision 1 présente le seuil utilisé pour commencer un tour d'eau pour une parcelle de maïs grain cultivé dans un sol argilo-calcaire. Cette table s'applique à la culture de maïs lorsque son stade de développement est entre "5 feuilles" et "10 feuilles". Les cellules de cette table présentent les seuils à atteindre par les mesures des tensiomètres en fonction de la durée des tours d'eau.

La première colonne d'une table de décision doit se lire comme "si la durée du tour d'eau propre à la parcelle est entre 9 à 10 jours" et " lorsque la variable Probe30 est supérieure à 30 cbar et la variable Probe60 est supérieure à 10 cbar " OU " lorsque la somme (Probe30 + Probe60) est supérieure à 40 cbar ", alors le tour d'eau peut commencer. Il convient de noter que dans cette table de décision, si les deux premières contraintes sont vraies simultanément alors la troisième contrainte est forcément vraie, car si $Probe30 > 30$ et $Probe60 > 10$ alors $Probe30 + Probe60 > 40$.

TABLE 1 – Valeurs de seuil en fonction de la durée des tours d'eau

	9 à 10 jours	6 à 8 jours	inférieure ou égale à 5 jours
Probe30	30 cbar	50 cbar	60 cbar
Probe60	10 cbar	20 cbar	20 cbar
total	40 cbar	70 cbar	80 cbar

Nos travaux (Nguyen *et al.*, 2020) ont pour objectif de traduire ces tables de décision en règles. Ces traitements sont réalisés dans la phase d'analyse du système contextuel. La phase d'exploitation traduit les décisions d'irriguer en commandes exécutables par le dispositif d'arrosage.

3 Etat de l'art

D'après nos travaux sur le développement de système contextuel, une ontologie est un modèle de données partagé pour faciliter l'interprétation des données issues de différentes sources. Ainsi la base de connaissances structurée par cette ontologie intègre la description des mesures issues de capteurs hétérogènes. La description des mesures doit être réutilisable par n'importe quelle machine et compréhensible par l'homme. Pour atteindre cet objectif, nous avons étudié les ontologies utilisées dans les systèmes d'aide à la décision d'irrigation. Notre objectif est de réutiliser ces modélisations autant que faire se peut.

Plusieurs systèmes experts ont été développés pour déterminer les besoins en eau d'une culture. Par exemple, (Nada *et al.*, 2014) décrit un système expert développé à l'aide de la méthode Common-KADS pour irriguer les manguiers. Ce système expert n'est pas associé à un réseau de capteurs ou d'actionneurs. Son objectif est de déterminer la meilleure date d'irrigation. Dans ces travaux, l'ontologie développée n'a pas été publiée sur le Web.

Les technologies du Web sémantique ont déjà été utilisées pour le développement de systèmes contextuels dédié à l'irrigation. Par exemple, le projet SWAMP a pour objectif de développer une plateforme de gestion de l'eau pour l'irrigation de précision (Kamiński *et al.*, 2019). Ce projet a plusieurs sites pilotes afin d'expérimenter plusieurs solutions d'irrigation de précision dans des environnements différents. La plateforme IoT FIWARE qui permet de connecter des appareils au cloud est un des composants de l'architecture développée au sein du projet SWAMP. La plateforme FIWARE intègre une solution Semantic Web of Thing intitulée SPARQL Event Processing Architecture (SEPA). Les mesures de capteurs sont échangées au format JSON-LD pour mettre à jour une base de connaissances. Ces mesures sont ensuite interrogées à l'aide d'un moteur SPARQL. À notre connaissance, le projet SWAMP n'a pas encore publié les ontologies utilisées dans ces expérimentations.

Les travaux de (Wang *et al.*, 2015; Wang & Wang, 2018) présentent quelques ontologies dédiées à la culture des agrumes. Une des ontologies concerne l'irrigation. Cette ontologie permet de stocker des mesures de l'humidité du sol en fonction du type de sol et du stade de développement de la culture. Lorsque l'humidité du sol atteint un certain seuil, les agriculteurs reçoivent une alerte. Ces travaux n'ont pas publié leur ontologie sur le Web.

Selon nous, le système contextuel le plus abouti dédié à l'irrigation est celui développé lors du projet PLANTS (Goumopoulos *et al.*, 2009). Ce système concerne la culture sous serre de plants de framboisiers. Il utilise plusieurs types de capteurs pour observer le développement des plants. Ce système contextuel contrôle des dispositifs d'arrosage dans quatre zones de la serre. L'ontologie développée dans PLANTS décrit des e-entités et leurs interactions (Goumopoulos *et al.*, 2009, 2014). Une e-entité est une représentation virtuelle d'un objet physique : un plant ou un appareil. Chaque mesure de capteur est définie comme le paramètre d'une e-entité. Par exemple, l'e-entité représentant un plant a comme paramètre "LeafTemperature". Ce paramètre est mis à jour par les mesures d'un thermomètre. La dernière mesure du capteur est utilisée pour mettre à jour le paramètre correspondant. Par conséquent, ces travaux ne traitent pas d'agrégation de flux de mesures de capteurs. Des règles sont utilisées pour inférer les états des plants de framboisiers en fonction des valeurs de certains paramètres. Le dispositif d'arrosage est contrôlé par la détection de l'état "stress hydrique" dans une zone spécifique. Ainsi, la seule partie de l'ontologie dont nous pourrions nous inspirer est la hiérarchie des états des plants : les différents types de stress de la plante. Malheureusement, cette ontologie n'est pas publiée sur le Web car il s'agit du schéma de la base de faits implémenté dans le moteur d'inférences Jess.

Pour conclure, certains travaux concernent la gestion des flux de mesures de capteurs à l'aide des technologies Web sémantique ou le calcul d'agrégation sur ces flux. Malheureusement, leurs résultats ne sont pas directement réutilisables. Notre approche doit gérer à la fois l'agrégation temporelle et spatiale des flux de mesures de capteurs. De plus, les ontologies mentionnées dans les travaux précédents ne sont pas disponibles sur le Web ou leur domaine ne correspond pas exactement à notre cas d'usage.

4 Développement d'ontologies

LOT est une méthodologie utilisée pour le développement d'ontologies. Elle a été proposée pour la première fois dans (Poveda-Villalón, 2012) et développée dans (García-Castro *et al.*, 2017). LOT s'inspire des techniques agiles pour aligner le développement des ontologies avec le développement du système d'information. Cette méthodologie se concentre sur (1) la réutilisation d'éléments (classes, propriétés et attributs) existant dans des vocabulaires ou ontologies déjà publiés et (2) la publication de l'ontologie selon les principes du Web de données liées. Elle réutilise certaines activités d'ingénierie des connaissances définies dans la méthodologie NeOn (Suárez-Figueroa *et al.*, 2015). Cette méthodologie définit les itérations sur les quatre activités suivantes : (1) spécification des besoins ontologiques, (2) implémentation de l'ontologie, (3) publication de l'ontologie et (4) maintenance de l'ontologie.

4.1 Spécification des besoins ontologiques

L'objectif de l'ontologie à développer est de stocker toutes les données manipulées par le système contextuel : les données capteurs, les résultats des traitements (agrégation ou inférence) jusqu'à la décision finale d'irrigation. Tout d'abord, nous avons étudié la documentation de la méthode IRRINOV® Arvalis *et al.* (2007) pour identifier les éléments suivants :

- les types de capteurs et leurs mesures,
- les données nécessaires à la prise de décisions : type de sol, variété de culture, date de semences, localisation des capteurs et leur profondeur, quantité de pluie, évolution des stades de développement de la culture, mesures d'humidité du sol à différentes profondeurs,
- les différents traitements appliqués sur les flux de mesures de capteurs, par exemple le nettoyage, l'agrégation temporelle et spatiale, la comparaison à l'aide de seuils,

Specification Competency Questions document			
Version 0.1			
Code	Competency Questions	Answer/Example	
CQ1	Description of measurement equipments		
CQ1.1	What is the identifier of the probe/sensor?	2013F13 03	
CQ1.2	Which type of measurement provides the probe/sensor? Which phenomenon and which associated property is measured by the probe/sensor?	Example: soil moisture at 30 cm-depth	
CQ1.3	What is the correction value of the probe/sensor? Does the raw measurement produced by a probe/sensor need a transformation before being considered as a valid measurement?	1	Ti vé re
CQ1.4	What is the range of value provided by the probe/sensor? Is the measurement of the probe/sensor valid?	0 to 200	
CQ1.5	What is the unit of the probe/sensor?	ohm, mm, degrés Celsius	

FIGURE 2 – *Quelques exemples de question de compétences*

— les différentes décisions prises par la méthode.

Dans un second temps, nous avons discuté avec les experts en irrigation d'Arvalis et d'INRAE pour clarifier la méthode IRRINOV®. Par exemple, nous avons posé les questions suivantes aux experts : "Quelle est la différence entre une irrigation et un tour d'eau ? Quelles sont les valeurs possibles des stades de développement du maïs ? Est-ce-que tous les stades vont apparaître ? Comment observer un stade de développement du maïs ?"

Troisièmement, nous avons essayé de généraliser les connaissances décrites lors de ces discussions en proposant des définitions consensuelles des notions nécessaires à la compréhension d'IRRINOV®. Ce travail a été effectué en interrogeant des sources disponibles sur le Web. Les sources sélectionnées sont des articles de références produites par des organisations reconnues. Par exemple, les différents stades de développement du maïs sont définis dans une publication de l'Université de l'Iowa (Lori J. Abendroth *et al.*, 2011).

Quatrièmement, l'analyse de l'ensemble de données fournies par Arvalis nous a permis de mieux comprendre les calculs effectués sur les flux de mesures des capteurs. Cette analyse nous a permis de définir plusieurs chaînes de traitements : chacune correspondant à un type de flux de mesures du capteur. Une chaîne commence par valider les mesures de capteurs, ensuite elle agrège ces mesures (agrégations temporelle ou spatiale) puis elle compare les valeurs agrégées à des seuils et enfin des déductions sont appliquées sur les états. Un exemple d'agrégation temporelle est le calcul de la moyenne des mesures d'humidité du sol produites par un tensiomètre sur une fenêtre de 24 heures. Ces agrégats sont modélisés sous la forme d'une nouvelle propriété du phénomène observé par la sonde. Notre système contextuel comprend quatre principaux flux de mesures de capteurs. Chacun de ces flux est décrit par un phénomène observé (sol, pluie, culture) et ses propriétés associées : (1) l'humidité du sol, (2) la quantité de pluie, (3) le stade de développement de la culture et (4) le besoin en eau de la culture. A partir de cette analyse, nous avons défini les spécifications ontologiques de notre système contextuel. Ces spécifications sont écrites sous la forme de questions de compétences. L'ensemble des questions de compétences a été décrit dans un tableur disponible dans le répertoire gitlab associé à ce projet⁴. En résumé, l'ontologie doit être capable de décrire tous les traitements appliqués aux flux de mesures de capteurs jusqu'à obtenir la décision journalière d'irrigation.

La figure 2 présente un extrait des questions de compétences. Par exemple, la question CQ1.1 définit le besoin de connaître le type et la marque de chaque sonde.

4.2 Conceptualisation de l'ontologie

La spécification des besoins ontologiques était dans un premier temps orientée vers le développement d'une seule ontologie. En cours de développement, nous avons noté que cer-

4. <https://gitlab.irstea.fr/irrig/public/tree/master/CompetencyQuestions>

tains éléments de l'ontologie pouvaient être réutilisés dans la conception de tout système contextuel. Nous avons donc décidé de définir deux ontologies : CASO et IRRIG. L'ontologie CASO (Contexte Aware System Ontology) est dédiée au développement de tout système contextuel. L'ontologie IRRIG est dédiée au développement d'un système contextuel automatisant l'irrigation.

A noter qu'avant de commencer le développement de notre ontologie, nous avons étudié plusieurs ontologies de référence sur les mesures de capteurs (Poveda Villalón *et al.*, 2018). Ainsi, nous avons choisi de réutiliser SOSA/SSN car cette ontologie propose plusieurs patrons de conception ontologiques décrivant précisément les mesures de capteurs.

La première étape de la conceptualisation définit les composants de l'ontologie à partir des questions de compétences. Cette étape se compose de différentes phases exécutées dans l'ordre de présentation ci-dessous :

- identification des classes : Nous voulons modéliser tous les traitements appliqués aux flux de mesures de capteurs. Ce sont principalement des agrégations et des comparaisons à partir de seuils. Le but d'une comparaison est de déduire un état à partir d'une valeur agrégée. Pour différencier les inférences des autres calculs, nous devons définir la classe "Dédution". Le résultat d'une déduction est un état (une valeur symbolique). Nous définissons les seuils comme des bornes d'un état donné.
- identification des propriétés d'objets : Pour caractériser une déduction, nous avons besoin de deux nouvelles propriétés d'objet : (1) une propriété qui lie une déduction à son résultat (un état) et (2) une propriété qui lie une déduction à l'intervalle temporel où cette déduction est valide, c'est-à-dire la durée pendant laquelle le phénomène observé est dans cet état.
- identification des contraintes de cardinalité : Cette étape détermine si une propriété d'objet est fonctionnelle. Par exemple, la propriété qui lie une déduction à son résultat est fonctionnelle. Une déduction n'a qu'un seul résultat : l'état du phénomène.
- identification des individus : D'après les patrons de conception de SOSA/SSN, les phénomènes observés sont modélisés sous la forme d'instances de la classe **sosa :FeatureOfInterest** (Janowicz *et al.*, 2018). Les types de mesures caractérisant ces phénomènes sont modélisés sous la forme d'instances de la classe **ssn :Property**, chacune étant liée à l'instance correspondante de la classe **sosa :FeatureOfInterest** par la propriété d'objet **ssn :hasProperty**. Par exemple, un individu, instance de la classe **ssn :Property**, représente la quantité journalière de pluie et est lié à une instance de la classe **sosa :FeatureOfInterest** représentant la pluie.

Ensuite, nous avons identifié des éléments d'ontologies existantes pour les réutiliser. Les ontologies sélectionnées ont été développées et sont maintenues par des organisations de normalisation.

- la nouvelle version de l'ontologie Semantic Sensor Network (SOSA/SSN) qui est une recommandation du W3C et de l'OGC. Cette ontologie décrit les capteurs, leurs mesures, les échantillons et les actionneurs (Janowicz *et al.*, 2018).
- l'ontologie Smart Appliances REference (SAREF)⁵ est une recommandation de l'ETSI pour résoudre les problèmes d'interopérabilité dans le domaine de l'IoT (ETSI TS 103 264 - v2.1.1, 2017). Cette ontologie modélise les appareils connectés ainsi que leurs fonctions, commandes, services, états et profils. Nous avons réutilisé des éléments de SAREF4AGRI qui est une extension de SAREF pour l'agriculture.
- l'ontologie PROV du W3C est utilisée pour modéliser la provenance des données (Lebo *et al.*, 2013).
- l'ontologie SKOS du W3C est préconisée pour représenter les thésaurus et tout système d'organisation des connaissances (Bechhofer & Miles, 2009). Un thésaurus peut être utilisé pour identifier les types de mesures ou de phénomènes observés.
- l'ontologie Time du W3C⁶ permet de décrire tous les éléments temporels.
- l'ontologie Units of Measure and Related Concepts (OM) (Rijgersberg *et al.*, 2013) identifie un ensemble d'unités de mesures.

5. <http://www.w3id.org/saref>

6. <http://www.w3.org/2006/time>

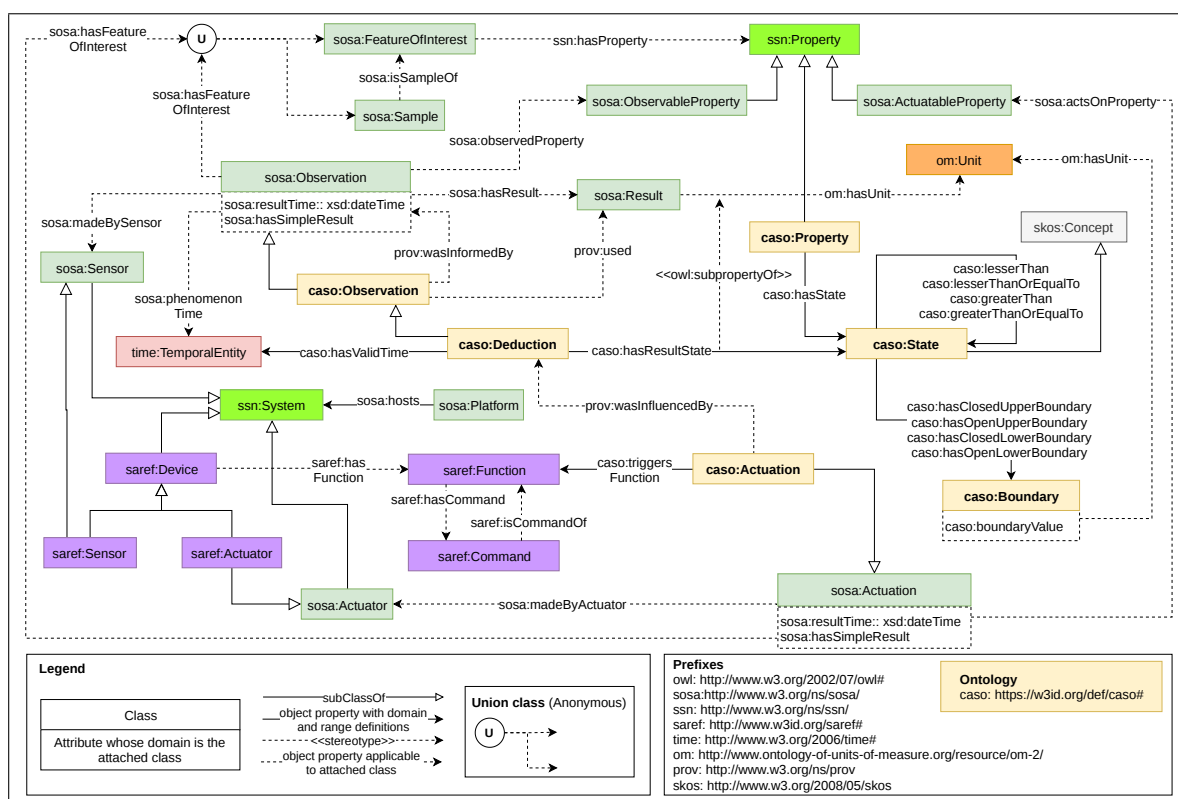


FIGURE 3 – *L'ontologie CASO.*

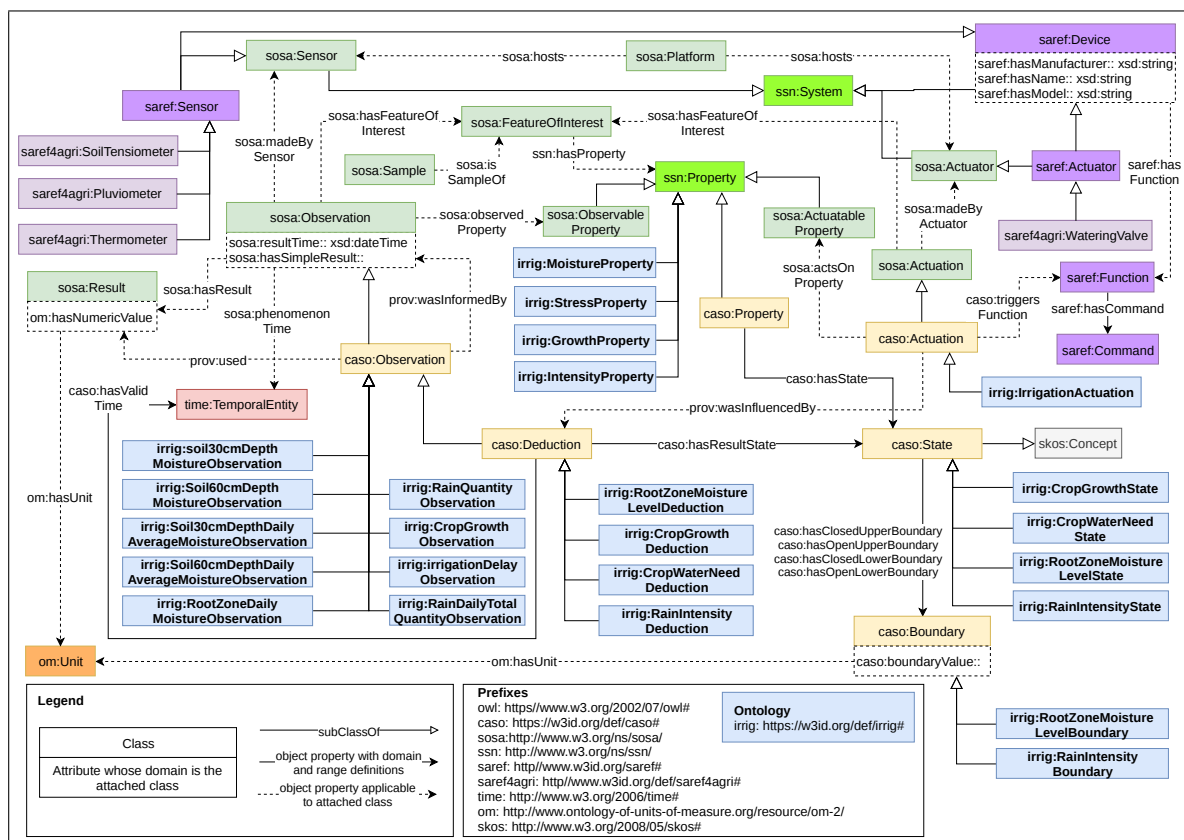
Dans un cas, les éléments des ontologies existantes correspondaient exactement à l'utilisation prévue dans notre ontologie. Par conséquent, ils ont été intégrés sans aucune modification. Quelques exemples de ces réutilisations sont les classes **sosa :Platform**, **sosa :FeatureOfInterest** ou **om :Unit**.

Dans un autre cas, certaines caractéristiques ou contraintes supplémentaires ont dû être ajoutées aux éléments des ontologies existantes. Pour ce faire, nous avons spécialisé des classes existantes en définissant de nouvelles sous classes. Par exemple, la classe **caso :Observation** est une spécialisation de la classe **sosa :Observation**. Elle représente tout processus de calcul. Toutes les instances de cette nouvelle classe doivent être liées par la propriété objet `prov:wasInformedBy` à leurs données d'entrée. La classe **caso :Deduction** est une spécialisation de **caso :Observation**. Une déduction est également un processus de calcul qui a pour résultat un état (une valeur symbolique et non numérique). Pour forcer la modélisation des états sous forme de valeur symbolique qu'il faut documenter correctement, la classe **caso :State** est définie comme une sous classe de **skos :Concept**. Les états (des plantes ou des dispositifs) sont réutilisables dans différentes applications agricoles, leurs définitions dans un thésaurus faciliteront leurs réutilisations.

Finalement, la conceptualisation a abouti à deux ontologies : CASO et IRRIG. L'ontologie IRRIG importe et étend l'ontologie CASO. L'ontologie CASO est illustrée à la figure 3. L'ontologie IRRIG est représentée sur la figure 4. Les entités définies dans les ontologies CASO et IRRIG sont respectivement coloriées en jaune et en bleu.

L'objectif de CASO est de modéliser tout traitement du contexte. IRRIG est une spécialisation de CASO pour décrire les traitements du contexte de la méthode IRRINOV®. Pour cette raison, elle spécialise certains éléments de CASO, comme le montre la figure 4. Par exemple, IRRIG spécialise la classe **ssn :Property** en différentes sous-classes liées à l'humidité, le stress et la croissance. Plusieurs sous-classes de **caso :Observation** spécifient différents types d'observations. Chaque sous-classe est dédiée aux observations d'une instance spécifique de **ssn :Property**.

Caso et IRRIG deux ontologies pour le développement de systèmes contextuels

FIGURE 4 – *L'ontologie IRRIG*

4.3 Encodage des ontologies

Une fois les modèles de données finalisés, les deux ontologies ont été implémentées dans le langage OWL (Group, 2012) en utilisant Protégé (Musen, 2015). La mise en œuvre des ontologies comprenait la déclaration de metadonnées telles que les auteurs, les dates et les licences, selon (Garijo & Poveda Villalon, 2017). Le code OWL des ontologies est disponible dans deux répertoires GitHub distincts. L'implémentation actuelle de CASO contient 27 classes, 40 propriétés d'objet et 4 propriétés de type de données. Elle réutilise les ontologies SOSA/SSN, SKOS, SAREF, PROV, Time et OM. L'ontologie IRRIG importe CASO et l'étend avec 31 classes, 4 propriétés de type de données et 71 individus pour modéliser les états, les types de mesures et les phénomènes naturels liés à l'irrigation. Parmi eux, quatre classes et trois propriétés de type de données sont importées de l'ontologie SAREF4AGRI, une extension de SAREF pour agriculture.

4.4 Évaluation de l'ontologie

Les deux ontologies ont été évaluées de trois manières différentes : vérification de l'absence de mauvaises pratiques, vérification de la couverture des besoins ontologiques et validation de l'ontologie par l'implémentation des règles avec le moteur Drools.

Pour vérifier l'absence de mauvaises pratiques ou d'erreurs dans CASO et IRRIG, le logiciel de vérification OOPS ! a été utilisé (Poveda-Villalón *et al.*, 2014). Le rapport fournit par ce logiciel nous a permis d'améliorer les aspects suivants des ontologies : (1) définir les propriétés inverses, (2) enrichir la description des composants des ontologies en complétant les propriétés d'annotation `rdfs:label` et `rdfs:comment`, et (3) saisir correctement certains éléments de l'ontologie en spécifiant la classe ou le type de propriétés OWL (type de données, objet ou annotation).

En ce qui concerne la vérification de la couverture des besoins, l'ontologie IRRIG, qui contient déjà CASO, a été comparée aux questions de compétences précédemment définies. Pour chaque question, les éléments de l'ontologie répondant à la question ont été identifiés.

Enfin, nous avons vérifié que les données fournies par Arvalis pouvaient être annotées avec nos ontologies. Nous avons utilisé le jeu de données d'Arvalis produit pendant une expérimentation d'irrigation en 2013. Pour ce faire, plusieurs fichiers RDF ont été générés. Chaque fichier décrit les mesures produites par les capteurs pendant une journée. L'ensemble des résultats des traitements effectués pour aboutir à la décision finale ont aussi été stockés dans ces fichiers. Ainsi nous avons pu tracer tous les résultats des traitements effectués par notre outil d'aide à la décision. Des exemples du contenu de ces fichiers sont décrits en détail dans (Nguyen *et al.*, 2020).

4.5 Publication de l'ontologie et maintenance

Pour maintenir ces deux ontologies et les faire évoluer, nous avons besoin d'obtenir les commentaires de la communauté d'utilisateurs potentiels. Tout d'abord, les ontologies CASO et IRRIG ont été publiées sur le Web, chacune ayant reçu un identifiant pérenne : <https://w3id.org/def/caso#> et <https://w3id.org/def/irrig#>. La publication de ces ontologies sur le Web a été réalisée à l'aide de la suite logicielle OnToology (Alobaid *et al.*, 2018). OnToology s'appuie sur un répertoire GitHub contenant le code et la documentation HTML. Les pages HTML ont été générées automatiquement par l'outil Widoco (Garijo, 2017). Puis, elles ont été mises à jour manuellement pour inclure des diagrammes et des informations manquantes.

Le répertoire GitHub est rendu public, ainsi les utilisateurs peuvent écrire des commentaires et rendre compte des problèmes rencontrés. La documentation du répertoire fournit aussi les adresses e-mail des responsables des ontologies. Ces ontologies ont aussi été publiées sur l'Agroportal du Lirmm.

Nous avons prévu de maintenir les ontologies IRRIG et CASO au moins pendant 5 ans.

5 Synthèse et Conclusion

Les activités d'ingénierie des connaissances sont maintenant soutenues par plusieurs méthodologies. Mais il existe encore des décisions importantes à prendre pendant la conceptualisation de l'ontologie. Une de nos décisions la plus controversée et la plus longue était de savoir s'il fallait créer la classe Dédution. Représente-t-elle vraiment une nouvelle notion ou est-ce simplement une observation au sens de SOSA/SSN ? Nous avons choisi de mettre en avant les déductions en créant cette classe car elle permet d'identifier le contexte de haut niveau avec le raisonnement symbolique associé. Une déduction aboutie à un état. Une autre remarque importante lors du développement de l'ontologie est de terminer le cycle entre les propriétés observables par des capteurs et les propriétés actionnables par des actionneurs. C'est pour cette raison que nous avons combiné les ontologies SOSA/SSN et SAREF.

Avant de commencer le développement de CASO et IRRIG, nous avons décidé de réutiliser des ontologies existantes proposées par des organismes de normalisation pour accroître l'interopérabilité des données. Cependant, ce choix a considérablement augmenté le temps de développement des ontologies. Quand on réutilise un élément existant, il faut comprendre précisément la sémantique et les conséquences de choix de modélisation des auteurs. Cette tâche s'avère encore plus compliquée lorsque l'on combine plusieurs ontologies. D'après notre expérience, il est plus facile de construire un modèle de données à partir de zéro que d'intégrer des éléments existants. Par conséquent, la décision de réutiliser les ontologies repose entièrement sur les exigences demandées en matière d'interopérabilité des données.

Cet article est une traduction partielle de l'article (Nguyen *et al.*, 2020). Nous avons présenté les étapes de développement des ontologies intitulées CASO et IRRIG. CASO est une ontologie générique qui a pour but de modéliser tous traitements effectués par un système contextuel sur les flux de mesures de capteurs. IRRIG importe et étend CASO pour modéliser les traitements nécessaires à la prise de décision d'irrigation en suivant la méthode IRRINOV. CASO et IRRIG réutilisent des éléments des ontologies SOSA/SSN, PROV, SAREF, SAREF4AGRI, OM, Time, SKOS. Ces ontologies sont publiées sur le Web. IRRIG a permis de définir la base de faits utilisée par le moteur à base de règles Drools. Ainsi nous avons pu valider la modélisation proposée pour décrire les traitements nécessaires à la prise de décision d'irrigation.

Acknowledgements

Cette recherche est financée au travers de différents projets : (1) le projet CPER "ConnecSens", (2) le projet "Programme I-Site Clermont WOW ! Wide Open to the World - CAP20-25" (16-IDEX-0001) et (3) le projet ETSI STF534 "SAREF extensions". Le projet CPER "ConnecSens" est cofinancé par la région Auvergne-Rhône-Alpes en France, ainsi que par l'Union européenne via le fond FEDER.

Références

- ABOWD G. D., DEY A. K., BROWN P. J., DAVIES N., SMITH M. & STEGGLES P. (1999). Towards a Better Understanding of Context and Context-Awareness. In *Handheld and Ubiquitous Computing*, volume 1707, p. 304–307. Springer Berlin Heidelberg.
- ALOBAD A., GARIJO D., POVEDA-VILLALÓN M., SANTANA-PEREZ I., FERNÁNDEZ-IZQUIERDO A. & CORCHO O. (2018). Automating ontology engineering support activities with OnToolology. *Journal of Web Semantics*.
- ARVALIS, INRA & CHAMBRE D'AGRICULTURE (2007). *Guide de l'utilisateur, Carnet de terrain : Piloter l'irrigation avec la méthode IRRINOV*. Technical report 07X04, Arvalis, Midi-Pyrénées, France.
- BECHHOFFER S. & MILES A. (2009). Skos simple knowledge organization system reference. *W3C recommendation*, W3C.
- ETSI TS 103 264 - v2.1.1 (2017). *SmartM2M; Smart Appliances; Reference Ontology and oneM2M Mapping*. Rapport interne, ETSI.

- GARCÍA-CASTRO R., FERNÁNDEZ-IZQUIERDO A., HEINZ C., KOSTELNIK P., POVEDA-VILLALÓN M. & SERENA F. (2017). *D2.2 Detailed Specification of the Semantic Model*. Rapport interne, Universidad Politécnica de Madrid (UPM).
- GARIJO D. (2017). Widoco : a wizard for documenting ontologies. In *International Semantic Web Conference*, p. 94–102 : Springer.
- GARIJO D. & POVEDA VILLALÓN M. (2017). *A checklist for complete vocabulary metadata*. Rapport interne, WIDOCO.
- GOUMOPOULOS C., KAMEAS A. D. & CASSELLS A. (2009). An Ontology-Driven System Architecture for Precision Agriculture Applications. *Int. J. Metadata Semant. Ontologies*, **4**(1/2), 72–84.
- GOUMOPOULOS C., O'FLYNN B. & KAMEAS A. (2014). Automated zone-specific irrigation with wireless sensor/actuator network and adaptable decision support. *Computers and Electronics in Agriculture*, **105**, 20–33.
- GROUP W. O. W. (2012). *OWL 2 Web Ontology Language Document Overview (Second Edition)*. W3c Recommendation, W3C.
- JANOWICZ K., HALLER A., COX S. J., LE PHUOC D. & LEFRANÇOIS M. (2018). SOSA : A lightweight ontology for sensors, observations, samples, and actuators. *Journal of Web Semantics*.
- KAMIENSKI C., SOININEN J.-P., TAUMBERGER M., DANTAS R., TOSCANO A., SALMON CINOTTI T., FILEV MAIA R. & TORRE NETO A. (2019). Smart Water Management Platform : IoT-Based Precision Irrigation for Agriculture. *Sensors*, **19**(2), 276.
- LEBO T., SAHOO S., MCGUINNESS D., BELHAJJAME K., CHENEY J., CORSAR D., GARIJO D., SOILAND-REYES S., ZEDNIK S. & ZHAO J. (2013). Prov-o : The prov ontology. *W3C recommendation*, **30**.
- LORI J. ABENDROTH, ROGER W. ELMORE, MATTHEW J. BOYER & STEPHANIE K. MARLAY (2011). *Corn Growth and Development*. Iowa State University.
- MUSEN M. A. (2015). The protégé project : a look back and a look forward. *AI Matters*, **1**(4), 4–12.
- NADA A., NASR M. & HAZMAN M. (2014). Irrigation expert system for trees. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, **3**(8), 170–175.
- NGUYEN Q.-D., ROUSSEY C., POVEDA-VILLALÓN M., DE VAULX C. & CHANET J.-P. (2020). Development Experience of a Context-Aware System for Smart Irrigation Using CASO and IRRIG Ontologies. *Applied Sciences*, **10**(5), 1803.
- POVEDA-VILLALÓN M. (2012). A reuse-based lightweight method for developing linked data ontologies and vocabularies. In E. SIMPERL, P. CIMIANO, A. POLLERES, O. CORCHO & V. PRESUTTI, Eds., *The Semantic Web : Research and Applications*, p. 833–837, Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg.
- POVEDA-VILLALÓN M., GÓMEZ-PÉREZ A. & SUÁREZ-FIGUEROA M. C. (2014). OOPS! (Ontology Pitfall Scanner!) : An On-line Tool for Ontology Evaluation. *International Journal on Semantic Web and Information Systems (IJSWIS)*, **10**(2), 7–34.
- POVEDA VILLALÓN M., NGUYEN Q.-D., ROUSSEY C., DE VAULX C. & CHANET J.-P. (2018). Ontological Requirement Specification for Smart Irrigation Systems : A SOSA/SSN and SAREF Comparison. In *Proceedings of the 9th International Semantic Sensor Networks Workshop, International Semantic Web Conference*, volume 2213 of *CEUR Workshop Proceedings*, p. 1–16, Monterey, United States.
- RIJGERSBERG H., VAN ASSEM M. & TOP J. (2013). Ontology of units of measure and related concepts. *Semantic Web*, **4**(1), 3–13.
- SUÁREZ-FIGUEROA M. C., GÓMEZ-PÉREZ A. & FERNÁNDEZ-LOPEZ M. (2015). The neon methodology framework : A scenario-based methodology for ontology development. *Applied ontology*, **10**(2), 107–145.
- SUN J., DE SOUSA G., ROUSSEY C., CHANET J.-P., PINET F. & HOU K. M. (2016). Intelligent Flood Adaptive Context-aware System : How Wireless Sensors Adapt their Configuration based on Environmental Phenomenon Events. *IFSA*, **206**(11), 68–81.
- WANG Y. & WANG Y. (2018). Citrus ontology development based on the eight-point charter of agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, **155**, 359–370.
- WANG Y., WANG Y., WANG J., YUAN Y. & ZHANG Z. (2015). An ontology-based approach to integration of hilly citrus production knowledge. *Computers and Electronics in Agriculture*, **113**(C), 24–43.