

République Algérienne Démocratique et Populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Université Abbes Laghrour Khenchela
جامعة عباس لغرور خنشلة



Faculté des sciences et de la Technologie
Département de Mathématiques et Informatique

Thèse

Pour l'obtention du diplôme de doctorat LMD

Spécialité : Sécurité et Technologie Web

Représentation des Connaissances dans l'Internet des Objets : Modélisation Sémantique et Raisonnement

Présentée par :

Fatima Zahra AMARA

Devant le jury composé de :

Dr. Fayçal ABBAS	Université de Khenchela	Président
Pr. Mounir HEMAM	Université de Khenchela	Directeur
Pr. Moufida MAIMOUR	Université de Lorraine	Co-Directeur
Pr. Djamel BENMERZOUG	Université de Constantine 2	Examinateur
Dr. Rohallah BENABOUD	Université d'Oum El-Bouaghi	Examinateur
Dr. Mohammed El Habib SOUIDI	Université de Khenchela	Examinateur

Soutenue le : 1 Juillet 2024

Dédicace

“

À mon père, celui qui m'a montré la valeur du travail acharné, de la persévérance et de l'intégrité. Tes enseignements, ta sagesse et ton soutien constant ont été les fondations sur lesquelles j'ai bâti cette thèse. Cette réussite t'appartient autant qu'à moi. Merci pour ton amour inconditionnel et ton exemple inspirant.

À ma mère, ta tendresse, ton soutien sans faille et ta foi en mes capacités m'ont donné le courage d'atteindre de nouveaux sommets.

Cette thèse est le fruit de nos conversations inspirantes, de tes encouragements infinis et de ton amour incommensurable.

À mes chères sœurs et mon cher frère, vous êtes mes alliés précieux dans les hauts et les bas de la vie. Votre soutien indéfectible, votre amour inconditionnel et vos encouragements constants ont été pour moi une source inestimable de force et de réconfort.

À toute ma chère famille, À tous ceux qui me chérissent, pour chacun de vous qui avez illuminé mon chemin avec votre amour, votre soutien et votre bienveillance.

”

Fatima Zahra

Remerciements

"الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ"

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers mon directeur de thèse, *Pr. Mounir HEMAM*, pour sa guidance experte, son soutien constant et ses précieux conseils tout au long de ce travail de recherche. Sa patience, sa disponibilité, sa gentillesse et sa bienveillance ont été des atouts inestimables qui m'ont permis de progresser dans mes travaux et d'atteindre mes objectifs académiques.

Je souhaite exprimer mes remerciements à mon co-encadrante, *Dr. Moufida MAIMOUR*. Son expertise et son dévouement ont joué un rôle majeur dans mes premiers pas dans la recherche. Je souhaite également remercier *Dr. Meriem DJEZZAR* pour sa collaboration, son soutien et ses conseils éclairés ont illuminé mon parcours académique.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour leurs remarques constructives qui ont contribué à améliorer la qualité de cette thèse.

J'exprime un immense merci à *Dr. Sanju TIWARI* pour son mentorat exceptionnel et son soutien inestimable dans la recherche. Sa vision, sa générosité, son expertise et son engagement ont été des atouts précieux, ouvrant les portes de la collaboration internationale et stimulant la curiosité intellectuelle. Je lui suis éternellement reconnaissant(e) d'avoir cru en moi et d'avoir offert une opportunité de contribution significative dans un environnement dynamique.

Je désire à exprimer ma profonde gratitude au *Pr. Sven GROPE* pour m'avoir accordé l'opportunité précieuse de réaliser un stage au sein de son équipe à l'Université de Lübeck en Allemagne. Sa générosité et sa confiance en moi ont été des éléments déterminants dans cette expérience enrichissante et dans les collaborations qui ont suivi.

Je suis reconnaissante envers tous mes enseignants, mes collègues et amis qui ont partagé avec moi leurs idées, leurs expériences et leur soutien moral tout au long de ce parcours académique.

Résumé

La croissance rapide de l'Internet des Objets est alimentée par la prolifération de l'Internet et des technologies intelligentes, conduisant à une transformation majeure dans divers secteurs, y compris l'industrie 4.0. Au cœur de cette évolution, le Système Cyber-Physique joue un rôle crucial en permettant une surveillance autonome et la transmission d'informations via Internet. Cependant, la diversité des appareils de l'Internet des Objets et la variété des données générées posent des défis complexes en termes d'interopérabilité, de complexité et d'hétérogénéité. L'émergence de l'Internet des Objets devient cruciale pour la vision de l'Industrie 4.0, nécessitant une communication intelligente entre les humains et les machines, ainsi qu'entre les machines elle mêmes. Pour surmonter les défis liés à la diversité des appareils et des données, l'interopérabilité sémantique est identifiée comme une solution essentielle. Alors que les technologies du Web sémantique, y compris le Web sémantique des objets, sont explorées pour relever ces défis, des limites demeurent, en particulier en ce qui concerne l'application en temps réel du Web sémantique des objets.

Pour fournir des éléments de réponse à cette problématique nous proposons un framework innovant centré autour de la sémantique en temps réel. Le framework proposé couvre plusieurs contributions significatives telles que le développement d'une ontologie nommée "I4.0-Onto", l'annotation sémantique en temps réel des données, et la mise en œuvre de moteurs de requête et de raisonnement, ainsi que la publication des données sous forme de données liées. Ces avancées, issues du domaine du Web sémantique, offrent des perspectives prometteuses pour l'automatisation, la personnalisation, la récupération d'informations et la réutilisation des données dans le contexte dynamique de l'Internet des Objets et de l'industrie 4.0.

Dans cette thèse, l'ontologie "I4.0-Onto" sert de base structurée, facilitant la représentation et la compréhension de divers appareils de l'Internet des Objets et de leurs données en temps réel. L'annotation sémantique en temps réel des données améliore l'interopérabilité de l'information, permettant une prise de décision en temps opportun dans des environnements industriels dynamiques. De plus, la mise en place de moteurs de requête et de raisonnement assure une utilisation efficace de la sémantique en temps réel. Cela aide non seulement à la surveillance autonome, mais améliore également la réactivité globale des systèmes de l'Internet des Objets.

Mots clés : Internet des Objets, Web Sémantique, Annotation sémantique, Ontologie, Données liées, Raisonnement sémantique.

Abstract

The rapid growth of the Internet of Things is fueled by the proliferation of the Internet and smart technologies, leading to a major transformation in various sectors, including Industry 4.0. At the heart of this evolution, the physical cyber system plays a crucial role in enabling autonomous monitoring and the transmission of information via the Internet. However, the diversity of Internet of Things devices and the variety of data generated pose complex challenges in terms of interoperability, complexity and heterogeneity. The emergence of the Internet of Things is becoming crucial to the vision of Industry 4.0, requiring intelligent communication between humans and machines, as well as between machines themselves. To overcome the challenges of device and data diversity, semantic interoperability is identified as an essential solution. While Semantic Web technologies, including the Semantic Web of Things, are being explored to address these challenges, limitations remain, particularly with respect to the real-time application of the Semantic Web of Things.

To provide answers to this problem, we propose an innovative framework centered around real-time semantics. The proposed framework covers several significant contributions such as the development of an ontology named "I4.0-Onto", real-time semantic annotation of data, and the implementation of query and reasoning engines, as well as publishing the data as linked data. These advances, from the semantic web, offer promising prospects for automation, personalization, information retrieval and data reuse in the dynamic context of the Internet of Things and Industry 4.0.

In this thesis, the ontology "I4.0-Onto" serves as a structured basis, facilitating the representation and understanding of various devices of the Internet of Things and their data in real time. real-time semantic annotation of data improves the interpretability of information, enabling timely decision-making in dynamic industrial environments. Moreover, the implementation of query and reasoning engines ensures an efficient use of semantics in real time. This not only helps with autonomous monitoring, but also improves the overall responsiveness of Internet of Things systems.

Keywords :Internet of Things, Semantic Web, Semantic annotation, Ontology, Linked data, Semantic reasoning.

ملخص

النمو السريع لإنترنت الأشياء يحفز انتشار الإنترنت والتقنيات الذكية، مما يؤدي إلى تحول كبير في مختلف القطاعات، بما في ذلك الصناعة 4.0. وفي قلب هذا التطور، يلعب النظام الفيزيائي السيبراني دوراً حاسماً من خلال تمكين المراقبة المستقلة ونقل المعلومات عبر الإنترنت. ومع ذلك، فإن تنوع أجهزة إنترنت الأشياء وتنوع البيانات المتولدة يطرح تحديات معقدة من حيث قابلية التشغيل البيئي والتعقيد وعدم التجانس. أصبح ظهور إنترنت الأشياء أمراً حاسماً لتحقيق رؤية الصناعة 4.0، مما يتطلب التواصل الذكي بين البشر والآلات، وكذلك بين الآلات ذاتها. للتغلب على التحديات التي يفرضها تنوع الأجهزة والبيانات، تم تحديد قابلية التشغيل البيئي الدلالي كحل أساسي. وبينما يستمر استكشاف تقنيات الويب الدلالي، بما في ذلك الويب الدلالي للأشياء، لمواجهة هذه التحديات، لا تزال هناك قيود، لا سيما فيما يتعلق بالتطبيق الآني للويب الدلالي للأشياء. لتقديم بعض الإجابات على هذه المشكلة، نقترح إطار عمل مبتكر يتمحور حول دلالات الوقت الحقيقي. ويغطي الإطار المقترح عدة إسهامات مهمة مثل تطوير أنطولوجيا تحمل اسم "I4.0-Onto" والتعليق الدلالي للبيانات في الوقت الحقيقي، وتنفيذ محركات الاستعلام والاستدلال، فضلاً عن نشر البيانات في شكل بيانات مترابطة. توفر هذه التطورات النابعة من مجال الويب الدلالي آفاقاً واعدة لأتمتة البيانات وتخصيصها واسترجاع المعلومات وإعادة استخدامها في السياق الديناميكي لإنترنت الأشياء والصناعة 4.0. في هذه الأطروحة، يعمل الأنطولوجيا "I4.0-Onto" كأساس منظم، مما يسهل تمثيل وفهم مختلف أجهزة إنترنت الأشياء وبياناتها في الوقت الفعلي. يعمل التعليق التوضيحي الدلالي للبيانات في الوقت الفعلي على تحسين قابلية تفسير المعلومات، مما يتيح اتخاذ القرارات في الوقت المناسب في البيئات الصناعية الديناميكية. بالإضافة إلى ذلك، يضمن تنفيذ محركات الاستعلام والاستدلال الاستخدام الفعال للدلالات في الوقت الحقيقي. وهذا لا يساعد فقط في المراقبة المستقلة، بل يحسن أيضاً من الاستجابة الكلية لأنظمة إنترنت الأشياء.

كلمات مفتاحية: إنترنت الأشياء، الويب الدلالي، التعليق الدلالي، أنطولوجيا، بيانات مرتبطة، الاستدلال الدلالي.

Table des matières

Dédicace	I
Remerciements	II
Résumé	III
Abstract	IV
V	ملخص
Introduction générale	1
1 Représentation des Connaissances et Raisonnement	5
1.1 Bases de la Représentation des Connaissances et du Raisonnement	6
1.1.1 Représentation des Connaissances	6
1.1.1.1 Formalisme de la Représentation des Connaissances	7
1.1.2 Raisonnement	7
1.1.2.1 Synergie entre Connaissances et Raisonnements	8
1.2 Applications de la Représentation des Connaissances et du Raisonnement	8
1.2.1 Systèmes experts	8
1.2.2 Traitement du langage naturel	9
1.2.3 Robotique et automatisation	9
1.3 Technologie du Web Sémantique	9
1.3.1 Historique et évolution du Web Sémantique	10
1.3.2 Les Langages de la Représentation de la Connaissance	12
1.3.2.1 XML (eXtensible Markup Language)	12
1.3.2.2 RDF (Resource Description Framework)	13
1.3.2.3 RDFs (Resource Description Framework Schema)	14
1.3.2.4 OWL (Ontology Web Language)	14
1.3.3 Ontologie	16
1.3.3.1 Composants d'une Ontologie	16
1.3.4 Extraction sémantique	17
1.3.4.1 SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language)	18
1.3.4.2 SWRL (Sematic Web Rule Lanuage)	19
1.3.5 Linked Data	20
1.3.6 Défis et limitation du Web Sémantique	20
1.4 Outils de Représentation de Connaissance et Raisonnement	21
1.4.1 Protégé	22
1.4.2 Jena	22
1.4.3 TopBraid Composer	22
1.4.4 Prolog	22

1.4.5	PoolParty	22
1.4.6	GraphDB	22
1.5	Conclusion	23
2	Internet des Objets : Connectant le Monde Physique au Numérique	24
2.1	IoT Principes, Composants et Défis	25
2.1.1	Principes de l’IoT	25
2.1.2	Composants de l’IoT	26
2.1.3	Défis de l’IoT	26
2.2	Architecture de l’Internet des Objets	28
2.3	Evolution de l’Internet des Objets	29
2.3.1	l’Internet des Objets	29
2.3.2	Le Web des Objets	30
2.3.3	Le Web Sémantique des Objets	30
2.3.4	Framework du Web Semantique des Objets	31
2.3.4.1	BIG-IoT [61, 62]	31
2.3.4.2	FIESTA IoT	31
2.3.4.3	VICINITY [65]	32
2.3.4.4	INTER-IoT [66]	32
2.3.4.5	Open-IoT [67]	32
2.3.4.6	SymbIoTe	32
2.3.4.7	M3 Framework	33
2.4	Applications de l’Internet des Objets	33
2.4.1	Ville intelligente	34
2.4.2	Agriculture intelligente	34
2.4.3	Santé connectée	35
2.4.4	Énergie intelligente	35
2.4.5	Domotique	35
2.4.6	Industrie 4.0	35
2.5	L’Internet des Objets au Service de l’Industrie 4.0	35
2.5.1	Fondements et Technologies clé de l’Industrie 4.0	36
2.5.1.1	Internet des Objets	36
2.5.1.2	Internet Industriel des Objets	37
2.5.1.3	Cyber Physical Systems	37
2.5.1.4	Big Data et Analyse de Données	38
2.5.1.5	Intégration horizontale et verticale	38
2.5.1.6	Cloud Computing	39
2.5.1.7	Réalité augmentée	39
2.5.1.8	Jumeau numérique	39
2.5.1.9	Cybersécurité	39
2.5.2	Impact de l’IoT sur les processus de fabrication	39
2.5.3	Défis et opportunités de l’IoT dans l’Industrie 4.0	40
2.6	Tendances futures de l’IoT pour l’industrie 4.0	41
2.7	Conclusion	42
3	Interopérabilité Sémantique et Modélisation Temps Réel	43
3.1	Interopérabilité Sémantique	44
3.1.1	Solutions Clés pour l’Interopérabilité Sémantique	45
3.1.2	Les Défis de l’interopérabilité Sémantique	46

3.1.3	Annotation Sémantique de Données	46
3.1.4	Ontologie et Internet des objets	46
3.2	Modélisation en Temps Réel	48
3.2.1	Modélisation Sémantique en Temps Réel	49
3.2.1.1	Outils de Modélisation Sémantique en Temps Réel	49
3.2.1.2	Avantages de la Modélisation en Temps Réel	51
3.3	Interconnecter les Systèmes en Temps Réel	53
3.3.1	Défis et Perspectives	54
3.4	L'Impact de l'Interopérabilité Sémantique dans l'industrie 4.0	54
3.5	Conclusion	58
4	Développement de l'Ontologie de l'Industrie 4.0	60
4.1	La Réutilisation des Ontologies Existantes	60
4.2	Méthodologie	62
4.3	Spécification du Domaine de l'Ontologie	64
4.4	Conceptualisation : Identifier les Concepts Clés	65
4.5	Choisir un Langage d'Ontologie	67
4.6	Développement et Implémentation de l'I4.0-Onto	68
4.6.1	Créer la structure de l'ontologie	68
4.6.1.1	Création des classes et sous-classes	68
4.6.1.2	Création des Propriétés	71
4.6.1.3	Création des Individus	73
4.7	Validation de l'ontologie	76
4.8	Conclusion	77
5	Framework Sémantique : Modélisation en Temps Réel et Raisonnement	79
5.1	Vision Générale du Framework	80
5.2	Développement et Implémentation du Framework	81
5.2.1	Couche de Ressources et de Traitement des Données	82
5.2.2	Couche de représentation des connaissances	86
5.2.3	Couche Règles Sémantiques	87
5.2.3.1	Raisonnement Sémantique	87
5.2.3.2	Recherche sémantique	89
5.2.4	Couche Publication des Données	93
5.2.5	Couche d'application industrielle et IoT	94
5.3	Avantages et Contributions du Framework	94
5.4	Conclusion	95
	Conclusion et perspectives	96
	Bibliographie	99

Liste des figures

1.1	Vision de la Représentation des Connaissances.	7
1.2	Les couches d'architecture du Web Sémantique.	10
1.3	Chronologie présentant l'évolution du Web sémantique.	11
1.4	Exemple Triplet RDF.	13
1.5	Représentation graphique du RDF/XML.	14
1.6	Représentation graphique de RDF et RDFS : passer des triplets de base au schéma sémantique.	15
1.7	Les couches de l'OWL.	15
1.8	Représentation Visuelle du Flux de Travail SPARQL.	18
2.1	Principes de l'Internet des Objets.	25
2.2	Composants majeurs de l'Internet des Objets.	26
2.3	Défis de l'Internet des Objets.	27
2.4	Architecture de l'IoT.	28
2.5	De l'Internet des Objets au Web Semantic des Objets.	30
2.6	Technologies Clés de l'Industrie 4.0.	36
2.7	IoT, IIoT, Industrie 4.0 et CPS dans le diagramme de Venn [84].	38
3.1	Casser les silos de données: laisser les machines dialoguer!	44
3.2	Vision de l'interopérabilité sémantique dans l'IoT.	45
4.1	L'ontologie SOSA.	61
4.2	METHONTOLOGIE : Le processus de développement d'une ontologie.	64
4.3	Composants de l'industrie 4.0.	65
4.4	Classes et sous-classes de l'ontologie I4.0-Onto.	68
4.5	Hierarchie de classes de l'ontologie I4.0-Onto.	70
4.6	Propriétés d'Objet (Object Properties) de l'ontologie I4.0-Onto.	72
4.7	Propriétés de Données (Data Properties) de l'ontologie I4.0-Onto.	72
4.8	Individus de l'ontologie I4.0-Onto.	74
4.9	Une partie de l'ontologie I4.0-Onto représentée avec OntoGraph.	75
4.10	L'interface de Themis.	76
4.11	Tests et résultats.	77
5.1	Présentation générale du framework proposé.	80
5.2	Framework proposé pour la modélisation et le raisonnement sur les données de flux IoT dans I4.0.	82
5.3	Couche de ressources et de traitement des données en temps réel.	83
5.4	Exécution des règles SWRLTab.	89
5.5	Résultat de la requête SPARQL 1 dans Protégé.	90
5.6	Résultat de la requête SPARQL 2 dans Protégé.	91
5.7	Résultat de la requête SPARQL 3 dans Protégé.	92
5.8	Résultat de la requête SPARQL 4 dans Protégé.	93

5.9 Modèle développé sur le cloud LOD. 94

Liste des tableaux

1.1	Aperçu des Projets du Web Sémantique Indexant les Ontologies et Vocabulaires.	21
1.2	Outils de Connaissances et Raisonnement	23
2.1	Framework améliorant l'interopérabilité des systèmes IoT	34
3.1	Ontologies de l'IoT	48
3.2	Comparaison des outils pour l'annotation sémantique en temps réel	52
3.3	Tableau comparatif des recherches	57
3.4	Comparaison des travaux récents de la littérature.	58

Liste des sigles et acronymes

IoT	<i>Internet of Things</i>
WoT	<i>Web of Things</i>
SWoT	<i>Semantic Web of Things</i>
I4.0	<i>Industry 4.0</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
CPS	<i>Cyber Physical Systems</i>
IA	<i>Intelligence Artificielle</i>
OWL	<i>Ontology Web Languge</i>
RDF	<i>Resource Description Framework</i>
SWRL	<i>Semantic Web Rule Languge</i>
NLP	<i>Natural Language Processing</i>
WWW	<i>World Wide Web</i>

Introduction générale

Contexte de la recherche

En raison de l'expansion significative de l'internet et des technologies intelligentes, l'IoT connaît une croissance rapide, présentant des défis et des opportunités substantiels. Le déploiement du paradigme IoT a déclenché une vague d'innovation, en faisant la tendance technologique émergente la plus significative [1]. Les progrès de l'IoT ont révolutionné l'industrie, propulsant le domaine de l'Industrie 4.0 (I4.0), similaire à la révolution industrielle initiale. Au cœur de la mise en œuvre de l'I4.0 se trouve le Système Cyber-Physique, capable de surveiller et de générer de manière autonome des informations sous forme de flux de données via internet. La composition des sous-systèmes est essentielle dans la fabrication des systèmes IoT modernes, améliorant continuellement les interactions entre des systèmes divers qui génèrent des données de flux détectées avec un haut niveau de pénétration. L'IoT a transformé les modes de vie modernes en comblant le fossé entre les mondes physique et virtuel [2]. Selon des statistiques récentes, le nombre d'appareils IoT dépassera 25,4 milliards d'ici 2030. Par conséquent, la quantité de données générées devrait atteindre 73,1 zettaoctets d'ici 2025¹.

L'IoT devrait jouer un rôle critique dans la vision de l'I4.0 avec la naissance de l'Internet Industriel des Objets (IIoT), qui est une collection d'ensembles de capteurs intelligents et d'objets intégrés à une configuration d'application industrielle en temps réel [3]. Cela nécessite une communication intelligente homme-machine et machine-machine. Des composants tels que des actionneurs, des capteurs, des CPS et leurs données sont utilisés pour atteindre cet objectif. La nature omniprésente des composants qui génèrent en continu des données via Internet et communiquent avec d'autres entités associées, accumulant une énorme quantité de données brutes sur le web, soulève plusieurs problèmes, tels que la faible interopérabilité, l'hétérogénéité et la complexité élevée du développement. La nature hétérogène des différents dispositifs et la variété des données générées posent des défis à l'utilisation efficace de la production I4.0. Il est souligné que l'interopérabilité entre les "Objets" sur l'IoT est l'un des critères essentiels pour prendre en charge l'adressage, le suivi et la découverte d'objets, ainsi que la représentation, le stockage et l'échange d'informations [4]. Les entreprises de fabrication modernes s'efforcent de numériser la gestion des actifs physiques, des processus, des personnes et des lieux. Étant donné que d'énormes quantités de données brutes sont générées et collectées dans cet environnement, l'intégration et la gestion de diverses sources de données sont vitales. Ainsi, la fourniture d'interopérabilité sémantique pour les systèmes IoT est devenue un domaine d'étude crucial. Des problèmes d'interopérabilité surviennent lorsque des dispositifs et des systèmes hétérogènes sont liés dans un système IIoT [5].

L'interopérabilité sémantique garantit que les informations et les services sont partagés pour préserver le flux sémantique. Peu importe la diversité, chaque système doit être capable d'identi-

¹<https://dataprot.net/statistics/iot-statistics/>

fier les données, de les représenter et de les contextualiser pour comprendre les données partagées de manière significative. Comme la communication est principalement destinée à être interprétée par une machine et ne sera transmise à un utilisateur humain qu'une fois transformée, des modèles riches et expressifs semblent particulièrement appropriés dans le cas des objets connectés. De nombreuses tentatives ont été faites pour résoudre ce problème en présentant différentes approches basées sur le Web sémantique pour fusionner les technologies du Web sémantique avec l'IoT. Dans le secteur de l'IoT, les technologies du Web sémantique sont également appliquées à d'autres objectifs tels que la description et la recherche d'objets et de services IoT, la composition de services, les modèles et le raisonnement sur les ressources IoT [6], conduisant au cadre du Web sémantique des objets (SWoT). Cependant, ils présentent encore certains problèmes et limitations, notamment le fait que le SWoT n'est pas une application en temps réel, puisque les données brutes sont initialement stockées sur le web. La transmission en temps réel des données d'applications et de dispositifs via internet a été identifiée comme l'un des principaux indicateurs de performance [7]. Les normes, protocoles et technologies de réseau interopérables facilitent l'adoption de la technologie I4.0 par les entreprises. Ainsi, il existe une demande croissante pour le développement d'une approche sémantique en temps réel.

Problématique

Au cours des dernières années, la prolifération des capteurs intégrés dans des dispositifs intelligents tels que les téléphones mobiles, les montres intelligentes et les lunettes connectées a connu une croissance remarquable. Ces objets intelligents, de plus en plus interconnectés à l'internet, contribuent à l'émergence d'applications de l'IoT, redéfinissant ainsi divers secteurs, dont l'Industrie 4.0.

L'Industrie 4.0, en tant qu'exemple emblématique du champ d'application de l'IoT, illustre parfaitement la convergence entre les technologies intelligentes et la connectivité. Dans ce contexte, non seulement le développement d'infrastructures et de logiciels est crucial, mais également la conception et le déploiement de services innovants capables de prendre en charge des applications industrielles multiples, évolutives et interopérables.

Cependant, au sein de l'IoT, les défis persistent, et parmi eux, l'interconnexion des objets et leur interopérabilité sémantique demeurent des enjeux critiques. La nature diverse et hétérogène des données et des ressources de l'IoT crée une complexité supplémentaire, mettant en évidence la nécessité d'une interconnexion sémantique pour surmonter les obstacles à la communication et à l'interopérabilité entre les divers composants de l'Industrie 4.0.

Afin de répondre à ces défis de manière dynamique, la modélisation sémantique en temps réel émerge comme une nécessité impérieuse. En effet, la compréhension sémantique des données en temps réel permet une adaptation instantanée aux changements dans l'environnement industriel, favorisant ainsi une prise de décision rapide et éclairée. Cette approche donne aux systèmes IoT de l'Industrie 4.0 la capacité de réagir de manière intelligente aux fluctuations et aux exigences évolutives, créant ainsi des environnements industriels agiles et efficaces, où la modélisation sémantique devient une clé essentielle pour maximiser l'utilisation des capacités de l'IoT.

Contributions

La thèse présente des contributions significatives en proposant un cadre novateur centré sur la sémantique en temps réel, offrant des perspectives prometteuses pour l'automatisation, la

personnalisation, la récupération d'informations, la réutilisation des données et la découverte de connaissances. Ce cadre novateur s'articule autour d'une série d'étapes clés, notamment l'annotation sémantique en temps réel des flux de données, la représentation des connaissances, le raisonnement sur ces annotations, et la requête sur les données annotées de manière sémantique, suivie de la publication de ces données en tant que Linked Data. Face à la diversité des données, la thèse s'appuie sur les progrès du Web sémantique en mettant en avant l'utilisation stratégique d'ontologies, de l'annotation sémantique, du Linked Data et du raisonnement sémantique en tant que solutions essentielles. Ces avancées, issues du domaine du Web sémantique, se révèlent être des éléments clés pour surmonter l'hétérogénéité des données et réaliser une interopérabilité sémantique efficace, particulièrement dans le contexte spécifique de l'IoT. Ainsi, cette thèse ouvre la voie à des applications avancées en fournissant un cadre complet et innovant intégrant ces technologies sémantiques.

Les contributions dans cet thèse sont données comme suit :

- **Élaboration de l'ontologie I4.0-Onto pour la représentation des connaissances**
 - Développement l'I4.0-Onto en tant que cadre robuste pour la représentation des connaissances IoT dans le contexte de l'Industrie 4.0.
 - Construction une ontologie complète qui englobe les concepts clés, les relations et les entités pertinents pour l'Industrie 4.0, facilitant l'organisation efficace des connaissances.
- **Annotation en temps réel des données, assurant une intégration en temps réel de la sémantique dans les données de flux de capteurs hétérogènes**
 - Mise en œuvre des techniques d'annotation en temps réel pour intégrer de manière transparente des informations sémantiques dans des données de flux de capteurs divers.
 - Permission de l'incorporation immédiate et dynamique de contextes significatifs, améliorant la compréhension et l'interprétation des données en temps réel.
- **Fournir des moteurs de requête et de raisonnement pour déduire et acquérir de nouvelles connaissances afin de répondre à des requêtes complexes**
 - Mise en œuvre des processus inférentiels pour déduire et acquérir de nouvelles connaissances, permettant au système de répondre de manière efficace à des requêtes complexes.
 - Développement des moteurs de requête sophistiqués capables de traiter des demandes complexes, en utilisant des mécanismes de raisonnement avancés.
- **Publication des données structurées en tant que données liées pour permettre la récupération de données structurées à partir de différentes sources**
 - Établit un mécanisme pour publier des données structurées sous forme de données liées, assurant l'accessibilité à partir de différentes sources.
 - Permet la récupération aisée de données structurées, favorisant l'interopérabilité et la facilité d'intégration sur différentes plates-formes et applications.

Structure de la thèse

Cette thèse est organisée en cinq chapitres :

Chapitre 1

Explore en détail la représentation des connaissances et le raisonnement dans le domaine de l'intelligence artificielle, mettant l'accent sur la formalisation de l'information, les différentes formes de raisonnement, et les concepts clés tels que les ontologies et le Web Sémantique. Il offre une compréhension approfondie de ces fondements essentiels, soulignant leur rôle crucial dans le développement de systèmes informatiques intelligents.

Chapitre 2

Représente l'IoT, examinant ses principes fondamentaux, ses applications diverses, et mettant en évidence son rôle essentiel dans la transformation numérique, notamment au sein de l'industrie 4.0, tout en abordant les défis et les tendances futures.

Chapitre 3

Examine en détail les fondements de l'interopérabilité sémantique et de la modélisation en temps réel, mettant en lumière leur importance dans la connectivité technologique contemporaine. En se concentrant sur la compréhension commune des données entre systèmes et l'analyse dynamique des changements instantanés, le chapitre aborde les défis, propose des solutions innovantes, et évalue l'impact crucial de ces concepts, notamment dans le contexte de l'industrie 4.0.

Chapitre 4

Détaille de manière approfondie le processus intégral de création de l'ontologie dédiée à l'industrie 4.0. Il met en avant son rôle crucial dans l'établissement d'un environnement d'information cohérent tout en examinant la synergie essentielle entre I4.0-Onto et les ontologies préexistantes, visant à atteindre une interopérabilité optimale.

Chapitre 5

Introduit les développements et l'implémentation du framework novateur spécifiquement conçu pour l'IoT dans le contexte de l'industrie 4.0, visant à automatiser, personnaliser, rechercher, réutiliser les données, et découvrir des connaissances, grâce à une approche sémantique en temps réel.

La thèse s'achève avec une conclusion générale récapitulant le contexte de recherche de notre étude, nos contributions et énonce un ensemble de perspectives.

Chapitre 1

Représentation des Connaissances et Raisonement

La représentation et le raisonnement des connaissances sont l'un des domaines prometteurs de l'intelligence artificielle (IA) [8]. L'intelligence artificielle est un domaine en constante évolution qui vise à doter les machines de la capacité de penser, d'apprendre et de prendre des décisions de manière similaire à l'être humain. Parmi les nombreux domaines qui composent l'IA, la représentation des connaissances et le raisonnement s'intéressent à la pensée des objets d'IA et à la manière dont cette pensée contribue au comportement intelligent des objets. Ils se focalisent sur la représentation des informations et des données du monde réel dans un format que les machines peuvent utiliser pour résoudre des problèmes concrets. De plus, ils démontrent comment ces connaissances peuvent être exploitées dans un processus de raisonnement pour déduire de nouvelles connaissances à partir de connaissances existantes [9].

En 1995, Klein et Methlie ont défini la représentation des connaissances comme "La représentation des connaissances signifie que les connaissances sont formalisées sous une forme symbolique, c'est-à-dire qu'elles trouvent une expression symbolique qui peut être interprétée" [10]. La représentation des connaissances consiste à créer une structure ou un modèle qui permet de stocker et d'organiser l'information de manière à ce qu'elle puisse être utilisée de manière efficace par les ordinateurs. Elle s'inspire de la manière dont les êtres humains organisent leur propre connaissance. Cette représentation peut prendre diverses formes, des bases de données structurées aux réseaux sémantiques en passant par les ontologies. L'objectif est de permettre aux machines de stocker des faits, des concepts, des relations et des règles, et de les manipuler de manière à pouvoir effectuer des tâches complexes.

Le raisonnement, quant à lui, est le processus par lequel un système utilise les connaissances représentées pour tirer des conclusions, prendre des décisions, résoudre des problèmes ou répondre à des questions. Il peut prendre plusieurs formes, dont le raisonnement déductif, inductif et abductif. Le raisonnement déductif consiste à appliquer des règles logiques pour dériver des conclusions à partir de faits établis. Le raisonnement inductif généralise à partir d'observations pour créer des hypothèses. Le raisonnement abductif consiste à inférer la meilleure explication possible à partir des données disponibles.

Ces concepts sont au cœur de nombreuses applications d'IA, de la conception de systèmes experts capables de résoudre des problèmes spécifiques à la compréhension du langage naturel, en passant par la planification de tâches, la robotique et la prise de décision autonome. Les systèmes d'IA modernes sont capables de stocker d'énormes quantités de données, mais leur capacité à les comprendre et à les utiliser repose en grande partie sur la manière dont ces données sont

représentées et sur la qualité de leur raisonnement.

Ce présent chapitre explore les fondements de la Représentation des Connaissances et du Raisonnement. Nous commencerons par les bases de la Représentation des Connaissances et du Raisonnement, examinant comment formaliser l'information pour les systèmes informatiques et comment ces systèmes tirent des conclusions logiques. La Technologie du Web Sémantique sera ensuite présentée, mettant en lumière son évolution et son impact. Nous aborderons les Langages de la Représentation de la Connaissance, en se concentrant sur l'Ontologie, et explorerons des aspects pratiques tels que l'Extraction Sémantique, SPARQL, SWRL, et Linked Data. Enfin, nous discuterons des Outils de Représentation de Connaissance et de Raisonnement, offrant une vision complète de ces concepts essentiels dans le l'intelligence artificiel.

1.1 Bases de la Représentation des Connaissances et du Raisonnement

Les fondements de la représentation des connaissances et du raisonnement sont à la base de la manière dont les systèmes informatiques parviennent à traiter, gérer et utiliser les connaissances de manière intelligente.

La représentation des connaissances et le raisonnement constituent la branche de l'intelligence artificielle (IA) qui se penche sur la pensée des agents d'IA et sur la manière dont cette pensée contribue au comportement intelligent des agents. Elle se focalise sur la représentation des informations et des données du monde réel dans un format que les machines peuvent utiliser pour résoudre des problèmes concrets. Elle démontre également comment ces connaissances peuvent être exploitées dans un processus de raisonnement pour déduire de nouvelles informations à partir de connaissances existantes. La Représentation des Connaissances et du Raisonnement est dédié à l'étude (identification, modélisation, représentation et mise en œuvre) des divers types d'informations tels que les connaissances, les croyances, les préférences, les actions, etc., ainsi que du raisonnement nécessaire au développement de tels systèmes. Ces systèmes acquièrent des connaissances à partir de flux de données continus et hétérogènes. Les technologies sémantiques offrent un large éventail d'outils et de méthodes pour représenter, intégrer et acquérir des connaissances.

1.1.1 Représentation des Connaissances

La représentation des connaissances implique la conversion d'informations sur le monde dans un format utilisable par un système informatique pour résoudre des tâches complexes. Elle nécessite la création de formalismes ou de structures permettant d'encoder les connaissances de manière à la fois compréhensible par les humains et exploitable par les machines.

En 1995, Klein et Methlie ont défini la représentation des connaissances comme suit : "La représentation des connaissances signifie que les connaissances sont formalisées sous une forme symbolique, c'est-à-dire qu'elles trouvent une expression symbolique qui peut être interprétée" [10].

Des approche variées pour modéliser divers aspects de la connaissance sont également fournies par des approches telles que les réseaux sémantiques, les cadres (Frames), graphes de connaissances, les ontologies et la représentation basée sur le langage naturel. L'utilisation de ces techniques dépend souvent du contexte d'application, des types de connaissances à représenter et des exigences particulières du système d'intelligence artificielle en question. Il est possible de créer des représentations de connaissances riches et adaptées à des domaines variés en combinant ces

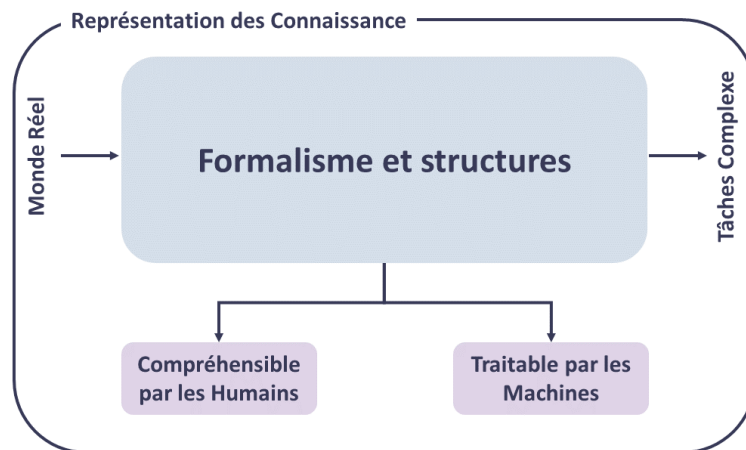


FIG. 1.1 : Vision de la Représentation des Connaissances.

méthodes.

1.1.1.1 Formalisme de la Représentation des Connaissances

La formalisation des connaissances est le processus d'acquisition et d'organisation des connaissances de manière méthodique et objective. Il s'agit d'extraire les informations pertinentes de diverses sources et de formaliser ces connaissances pour créer une base de connaissances unifiée et formalisée. Ces connaissances formalisées sont ensuite utilisées pour vérifier et garantir la fiabilité du fonctionnement des systèmes ou des processus [11].

L'émergence d'outils formels sophistiqués, tels que les graphes conceptuels et les réseaux sémantiques, a considérablement enrichi la représentation des connaissances complexes. Ce progrès, notamment dans le domaine de l'intelligence artificielle, a conduit à l'adoption de représentations formelles où les connaissances sont exprimées par des entités logiques interconnectées à travers des propriétés, des axiomes et des règles. Ces représentations formelles jouent un rôle essentiel dans les systèmes experts.

L'avènement du Web a apporté une dimension nouvelle, particulièrement avec l'émergence du Web sémantique (Section 1.3), introduisant le concept controversé d'ontologie. Cette évolution a donné lieu à plusieurs langages, dont les normes RDF, RDFS et OWL du W3C¹.

1.1.2 Raisonnement

Le raisonnement consiste à tirer des conclusions ou à faire des déductions sur la base des connaissances représentées. Différents types de mécanismes de raisonnement sont utilisés en fonction de la nature de la représentation des connaissances.

Les chercheurs ont avancé différentes définitions des concepts fondamentaux du raisonnement à partir des connaissances. Selon Zhang et Zhang [12], le raisonnement est un processus impliquant l'analyse, la synthèse et la prise de décision sur divers sujets. Il commence par la collecte de faits existants, la découverte d'interrelations entre les éléments, et le développement de nouvelles idées. En somme, le raisonnement est la démarche permettant de tirer des conclusions à partir de faits existants en suivant des règles établies. Kompridis [13] considère le raisonnement comme un terme englobant diverses compétences, notamment la compréhension, l'application de la logique,

¹<https://www.w3.org/>

et l'ajustement ou la validation de l'architecture sur la base des connaissances existantes. Tari [14] a défini le raisonnement sur les connaissances comme le mécanisme permettant de déduire de nouvelles connaissances à partir de faits et de règles logiques préexistants. En résumé, le raisonnement sur les connaissances est le processus consistant à utiliser des connaissances établies pour déduire de nouvelles connaissances.

Les premières tentatives de développement de méthodes de raisonnement basées sur la connaissance, telles que le raisonnement ontologique, ont suscité un vif intérêt et ont donné lieu à diverses approches. En outre, des techniques telles que le raisonnement logique par prédicat et le raisonnement ontologique peuvent être utilisées pour effectuer un raisonnement sur des graphes de connaissances [15]. Le raisonnement est le mécanisme par lequel un moteur d'inférence évalue les assertions logiques faites dans une ontologie et la base de connaissances associée [16].

1.1.2.1 Synergie entre Connaissances et Raisonnements

Une représentation efficace des connaissances est essentielle pour le raisonnement, elle permet de raisonner sur les connaissances représentées [17]. Dans le contexte des systèmes intelligents de résolution de problèmes, la conception de la base de connaissances et du moteur d'inférence est cruciale, car ils s'appuient sur les connaissances humaines pour résoudre les problèmes [18]. la synergie entre connaissances et raisonnements crée un écosystème dans lequel la représentation formelle des connaissances fournit le substrat nécessaire au raisonnement logique, permettant ainsi aux systèmes intelligents de comprendre le monde, de résoudre des problèmes complexes et d'évoluer au fil du temps. Cette synergie constitue la pierre angulaire du progrès continu dans le domaine de l'intelligence artificielle.

1.2 Applications de la Représentation des Connaissances et du Raisonnement

La planification, l'ordonnancement, le diagnostic et le contrôle des robots sont quelques-unes des nombreuses applications de la représentation des connaissances et raisonnement. De plus, il contribue à la résolution des problèmes, fait des suggestions et fournit des explications. Le raisonnement et la représentation des connaissances se positionnent comme des outils puissants pour la construction de systèmes intelligents. Voici quelques secteurs clés où la représentation des connaissances et le raisonnement revêtent une importance capitale :

1.2.1 Systèmes experts

Les systèmes basés sur la connaissance ont été développés en 1965 ² et étaient généralement connus sous le nom de systèmes experts. Ces systèmes utilisent des connaissances spécialisées et des règles logiques pour prendre des décisions ou fournir des conseils dans leur domaine d'expertise. La représentation des connaissances est essentielle à la conception d'un système expert [19].

Les systèmes experts font partie du domaine général de l'intelligence artificielle. Ils utilisent une approche symbolique pour représenter les connaissances et simuler le processus utilisé par les experts pour résoudre les problèmes. Pour accomplir ces prouesses, un système expert s'appuie sur

²<https://www.britannica.com/technology/expert-system>

deux composants : une base de connaissances et un moteur d'inférence. La base de connaissances est une collection organisée de faits sur le domaine du système, tandis qu'un moteur d'inférence interprète et évalue les faits dans la base de connaissances afin de fournir une réponse.

1.2.2 Traitement du langage naturel

La représentation des connaissances joue un rôle crucial dans le traitement du langage naturel (NLP) en permettant aux systèmes de comprendre, d'interpréter et de générer du langage humain.

En capturant et organisant des informations structurées, la représentation des connaissances en traitement du langage naturel (NLP) aide les systèmes à comprendre, traiter et générer du langage naturel, ce qui est essentiel pour diverses applications impliquant le travail avec des données textuelles. Les systèmes NLP incluent la détermination d'une représentation sémantique préliminaire de l'entrée, la désambiguïsation de cette représentation et l'inférence d'informations implicites ou manquantes, englobant les relations entre les causes et les effets, les moyens et les fins, ainsi que les parties et les ensembles [20].

1.2.3 Robotique et automatisation

Le fondement de l'IA est la représentation des connaissances, qui permet aux robots d'accéder à l'information, de raisonner clairement et de tirer des conclusions défendables. Les méthodologies et les stratégies de représentation des connaissances progresseront avec l'intelligence artificielle (IA), favorisant l'innovation dans de nombreux secteurs et transformant nos interactions avec les ordinateurs intelligents ³.

La représentation des connaissances en robotique est cruciale pour la résolution efficace des problèmes et l'apprentissage en robotique de service, impliquant diverses modalités de données et un raisonnement logique. Les représentations de haut niveau intégrant des structures facilitent le raisonnement autonome, tandis que l'établissement de liens entre les connaissances et les caractéristiques de bas niveau est vital pour des manipulations semblables à celles de l'homme dans la robotique de service [21].

La représentation des connaissances en robotique et automatisation est essentielle au développement de systèmes autonomes et intelligents. Afin que les robots puissent comprendre, raisonner et prendre des décisions en fonction de l'environnement dans lequel ils opèrent, les connaissances sont généralement représentées de manière structurée et formelle.

1.3 Technologie du Web Sémantique

La représentation des connaissances et le raisonnement jouent un rôle essentiel dans la création de contenus traités par des machines dans le contexte du Web Sémantique [22]. Comprendre la signification des données est le tour de magie du Web Sémantique. Les machines peuvent apprendre ce que sont les choses et comment elles interagissent à partir d'ontologies, puis utiliser ces connaissances pour générer des déductions et des connexions à l'aide de moteurs de raisonnement. Cela ouvre la voie à une recherche plus intelligente, à une intégration fluide des données et même à l'apprentissage automatique prédictif. C'est comme si l'on donnait de l'intelligence à l'internet, ouvrant la porte à un monde où les données sont intelligentes et profondément connectées.

³<https://timespro.com/blog/what-is-knowledge-representation-in-ai>

Le Web sémantique représente un changement de paradigme dans la façon dont nous concevons et interagissons avec les informations sur le World Wide Web (WWW). Les technologies Web traditionnelles se concentrent principalement sur la présentation et la récupération de données, laissant souvent les machines et les applications avoir du mal à comprendre la signification et les relations intégrées au contenu. La technologie du Web sémantique apparaît comme une solution à cette limitation, en introduisant un cadre qui enrichit les données avec une sémantique explicite, favorisant ainsi un environnement Web plus intelligent et interconnecté. Le Web Sémantique vise à donner du sens aux données, permettant aux ordinateurs de comprendre, d'interpréter et de raisonner sur les informations d'une manière similaire à la cognition humaine. Il y parvient en adoptant des langages et des protocoles standardisés, créant un Web où les données sont non seulement accessibles aux humains mais aussi compréhensibles par les machines.

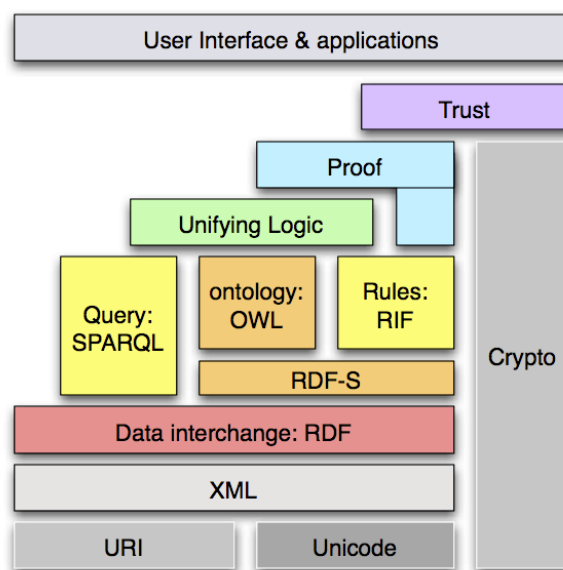


FIG. 1.2 : Les couches d'architecture du Web Sémantique.

L'objectif principale du Web Sémantique consiste à ajouter de la sémantique aux données du Web. Pour ce faire, on utilise des normes, des technologies et des ontologies afin d'améliorer la compréhension, l'intégration et le traitement de l'information par les machines. Le Web Sémantique repose sur des technologies telles que RDF (Resource Description Framework) et OWL (Web Ontology Language) qui fournissent un langage partagé pour représenter et organiser les connaissances [23]. La vision du Web sémantique telle qu'elle a été présentée par son créateur, Tim Berners-Lee, peut être conceptualisée en plusieurs strates⁴. (Figure 1.2).

1.3.1 Historique et évolution du Web Sémantique

En 2001, Tim Berners-Lee, James Hendler et Ora Lassila ont rédigé l'un des articles les plus influents de l'histoire de l'intelligence artificielle (IA) et de la représentation des connaissances [24]. Les efforts déployés pour créer des langages de représentation des connaissances, qui s'intègrent à Internet et ont une couche sémantique, sont décrits dans ce document [25]. Au départ, Internet était un immense graphe de réseau constitué par des URL et les nombreux liens qui y mènent et en partent. Au lieu d'être un graphe de liens hypertextes, le Web Sémantique le transforme en un graphe sémantique. Un lien peut avoir une multitude de significations dans

⁴<https://www.w3.org/DesignIssues/diagrams/swebstack/2006a.png>

l'hypertexte. Il peut conduire à une page de connexion au site Web, à un document qui décrit l'auteur de la page ou à une page sur un sujet connexe. La sémantique de ces liens est très peu claire. Elle est plutôt intégrée de manière implicite dans le code HTML et le code qui gère les pages. Les métadonnées nécessaires à l'utilisation efficace de ces noeuds et liens sont saisies par le Web Sémantique. Il sert de fondement aux agents intelligents et à d'autres types de systèmes innovants qui dépassent largement l'Internet traditionnel [26].

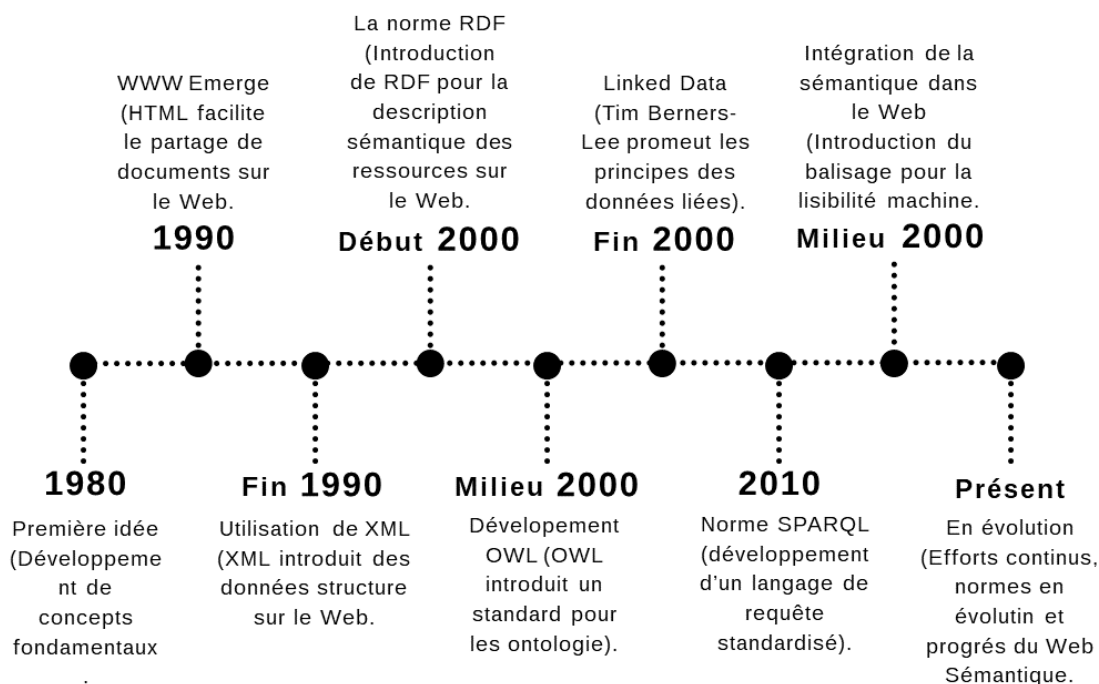


FIG. 1.3 : Chronologie présentant l'évolution du Web sémantique.

L'évolution du Web Sémantique se déroule en plusieurs phases distinctes. Après avoir débuté dans les années 1980 par la conceptualisation, il a pris de l'ampleur dans les années 1990 avec l'émergence du World Wide Web (WWW), principalement pour les contenus lisibles par l'homme. À la fin des années 1990, le langage XML a permis la représentation de données structurées, ouvrant la voie au cadre de description des ressources (RDF) au début des années 2000. Le milieu des années 2000 a vu le développement du langage d'ontologie Web (OWL), qui a enrichi la représentation des connaissances. À la fin des années 2000, Tim Berners-Lee a fait la promotion des données liées (Linked Data) en mettant l'accent sur l'interconnexion des ensembles de données. Les années 2010 ont vu la normalisation de SPARQL pour l'interrogation efficace des données RDF, et des technologies comme JSON-LD ont intégré la sémantique directement dans le contenu Web. Aujourd'hui, le Web Sémantique continue d'évoluer grâce à des efforts et des avancées constants, intégrant des innovations dans les graphes de connaissances, le traitement du langage naturel et l'intelligence artificielle, façonnant ainsi son développement et son application sur le Web.

La Figure 1.3) fournit une chronologie des événements clés de l'histoire du web sémantique, depuis sa conceptualisation initiale jusqu'à aujourd'hui, en mettant l'accent sur l'introduction de technologies et de normes essentielles.

1.3.2 Les Langages de la Représentation de la Connaissance

Les langages de représentation des connaissances sont des systèmes de notation formelle utilisés pour exprimer et représenter de manière structurée l'information. Ces langages sont conçus pour rendre plus facile la compréhension et le traitement automatisé des informations. Dans des domaines comme l'intelligence artificielle, la gestion des connaissances et la représentation des données, ils sont fréquemment utilisés. Ces langages permettent de décrire les connaissances de manière à ce que les machines puissent les interpréter et les manipuler. Ces langages sont essentiels au développement de systèmes intelligents capables de raisonner, d'apprendre et de traiter des données contextuelles.

1.3.2.1 XML (eXtensible Markup Language)

XML⁵, est une norme largement acceptée pour l'encodage des données. Il permet de partager et d'interpréter les données spatiales, révolutionnant ainsi l'échange de données au sein des organisations et entre elles [27]. XML est une syntaxe de marquage de l'information textuelle et sert d'outil pour créer d'autres langages de marquage spécifiques aux données. Il permet de faire la distinction entre le contenu et la présentation, ce qui favorise la flexibilité et la réutilisation des données [28]. XML est un langage de méta-description pour les données structurées, qui représente des documents organisés de manière hiérarchique. XML est une excellente technologie d'arrière-plan pour le stockage et le partage de données de manière structurée, offrant flexibilité et accessibilité visuelle [29].

Exemple d'un documents XML :

```
1 <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2 <Thèse>
3   <titre> Représentation des Connaissances dans Internet des Objets:
4     Modélisation Sémantique et Raisonnement </titre>
5   <auteur> Fatima Zahra AMARA </auteur>
6   <datedébut> Novembre 2019 </datedébut>
7   <datefin> 2024 </datefin>
8 </Thèse>
```

Utilisations courantes de XML :

- Échange de données : XML est largement utilisé pour échanger des données entre différents systèmes et applications.
- Fichiers de configuration : XML est souvent utilisé pour stocker les paramètres de configuration des applications.
- Services web : XML est une technologie clé des services web, qui permettent aux applications de communiquer entre elles sur l'internet.
- Balisage de documents : XML peut être utilisé pour baliser des documents.
- Stockage de données : XML peut être utilisé pour stocker des données dans un format structuré.

⁵<https://www.w3.org/XML/>

1.3.2.2 RDF (Resource Description Framework)

RDF⁶, est un modèle de données utilisé pour représenter des informations sur des ressources sur le Web. Il s'agit d'un modèle simple basé sur le concept de triple, composé d'un sujet, d'un prédicat et d'un objet (Figure 1.4).

Dans le contexte de l'annotation RDF, la notion de sujet correspond à une entité identifiée de manière unique par un URI (Uniform Resource Identifier). Le sujet peut également être un nœud vide, représentant ainsi une ressource anonyme. Le prédicat, quant à lui, symbolise une propriété descriptive, pouvant être interprétée comme un attribut ou une relation décrivant la ressource. Enfin, l'objet incarne la valeur associée à cette propriété, pouvant être soit une ressource spécifiée par un URI, soit une simple chaîne de caractères, également appelée littéral. Ce modèle offre une structure flexible pour décrire et lier des entités sur le Web Sémantique.

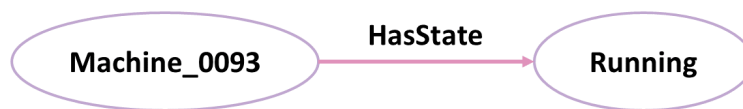


FIG. 1.4 : Exemple Triplet RDF.

RDF est largement utilisé dans divers domaines, notamment les soins de santé, les systèmes intégrés et les systèmes basés sur la connaissance. Il est également utilisé pour la représentation des connaissances dans les systèmes basés sur les connaissances, offrant des avantages tels qu'une représentation et une organisation flexibles des connaissances [30]. La gestion efficace et évolutive des données RDF est un domaine de recherche important, des techniques et des stratégies étant développées pour le stockage des données RDF [22].

La structure syntaxique de RDF s'appuie sur le modèle XML. Le fondement de RDF vise à permettre l'association d'attributs aux différentes ressources du Web en utilisant des méta-données sémantiques. Ainsi, RDF organise le Web comme une collection de ressources interconnectées par des liens sémantiques. Dans un fichier XML/RDF, la balise racine est `rdf :RDF`, contenant un ou plusieurs éléments `rdf :Description` pour chaque description de ressource présente dans le document. Chaque description inclut un attribut `rdf :about` pointant vers l'URI de la ressource à décrire, ainsi que un ou plusieurs éléments représentant des prédicats. Lorsque la valeur d'un prédicat est une autre ressource, l'attribut `rdf :resource` pointe vers son URI.

Exemple d'un documents RDF/XML :

```

1 <rdf:RDF
2   xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
3   xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
4   xmlns:ex="http://example.org/">
5
6   <!-- Temperature sensor in Room 1 -->
7   <rdf:Description rdf:about="http://example.org/TemperatureSensor">
8     <ex:hasValue rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">24.5</ex:hasValue>
9     <ex:hasLocation rdf:resource="http://example.org/Room1"/>
10  </rdf:Description>
11
12  <!-- Humidity sensor in Room 1 -->
13  <rdf:Description rdf:about="http://example.org/HumiditySensor">
  
```

⁶<https://www.w3.org/RDF/>

```
14 <ex:hasValue rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">55.2</ex:hasValue>
15 <ex:hasLocation rdf:resource="http://example.org/Room1"/>
16 </rdf:Description>
17 </rdf:RDF>
```

le code RDF/XML décrit les informations relatives aux capteurs de température et d'humidité, en indiquant les valeurs et les emplacements de chaque capteur. Les données sont représentées à l'aide de triplets RDF, avec des sujets, des prédicats et des objets formant des déclarations sur les relations entre les ressources dans le graphe. La figure 1.5 est la représentation graphique de l'exemple RDF/XML.

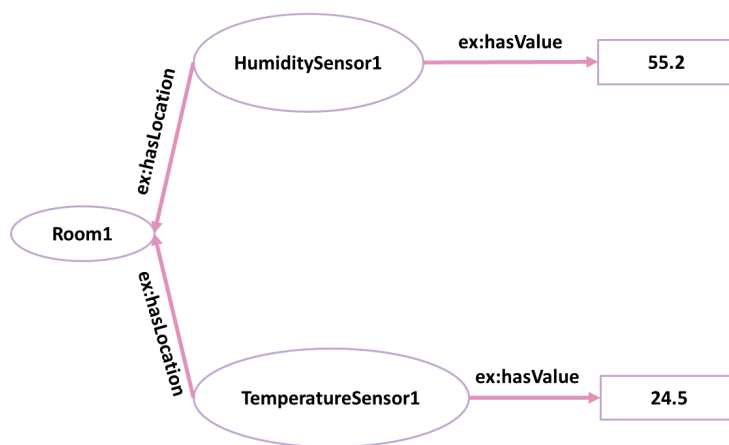


FIG. 1.5 : Représentation graphique du RDF/XML.

1.3.2.3 RDFs (Resource Description Framework Schema)

RDF offre une fonctionnalité d'échange de connaissances, mais ne donne pas à l'utilisateur la possibilité de définir les termes à utiliser ni d'établir la sémantique des objets employés. Par conséquent, il est essentiel d'attribuer une signification aux informations stockées sous la forme de triplets RDF. Cette responsabilité revient au RDF Schéma⁷, qui facilite la création de vocabulaires de méta-données. RDFs, est le langage de schéma basique couramment utilisé dans l'architecture technologique du Web sémantique. Ils fournissent des moyens de description des propriétés et des classes de ressources Web ainsi qu'une sémantique pour la généralisation et les hiérarchies de ces propriétés et classes [31], voir figure 1.6.

1.3.2.4 OWL (Ontology Web Language)

OWL⁸ est conçu pour être utilisé par des applications qui doivent traiter le contenu de l'information au lieu de simplement présenter l'information aux humains. Il permet une meilleure lisibilité du contenu Web par les machines que celle offerte par XML, RDF et RDF Schema (RDFs) en fournissant un vocabulaire supplémentaire ainsi qu'une sémantique formelle⁹.

OWL constitue une norme fondée sur la logique de description. Il s'appuie sur RDF et RDFS tout

⁷<https://www.w3.org/TR/rdf-schema/>

⁸<https://www.w3.org/TR/owl-features/>

⁹<https://www.w3.org/TR/owl-features/#s1.3>

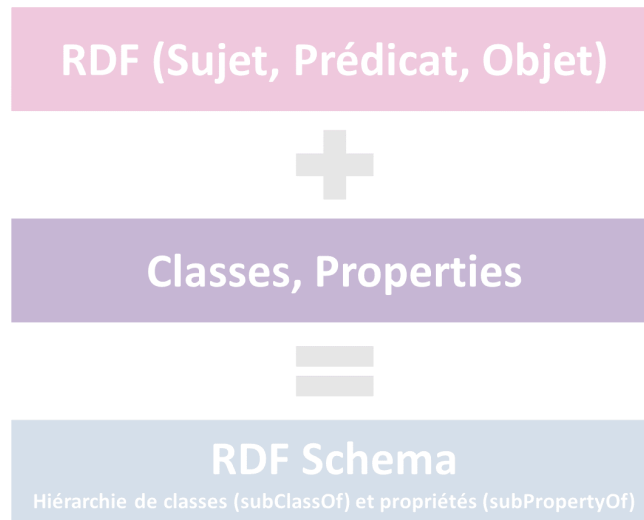


FIG. 1.6 : Représentation graphique de RDF et RDFS : passer des triplets de base au schéma sémantique.

en adoptant la syntaxe RDF/XML et il propose trois sous-langages de plus en plus expressifs (Figure 1.7) ¹⁰ :



FIG. 1.7 : Les couches de l'OWL.

- **OWL Lite** : Il répond aux exigences de classification hiérarchique et de contraintes simples en permettant uniquement des valeurs de cardinalité de 0 ou 1.
- **OWL DL** : Il englobe toutes les structures du langage OWL, y compris les restrictions telles que la séparation des types, exigeant qu'une propriété soit définie comme étant soit un individu, soit une classe.
- **OWL Full** : Le langage complet d'OWL exploite l'ensemble des éléments disponibles dans OWL. Il présente l'avantage d'une compatibilité totale avec RDF/RDFS, mais l'inconvénient d'une capacité de description élevée, au prix éventuel de ne pas garantir la complétude et la décidabilité des calculs liés à l'ontologie.

¹⁰<https://www.w3.org/TR/owl-features/s1.3>

1.3.3 Ontologie

L'ontologie revêt différentes significations selon les contextes, mais de manière générale, elle fait référence à l'étude philosophique de la nature de l'être, de l'existence ou de la réalité. Elle examine les questions liées à l'existence des entités et à leurs relations mutuelles.

En informatique et en science de l'information, le terme "ontologie" désigne une représentation formelle des connaissances ou des concepts propres à un domaine donné, englobant les relations entre ces concepts. Les ontologies servent à organiser et structurer l'information de manière compréhensible tant pour les humains que pour les ordinateurs. Elles occupent une place cruciale dans des domaines tels que l'intelligence artificielle, la représentation des connaissances et le Web Sémantique.

En 1992, Tom Gruber a proposé la définition suivante : "Une ontologie est une spécification d'une conceptualisation" [32]. Et en 1997, Borst a défini une ontologie comme une "spécification formelle d'une conceptualisation partagée" [33]. Une ontologie, comprend un ensemble de concepts, de relations entre ces concepts et des axiomes ou règles qui définissent leurs propriétés. Cette représentation structurée vise à capturer et à encoder les connaissances de manière à ce que les machines puissent les interpréter et les traiter.

Les ontologies ont augmenté en importance avec l'utilisation des graphes de connaissances, de l'apprentissage automatique, du traitement du langage naturel (NLP) et de la quantité de données générées quotidiennement [16]. Elle permet une compréhension partagée de tout domaine qui est communiquée entre les systèmes d'application et les personnes [34].

1.3.3.1 Composants d'une Ontologie

L'ontologie peut être considérée comme un 5-tuple dont les composants sont les suivants : les concepts, relations, fonctions, individus ou instances et axiomes [35].

$$\text{Ontologie} = \langle C, R, F, I, A \rangle$$

Où :

- **Concepts (classe)** : Ils modélisent une abstraction pertinente d'un segment du domaine traité, également appelé classe d'ontologie. Un concept peut être abstrait ou concret, atomique ou composé, réel ou fictif, selon [36].
- **Relations** : Constituent les liens potentiels entre les concepts. Ils garantissent une interconnexion entre les divers concepts.
- **Fonctions** : Sont des éléments qui ont pour but de calculer des informations à partir d'autres éléments.
- **Instances (objects)** : Sont la représentation des principaux objets du domaine selon la structure de l'ontologie.
- **Axiomes** : Sont les restrictions, les règles, les définitions des correspondances logiques [37] qui doivent être accomplies dans la relation entre les éléments de l'ontologie.

OWL est un langage permettant de définir des ontologies sur le Web. Une ontologie OWL décrit un domaine en termes de classes, de propriétés et d'individus et peut inclure des descriptions détaillées des caractéristiques de ces objets [38].

Le code suivant représente un exemple d'une ontologie OWL dans le contexte de l'Internet des objets (IoT). Supposons que nous voulons décrire une ontologie pour représenter des capteurs IoT mesurant la température :

```
1 <?xml version="1.0"?>
2 <!DOCTYPE rdf:RDF [
3     <!ENTITY owl "http://www.w3.org/2002/07/owl#" >
4     <!ENTITY xsd "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#" >
5     <!ENTITY iot "http://example.org/iot#" > ]>
6
7 <rdf:RDF xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
8     xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#"
9     xmlns:owl="http://www.w3.org/2002/07/owl#"
10    xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#"
11    xmlns:iot="http://example.org/iot#">
12
13    <!-- Déclaration des classes -->
14    <owl:Class rdf:about="#Sensor"/>
15    <owl:Class rdf:about="#Temperature"/>
16
17    <!-- Déclaration des propriétés -->
18    <owl:ObjectProperty rdf:about="#hasSensor"/>
19    <owl:DatatypeProperty rdf:about="#hasValue"/>
20
21    <!-- Définition des sous-classes -->
22    <owl:Class rdf:about="#Thermocouple">
23        <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#Class"/>
24        <owl:equivalentClass>
25            <owl:Class>
26                <owl:intersectionOf rdf:parseType="Collection">
27                    <rdf:Description rdf:about="#Sensor"/>
28                    <rdf:Description rdf:about="#Temperature"/>
29                </owl:intersectionOf>
30            </owl:Class>
31        </owl:equivalentClass>
32    </owl:Class>
33
34    <!-- Définition des individus -->
35    <rdf:Description rdf:about="#thermocouple1">
36        <rdf:type rdf:resource="#Thermocouple"/>
37        <iot:hasSensor rdf:resource="#temperatureSensor123"/>
38    </rdf:Description>
39 </rdf:RDF>
```

1.3.4 Extraction sémantique

Les règles sémantiques établies ainsi que les relations entre les données et les attributs, développées à l'aide de SWRL (Semantic Web Rule Language), facilitent l'extraction des relations entre les données implicitement définies dans le modèle d'ontologie construit. En parallèle, SPARQL (Protocol And RDF Query Language) représente un langage d'interrogation et un protocole de recherche de données spécifiquement conçus pour le modèle de données utilisé dans la description des ressources (RDF). En considérant la base de connaissances comme fondement et pivot de la recherche sémantique pour l'inférence et l'accumulation de connaissances, l'utilisation de

SPARQL dans la recherche sémantique vise à extraire les termes et les relations associés aux données présentes dans le modèle d'ontologie [39].

1.3.4.1 SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language)

SPARQL¹¹ est le langage d'interrogation standard pour RDF (Resource Description Framework) et est utilisé pour interroger et récupérer des données à partir d'ensembles de données RDF [40]. C'est un langage de requête et un protocole utilisé dans la Web Sémantique pour la recherche d'informations. Il s'agit d'un langage standard déclaré par le World Wide Web Consortium pour le cadre de description des ressources. Les requêtes SPARQL jouent un rôle essentiel dans la gestion des données dans divers domaines tels que le Web Sémantique, les big data, le cloud computing, et les données ouvertes liées (Linked Open Data). Elles peuvent être exécutées sur divers outils à des fins différentes, ce qui conduit à l'intégration du web sémantique avec des technologies telles que le cloud computing, les données ouvertes liées (LOD) et les bases de données graphiques [41].

SPARQL est un langage d'interrogation très expressif qui contient des opérations standard

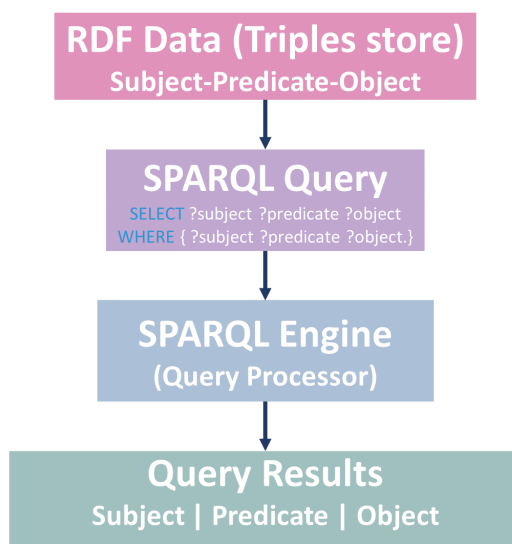


FIG. 1.8 : Représentation Visuelle du Flux de Travail SPARQL.

basées sur l'algèbre des ensembles. Il est utilisé dans des applications du Web Sémantique [42]. SPARQL est également utilisé dans les systèmes de réponse aux questions qui permettent aux utilisateurs d'exprimer leurs besoins d'information en langage naturel. Un cadre basé sur les dépendances a été développé pour traduire les requêtes en langage naturel en requêtes SPARQL, ce qui permet de l'adapter à différents domaines [43]. Étant donné que RDFS et OWL sont tous deux basés sur RDF, SPARQL peut également être utilisé pour interroger directement les ontologies et les bases de connaissances [22]. La figure 1.8 décrit une représentation simplifiée du fonctionnement de SPARQL.

SPARQL propose quatre types de requêtes principaux :

- **SELECT** : Renvoie les valeurs des variables spécifiées dans la requête.
- **ASK** : Renvoie true si la requête trouve une correspondance, et false sinon.

¹¹<https://www.w3.org/TR/sparql11-query/>

- **CONSTRUCT** : Retourne un graphe RDF en substituant les valeurs dans les modèles de données de la requête.
- **DESCRIBE** : Retourne un graphe RDF qui décrit la ressource spécifiée dans la requête

Voici un exemple de requête SPARQL (SELECT) visant à extraire des informations sur les capteurs de température à partir de données RDF liées à l'Internet des objets (IoT).

```
1 PREFIX iot: <http://example.org/iot#>
2 PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
3
4 SELECT ?sensor ?location ?temperature
5 WHERE {
6   ?sensor rdf:type iot:TemperatureSensor.
7   ?sensor iot:locatedIn ?location.
8 }
```

1.3.4.2 SWRL (Sematic Web Rule Lanuage)

SWRL¹² combine des ontologies et des règles, est un langage standard basé sur OWL-DL et le langage de balisage des règles (RuleML). Il permet d'exprimer des règles de raisonnement et d'inférence pour déduire de nouvelles connaissances à partir d'une description de données existante [44].

SWRL permet des assertions déclaratives efficaces dans la modélisation des connaissances d'un domaine et est particulièrement important dans la modélisation des connaissances du web sémantique. Il permet l'affirmation et la récupération de faits dans les ontologies. Parmi les avantages de SWRL, citons la possibilité d'utiliser des noms de classes ou leurs descriptions comme prédicats, l'utilisation d'égalités et d'inégalités, et l'autorisation de conjonctions d'atomes à la fois dans l'antécédent et le conséquent des règles SWRL. Il permet également le transfert de caractéristiques d'une classe ou d'une propriété à une autre sans sous-catégorisation, ainsi que la déduction de nouveaux individus à l'aide d'opérateurs existentiels [45].

SWRL est pris en charge par des éditeurs d'ontologies, des moteurs de règles et des raisonneurs d'ontologies, ce qui en fait un choix populaire pour le développement d'applications basées sur des règles [39].

les règles SWRL sont des règles d'implication, et leur syntaxe est de la forme (antécédent \rightarrow conséquent) [44], où l'antécédent spécifie les conditions préalables à la conséquence. L'antécédent et le conséquent sont des atomes logiques construits à partir de prédicats et d'individus. Les atomes sont reliés par des opérateurs logiques tels que "et" (\wedge) et "ou" (\vee).

La règle ci-dessus est un exemple simplifié, et les scénarios réels de IoT peuvent impliquer des règles plus complexes et un ensemble plus large de conditions et d'actions. L'idée est de démontrer comment SWRL peut être utilisé pour exprimer des règles dans le contexte de IoT. Cette règle stipule essentiellement que si les conditions spécifiées dans l'antécédent sont remplies (par exemple, une température élevée et un mouvement détecté dans le salon), la conséquence sera déclenchée, ce qui aura pour effet que le thermostat intelligent activera la climatisation dans le salon.

¹²<https://www.w3.org/submissions/SWRL/>

$$\begin{aligned} & \text{TemperatureSensor}(?sensor, ?temperature) \wedge \text{hasLocation}(?sensor, \text{LivingRoom}) \\ & \wedge \text{swrlb :greaterThan}(?temperature, 25) \wedge \text{MotionDetector}(?motionDetector) \\ & \wedge \text{hasLocation}(?motionDetector, \text{LivingRoom}) \wedge \text{detectsMotion}(?motionDetector, ?motion) \\ & \rightarrow \text{SmartThermostat}(?thermostat) \wedge \text{hasLocation}(?thermostat, \text{LivingRoom}) \\ & \wedge \text{turnsOn}(?thermostat, \text{AirConditioning}) \end{aligned}$$

1.3.5 Linked Data

Les données liées (Linked Data) est une initiative du W3C qui encourage la publication de données structurées sur le Web grâce à l'utilisation de vocabulaires issus de technologies telles que RDF, SPARQL et OWL [46]. Linked Data est un moyen puissant de structuration et de publication des données sur le web, ce qui permet de partager, de lier et d'enrichir les données au-delà des bibliothèques [47].

Les hyperliens permettent de relier des objets ou des observations et de distribuer des déclarations à triple codage sur plusieurs sites Web afin d'améliorer l'interopérabilité sémantique entre les données. Le concept de données liées a été inventé en 2006 par Tim Berners-Lee : "Le Web Sémantique ne consiste pas seulement à mettre des données sur le Web. Il s'agit de créer des liens pour qu'une personne ou une machine puisse explorer le réseau de données, Lorsque vous avez des données liées, vous pouvez trouver d'autres données liées"¹³.

Les données liées sont un concept et un ensemble de bonnes pratiques pour la publication et la connexion de données structurées sur le web [48]. Les principes fondamentaux des données liées sont les suivants :

- Utilisez des URIs comme noms pour les entités.
- Utilisez des URIs HTTP afin que les utilisateurs puissent rechercher ces noms.
- Lorsque quelqu'un recherche une URI, fournissez des informations utiles en utilisant les normes (RDF, SPARQL).
- Incluez des liens vers d'autres URIs afin que les utilisateurs puissent découvrir davantage d'informations.

Il est important de souligner l'existence de plusieurs projets sur le Web qui se consacrent à l'indexation d'ontologies et de vocabulaires. Ces initiatives jouent un rôle crucial dans la gestion et la mise à disposition de ressources sémantiques, facilitant ainsi la découverte, l'exploration et l'utilisation de connaissances structurées en ligne. Ces projets offrent une diversité de services, allant de la compilation et de la documentation d'ontologies à la fourniture d'outils interactifs pour l'exploration visuelle et l'analyse des données sémantiques. Le tableau 1.1 représente les Projets d'Indexation d'Ontologies et de Vocabulaires sur le Web.

1.3.6 Défis et limitation du Web Sémantique

Le web sémantique est le réseau de connexions entre différentes formes de données, auxquelles on donne une signification (sémantique) dans un langage normalisé. Il permet de construire un réseau de données plus robuste où les ordinateurs peuvent trouver, lire et même raisonner sur une unité de contenu .

¹³<https://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html>

Projet	Site Web	Description
BioPortal	bioontology.org/	Répertoire d'ontologies biomédicales avec des outils de visualisation et d'analyse.
LOV (Linked Open Vocabularies)	lov.linkeddata.es/	Collection d'ontologies et de vocabulaires contrôlés disponibles au format RDF.
Schema.org	schema.org	Projet collaboratif fournissant un ensemble standard de schémas pour les données structurées sur le web.
OBO Foundry (Open Biological and Biomedical Ontologies)	obofoundry.org/	Projet collaboratif pour développer des ontologies de référence interopérables dans le domaine biomédical.
Linked Open Vocabularies for the IoT (LOV4IoT)	lov4iot.appspot.com	Présenter une collection de plus de 800 vocabulaires spécifiques pour les domaines de l'IoT.

TAB. 1.1 : Aperçu des Projets du Web Sémantique Indexant les Ontologies et Vocabulaires.

Le Web Sémantique, bien que prometteur, fait face à divers défis. L'hétérogénéité des données, la complexité de la conversion, les questions de confidentialité et de sécurité, ainsi que la dépendance aux métadonnées constituent des obstacles majeurs. L'adoption lente, la complexité des requêtes et l'évolution constante des standards ajoutent également des nuances. Néanmoins, surmonter ces défis pourrait permettre au Web Sémantique de réaliser son potentiel en facilitant l'interopérabilité des données, la recherche avancée et le partage efficace des connaissances.

Plus de 20 ans après sa première proposition, le web sémantique n'a pas encore atteint sa pleine vision. Selon plusieurs auteurs éminents, la vision globale de l'échange, de la découverte, de l'intégration et de la réutilisation des données n'a pas encore été réalisée [49]. Chaque aspect du web sémantique doit être développé. Étant donné la diversité des approches, une consolidation orientée vers les applications est nécessaire, de même qu'une solide interopérabilité des outils et des processus bien documentés.

1.4 Outils de Représentation de Connaissance et Raisonnement

La représentation des connaissances et le raisonnement constituent des piliers fondamentaux de l'intelligence artificielle (IA), permettant aux systèmes de traiter l'information de manière sophistiquée et de prendre des décisions éclairées. Dans ce vaste domaine, une diversité d'outils a émergé pour répondre aux besoins spécifiques des projets et des applications. Ces outils jouent un rôle crucial dans la construction de modèles cognitifs, la gestion de connaissances complexes et la mise en œuvre de processus de raisonnement logique. Voici une exploration plus détaillée de quelques-uns de ces outils, soulignant leur diversité et leur pertinence dans le contexte de l'intelligence artificielle.

1.4.1 Protégé

Protégé¹⁴, se distingue en tant que plateforme de pointe pour la création d'ontologies. Avec une interface utilisateur conviviale, il offre des fonctionnalités puissantes pour la modélisation des connaissances à l'aide du langage OWL (Ontology Web Language). Protégé est adapté à des projets allant de la modélisation conceptuelle à la représentation détaillée de relations complexes et le raisonnement.

1.4.2 Jena

Apache Jena¹⁵, est un framework Java qui excelle dans le traitement des données RDF (Resource Description Framework) et la mise en œuvre de mécanismes de raisonnement associés au Web sémantique. Il offre des outils flexibles pour le stockage, la recherche et la manipulation de données RDF, renforçant ainsi la capacité des systèmes à représenter des connaissances interconnectées.

1.4.3 TopBraid Composer

TopBraid Composer¹⁶, se positionne comme un outil graphique de premier plan pour la création, la gestion et le raisonnement sur des ontologies OWL complexes. En intégrant des fonctionnalités avancées telles que la validation d'ontologie et la génération de code, il facilite le développement d'applications intelligentes exigeant une représentation détaillée des connaissances.

1.4.4 Prolog

Prolog¹⁷, un langage de programmation logique, offre un environnement propice au raisonnement déductif. Utilisé pour la résolution de problèmes basée sur la logique formelle, Prolog permet d'exprimer des règles logiques complexes et de déduire des conclusions à partir de faits prédéfinis.

1.4.5 PoolParty

PoolParty¹⁸, PoolParty se distingue en tant que plateforme de gestion de connaissances sémantiques. En intégrant des capacités d'extraction sémantique et de recherche sémantique, il permet la création et l'exploitation de connaissances structurées, favorisant ainsi des processus de raisonnement contextuels.

1.4.6 GraphDB

GraphDB¹⁹, une base de données triplestore, se positionne comme une solution robuste pour le stockage et la recherche de données RDF. Son utilisation est particulièrement pertinente pour

¹⁴<https://protege.stanford.edu/>

¹⁵<https://jena.apache.org/>

¹⁶<https://allegrograph.com/topbraid-composer/>

¹⁷<https://www.swi-prolog.org/>

¹⁸<https://www.poolparty.biz/>

¹⁹<https://graphdb.ontotext.com/>

Outil	Langage de Représentation	Principales Fonctionnalités
Protégé	OWL	Modélisation détaillée des connaissances, OWL et raisonnement
Jena	RDF	Stockage, recherche et raisonnement sur des données RDF
TopBraid Composer	OWL	Validation d'ontologie, génération de code
Prolog	Logique du premier ordre	Résolution de problèmes basée sur la logique formelle
PoolParty	RDF	Extraction sémantique, recherche sémantique
GraphDB	RDF	Stockage et recherche de données RDF, Web sémantique

TAB. 1.2 : Outils de Connaissances et Raisonnement

les applications basées sur le Web sémantique, où la représentation précise des connaissances et le raisonnement logique sont essentiels.

Le tableau 1.2 synthétise les caractéristiques essentielles d'outils majeurs dédiés à la représentation des connaissances et au raisonnement en intelligence artificielle. Chaque outil est brièvement décrit en mettant en avant sa fonction principale, le langage de représentation des connaissances qu'il supporte, et les fonctionnalités clés qu'il offre. Ce résumé permet de guider les utilisateurs dans le choix d'un outil en fonction de leurs besoins spécifiques en modélisation et raisonnement dans le domaine de l'IA.

1.5 Conclusion

En conclusion de ce chapitre consacré à la représentation des connaissances et au raisonnement, nous avons exploré les fondements essentiels de ce domaine fascinant. Nous avons plongé dans la représentation des connaissances, mettant en lumière les ontologies et leurs composants, ainsi que les langages tels que SPARQL et SWRL qui alimentent le Web Sémantique. L'évolution historique de cette technologie a également été examinée, démontrant son impact significatif sur le paysage informatique. Les applications variées de la représentation des connaissances et du raisonnement, notamment l'extraction sémantique et l'utilisation de Linked Data, ont été présentées. Enfin, nous avons exploré les outils clés qui facilitent la mise en œuvre de ces concepts. Ce chapitre offre ainsi une base solide pour la compréhension et l'application pratique des technologies du Web Sémantique dans le domaine complexe de la représentation des connaissances et du raisonnement.

Chapitre 2

Internet des Objets : Connectant le Monde Physique au Numérique

L'Internet des Objets a transformé les modes de vie modernes en jetant un pont entre les mondes physique et virtuel [2], c'est une révolution technologique en constante expansion, en train de métamorphoser notre monde physique en une réalité numérique interconnectée. L'IoT consiste à relier des objets du quotidien à l'infrastructure d'Internet, permettant ainsi une communication et une interaction entre le monde réel et le monde numérique d'une manière sans précédente, reposant sur une connectivité étroite entre le monde numérique et le monde physique grâce aux capteurs [50]. L'IoT peut être défini comme un réseau de réseaux composé de millions de réseaux privés, publics, académiques, commerciaux et gouvernementaux, allant de l'échelle locale à mondiale, interconnectés par un ensemble varié de technologies de réseau électroniques, sans fil et optiques [51]. Cette interconnexion permet aux objets de collecter, d'analyser et de partager des données en temps réel, créant ainsi un tissu numérique omniprésent qui sous-tend notre quotidien.

L'IoT a trouvé des applications dans une multitude de secteurs. A l'instar des soins de santé, il permet le suivi à distance des patients, dans l'agriculture, il optimise la gestion des cultures, dans la logistique, il améliore la traçabilité des produits, et dans la domotique, il rend nos maisons plus intelligentes. De plus, les transports et bien d'autres domaines ont bénéficié de l'IoT, améliorant l'efficacité opérationnelle, créant de nouvelles opportunités commerciales et améliorant la qualité de vie permettant de réaliser des économies de temps et d'énergie très appréciables. Utilisés dans divers domaines, l'Internet des objets vise à répondre à plusieurs défis actuels et futurs importants. Ils offrent la possibilité de stocker une quantité considérable de données sur le Web [46].

Selon les statistiques, en raison de la prolifération des appareils intelligents, le nombre d'appareils IoT actifs actuellement dépasse 14 milliards objets connectés dans le monde¹. Cette exploration permet au capteurs, appareils et systèmes de se connecter pour créer une toile intelligente qui redéfinit notre façon de vivre, de travailler et d'interagir avec notre environnement. En effet, l'IoT ouvre la porte à une nouvelle ère de connectivité, mais elle soulève également plusieurs défis telle que l'interopérabilité et la gestion des données, qui nécessitent une attention constante. Cependant, le potentiel infini de l'IoT pour améliorer notre qualité de vie et résoudre des problèmes complexes est incontestable.

Ce chapitre a pour objectif de fournir une vue d'ensemble complète de l'Internet des Objets et de son rôle central dans l'Industrie 4.0. Il est organisé de manière à aborder les principes

¹<https://explodingtopics.com/blog/iot-stats>

fondamentaux de l'IoT, ses composants essentiels, ainsi que les défis qui lui sont associés dans la première section. Ensuite, nous explorerons l'architecture de l'IoT et son évolution, y compris l'impact du Web Sémantique des Objets. La section suivante se concentrera sur les applications diverses et variées de l'IoT, de la ville intelligente à l'Industrie 4.0. Puis, nous analyserons en détail comment l'IoT contribue à l'Industrie 4.0, en examinant les fondements technologiques, les effets sur les processus de fabrication, ainsi que les défis et opportunités à venir. Enfin, nous explorerons les tendances futures de l'IoT dans le contexte de l'Industrie 4.0.

2.1 IoT Principes, Composants et Défis

2.1.1 Principes de l'IoT

Il convient de noter que l'Internet des objets est un concept difficile à définir précisément. En fait, il n'existe pas de définition universelle de l'IoT. Selon le site web de Real Technologies (RT)², une start-up européenne spécialisée dans l'IoT, il existe environ 139 définitions du terme IoT depuis 1999. Selon eux, l'IoT se résume essentiellement à des objets électromécaniques intelligents connectés à Internet. D'après Perera et al.[52], l'Internet des Objets connecte les personnes et les objets à tout moment, en tout lieu, avec n'importe quel objet et n'importe quelle personne, idéalement en utilisant n'importe quel réseau et n'importe quel service. Il est également défini comme un système de dispositifs informatiques interconnectés, de machines mécaniques et numériques, d'objets, d'animaux ou de personnes dotés d'identifiants uniques et de la capacité de transférer des données sur un réseau sans nécessiter d'interaction d'humain à humain ou d'humain à ordinateur [53].

L'objectif fondamental de l'IoT est de permettre le partage de connaissances et d'informations en temps réel par l'intermédiaire d'un réseau [54]. La figure 2.1 représente les principes de l'Internet des Objets.

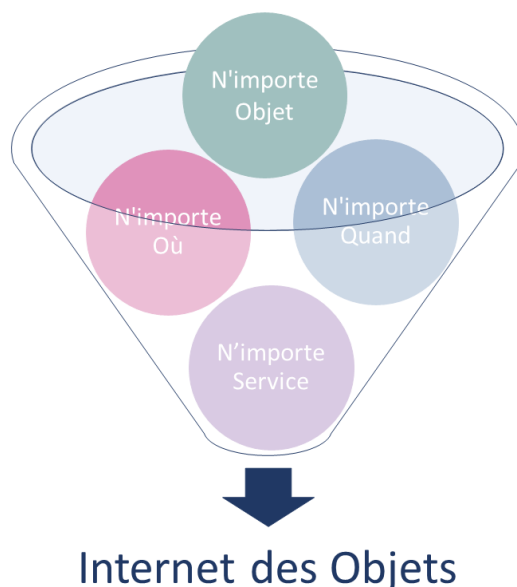


FIG. 2.1 : Principes de l'Internet des Objets.

²<https://www.rtsrl.eu/blog/what-is-internet-of-things-iot/>

2.1.2 Composants de l'IoT

Les composants de l'Internet des Objets sont les éléments essentiels qui constituent l'écosystème de IoT, permettant aux appareils et aux objets de se connecter, de collecter et d'échanger des données. Basant sur cinq éléments principaux (Figure 2.2) :

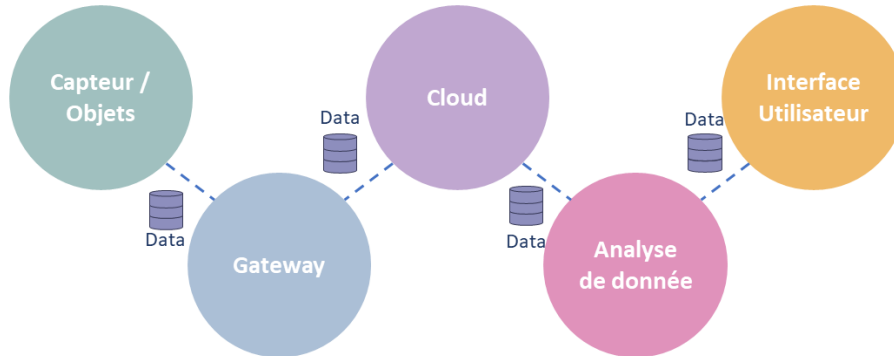


FIG. 2.2 : Composants majeurs de l'Internet des Objets.

1. **Capteurs/ objets** : Les capteurs ou objets sont essentiellement utilisés pour collecter et transmettre des données et effectuer des actions sur la base de ces données. Par exemple, les capteurs peuvent être utilisés pour mesurer la température et l'humidité. Il existe différents types de capteurs : Capteurs de température, capteurs d'humidité, capteurs de proximité, capteurs de mouvement, capteurs de lumière, capteurs de pression, capteurs de gaz et capteurs GPS.
2. **Passerelle (Gateway)** : La passerelle est également un composant qui sert d'intermédiaire entre les capteurs et le cloud central. La passerelle est l'un des composants essentiels de l'IoT qui assure la communication, la gestion et le traitement des données. Assurant l'agrégation des données, communication, sécurité, traduction des protocoles, équilibrage des charges et réduction des temps de latence.
3. **Cloud** : Dans l'Internet des Objets, le terme "cloud" désigne un service qui s'occupe de gérer, stocker et traiter les données produites par les appareils IoT. le stockage et collecte des données, sécurité, connectivité, intégration et rentabilité sont les aspects clés du Cloud dans IoT.
4. **Analyse de Données** : Il s'agit de la composante essentielle de l'IoT qui permet fondamentalement d'exploiter le potentiel de l'IoT. Permet d'analyser les informations significatives générées par les appareils et les capteurs de IoT. L'analyse comprend plusieurs fonctions, telles que le traitement des données, l'apprentissage automatique et l'analyse statistique.
5. **Interface Utilisateur** : L'interface utilisateur, également connue sous le nom d'IU dans l'Internet des Objets, fournit une interface par laquelle les utilisateurs peuvent interagir avec les applications et les systèmes. Offrant la visualisation des données, conception conviviale, personnalisation et la gestion à distance.

2.1.3 Défis de l'IoT

La technologie de l'Internet des objets est en train de révolutionner la manière dont les organisations communiquent, collaborent et coordonnent leurs processus commerciaux quotidiens.

L'adoption de ces technologies est particulièrement bénéfique pour les entreprises dotées de processus complexes et répartis. Les systèmes IoT englobent des appareils travaillant de concert pour aider les organisations à améliorer leur position stratégique de manière proactive et réactive. Pour y parvenir, il est essentiel que ces organisations aient une vision claire des informations revêtant de l'importance pour leurs activités, quels types de données elles souhaitent obtenir de ces dispositifs, ainsi que les objectifs visés avec ces informations [55].

L'Internet des objets présente un éventail de défis complexes (Figure 2.3) qui doivent être surmontés pour garantir son succès. La sécurité de l'IoT est cruciale, car la prolifération d'appareils connectés accroît la surface d'attaque potentielle pour les cybermenaces. La couverture est un autre défi, car il est essentiel d'assurer une connectivité fiable, même dans des environnements complexes. L'évolutivité est un impératif, car l'IoT continue de croître en nombre d'appareils et de données. Cependant, l'un des défis les plus pressants est l'interopérabilité, en particulier l'interopérabilité sémantique, car les appareils hétérogènes doivent communiquer efficacement malgré leurs différences dans les protocoles et les types de données. De plus, l'autonomie limitée de la batterie est un obstacle, en particulier pour les appareils alimentés par batterie, qui doivent gérer leur énergie avec parcimonie. Enfin, l'accès à distance est essentiel pour l'IoT, car il doit permettre la gestion et le contrôle à distance des dispositifs, tout en garantissant la sécurité et la confidentialité des données. La résolution de ces défis, en particulier en matière d'interopérabilité sémantique, est essentielle pour libérer tout le potentiel de l'IoT.

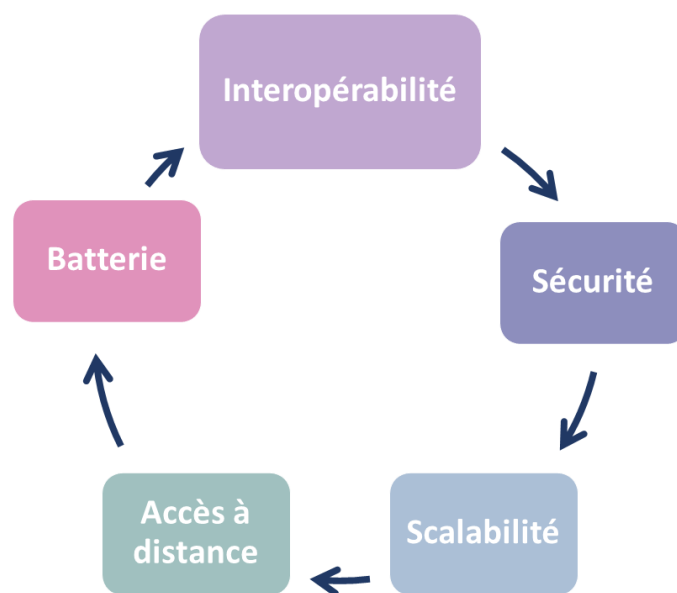


FIG. 2.3 : Défis de l'Internet des Objets.

L'IoT consiste en la connexion d'objets intelligents du monde physique grâce à la technologie de communication. Ces technologies sont recherchées et mises en œuvre dans divers domaines. Cela n'est réalisable que par le biais de l'utilisation d'applications appropriées et optimisées, qui peuvent être créées en se basant sur un ensemble préalablement défini d'algorithmes et de données collectées et partagées par les dispositifs [56]. L'accès et le traitement de l'information sont devenus progressivement les bases nécessaires pour obtenir un avantage concurrentiel. Dans ce contexte, les organisations doivent être convaincues qu'elles disposent de l'information adéquate, au moment opportun [57].

En raison de l'énorme quantité de données brutes provenant de l'IoT disponibles en ligne, ainsi que de la prolifération d'appareils interconnectés, se posent plusieurs défis majeurs. Ces

défis incluent des problèmes d'évolutivité, de diversité et de l'interopérabilité, qui sont largement reconnus comme des obstacles significatifs à la réalisation complète de la vision de l'IoT et à sa mise en œuvre généralisée dans notre vie quotidienne. Il devient impératif de développer des représentations sémantiques formelles et des technologies permettant de faciliter l'interopérabilité entre des dispositifs qui présentent des différences substantielles.

2.2 Architecture de l'Internet des Objets

L'Internet des objets se réfère à la vaste interconnexion de divers appareils tels que les dispositifs portables, les montres, les tablettes, les télécommandes, les capteurs, et bien d'autres, avec les individus qui les utilisent. Cette technologie permet la collecte de données à partir d'un grand nombre de ces appareils, puis les transfert vers des centres de données et des serveurs en vue d'une analyse approfondie, déclenchant ainsi des processus d'automatisation et d'actions. Toutefois, il est essentiel de noter qu'entre la commande donnée par l'utilisateur et l'accomplissement des tâches, un vaste cadre architectural, en grande partie invisible, repose sur une multitude d'éléments et d'interactions.

L'architecture de l'Internet des objets se compose principalement de quatre couches, comme la représente la figure 2.4, détaillé comme suit :

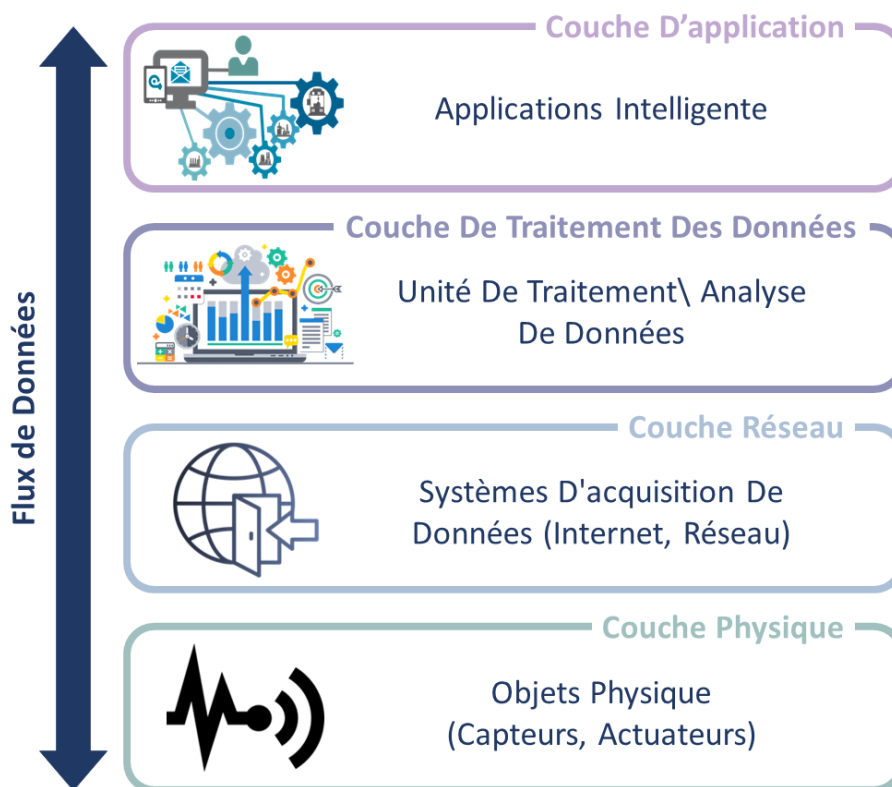


FIG. 2.4 : Architecture de l'IoT.

1. Couche Physique :

La première couche de l'architecture de l'IoT est la couche physique, chargée de rassembler des données provenant de diverses sources. Elle intègre des capteurs et des actuateurs positionnés dans l'environnement, destinés à recueillir des informations relatives à

la température, à l'humidité, à l'éclairage, au son et à d'autres paramètres physiques. Ces dispositifs sont interconnectés avec la couche réseau via des protocoles de communication.

2. Couche Réseau :

La couche réseau d'une architecture IoT a pour mission d'assurer la communication et la connectivité entre les appareils du système IoT. Elle englobe les protocoles et les technologies qui permettent aux appareils de se connecter et de communiquer entre eux, ainsi qu'avec Internet. Parmi les technologies réseau couramment utilisées dans l'IoT, on trouve le WiFi, le Bluetooth, le Zigbee, ainsi que les réseaux cellulaires tels que la 4G et la 5G. De plus, la couche réseau peut également inclure des passerelles et des routeurs qui agissent comme des intermédiaires entre les appareils et Internet.

3. Couche de Traitement des Données :

La couche de traitement des données dans l'architecture IoT désigne les composants logiciels et matériels responsables de la collecte, de l'analyse et de l'interprétation des données provenant des appareils IoT. Son rôle consiste à recevoir les données brutes des appareils, à les traiter et à les rendre accessibles pour une analyse ultérieure ou pour des actions. Cette couche de traitement des données englobe une variété de technologies et d'outils, tels que les systèmes de gestion des données, les plateformes d'analyse, ainsi que les algorithmes d'apprentissage automatique. Ces outils sont utilisés pour extraire des informations significatives des données et prendre des décisions basées sur ces données.

4. Couche d'application :

La couche d'application au sein de l'architecture IoT est la couche supérieure qui interagit directement avec l'utilisateur final. Son objectif principal est de fournir des interfaces conviviales et des fonctionnalités qui permettent aux utilisateurs d'accéder aux appareils IoT et de les gérer. Au sein de cette couche, on retrouve une diversité de logiciels et d'applications intelligentes, notamment des applications mobiles, des portails web, ainsi que d'autres interfaces utilisateur spécialement conçues pour interagir avec l'infrastructure fondamentale de l'IoT.

2.3 Evolution de l'Internet des Objets

2.3.1 l'Internet des Objets

Au cours de la dernière décennie, l'internet des objets s'est considérablement développé. D'une part, cette évolution est principalement due aux progrès des technologies intelligentes. En effet, le cloud computing permet un stockage en faible coût, ce qui permet aux appareils IoT de stocker des quantités massives de données générées par les systèmes IoT à des tarifs équitables. En outre, les technologies Big Data ont simplifié l'organisation et l'interprétation des données générées par les systèmes IoT. L'intelligence artificielle et les technologies associées ont permis de générer des connaissances qui contribuent à la croissance des entreprises. D'autre part, l'avancement des technologies de connectivité est essentiel, avec des milliards de nouveaux dispositifs IoT entrant chaque année, tels que la 5G, qui permettrait une transmission rapide des données vers et depuis les serveurs cloud. En outre, IPv6 permet aux appareils IoT d'être adressés de manière unique sans avoir à contourner les NAT (Network Address Translation) et les serveurs traditionnels.

2.3.2 Le Web des Objets

Les éléments centraux de l'Internet des Objets sont les capteurs, qui sont des composants électroniques de plus en plus miniaturisés qui communiquent sans fil par l'intermédiaire de réseaux de capteurs sans fil (WSN). Les WSN déploient des dispositifs pour mesurer les phénomènes environnementaux, jouant un rôle essentiel dans l'IoT qui a évolué à partir des WSN afin de les intégrer à l'internet. L'IoT fait référence à des objets physiques en réseau dotés d'identités numériques, ce qui leur permet de se connecter et de communiquer sur l'internet. Le réseau sert de lien entre les mondes physique et virtuel. Le concept de l'Internet des Objets prévoit qu'un grand nombre d'appareils intelligents communicants viendront compléter l'internet actuel. IoT est né de la convergence de l'internet et des technologies sans fil.

L'intégration de tout objet contrôlé à distance dans le World Wide Web est appelée le Web des objets ou Web of Things (WoT). Il s'agit d'un lien entre les mondes physique et numérique. C'est une innovation de l'Internet des Objets qui inclut des objets intelligents sur l'internet et le web. Le Web des Objets offre une couche d'application qui facilite la création d'applications IoT composées de plusieurs appareils provenant de diverses plateformes et de divers domaines d'application [58].

2.3.3 Le Web Sémantique des Objets

Les concepts et technologies du web sémantique sont intégrés dans les réseaux d'objets connectés pour relever les défis de l'interopérabilité, ce qui limite le développement de l'IoT. La combinaison des technologies du web sémantique et des domaines de l'IoT ou WoT donne lieu à l'émergence d'un nouveau terme, connu sous le nom de Web sémantique des objets ou Semantic Web of Things (SWoT) [59]. Le web sémantique des objets est décrit comme l'adoption des technologies du web sémantique dans les applications de l'internet des objets [60]. Alors que l'objectif du web sémantique est d'avoir et de créer un contenu lisible que les machines et les humains peuvent traiter, l'internet des objets peut utiliser cette vision pour refléter, expliquer et annoter les données. Ainsi, les données peuvent être partagées, réutilisées et combinées afin de créer de nouveaux services et d'extraire de véritables informations des ensembles de données de l'IoT.

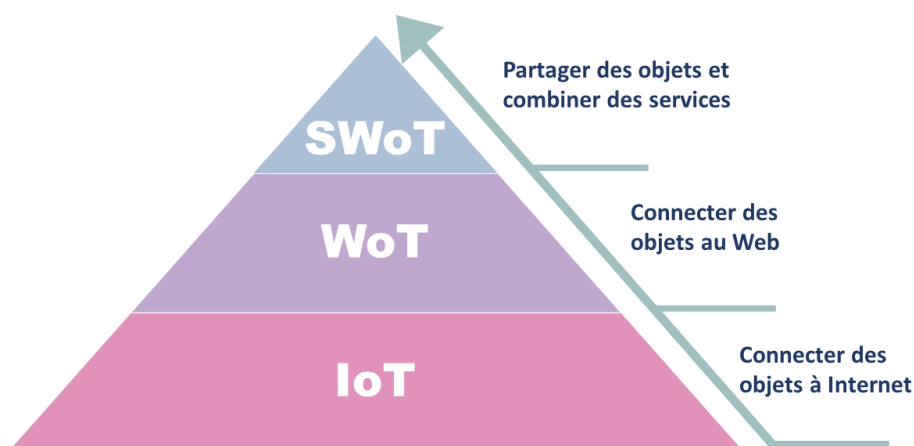


FIG. 2.5 : De l'Internet des Objets au Web Semantic des Objets.

La transition de l'IoT vers le SWoT permet une utilisation plus avancée des données des objets connectés, offrant des avantages tels qu'une meilleure compréhension des données, des décisions plus intelligentes, une automatisation améliorée et une interopérabilité accrue. Cela

ouvre la voie à des applications plus sophistiquées dans divers domaines, notamment l'industrie, la santé, l'agriculture, la mobilité, et bien d'autres.

2.3.4 Framework du Web Semantique des Objets

Le framework du Web Semantique des Objets est un ensemble de couches chargées de l'agrégation, de la persistance, de l'analyse et de la distribution des données [52]. Il permet l'intégration de données hétérogènes au sein d'une même structure et l'accès transparent aux applications qui peuvent s'appuyer sur les données collectées pour leur usage spécifique [7]. Dans ce qui suit, nous présentons les cadres existants relatifs à l'IoT qui soutiennent l'interopérabilité sémantique dans les systèmes IoT, tels que BiG-IoT, FIESTA IoT, VICINITY, INTER-IoT, Open-IoT, SymbIoTe, et le M3 Framework.

2.3.4.1 BIG-IoT [61, 62]

Le développement de l'API BiG-IoT repose sur l'adressage sémantique et les problèmes d'interopérabilité de l'Internet des Objets pour concrétiser de véritables écosystèmes de l'IoT. Le projet est une plateforme Web qui connecte différentes plateformes et systèmes intermédiaires. Il utilise `schema.org`³ comme vocabulaire conceptuel. Avec une API bien définie et une architecture clairement définie, il est simple de créer des applications et des services pour des plates-formes hétérogènes avec un niveau croissant d'interopérabilité sémantique. Les fonctions suivantes définissent l'API de l'IoT :

- Gestion de l'identité pour l'enregistrement des ressources ;
- Découverte des ressources selon des critères de recherche définis par l'utilisateur ;
- Accès aux métadonnées et aux données (téléchargement de données et publication/ enregistrement de flux) ;
- Gestion du vocabulaire pour les descriptions sémantiques des concepts ;
- Sécurité, y compris la gestion de l'identité, l'autorisation et la gestion des clés ;
- Facturation permettant de gagner de l'argent grâce à des mécanismes de paiement et de facturation.

2.3.4.2 FIESTA IoT

Le projet FIESTA, financé par l'Union européenne dans le cadre de l'action Horizon 2020, s'inscrit dans le domaine de la "Recherche et Expérimentation sur l'Internet du Futur". Il s'agit d'un projet de recherche et d'innovation qui vise à faciliter l'interopérabilité et l'expérimentation dans le domaine de l'Internet des Objets en utilisant des technologies sémantiques.

Le projet FIESTA consiste en des expériences à grande échelle dans le domaine de l'IoT, utilisant des données et des ressources provenant de plateformes IoT [63]. Grâce aux technologies sémantiques, le projet FIESTA permet aux chercheurs et aux expérimentateurs de partager et de réutiliser des données provenant de divers bancs d'essai IoT. Ces expériences offrent divers outils et meilleures pratiques pour améliorer l'interopérabilité des plateformes IoT hétérogènes. L'architecture FIESTA-IoT se compose d'un ensemble de blocs fonctionnels qui permettent [64] :

- L'intégration des flux de données et des ressources des bancs d'essai dans FIESTA-IoT ;
- La découverte des ressources via FIESTA-IoT et leur accessibilité via les services FIESTA-IoT ;

³<https://schema.org/>

- L'interrogation sémantique à la fois des ensembles de données liées (collectées à partir des bancs d'essai) et des API de services IoT ;
- L'accès sécurisé aux ressources des bancs d'essai par des expérimentateurs authentifiés et autorisés.

2.3.4.3 VICINITY [65]

Le projet VICINITY vise à connecter des plates-formes basées sur le cloud provenant de divers domaines d'application en proposant une "interopérabilité en tant que service" pour l'Internet des Objets [29]. L'objectif principal est d'améliorer l'interopérabilité sémantique en utilisant la norme d'ontologie du langage Web du W3C. Le réseau d'ontologies VICINITY est composé d'ontologies inter-domaines qui abordent des concepts généraux tels que le temps, l'espace et le Web des Objets. De plus, elles représentent les informations nécessaires pour que les pairs puissent échanger des données de description de l'IdO. Les ontologies orientées domaine cherchent à couvrir une large gamme de domaines, y compris la santé et les transports.

2.3.4.4 INTER-IoT [66]

INTER-IoT a pour objectif principal de concevoir, mettre en œuvre et tester un framework permettant l'interopérabilité entre différentes plateformes de l'Internet des Objets. Le but ultime du projet INTER-IoT est de fournir une architecture système interopérable permettant d'intégrer de manière transparente diverses architectures IoT dans multiples domaines d'application. L'interopérabilité sera assurée à plusieurs niveaux, notamment au niveau du système, du réseau, des intergiciels (middleware), des services et des données. Cela permet aux développeurs de créer des applications IoT intelligentes efficaces et efficientes sur des plateformes IoT hétérogènes. INTER-IoT vise à être générique, permettant à différentes approches de coexister sur la plateforme. Cela inclut des services cloud utilisant une couche d'Infrastructure en tant que Service (IaaS) pour adapter leurs opérations selon les besoins.

2.3.4.5 Open-IoT [67]

ICFOSS propose une plateforme de partage de connaissances activée par la communauté pour partager, discuter et collaborer sur les matériels et logiciels open source pour l'Internet des Objets. Le projet Open-IoT se concentre sur l'augmentation de l'interopérabilité sémantique. Une plateforme intergicelle a été créée pour permettre l'intégration sémantique des applications dans le cloud. Elle utilise l'ontologie du réseau sémantique de capteurs pour modéliser l'information et réaliser l'intégration sémantique de divers systèmes IoT. De plus, elle utilise les Données Liées (Linked Data) pour enrichir les données et les inférer. La plateforme Open IoT est l'intergiciel et infrastructure qui permet aux utilisateurs finaux d'interagir avec des objets connectés. Elle sert d'interface logicielle entre les couches matérielles et applicatives. La plateforme IoT orchestre la circulation des données entre les dispositifs IoT et les applications IoT.

2.3.4.6 SymbIoTe

L'environnement SymbIoTe (Symbiosis of smart objects across IoT) fournit une couche d'abstraction pour une "vue unifiée" sur diverses plates-formes et leurs ressources, permettant aux concepteurs d'applications et aux développeurs de voir les ressources de la plateforme de manière transparente.

L'architecture de SymbIoTe est basée sur une pile hiérarchique de l'IoT et prend en charge plusieurs plateformes IoT. Elle déploie un intergiciel d'interopérabilité à la fois flexible et sécurisé sur les plateformes IoT. L'objectif principal du projet est de développer des applications IoT sur des plateformes IoT, ainsi que des espaces intelligents dynamiques et adaptatifs dans lesquels ils peuvent collaborer [64, 68]. Il propose un moteur de recherche sémantique de l'Internet des Objets pour les objets connectés enregistrés par les fournisseurs de plateformes. De plus, une couche d'abstraction unifie l'utilisation de ces ressources sur l'ensemble des plateformes.

2.3.4.7 M3 Framework

M3 Framework (Machine-to-Machine Measurement framework) permet aux applications de l'Internet des Objets d'assister les utilisateurs dans l'interprétation des mesures des capteurs et de combiner différents domaines. M2M est utilisé dans le cadre du projet pour annoter sémantiquement et raisonner sur les données M2M collectées à partir de divers dispositifs, systèmes et domaines de l'IoT.

Les couches suivantes structurent le framework M3 pour augmenter le niveau d'interopérabilité sémantique [69, 70] :

- La couche de perception est composée de dispositifs physiques de l'IoT tels que des capteurs, des actionneurs et des objets intelligents ;
- La couche d'acquisition de données collecte des données brutes à partir des dispositifs de l'IoT et les convertit dans un format unifié, tel que RDF/XML conforme à l'ontologie M3 ;
- La couche de persistance est responsable du stockage de M3 dans une base de données pour stocker des données de capteurs sémantiques, appelée le triple store ;
- Pour mettre à jour les ontologies de domaine M3, les ensembles de données et les règles, la couche de gestion des connaissances est responsable de la recherche, de l'indexation, de la conception, de la réutilisation et de la combinaison de connaissances spécifiques au domaine, telles que les ontologies et les ensembles de données ;
- La couche de raisonnement utilise des moteurs de raisonnement et des règles M3 pour inférer de nouvelles connaissances ;
- Sur les données de capteurs inférées, la couche de requête de connaissances exécute des requêtes SPARQL ;
- La couche d'application utilise une application (qui s'exécute sur des appareils intelligents) pour analyser et afficher les résultats aux utilisateurs finaux.

Ces framework jouent un rôle important dans l'amélioration de l'interopérabilité des dispositifs et des systèmes IoT en abordant des défis sémantiques tels que la représentation des données, la gestion du vocabulaire, les ontologies, les techniques de raisonnement et de liaison. Chaque cadre propose des fonctionnalités et des solutions uniques pour faciliter la communication et l'interaction sans heurts entre les dispositifs et les plateformes IoT (Tableau 2.1).

2.4 Applications de l'Internet des Objets

L'Internet des Objets intègre une variété de technologies préexistantes, telles que les infrastructures de communication, les technologies de l'information, les systèmes de détection et de contrôle, les logiciels et le matériel, pour améliorer les processus, réduire les coûts, stimuler l'innovation de produits et de modèles commerciaux, et améliorer l'engagement client. Les applications de l'IoT toucheront de nombreux aspects, y compris la gestion de l'énergie, la gestion

Framework	La Contribution au Niveau Sémantique
BIG-IoT	Élargit les normes du Web des objets et la gestion du vocabulaire pour gérer la sémantique.
FIESTA IoT	Incorpore des techniques de raisonnement et de liaison pour améliorer l'interopérabilité sémantique.
VICINITY	Développement et utilisation d'ontologies spécifiques pour améliorer l'interopérabilité sémantique.
INTER-IoT	Se concentre sur la transformation des données et de la sémantique, améliorant l'interopérabilité dans les systèmes IoT.
Open-IoT	Améliore l'interopérabilité en étendant l'ontologie SSN et en utilisant les principes des données liées.
SymbIoTe	Fournit un moteur de recherche sémantique pour l'IoT, facilitant la découverte et l'interopérabilité des ressources IoT.
M3 Framework	Intègre la gestion des connaissances et des couches de raisonnement pour améliorer l'interopérabilité sémantique dans les systèmes IoT.

TAB. 2.1 : Framework améliorant l'interopérabilité des systèmes IoT

des stocks, la régulation du trafic, l'automatisation résidentielle, l'industrie, les soins de santé, les applications militaires, et bien d'autres domaines [71].

Une explosion de dispositifs et de plateformes IoT a été intégrée dans un large éventail d'applications, notamment dans l'industrie, les hôpitaux, l'agriculture, les infrastructures, l'électricité, les transports, le contrôle industriel et les habitations. Ainsi, un profond bouleversement s'est produit dans tous les domaines. Avec l'ajout de notifications sémantiques, il est possible de réaliser une analyse approfondie des données et une découverte des connaissances, en particulier dans les domaines de la reconnaissance des activités, de la prise de décision et de la découverte des tendances [72].

L'Internet des Objets permet un accès aisé et une interaction avec une variété d'appareils intelligents et d'objets performants, ouvrant ainsi la voie au développement d'applications intelligentes innovantes dans divers secteurs. Actuellement, des efforts sont déployés pour intégrer des aspects sémantiques aux applications de l'IoT dans plusieurs domaines. Dans cette section, nous explorons des domaines d'application importants de l'IoT qui utilisent surtout des concepts sémantiques.

2.4.1 Ville intelligente

Les villes intelligentes utilisent l'IoT pour surveiller et gérer efficacement les infrastructures, les transports, l'énergie et la sécurité. Les aspects sémantiques permettent une compréhension contextuelle des données, favorisant ainsi la prise de décisions éclairées pour une utilisation plus efficace des ressources.

2.4.2 Agriculture intelligente

L'IoT est utilisé pour surveiller les conditions environnementales, le sol et les cultures. Les aspects sémantiques permettent une interprétation plus précise des données pour optimiser l'ir-

rigation, la fertilisation et la gestion des cultures.

2.4.3 Santé connectée

Les dispositifs IoT sémantiques sont utilisés pour surveiller la santé des patients, collecter des données médicales en temps réel et envoyer des alertes en cas de besoin. Les informations sémantiques aident les professionnels de la santé à interpréter les données et à prendre des décisions médicales plus précises.

2.4.4 Énergie intelligente

L'IoT est déployé pour surveiller et optimiser la production, la distribution et la consommation d'énergie. Les aspects sémantiques aident à coordonner les multiples sources d'énergie et à gérer la demande en temps réel.

2.4.5 Domotique

Les foyers intelligents utilisent l'IoT pour automatiser l'éclairage, le chauffage, la sécurité et d'autres systèmes. Les aspects sémantiques permettent des interactions plus sophistiquées entre les appareils, améliorant ainsi la convivialité et la gestion.

2.4.6 Industrie 4.0

L'industrie 4.0 intègre l'IoT pour automatiser les processus de fabrication, surveiller les équipements et optimiser la gestion de la chaîne d'approvisionnement. Les aspects sémantiques facilitent l'interopérabilité entre les machines et les systèmes de gestion et de surveillances. D'ici l'industrie 4.0 présente des caractéristiques idéales pour tester et mettre en œuvre des approches de l'IoT en raison de sa complexité, de son besoin de précision, de son flux de données massives, de ses interactions complexes et de son potentiel commercial. Cela peut contribuer à l'amélioration des opérations industrielles, à l'innovation et à la création de valeur ajoutée pour les entreprises.

2.5 L'Internet des Objets au Service de l'Industrie 4.0

L'ère actuelle de la révolution industrielle a été témoin de deux phénomènes technologiques majeurs qui ont transformé la manière dont nous concevons, produisons et gérons nos produits : l'Internet des Objets (IoT) et l'Industrie 4.0 (I4.0). Ces deux concepts, bien qu'originaires de domaines différents, ont convergé pour redéfinir les normes de l'industrie, stimulant une vague d'innovation et de changements disruptifs. La convergence de l'IoT et de l'Industrie 4.0 représente une opportunité significative pour les entreprises industrielles d'améliorer leur efficacité opérationnelle, leur productivité et leur compétitivité en exploitant les données en temps réel générées par les dispositifs IoT dans le contexte de l'automatisation et de la numérisation de l'Industrie 4.0.

L'Industrie 4.0 représente une évolution dans le monde de la production et de la gestion industrielle. Elle est alimentée par la convergence de technologies de pointe telles que l'Internet des Objets, l'intelligence artificielle, la robotique avancée, la réalité augmentée et la fabrication

additive (impression 3D). Ces technologies convergent pour créer un écosystème industriel entièrement connecté et numérique, redéfinissant les normes de l'efficacité, de la productivité et de la flexibilité.

L'essor de IoT, des CPS et des collaborations plus étroites entre les systèmes homme-machine et machine-machine ont transformé le paysage industriel actuel, donnant naissance à ce que l'on appelle l'industrie 4.0 (I4.0) [73]. Il s'agit de la mise en réseau intelligente des machines, des personnes et des processus industriels. L'industrie 4.0 implique désormais la transformation numérique de tous les marchés industriels et de consommation, de l'introduction de la fabrication intelligente à la numérisation de l'ensemble des canaux de fourniture de valeur [74].

2.5.1 Fondements et Technologies clé de l'Industrie 4.0

Les technologies intelligentes jouent un rôle essentiel dans la croissance économique à long terme. Elles transforment les maisons, les bureaux, les usines et même des villes entières en systèmes autonomes et autocontrôlés qui fonctionnent sans intervention humaine constante [75].

Les fondements de l'Industrie 4.0 sont un ensemble de principes et de concepts qui soutiennent la quatrième révolution industrielle. L'Industrie 4.0 représente une transformation majeure dans le domaine de la fabrication et de l'industrie, caractérisée par l'utilisation intensive de technologies numériques et de l'Internet des objets pour automatiser et améliorer les processus de production. L'I4.0 est caractérisée par l'adoption croissante de la technologie numérique dans le secteur industriel (Figure 2.6). Ces évolutions dans l'Industrie 4.0 nous ouvrent de nouvelles perspectives de travail avec des machines, favorisant une productivité accrue.

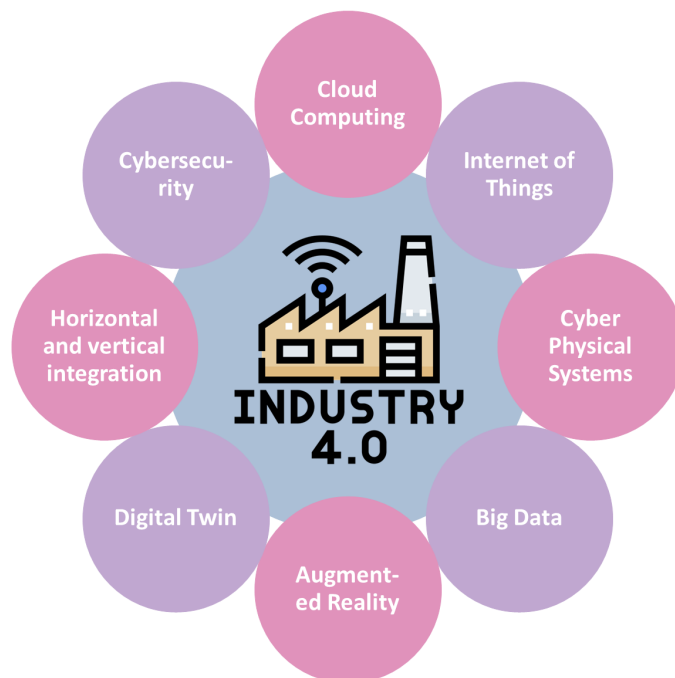


FIG. 2.6 : Technologies Clés de l'Industrie 4.0.

2.5.1.1 Internet des Objets

Le paradigme de l'IoT est apparu dans le but de collecter et de transmettre des données de manière autonome par l'intermédiaire de réseaux basés sur le protocole Internet, éliminant ainsi

la nécessité d'une intervention humaine constante. L'IoT connecte des milliards d'objets et de personnes et est reconnu comme l'une des technologies les plus influentes pour générer, modifier et partager de grandes quantités de données.

L'industrie 4.0 se caractérise par l'intégration de technologies de pointe dans les processus industriels afin d'accroître la productivité, la flexibilité et l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA) et la robotique [76]. Dans une usine intelligente de l'industrie 4.0, les machines et les équipements sont interconnectés et communiquent entre eux et avec un système de contrôle central pour permettre la surveillance, l'analyse et la prise de décision en temps réel [77].

L'Internet des Objets dans le contexte industriel fait référence à l'interconnexion et à l'intégration de dispositifs physiques, tels que des capteurs, des machines, des véhicules et d'autres objets, au sein d'un environnement industriel via des réseaux de communication. L'objectif principal de l'IoT industriel est de collecter, de surveiller et d'échanger des données en temps réel afin d'optimiser les opérations industrielles, d'améliorer l'efficacité, de réduire les coûts et d'augmenter la qualité des produits.

En effet, l'utilisation des technologies IoT continue de prospérer, car elle cherche à connecter les objets et les personnes, ce qui en fait l'une des technologies les plus essentielles de la vie quotidienne. L'IoT joue un rôle central dans la révolution de l'industrie 4.0, apportant une transformation significative aux opérations des entreprises manufacturières. L'incorporation de l'IoT dans le domaine de la fabrication présente une vaste gamme d'atouts, notamment une amélioration marquée de l'efficacité, une réduction des coûts, une hausse de la qualité, et une flexibilité accrue pour s'adapter aux besoins changeants des clients.

2.5.1.2 Internet Industriel des Objets

L'internet industriel des objets (IIoT), un sous-ensemble de l'IoT au sens large, se concentre spécifiquement sur l'industrie manufacturière [78]. Contrairement aux dispositifs traditionnels de l'IoT tels que les smartphones et les gadgets sans fil, l'IIoT est conçu pour des "objets" plus vastes et plus robustes.

L'objectif premier de l'IIoT est d'établir une connectivité entre les actifs industriels, tels que les moteurs, les réseaux électriques et les capteurs, et le cloud par l'intermédiaire d'un réseau [79]. Cette connectivité permet aux systèmes qui en résultent et aux dispositifs qui les composent de surveiller, de collecter, d'échanger, d'analyser et de réagir aux données en temps réel, en adaptant de manière autonome leur comportement ou leur environnement sans intervention humaine [80]. Par conséquent, l'IIoT peut considérablement améliorer l'efficacité opérationnelle et favoriser le développement de modèles commerciaux entièrement nouveaux.

L'IIoT joue un rôle crucial dans la transformation des systèmes cyber-physiques et des processus de production, en tirant parti du big data et de l'analytique dans le contexte de la quatrième révolution industrielle. Sans la connectivité et les données fournies par l'IIoT, l'industrie 4.0 n'existerait pas et n'aurait pas le même impact transformateur sur l'efficacité. Par conséquent, l'IIoT est l'un des piliers fondamentaux de l'industrie 4.0. La figure 2.7 utilise un diagramme de Venn pour illustrer les chevauchements entre l'IoT, l'IIoT, les CPS et l'industrie 4.0.

2.5.1.3 Cyber Physical Systems

Les systèmes cyber-physiques (CPS) [81] font partie intégrante de l'architecture des systèmes orientés services. Ils représentent un système d'éléments informatiques collaborant pour contrôler et commander des entités physiques. Dans ce contexte, CPS est synonyme d'un ensemble de

composants de systèmes distribués mis en œuvre sous forme de modules logiciels et de matériel embarqué [82].

Le concept de CPS joue un rôle central dans la mise en œuvre des principes de l'industrie 4.0. Les CPS représentent une classe émergente de systèmes dans lesquels les actifs physiques, dotés de capacités de calcul, sont intégrés de manière transparente dans un réseau. Ces systèmes facilitent l'échange de divers types de données, y compris des données en temps réel provenant d'actifs physiques, d'une variété de modèles (tels que des modèles basés sur la physique et des modèles axés sur les données), et d'une gamme de services tels que la reconfiguration et la surveillance [83].

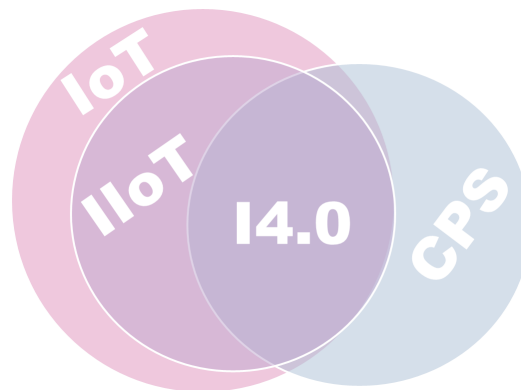


FIG. 2.7 : IoT, IIoT, Industrie 4.0 et CPS dans le diagramme de Venn [84].

2.5.1.4 Big Data et Analyse de Données

Dans le contexte de l'Industrie 4.0, le Big Data est recueilli à partir d'une multitude de sources variées, notamment la collecte de données à partir d'actifs, d'équipements et de terminaux connectés à l'Internet des objets (IoT). Ces sources de données ne se limitent pas à l'environnement de l'usine, mais s'étendent également à d'autres secteurs de l'entreprise et même à des sources externes à l'entreprise, telles que les retours clients et les tendances du marché, qui alimentent la recherche et le développement ainsi que la conception. De plus, des données provenant d'applications liées à la météorologie et à la circulation contribuent à améliorer la gestion logistique.

2.5.1.5 Intégration horizontale et verticale

L'intégration horizontale et verticale est un élément central de l'Industrie 4.0. L'intégration horizontale implique une étroite collaboration des processus au niveau opérationnel, à la fois au sein de multiples installations de production et tout au long de la chaîne d'approvisionnement. En revanche, l'intégration verticale consiste à relier toutes les strates de l'entreprise, favorisant ainsi une circulation fluide des données entre le terrain (ateliers) et la direction. En d'autres termes, la production est étroitement alignée avec des fonctions telles que la recherche et le développement, l'assurance qualité, les ventes, le marketing, ainsi que d'autres services, ce qui permet de briser les cloisonnements de données et de savoir-faire, et d'optimiser les opérations.

2.5.1.6 Cloud Computing

Le Cloud Computing joue un rôle essentiel dans l'Industrie 4.0 et la transformation digitale. En effet, la technologie du cloud actuelle constitue la fondation sur laquelle reposent les technologies les plus avancées, telles que l'intelligence artificielle, l'Internet des objets (IoT) et l'apprentissage automatique (Machine Learning). Elle offre aux entreprises les moyens nécessaires pour innover. Les données qui alimentent les technologies de l'Industrie 4.0 sont stockées dans le cloud, et les systèmes cyberphysiques au cœur de l'Industrie 4.0 utilisent le cloud pour assurer une communication en temps réel et une coordination efficace. En résumé, le Cloud Computing est véritablement la pierre angulaire de cette révolution industrielle et de la transition vers le numérique.

2.5.1.7 Réalité augmentée

La réalité augmentée consiste généralement à superposer des éléments numériques sur un environnement physique. Dans le cadre de systèmes de RA, les employés utilisent des lunettes intelligentes ou des appareils mobiles pour visualiser en temps réel diverses informations, telles que des données provenant de l'Internet des objets (IoT), des modèles numériques d'objets, des instructions de réparation ou d'assemblage, des contenus de formation, etc., tout en regardant un objet réel, comme un équipement ou un produit. Bien que la RA soit encore une technologie en développement, elle a un impact significatif sur des domaines tels que la maintenance, le service client, l'assurance qualité, la formation et la sécurité des techniciens.

2.5.1.8 Jumeau numérique

Jumeau numérique ou Digital Twins est une représentation virtuelle et simulée d'une machine, d'un produit, d'un processus ou d'un système du monde réel, construite à partir de données collectées par des capteurs de l'IoT. Cette composante cruciale de l'Industrie 4.0 permet aux entreprises d'acquérir une compréhension plus approfondie, d'effectuer des analyses et d'améliorer la performance et la maintenance de leurs systèmes industriels et de leurs produits. Par exemple, un opérateur de machines peut utiliser un jumeau numérique pour détecter une pièce défectueuse spécifique, anticiper des problèmes potentiels et améliorer le temps de fonctionnement de l'équipement.

2.5.1.9 Cybersécurité

Avec la montée de la connectivité et l'utilisation généralisée du Big Data dans le contexte de l'Industrie 4.0, la sécurité informatique devient d'une importance capitale. En adoptant une architecture de type "Zero Trust" et en utilisant des technologies telles que le Machine Learning ou la blockchain, les entreprises ont la possibilité d'automatiser la détection, la prévention et la réponse aux incidents, ce qui leur permet de réduire au minimum les risques de violation de données et les perturbations de la production sur l'ensemble de leurs réseaux.

2.5.2 Impact de l'IoT sur les processus de fabrication

Profondément enracinés dans le domaine de l'Internet des objets et de la fabrication fondée sur les systèmes cyber-physiques, des concepts novateurs tels que l'usine du futur et l'industrie 4.0 envisagent des environnements industriels hautement connectés où des produits intelligents

personnalisés sont conçus à l'aide de processus et de procédures intelligents [85]. L'IoT apporte une révolution dans les procédés de fabrication en offrant la possibilité d'une gestion de la production plus intelligente, efficiente, et adaptable. Cette transformation se traduit par une amélioration de la qualité, une réduction des dépenses, et une satisfaction client accrue et a un impact majeur sur les procédés de production, avec plusieurs conséquences majeures à souligner.

- **Surveillance en temps réel** : L'IoT permet de surveiller en temps réel l'état des machines, des équipements et des matières premières. Cela permet de détecter rapidement les problèmes, de prévenir les pannes et d'optimiser la maintenance.
- **Amélioration de la qualité** : En collectant des données sur les processus de fabrication, l'IoT permet de détecter les variations et les défauts de manière plus précise, ce qui conduit à une amélioration de la qualité des produits.
- **Optimisation de la production** : L'IoT permet d'optimiser la production en ajustant automatiquement les paramètres en fonction des données en temps réel. Cela permet de réduire les gaspillages, d'augmenter l'efficacité et de réduire les coûts de production.
- **Traçabilité** : L'IoT permet de suivre chaque produit tout au long de la chaîne de production, de la fabrication à la livraison. Cela renforce la traçabilité des produits, ce qui est essentiel pour garantir la conformité aux normes et aux réglementations.
- **Gestion de l'inventaire** : En surveillant l'inventaire en temps réel, l'IoT permet d'optimiser la gestion des stocks, de réduire les ruptures de stock et d'améliorer la planification de la chaîne d'approvisionnement.
- **Personnalisation** : L'IoT permet de personnaliser la production en fonction des besoins individuels des clients. Les données collectées peuvent être utilisées pour produire des produits sur mesure de manière rentable.
- **Maintenance prédictive** : L'IoT facilite la mise en place de la maintenance prédictive en surveillant l'état des machines. Cela permet de planifier la maintenance avant qu'une panne ne se produise, réduisant ainsi les temps d'arrêt non planifiés.
- **Réduction des coûts énergétiques** : En surveillant la consommation d'énergie des équipements, l'IoT permet d'identifier des moyens d'économiser de l'énergie et de réduire les coûts associés.

2.5.3 Défis et opportunités de l'IoT dans l'Industrie 4.0

L'accès aux données en temps réel dans une production est essentiel, qu'il s'agisse de produits, de processus ou de machines fonctionnant dans l'usine. Traditionnellement, l'accès à l'information en temps réel pour les processus n'était pas disponible au niveau de l'atelier. En cas de modification des processus ou des actions, les travailleurs ou les machines doivent attendre que les instructions soient transférées manuellement ou que les données soient chargées dans le système de production [86].

Les défis et opportunités de l'IoT dans l'Industrie 4.0 sont nombreux. D'un côté, l'IoT offre la possibilité de connecter et d'optimiser des processus industriels de manière sans précédent, créant ainsi des opportunités de productivité, d'efficacité et d'innovation. Cependant, il existe également des défis importants à relever, notamment en matière de sécurité, de gestion des données massives, de coûts d'implémentation, et de formation des travailleurs. Néanmoins, si

ces défis sont surmontés, l'IoT peut révolutionner l'Industrie 4.0 et transformer la manière dont les entreprises fabriquent des produits et interagissent avec leurs clients.

De nombreux systèmes industriels existants ne sont pas intrinsèquement conçus pour une intégration transparente dans les cadres de l'industrie 4.0, et faire face à la grande quantité de données collecté par l'IoT peut être un défi. Les industries emploient des stratégies telles que la surveillance en temps réel, les processus intelligents, les appareils connectés, les opérations sans papier, l'automatisation avec une intervention humaine minimale et l'analyse des big data pour numériser leurs produits, leurs processus de fabrication ou créer des services numériques à valeur ajoutée. Les données en temps réel permettent aux dispositifs industriels de prendre des décisions éclairées et d'automatiser des tâches, ce qui marque un changement transformateur dans les capacités industrielles, et le Web sémantique est prometteur pour relever les défis de l'interopérabilité des données dans les mises en œuvre de l'industrie 4.0.

2.6 Tendances futures de l'IoT pour l'industrie 4.0

L'Internet des Objets a révolutionné de nombreux aspects de notre vie quotidienne, mais son impact sur l'industrie est particulièrement significatif. Dans le contexte de l'Industrie 4.0, l'IoT joue un rôle crucial dans la transformation de la fabrication et de la chaîne d'approvisionnement. L'intersection de ces deux domaines a donné naissance à des tendances futures qui promettent de remodeler radicalement la manière dont les produits sont fabriqués, gérés, et livrés. Ces tendances révèlent comment l'IoT continuera à optimiser la production, à améliorer la qualité, à réduire les coûts, et à stimuler l'innovation au sein du secteur manufacturier. Dans cet article, nous allons explorer en détail ces tendances prometteuses qui éclairent l'avenir de l'Industrie 4.0, mettant en lumière leur impact potentiel sur la manière dont les entreprises opèrent et compétent dans un monde de plus en plus connecté. Certaines de ces tendances spécifiques incluent :

- L'automatisation basée sur l'IoT s'intensifiera, avec des usines de plus en plus autonomes et des robots collaboratifs qui travaillent aux côtés des travailleurs humains.
- Les jumeaux numériques, des répliques virtuelles d'actifs physiques, deviendront courants pour surveiller et optimiser en temps réel les opérations de fabrication.
- L'adoption de la 5G en milieu industriel permettra une connectivité ultra-rapide et fiable pour prendre en charge des applications IoT encore plus avancées.
- Grâce à l'analyse de données avancée, la maintenance prédictive deviendra plus précise, réduisant davantage les temps d'arrêt imprévus.
- L'IoT sera intégré aux technologies de fabrication additive (impression 3D) pour des processus de production plus flexibles et personnalisables.
- La technologie blockchain sera utilisée pour sécuriser la chaîne d'approvisionnement, garantir la traçabilité des produits et lutter contre la contrefaçon.
- L'intégration de l'IA dans l'IoT permettra des fonctionnalités avancées, telles que l'analyse prédictive, la planification de la production et l'optimisation des opérations.
- Les entreprises tireront parti de l'IoT pour surveiller leurs opérations en temps réel, ce qui permettra des ajustements rapides et une réactivité accrue aux demandes du marché.
- La sécurité des dispositifs IoT et des données deviendra une priorité, avec des normes plus strictes et des solutions de cybersécurité avancées.
- L'IoT sera utilisé pour surveiller et réduire la consommation d'énergie, minimiser les déchets et promouvoir des pratiques durables dans la fabrication.
- L'IoT permettra une personnalisation de masse en adaptant la production en fonction des besoins individuels des clients.

- L'IoT facilitera la réutilisation, la remise en état et le recyclage des produits, contribuant ainsi à une économie plus circulaire.

2.7 Conclusion

En conclusion, ce chapitre nous a permis d'explorer en détail l'Internet des Objets (IoT) et son rôle significatif dans l'Industrie 4.0. Nous avons commencé par établir les bases en examinant les principes fondamentaux de l'IoT, ses composants clés et les défis auxquels il est confronté. Ensuite, nous avons plongé dans l'architecture de l'IoT, son évolution, et ses applications variées, allant des villes intelligentes à la santé connectée. Nous avons également étudié comment l'IoT révolutionne l'Industrie 4.0, en mettant en lumière ses implications technologiques, ses effets sur les processus de fabrication, ainsi que les opportunités et défis qu'il apporte. Enfin, en considérant les tendances futures, il est évident que l'IoT continuera d'être un moteur d'innovation majeur dans le secteur industriel. Ce chapitre fournit une base solide pour comprendre l'IoT et sa place cruciale dans la transformation de l'industrie moderne.

Chapitre 3

Interopérabilité Sémantique et Modélisation Temps Réel

Dans l'époque contemporaine, marquée par une connectivité sans précédent et une diffusion rapide de l'information, les secteurs de l'informatique, de l'ingénierie et des sciences appliquées sont confrontés à un impératif crucial ; assurer une interconnexion fluide et compréhensible entre une multitude de systèmes, de dispositifs et d'entités. Dans ce contexte dynamique, notre attention se tourne naturellement vers deux concepts fondamentaux : l'interopérabilité sémantique et la modélisation en temps réel. Ces deux piliers deviennent indispensables pour relever les défis complexes posés par la nécessité de synchroniser et d'harmoniser les échanges d'informations au sein de cet écosystème technologique en constante évolution. Dans ce paysage en perpétuelle mutation, la capacité à interconnecter intelligemment divers systèmes, appareils et applications est devenue essentielle pour répondre aux exigences d'une société de plus en plus axée sur la connectivité en temps réel.

L'interopérabilité sémantique représente le socle sur lequel repose la possibilité pour différents systèmes informatiques de partager et d'interpréter des informations de manière significative [87]. Surpasse la simple compatibilité technique, exigeant une compréhension commune des données échangées. D'autre part, la modélisation en temps réel offre une perspective novatrice, permettant d'analyser et de représenter des systèmes en tenant compte des changements instantanés, offrant ainsi des avantages significatifs dans des domaines aussi variés que la santé, l'industrie et les villes intelligentes. L'interopérabilité sémantique et la modélisation en temps réel représentent des concepts clés pour l'évolution des systèmes informatiques [88], offrant des opportunités d'amélioration significatives dans des domaines aussi variés que la santé, l'industrie et les villes intelligentes. Ces approches favorisent une collaboration transparente et une compréhension en temps réel des données, ouvrant la voie à des avancées technologiques et à une prise de décision plus éclairée.

Dans ce chapitre, nous explorerons divers aspects cruciaux liés à l'interopérabilité, en mettant particulièrement l'accent sur l'Interopérabilité Sémantique. Ce concept revêt une importance majeure dans le domaine de la technologie de l'information, visant à assurer une compréhension commune des données entre différents systèmes. Nous aborderons les défis inhérents à cette forme d'interopérabilité, mettant en lumière les complexités qui émergent lors de la communication entre des systèmes utilisant des langages et des structures de données différentes. Pour surmonter ces défis, nous explorerons les solutions possibles et les approches innovantes, notamment l'Annotation Sémantique, qui permet d'enrichir le sens des données pour favoriser une compréhension partagée. Une autre dimension clé de notre exploration portera sur la Mo-

délisation en Temps Réel, dévoilant les avantages considérables de cette approche dynamique. Nous examinerons la Modélisation Sémantique en Temps Réel et les synergies résultant de la convergence entre l'Interopérabilité Sémantique et la Modélisation en Temps Réel. En outre, nous discuterons des défis spécifiques liés à l'interconnexion des systèmes en temps réel, tout en offrant une perspective sur les tendances futures. Enfin, nous analyserons l'impact crucial de l'interopérabilité dans l'industrie 4.0, soulignant son rôle fondamental dans l'évolution et la transformation des processus industriels contemporains. En explorant les subtilités du présent, nous ouvrons de nouvelles opportunités afin de repenser la dynamique des interactions et du développement des systèmes au sein de notre monde de plus en plus interconnecté.

3.1 Interopérabilité Sémantique

L'interopérabilité désigne la capacité des systèmes ou des dispositifs à communiquer, à coopérer et à collaborer efficacement, que ce soit au sein d'une organisation ou entre organisations. Elle implique la capacité de différents systèmes à échanger des informations et à utiliser ces informations pour fonctionner de manière transparente [89]. L'interopérabilité peut être obtenue grâce à l'utilisation de normes, de cadres et de technologies qui permettent aux systèmes de travailler ensemble et d'interopérer. Elle est particulièrement importante dans des domaines tels que l'automatisation, l'intégration des entreprises et les villes intelligentes, où des dispositifs et des systèmes disparates doivent s'intégrer et fonctionner ensemble de manière efficace. Diverses méthodes et solutions ont été proposées pour relever les défis de l'interopérabilité, notamment la normalisation, les intergiciels et les techniques d'intégration. Le manque d'interopérabilité peut entraîner des inefficacités dans les applications, d'où l'importance de trouver des solutions complètes et fiables pour relever ces défis [90]. L'interopérabilité est de plusieurs types : syntaxique, sémantique, pragmatique et organisationnelle. Ces types sont des exigences non fonctionnelles importantes pour les systèmes d'information [91].

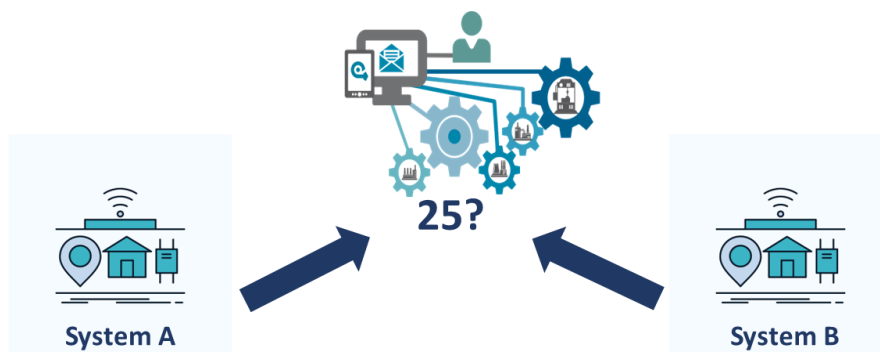


FIG. 3.1 : Casser les silos de données : laisser les machines dialoguer !

Nous intéressent à l'interopérabilité sémantique ; qui s'est imposée comme une nécessité pour faciliter l'inférence et la découverte de connaissances par des machines, ce qui permet d'obtenir des informations plus pertinentes. L'absence d'une représentation normalisée des données empêche les différentes applications de partager et de réutiliser les données (Figure 3.1), ce qui rend difficile la localisation des informations dont elles ont besoin [92]. L'interopérabilité sémantique vise à partager des données entre des organisations ou des systèmes et à s'assurer qu'ils comprennent et interprètent les données indépendamment des personnes impliquées, en utilisant des concepts de domaine, des connaissances contextuelles et une représentation formelle des données [93]. L'importance de l'interopérabilité sémantique devient encore plus prononcée

dans les contextes multidisciplinaires, où les différences techniques et linguistiques ajoutent de la complexité au défi.

Dans le domaine de la fabrications, l'importance de l'interopérabilité sémantique est primordiale. La possibilité d'accéder à des données en temps réel introduit une nouvelle approche de l'amélioration des processus d'entreprise. Cette interopérabilité permet aux entités de fabrication et à leurs systèmes automatisés d'échanger des informations avec précision et rapidité, ce qui se traduit par des opérations plus efficaces et plus fiables. En favorisant une communication transparente et le partage des données, l'interopérabilité sémantique joue un rôle crucial dans l'optimisation des processus de fabrication et l'amélioration de l'efficacité opérationnelle globale.

3.1.1 Solutions Clés pour l'Interopérabilité Sémantique

L'interopérabilité sémantique peut être assurée par l'utilisation de technologies sémantiques et d'ontologies. Ces technologies introduisent une couche sémantique qui définit formellement la signification des informations, améliorant l'interaction entre des systèmes hétérogènes [94]. La connectivité sémantique permet de partager des informations dont la signification est sans ambiguïté, ce qui permet de résoudre les problèmes d'interopérabilité dans l'industrie [95]. L'utilisation de modèles conceptuels et d'analyses ontologiques peut favoriser l'interopérabilité sémantique entre les bases de données, en garantissant une interprétation cohérente des données [96]. L'intégration sémantique est facilitée par des normes telles que RDF, RDFs et OWL, qui permettent d'établir des liens et des correspondances entre différentes représentations de données et de connaissances [97]. L'adoption de ces solutions clés permet de réaliser l'interopérabilité sémantique, ce qui permet une communication et un partage efficaces des informations entre les systèmes et les domaines. La figure 3.2 représente une vision de l'interopérabilité sémantique

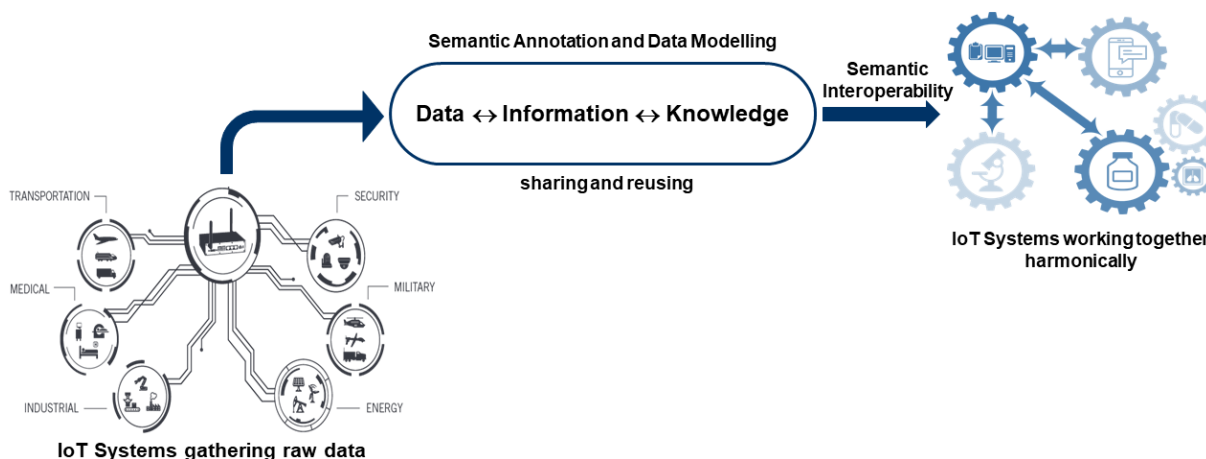


FIG. 3.2 : Vision de l'interopérabilité sémantique dans l'IoT.

dans l'IoT, elle illustre le processus selon lequel les données brutes collectées par les systèmes IoT sont initialement annotées sémantiquement. Cette étape vise à attribuer un sens aux données et à les rendre plus compréhensibles. Par la suite, les données annotées passent par une phase de modélisation, visant à organiser les données de manière à les rendre facilement exploitables. Enfin, une fois modélisées, les données peuvent être partagées et réutilisées par différents systèmes.

Cela décrit un flux logique où l'annotation sémantique et la modélisation des données contribuent à rendre les informations issues des systèmes IoT plus accessibles, compréhensibles et prêtes à être utilisées par d'autres applications ou systèmes. La combinaison de l'annotation

sémantique et de la modélisation des données garantit l'interopérabilité sémantique, permettant aux différentes applications et systèmes de comprendre, partager et réutiliser efficacement les données, favorisant ainsi une communication fluide et une collaboration optimale entre les divers composants du réseau IoT.

3.1.2 Les Défis de l'interopérabilité Sémantique

L'interopérabilité sémantique désigne la capacité de différents systèmes ou dispositifs à échanger et à comprendre des données de manière significative. Les défis de l'interopérabilité sémantique dans le contexte des villes intelligentes et de l'internet des objets (IoT) comprennent la nécessité d'une interopérabilité transparente entre les entités, l'adoption de technologies et d'outils sémantiques, et l'utilisation de modèles de données riches tels que les ontologies. Le manque d'interopérabilité sémantique dans les systèmes de l'IoT peut entraîner des difficultés dans le partage et la réutilisation des données brutes, ce qui nuit à la performance de ces systèmes. Pour résoudre ce problème, l'application des technologies du Web Sémantique, telles que les ontologies et les cadres, peut apporter une solution en donnant un sens aux données brutes de l'IoT et en les convertissant en un format de données enrichi [98][99].

L'interopérabilité sémantique pose plusieurs défis dans le domaine de l'informatique, notamment en raison de l'hétérogénéité des données, de la diversité des langages et des formats, des différences conceptuelles entre les systèmes, de l'évolution des normes, de la dépendance au contexte d'utilisation, des préoccupations de sécurité et de confidentialité, ainsi que des coûts et de la complexité associés à la mise en place de solutions. Le manque de normes universelles pour la représentation sémantique des données constitue également un obstacle. Surmonter ces défis nécessite l'adoption de normes ouvertes, l'utilisation de langages de modélisation sémantique, le développement de technologies d'intégration de données, et une collaboration étroite entre les parties prenantes pour favoriser des approches interopérables dès la conception des systèmes.

3.1.3 Annotation Sémantique de Données

L'annotation sémantique¹ est un processus d'attribution d'informations pertinentes aux concepts et à leurs relations. L'annotation sémantique des données est le processus d'amélioration des données par l'ajout d'étiquettes ou de métadonnées sémantiquement significatives, allant au-delà du simple étiquetage pour capturer les significations et les relations sous-jacentes. Cette méthode consiste à associer des éléments de données à des concepts issus d'une ontologie bien définie ou d'un graphe de connaissances, créant ainsi une couche plus informative. Dans le domaine des technologies du web sémantique, les déclarations de triples RDF sont couramment utilisées à cette fin, permettant une représentation structurée des relations entre les entités. Cruciale pour des applications telles que le web sémantique, les graphes de connaissances et les données liées, l'annotation sémantique des données permet aux machines non seulement de reconnaître les données, mais aussi d'en déduire la sémantique et de raisonner à ce sujet. Cela conduit à des capacités avancées telles que la recherche sémantique, le raisonnement automatisé et l'amélioration de l'interopérabilité entre divers ensembles de données et systèmes.

3.1.4 Ontologie et Internet des objets

Pour résoudre le problème de l'hétérogénéité, l'utilisation du cœur de la technologie sémantique (ontologie) pour l'annotation sémantique des informations sur les objets peut fournir aux

¹<https://www.ontotext.com/knowledgehub/%20fundamentals/semantic-annotation/>

machines des informations plus compréhensibles [100].

Dans le domaine de l'internet des objets, de nombreuses ontologies ont vu le jour, chacune d'entre elles étant conçue pour répondre à des perspectives et à des champs d'application spécifiques au sein de ce vaste domaine. Dans cette section, nous allons exposer une présentation détaillée de certaines ontologies de l'IoT les plus remarquables. En examinant leurs objectifs et applications distincts, nous visons à fournir une compréhension complète de la façon dont ces ontologies contribuent à la représentation structurée et à l'interopérabilité sémantique essentielles pour libérer tout le potentiel des données de l'IoT.

- **Semantic Sensor Network ontology (SSN²)** : c'est l'ontologie la plus connue, SSN est développée par le Semantic Sensor Network Incubator Group du W3C. Les capteurs et leurs observations, les techniques utilisées, les aspects étudiés, les échantillons utilisés à cette fin et les attributs découverts, ainsi que les actionneurs, sont tous décrits dans cette ontologie. SSN peut prendre en charge un large éventail de technologies et de cas d'application, y compris le Web des objets. L'ontologie SSN est étendue et complétée par plusieurs ontologies.
- **Sensor Core Ontology[101]** : SCO est basée sur l'ontologie actuelle des capteurs et sur la connaissance du domaine des capteurs. Des modules tels que le module de composant, le module de service et le module de contexte ont été ajoutés pour étendre l'ontologie du SSN. L'espace, le temps et les thèmes sont des classes introduites dans le module de contexte.
- **Wireless Semantic Sensor Network ontology[102]** : Est une extension de l'ontologie SSN pour les réseaux de capteurs sans fil. L'ontologie SSN a été enrichie par l'ajout de nouveaux concepts WSN tels que la communication, le flux de données et l'état. La communication et la transformation des données de détection sont ainsi assurées.
- **IoT Ontology [103]** : Décrit une ontologie pour représenter les informations sur les "choses" de l'IoT, telles que les entités intelligentes, les entités physiques, les entités de contrôle, les appareils électroniques et les réseaux, et sur la manière dont elles devraient interagir. Basée sur l'ontologie SSN.
- **M3 Ontology [104]** : C'est une extension de l'ontologie SSN. Les technologies du web sémantique sont utilisées pour agréger les données M2M interdomaines et les enrichir. L'ontologie M3 décrit les composants essentiels de l'architecture M2M et annote sémantiquement les données M2M. Elle classe également les dispositifs M2M, leurs données et leurs domaines, et relie les idées M3 à des ontologies de domaine pour obtenir de plus amples informations.
- **SAREF Ontology [105]** : Elle se concentre sur le concept d'appareil, vise à décrire les concepts fondamentaux récurrents, leurs connexions et les correspondances avec d'autres concepts utilisés par divers actifs/normes/modèles dans le domaine des appareils intelligents.
- **OneM2M Ontology [106]** : Elle explique la signification des capteurs et des actionneurs. Son principal objectif est, d'une part, d'assurer la compatibilité entre divers systèmes IoT et, d'autre part, de permettre l'interopérabilité sémantique dans les systèmes IoT intersilo.

²<https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/>

Ontologie	Année	Domaine
SSN	2012	GENERALE
SCO	2012	SPECIFIQUE
WSSN	2012	GENERALE
IoT Ontology	2012	GENERALE
M3 Onto	2014	SPECIFIQUE
SAREF	2015	SPECIFIQUE
One M2M	2016	SPECIFIQUE
IoT-O	2016	GENERALE
SmartOntoSensor	2017	SPECIFIQUE
IoT Lite	2017	GENERALE
SOSA	2019	GENERALE

TAB. 3.1 : Ontologies de l’IoT

- **IoT-O [107]** : Est une ontologie pour le domaine central de l’internet des objets. Elle est conçue pour représenter des informations horizontales sur les systèmes et les applications de l’IoT, ainsi que des connaissances verticales spécifiques à l’application. L’IoT-O se compose de nombreux modules : module de détection, module d’action, module de service et module d’énergie.
- **SmartOntoSensor [108]** : Est un modèle ontologique qui vise à créer une conception formelle des ressources et des capteurs des smartphones, y compris leurs catégories, leur taxonomie, leurs connexions et des informations sur les attributs, les performances et la fiabilité des capteurs. Il comprend des énoncés logiques qui décrivent les associations entre les composants et les concepts de capteurs. Ainsi, elle stimule la valeur de l’information et la réutilisabilité pour le développement et le partage d’applications en fournissant une compréhension commune des données collectées par les capteurs du smartphone. L’ontologie peut être utilisée pour définir les appareils IoT et leurs capacités dans les applications actuelles qui acceptent les annotations Schema.org.
- **IoT-Lite [109]** : Est une instanciation de l’ontologie SSN. Elle fournit une ontologie de base légère qui permet une annotation et un traitement rapides. IoT-Lite peut être un composant fondamental d’un modèle sémantique auquel de multiples modules sémantiques peuvent être ajoutés, en fonction des applications, pour fournir des concepts et des connexions supplémentaires spécifiques au domaine et à l’application.
- **Sensor, Observation, Sample, and Actuator (SOSA) ontology [110]** : Construite sur l’ontologie SSN, est une ontologie légère centrée sur les événements. L’ontologie SOSA est une spécification générale rigoureuse et légère pour modéliser l’interaction des entités impliquées dans l’observation, l’actionnement et l’échantillonnage.

Le tableau 3.1 présente un résumé des ontologies présentées et le fragment du domaine de IoT. Ces ontologies décrivent des domaines généraux ou spécifiques.

3.2 Modélisation en Temps Réel

La modélisation en temps réel est une technique utilisée dans le développement de systèmes logiciels qui ont des exigences strictes en matière de qualité et de délais. Elle implique l’utilisation

de modèles et de langages de modélisation pour analyser les caractéristiques du système, capturer les exigences et l'intention de conception, et générer des implémentations complètes directement à partir des modèles. La modélisation en temps réel est particulièrement importante dans le domaine des systèmes cyber-physiques (CPS), où le comportement du système doit être vérifié en temps réel. Les automates temporels sont couramment utilisés pour établir des modèles de comportement des CPS, et la vérification en temps réel est effectuée sur la base de ces modèles [111]. La modélisation en temps réel est également pertinente dans le contexte des systèmes de stockage d'énergie, tels que les supercondensateurs, où des modèles précis sont nécessaires pour les simulations en temps réel [112]. Dans l'ensemble, la modélisation en temps réel joue un rôle crucial pour garantir la qualité et le respect des délais des systèmes logiciels et pour permettre l'analyse et la simulation en temps réel.

3.2.1 Modélisation Sémantique en Temps Réel

La modélisation sémantique en temps réel fait référence au processus de génération de représentations sémantiques précises et actualisées d'une scène ou d'un environnement en temps réel. Elle fait référence à la création de la représentations sémantiques des données en temps réel, permettant une compréhension et une analyse immédiates du contenu. Cela peut être appliqué à divers domaines, tels que NLP, la vision par ordinateur et l'analyse de données en temps réel. Dans des domaines tels que la recherche d'informations en temps réel, la surveillance, l'analyse des sentiments en temps réel, la prise de décision en temps réel, etc., la modélisation sémantique en temps réel est essentielle. Cependant, il est important de noter que la mise en place de ces systèmes nécessite une compréhension approfondie des exigences spécifiques de chaque application et des technologies appropriées.

3.2.1.1 Outils de Modélisation Sémantique en Temps Réel

Les systèmes de traitement de flux en temps réel sont essentiels pour traiter de grands volumes de données en temps réel. La modélisation sémantique en temps réel consiste à comprendre la signification des données qui circulent dans un système en temps réel. Ceci est particulièrement important dans les scénarios où non seulement le volume de données est important, mais où le contexte et la sémantique des données sont cruciaux pour la prise de décision.

Plusieurs outils et frameworks peuvent être utilisés pour la modélisation sémantique en temps réel :

- **Apache Flink**³ : Apache Flink est un framework de traitement de flux robuste doté de capacités étendues. Prenant en charge le traitement des événements, les calculs avec état et le traitement complexe des événements, Flink est un outil polyvalent pour le traitement des flux de données en temps réel. Sa flexibilité est encore soulignée par la mise à disposition d'API pour Java et Scala, ce qui facilite l'intégration transparente avec divers environnements de programmation. Il convient de souligner les prouesses de Flink dans le développement d'applications complexes de traitement d'événements, où il excelle dans la gestion de scénarios de données complexes. En outre, la prise en charge par Flink du traitement avec état ajoute une couche de sophistication, ce qui le rend bien adapté aux applications nécessitant une modélisation sémantique en temps réel. En résumé, Apache Flink apparaît comme une solution puissante pour les entreprises qui recherchent un trai-

³<https://flink.apache.org/>

tement efficace des flux de données, avec pour objectif de comprendre et de donner un sens aux flux de données dynamiques.

- **Apache Kafka Streams⁴** : Kafka Streams, qui fait partie intégrante de l'écosystème Apache Kafka, est une formidable bibliothèque de traitement de flux conçue pour les applications de données en temps réel et les microservices dans le cadre de Kafka. Cette bibliothèque facilite le développement transparent d'applications qui traitent et analysent les données en continu, en s'alignant sur les exigences dynamiques des scénarios en temps réel. Kafka Streams se distingue notamment par ses fonctionnalités robustes, dont la prise en charge du traitement avec état, des jointures et des opérations de fenêtrage. Cet ensemble de fonctionnalités fait de Kafka Streams un choix idéal pour les cas d'utilisation qui exigent une compréhension nuancée de la sémantique des données. Par essence, Kafka Streams permet aux développeurs et aux organisations d'exploiter la puissance du traitement des données en temps réel, en leur permettant de créer des applications sophistiquées qui tirent des enseignements significatifs des données en continu.
- **Spark Streaming (Flux structuré)⁵** : Apache Spark, un framework de traitement de big data largement adopté, étend ses capacités au traitement de données en temps réel grâce au module Structured Streaming, riche en fonctionnalités. Ce module permet aux utilisateurs d'effectuer un traitement en temps réel des flux de données de manière transparente au sein de l'écosystème Spark. Spark se distingue par sa prise en charge d'API de haut niveau, offrant aux développeurs la possibilité d'utiliser des langages tels que Scala, Java et Python pour un développement rationalisé et efficace.

Le streaming structuré dans Spark est particulièrement remarquable pour son ensemble complet de fonctionnalités, ce qui en fait un excellent choix pour la modélisation sémantique en temps réel. Il excelle dans la prise en charge des opérations fenêtrées, permettant l'analyse des données dans des intervalles de temps spécifiques, ce qui est crucial pour comprendre les modèles temporels. En outre, le flux structuré de Spark facilite le traitement avec état, ce qui permet de conserver les informations contextuelles à travers les événements successifs du flux de données. Le cadre permet en outre le traitement des événements, ce qui garantit un traitement précis des horodatages et améliore son adéquation aux scénarios dans lesquels les considérations temporelles sont primordiales. En résumé, le module Structured Streaming d'Apache Spark apparaît comme une solution robuste pour les organisations qui recherchent des capacités de traitement de données en temps réel, en mettant l'accent sur la modélisation sémantique et en s'appuyant sur un support linguistique polyvalent et un ensemble de fonctionnalités puissantes.

- **TensorFlow DataFlow (Apache Beam)⁶** : Apache Beam, un framework révolutionnaire, introduit une approche unifiée du traitement par flux et par lots. Parallèlement, TensorFlow DataFlow sert de système d'exécution dédié à Apache Beam, s'intégrant de manière transparente à ses capacités. Ce duo dynamique offre un modèle de programmation unifié, prenant en charge à la fois le traitement par lots et le traitement en flux au sein d'un cadre unique. Il présente une solution unifiée et polyvalente, permettant aux développeurs de créer facilement des pipelines de traitement de données sophistiqués. Ce modèle unifié ne se contente pas de rationaliser les efforts de développement, il permet également aux entreprises de s'attaquer à des scénarios complexes, y compris ceux qui exigent une compréhension sémantique, dans un large éventail de langages de programmation.

⁴<https://kafka.apache.org/>

⁵<https://spark.apache.org/>

⁶<https://www.tensorflow.org/tfx/guide/beam>

- **NATS Streaming**⁷ : Apache NATS Streaming est un système de messagerie léger et performant qui étend les capacités du système de messagerie NATS. Conçu pour les architectures en continu et pilotées par les événements, ce système est adapté aux exigences des scénarios de traitement des données en temps réel.
NATS Streaming est une solution puissante pour les organisations qui recherchent une messagerie efficace et fiable dans le domaine des systèmes distribués. En mettant l'accent sur la livraison au moins une fois, la relecture des messages et le stockage persistant, il apparaît comme un outil précieux pour la modélisation sémantique en temps réel, permettant aux organisations de tirer des enseignements significatifs des données en continu dans un environnement distribué et axé sur les événements.
- **Amazon Kinesis**⁸ : Amazon Kinesis est une plateforme complète basée sur le cloud au sein de l'écosystème Amazon Web Services (AWS), spécialement conçue pour traiter efficacement les données en continu. Les services tels que Kinesis Data Streams et Kinesis Data Analytics sont au cœur de son offre et sont conçus pour prendre en charge le traitement des données en temps réel à grande échelle. Il représente une solution polyvalente pour les organisations qui cherchent à exploiter les capacités de traitement des données en continu basées sur le cloud. Avec l'inclusion de Kinesis Data Analytics et sa prise en charge des requêtes SQL, les utilisateurs peuvent intégrer de manière transparente une logique de modélisation sémantique dans leur analyse en temps réel, fournissant ainsi un ensemble d'outils précieux pour extraire des informations exploitables des données en continu dans l'environnement cloud d'AWS.

Le tableau 3.2 offre une comparaison détaillée des différentes solutions de traitement en temps réel pour la modélisation sémantique dans un système d'annotation sémantique. Le choix entre ces solutions dépendra des besoins spécifiques du projet, de la familiarité avec les technologies, et de la préférence pour des caractéristiques spécifiques telles que la facilité d'utilisation, l'intégration, et le support du cloud.

3.2.1.2 Avantages de la Modélisation en Temps Réel

La modélisation en temps réel offre plusieurs avantages dans divers domaines, notamment dans les domaines scientifiques, industriels, informatiques et de simulation.

- **Réactivité instantanée** : La modélisation en temps réel permet d'obtenir des résultats et des simulations en temps réel, ce qui signifie que les utilisateurs peuvent prendre des décisions basées sur des données actualisées en temps réel.
- **Analyse dynamique** : Les modèles en temps réel capturent les variations et les fluctuations des données au fur et à mesure qu'elles se produisent, ce qui permet une analyse plus approfondie des processus dynamiques et des changements dans les systèmes.
- **Prise de décision en temps réel** : Dans des domaines critiques, la modélisation en temps réel permet une prise de décision plus rapide et plus précise en fournissant des informations instantanées sur les changements du système.
- **Contrôle en temps réel** : Dans les systèmes de contrôle, tels que les systèmes industriels, les réseaux électriques et les processus de fabrication, la modélisation en temps réel permet un contrôle continu et en temps réel des opérations.

⁷<https://docs.nats.io/nats-concepts/jetstream/streams>

⁸<https://aws.amazon.com/kinesis/>

Critère	Apache Flink	Kafka Streams	Spark Streaming	TensorFlow DataFlow	NATS Streaming	Amazon Kinesis
Facilité d'utilisation	Modérée	Modérée	Modérée	Modérée	Facile	Facile
Capacités d'intégration	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Excellente
Prise en charge du traitement par état	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Traitement du temps d'événement	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui
Traitement d'événements complexes	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui (via Kinesis Data Analytics)
Langages de programmation	Java, Scala	Java	Scala, Java, Python	Divers	Non spécifié	SQL, Java, Python
Stockage persistant	Oui (points de contrôle étatiques)	Non	Oui (dépend du stockage)	Oui (dépend du stockage)	Oui	Oui (Kinesis Data Streams)
Support Cloud	Limité	Limité	AWS uniquement	Multi-cloud (via Apache Beam)	Limité	AWS uniquement
Cas d'utilisation d'annotation sémantique	Adapté à une modélisation complexe	Adapté aux scénarios nécessitant une compréhension sémantique	Adapté à la modélisation sémantique en temps réel	Adapté aux pipelines de traitement de données complexes	Support limité pour la modélisation sémantique	Adapté au traitement et à l'analyse en temps réel à l'aide de requêtes SQL

TAB. 3.2 : Comparaison des outils pour l'annotation sémantique en temps réel

- **Intégration avec des systèmes en temps réel :** Elle facilite l'intégration avec des systèmes qui nécessitent des réponses rapides, tels que les systèmes de contrôle automatisés, les applications de trading financier et les systèmes embarqués.
- **Optimisation continue :** Les modèles en temps réel permettent d'ajuster et d'optimiser les paramètres d'un système en continu, en fonction des conditions en temps réel, ce qui peut conduire à une utilisation plus efficace des ressources.

La modélisation en temps réel joue un rôle crucial dans les systèmes IoT (Internet des objets) et offre une combinaison de réactivité et de précision, ce qui est essentiel pour optimiser et gérer efficacement les données générées par les dispositifs connectés. Cela permet une analyse en temps réel, un contrôle instantané et une prise de décision rapide, contribuant ainsi à maximiser l'efficacité et la performance des systèmes IoT dans des domaines tels que la l'industry 4.0 et la santé connectée.

3.3 Interconnecter les Systèmes en Temps Réel

Les systèmes d'interconnexion en temps réel sont conçus pour permettre la communication et l'échange de données entre différentes entités en temps réel. Ces systèmes sont essentiels pour diverses applications telles que les réseaux IP, la simulation de vol, les systèmes distribués en temps réel, l'acquisition d'informations et la messagerie instantanée. Ils garantissent que les flux sensibles au temps bénéficient d'une qualité de service optimale et assurent la synchronisation et la performance entre plusieurs simulateurs et nœuds informatiques. Les systèmes d'interconnexion en temps réel utilisent des technologies telles que le découpage en tranches de réseaux virtuels, la différenciation de la sensibilité au temps, le protocole UDP/IP, la synchronisation des horloges et les sous-systèmes de communication de données. Ils relèvent les défis de l'équilibrage de la charge, de l'utilisation des ressources, de la tolérance aux pannes, de la précision des informations et de l'interconnexion entre différents systèmes [113] [114].

Interconnecter des systèmes en temps réel consiste à établir des connexions entre différentes entités informatiques afin qu'elles puissent échanger des informations instantanément. Cette interconnexion revêt une importance particulière dans des domaines tels que l'Internet des objets (IoT), les systèmes embarqués, les réseaux de capteurs, la domotique, et d'autres applications où la synchronisation et la communication en temps réel sont cruciales. En ce qui concerne la modélisation sémantique en temps réel, l'objectif est souvent d'assurer une compréhension commune des données échangées entre les systèmes en utilisant des concepts sémantiques précis.

Dans le domaine de la modélisation sémantique en temps réel, plusieurs concepts et technologies jouent un rôle crucial dans l'interconnexion des systèmes en temps réel. L'utilisation d'ontologies pour définir des modèles sémantiques, à l'aide de langages tels que RDF et OWL, permet de décrire de manière précise les concepts et les relations entre les entités. Pour maintenir un modèle à jour de manière dynamique, le streaming RDF facilite la diffusion continue des données. L'adoption de protocoles de communication sémantique tels que JSON-LD ou RDF/SPARQL garantit une compréhension cohérente des informations échangées. Enrichir les données avec des annotations sémantiques, mettre en œuvre des mécanismes de traitement des événements sémantiques, assurer l'interopérabilité entre les systèmes, modéliser les changements dans le temps, et utiliser des systèmes de gestion de la connaissance sont autant d'éléments essentiels pour une modélisation sémantique efficace en temps réel.

3.3.1 Défis et Perspectives

L'interconnexion de systèmes en temps réel pour la modélisation sémantique présente plusieurs défis et perspectives. L'adoption de technologies sémantiques, telles que le web sémantique, peut améliorer l'interopérabilité entre des systèmes hétérogènes et la compréhension des classes de systèmes. Cependant, la création d'une correspondance sémantique entre les données et la conceptualisation est un processus qui prend du temps et qui est sujet à des erreurs [115]. Pour faire face, la recherche future devrait se concentrer sur le développement d'approches de modélisation sémantique efficaces et conviviales qui peuvent être facilement intégrées dans les pratiques commerciales quotidiennes.

L'un des principaux défis réside dans la diversité des ontologies et des modèles sémantiques utilisés par les systèmes, nécessitant une gestion délicate de l'interopérabilité. La complexité de synchroniser ces différentes représentations sémantiques afin de créer une compréhension commune des données échangées représente un enjeu majeur. Un autre défi crucial concerne la gestion du streaming de données en temps réel. La nécessité de traiter des flux continus de données RDF de manière efficace et rapide tout en maintenant une faible latence constitue un défi technique important. La sécurité et la confidentialité des informations échangées en temps réel représentent également des préoccupations essentielles, nécessitant des mécanismes robustes de protection des données.

Cependant, ces défis ouvrent également des perspectives passionnantes. L'intégration de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique offre la possibilité d'améliorer la compréhension des modèles sémantiques en temps réel, facilitant ainsi l'adaptation aux changements dynamiques. L'émergence de normes et de standards communs dans le domaine de la modélisation sémantique en temps réel pourrait contribuer à simplifier l'interopérabilité et à rendre les échanges entre systèmes plus fluides. De plus, l'intégration de technologies de communication de pointe, telles que la 5G, promet d'accroître l'efficacité des échanges en temps réel en fournissant des débits plus élevés et des connexions plus fiables. Bien que l'interconnexion des systèmes en temps réel pour la modélisation sémantique présente des défis, les perspectives sont riches en innovations technologiques et en opportunités d'amélioration, offrant ainsi un terrain fertile pour le développement de solutions plus robustes et réactives.

3.4 L'Impact de l'Interopérabilité Sémantique dans l'industrie 4.0

L'interopérabilité sémantique joue un rôle crucial dans l'industrie 4.0 en permettant une compréhension partagée et sans ambiguïté des données et des services à travers tous les composants d'un système de production [116]. Elle permet une communication et une interopérabilité transparentes entre différents systèmes industriels, en relevant les défis posés par le trafic massif de données [117]. En fournissant une compréhension commune de la signification des données échangées, l'interopérabilité sémantique facilite le partage d'informations et le transfert de connaissances entre les dispositifs et les systèmes [118]. Cela permet d'accroître l'efficacité du traitement et de l'échange d'informations par rapport aux méthodes conventionnelles, ce qui est essentiel pour répondre aux exigences des futurs réseaux industriels interconnectés [119]. En outre, l'interopérabilité sémantique permet la création et l'utilisation de jumeaux numériques, qui sont des représentations numériques des actifs et des processus associés, dans les systèmes de fabrication. Dans l'ensemble, l'interopérabilité sémantique est un catalyseur clé de la vision d'une usine décentralisée, flexible et auto-organisée dans l'industrie 4.0.

Cette section englobe les connaissances existantes pertinentes dans le domaine de recherche actuel, en abordant les défis de l'interopérabilité sémantique au sein de l'industrie 4.0 et en examinant le rôle du Web sémantique dans ce contexte. Un nombre considérable de recherches ont été soigneusement sélectionnés et sont présentés ci-dessous.

AutomationML ontology (AMLO) a été présenté dans [120], qui couvre la norme d'échange de données AutomationML dans le domaine de l'ingénierie industrielle. Le modèle sémantique sert de moyen d'échange de données entre divers CPS et améliore les processus d'ingénierie dans I4.0.

Teslya et al. [121] ont proposé une approche basée sur une ontologie pour décrire les composants industriels fusionnés à partir de quatre scénarios différents pour former une ontologie de niveau supérieur. Une telle union permettra de modifier le processus commercial créé, d'accroître la personnalisation des produits pour les clients tout en réduisant les coûts pour ses producteurs.

Wan et al. dans [122] ont proposé une ontologie basée sur la configuration des ressources décrivant la connaissance du domaine de la reconfiguration des ressources de fabrication sensible en utilisant le langage d'ontologie web (OWL). Leur travail vise à intégrer l'équipement CPS à l'aide d'une architecture d'intégration des ressources basée sur l'ontologie. Les données générées sont stockées dans une base de données relationnelle et sont associées et mises en correspondance avec les instances du modèle d'ontologie de fabrication. L'ontologie proposée pour la reconfiguration des ressources est testée avec un manipulateur intelligent comme cas d'utilisation, ce qui valide sa faisabilité de fabrication.

Ramírez-Durán et al. [123] ont développé ExtruOnt, un projet de développement visant à créer une ontologie pour décrire un type de machine de fabrication, précisément une machine qui exécute un processus d'extrusion (extruder). Bien que la portée de l'ontologie soit limitée à un domaine spécifique, elle pourrait être utilisée comme modèle pour développer d'autres ontologies pour décrire les machines de fabrication dans les scénarios de l'industrie 4.0. Les termes de l'ontologie ExtruOnt fournissent divers types d'informations relatives à une extrudeuse, qui se reflètent dans des modules distincts qui composent l'ontologie.

Kalayci et al. dans [124] démontre comment le défi de l'intégration des données peut être relevé en utilisant l'intégration sémantique des données et l'approche du graphe de connaissances virtuel. Ils ont proposé le cadre SIB pour intégrer sémantiquement les données de fabrication de Bosch, en particulier les données nécessaires à l'analyse du processus de montage en surface (SMT).

Berges et al. [125] dans présentent une proposition matérialisée dans un système d'interrogation visuelle basé sur la sémantique conçu pour un scénario réel de l'industrie 4.0, permettant aux experts du domaine de formuler des requêtes pour traiter une représentation numérique personnalisée de la machine et des formulaires générés à la volée. Le processus est soutenu par une ontologie sous-jacente qui décrit les principaux composants et capteurs de la machine.

La problématique de l'interopérabilité des normes entre différents frameworks de normalisation est abordée dans [126]; les chercheurs ont développé une approche axée sur les connaissances qui permet de décrire les normes et les cadres de normalisation dans un graphe de connaissances de l'industrie 4.0 (I40KG). L'ontologie STO représente les propriétés et les relations des normes et des cadres de normalisation.

Pour résoudre les problèmes d'hétérogénéité dans l'IIoT, Ren et al. [127] ont proposé un nouveau concept basé sur la TD normalisée du W3C, la modélisation sémantique des objets et KG. Ils ont également présenté deux exemples de modèles sémantiques légers. Le concept de détection du colmatage a ensuite été démontré sur un poste de travail Festo dans un cas

d'utilisation industrielle. Enfin, ils ont utilisé trois requêtes SPARQL pour démontrer comment découvrir et réutiliser les connaissances stockées dans un KG afin de concevoir une application IoT sur appareil dans un réseau distribué à l'aide d'un développement à code bas.

May et al. [128] abordent l'interopérabilité dans la fabrication intelligente et le défi de fédérer efficacement divers formats de données en utilisant des technologies sémantiques dans le contexte de la maintenance dans cette étude, et ils présentent un modèle sémantique sous la forme d'une ontologie pour la mise en correspondance des données pertinentes. Une mise en œuvre industrielle est utilisée pour valider et vérifier la solution proposée.

Les auteurs de [129] présentent une ontologie de référence commune pour la sidérurgie (CROS). CROS est un modèle partagé de ressources et de capacités sidérurgiques qui vise à simplifier la modélisation des connaissances, le partage des connaissances et la gestion des informations. Il s'agit de résoudre le problème d'interopérabilité sémantique posé par les données et les informations nécessaires à la planification de la chaîne d'approvisionnement et à la production d'acier. La modélisation des processus est généralement diffusée au-delà des frontières organisationnelles et des communautés de recherche.

Le tableau 3.3 est un tableau comparatif des différentes recherches mentionnées, mettant en évidence certains aspects clés de chaque étude :

Auteurs et Références	Domaine	Approche méthodologique / Méthode	Portée de l'ontologie / Modèle sémantique	Validation / Cas d'utilisation
Kovalenko et al. [120]	Ingénierie industrielle, AutomatisationML	Non spécifié	AutomationML Ontology (AMLO)	Non spécifié
Teslya et al. [121]	Composants industriels fusionnés	Ontologie basée sur une approche de fusion	Ontologie de niveau supérieur pour les composants industriels	Non spécifié
Wan et al. [122]	Reconfiguration des ressources	OWL, base de données relationnelle	Ontologie pour la reconfiguration des ressources de fabrication	Testé avec un manipulateur intelligent comme cas d'utilisation
Ramírez-Durán et al. [123]	Machines d'extrusion (ExtruOnt)	Non spécifié	Ontologie ExtruOnt pour décrire les extrudeuses	Non spécifié
Kalayci et al. [124]	Intégration sémantique des données	SIB, intégration sémantique des données	Cadre SIB pour l'intégration sémantique des données de fabrication de Bosch	Non spécifié
Berges et al. [125]	Interrogation visuelle basée sur la sémantique	Ontologie sous-jacente, interrogation visuelle	Système d'interrogation visuelle basé sur la sémantique avec ontologie associée	Scénario réel de l'industrie 4.0
Grangel et al. [126]	Interopérabilité des normes	Ontologie STO, Graphe de connaissances de l'I40KG	Ontologie STO pour représenter les propriétés et relations des normes et cadres de normalisation	Non spécifié
Ren et al. [127]	Hétérogénéité dans l'IIoT, IoT sémantique	TD normalisée, Modélisation sémantique des objets	Concept de détection du colmatage avec exemple de modèle sémantique léger	Cas d'utilisation sur un poste de travail Festo
May et al. [128]	Interopérabilité dans la fabrication intelligente	Technologies sémantiques	Modèle sémantique sous forme d'ontologie pour la mise en correspondance des données	Mise en œuvre industrielle pour validation et vérification
Cao et al. [129]	Sidérurgie (CROS)	Ontologie CROS	Ontologie CROS pour modéliser les ressources et capacités sidérurgiques	Non spécifié

TAB. 3.3 : Tableau comparatif des recherches

Publication	Modélisation sémantique en temps réel	Ontologie	Raisonnement sémantique	Requête sémantique	Données liées
[120]	-	+	-	-	-
[121]	-	+	-	-	-
[122]	-	+	-	-	-
[123]	-	+	-	-	-
[124]	-	+	-	+	-
[125]	-	+	-	+	-
[126]	-	+	+	+	+
[128]	-	+	-	-	-
[129]	-	+	-	-	+
[127]	-	+	-	+	-

TAB. 3.4 : Comparaison des travaux récents de la littérature.

Le tableau 3.4 présente un aperçu complet des publications récentes dans des domaines connexes, en se concentrant plus particulièrement sur l'utilisation des technologies du web sémantique dans le paysage de l'internet industriel des objets (IIoT). L'objectif principal est d'accroître l'interopérabilité sémantique entre divers systèmes IoT fonctionnant dans le cadre de l'industrie 4.0 (I4.0) et des flux de données. Cette analyse comparative évalue systématiquement ces travaux en fonction de leurs contributions distinctives dans l'exploitation des concepts sémantiques clés, à savoir la modélisation sémantique en temps réel, l'ontologie, le raisonnement sémantique, l'interrogation sémantique et les données liées.

L'objectif de cette analyse comparative est de mettre en lumière les progrès notables réalisés dans le domaine en délimitant les contributions spécifiques de chaque publication. En examinant la manière dont ces travaux intègrent et appliquent les concepts sémantiques, l'analyse vise à identifier les points communs, les différences et les tendances émergentes dans l'intégration des technologies sémantiques au sein des scénarios IIoT et I4.0.

Les analyses comparatives sont essentielles pour contextualiser et comprendre les avancées les plus récentes dans ce domaine. En outre, les résultats seront déterminants pour définir les synergies potentielles et les domaines de convergence entre le corpus de connaissances existant et l'approche sémantique en temps réel proposée dans le chapitre suivant. Ce lien entre les recherches antérieures et l'approche proposée est essentiel pour établir la nouveauté, l'importance et l'impact potentiel de l'approche sémantique en temps réel dans le paysage actuel de la recherche.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a exploré de manière approfondie les aspects cruciaux de l'interconnexion du présent, mettant en lumière deux domaines essentiels l'Interopérabilité Sémantique et la Modélisation en Temps Réel. Dans la première partie, nous avons présenter le domaine complexe de l'Interopérabilité Sémantique, en discutant des solutions clés, des défis persistants, et en soulignant l'importance de l'Annotation Sémantique de Données ainsi que de l'interaction entre les ontologies et l'Internet des objets. La seconde partie s'est concentrée sur la Modélisation en Temps Réel, dévoilant les nuances de la Modélisation Sémantique en Temps Réel. Nous avons

examiné les outils essentiels de cette discipline.

L'intégration de ces deux sphères a été explorée avec attention, montrant comment l'interconnexion des systèmes en temps réel peut être un catalyseur clé. Cependant, cette synergie n'est pas exempte de défis, comme illustré dans la section consacrée aux défis et perspectives. Ces défis, bien que stimulants, nécessitent une approche stratégique et collaborative pour assurer le succès de l'interopérabilité sémantique dans ce paysage technologique dynamique.

En fin, ce chapitre a mis en évidence l'impact profond de l'Interopérabilité Sémantique sur l'Industrie 4.0, soulignant son rôle crucial dans l'évolution et l'efficacité des systèmes interconnectés. Les avancées dans la Modélisation en Temps Réel et l'Interopérabilité Sémantique représentent ainsi des jalons essentiels vers une compréhension plus profonde, une réactivité accrue et une optimisation des processus au sein de notre monde de plus en plus connecté.

Chapitre 4

Développement de l'Ontologie de l'Industrie 4.0

Dans le paysage en évolution rapide de l'industrie 4.0 (I4.0), où les technologies de pointe convergent pour redéfinir les processus industriels, la représentation et la gestion efficaces des connaissances deviennent primordiales. Ce chapitre examine le rôle central de la modélisation ontologique dans le cadre proposé, en reconnaissant qu'il s'agit d'une pierre angulaire dans l'élaboration du web sémantique.

Comme le soulignent Rawat et al. [130] dans leurs travaux sur les fondements logiques du Web Sémantique, l'ontologie est un élément crucial de ce changement de paradigme. Elle constitue un outil puissant facilitant la création du Web Sémantique, en fournissant un cadre structuré pour l'organisation et la représentation des connaissances. Dans le contexte de notre framework, l'adoption de la modélisation ontologique est motivée par la reconnaissance du fait qu'elle sert de pivot à une gestion plus efficace des données hétérogènes.

Le champ d'application de l'industrie 4.0 ayant été soigneusement délimité, nous nous concentrons sur la construction de l'ontologie I4.0 (I4.0-Onto). Ce modèle ontologique est méticuleusement conçu pour capturer les relations complexes et les divers concepts du domaine de l'industrie 4.0. Comme le soulignent Bahadorani et al. [131], le développement de telles ontologies fait partie intégrante de l'intégration des données et de l'établissement de relations significatives entre les concepts. I4.0-Onto apparaît comme un cadre complet, ouvrant la voie à une meilleure compréhension et utilisation des connaissances dans le paysage dynamique de l'industrie 4.0.

En outre, comme notre système est positionné dans un écosystème où l'interopérabilité est primordiale, le rôle de l'ontologie devient encore plus prononcé. En s'interfaçant avec d'autres applications fondées sur des ontologies spécifiques dans le domaine de l'industrie 4.0, notre modèle ontologique garantit une communication et une synergie transparentes. Dans ce chapitre, nous allons explorer et détailler le processus complet de développement de l'ontologie de l'industrie 4.0, en soulignant son importance dans la promotion d'un environnement d'information cohérent, et explore l'interaction inhérente entre I4.0-Onto et les ontologies existantes pour parvenir à une interopérabilité optimale.

4.1 La Réutilisation des Ontologies Existantes

Dans le domaine de la représentation des connaissances, les ontologies servent de cadres complets encapsulant les informations fondamentales relatives à un domaine spécifique. Ces

ontologies sont structurées de manière à inclure des concepts, des relations, des instances, des axiomes et des règles, offrant ainsi un moyen systématique et organisé de comprendre et de naviguer dans les subtilités d'un domaine d'intérêt particulier.

Un exemple remarquable dans ce contexte est l'ontologie SOSA (Figure 4.1), qui trouve ses racines dans le SSN-XG¹ et l'ontologie SSN du Semantic Sensor Networks Incubator Group (groupe d'incubation des réseaux de capteurs sémantiques) du W3C. En outre, elle s'inspire des idées du groupe de travail W3C/OGC² (Spatial Data on the Web). L'ontologie SOSA encapsule les concepts et les relations de base indispensables à la construction de notre ontologie, tels que les propriétés Observation, Sensor et Observable.

Cependant, l'évolution des connaissances ne s'arrête pas au cadre SOSA existant. Afin d'améliorer et d'adapter son applicabilité aux exigences spécifiques de l'industrie 4.0 (I4.0), SOSA subit des modifications. Ces modifications impliquent l'extension de l'ontologie avec des classes et des propriétés supplémentaires, ce qui a donné lieu au développement d'I4.0-Onto. Cette ontologie étendue hérite non seulement des éléments fondamentaux de SOSA, mais incorpore également de nouveaux composants qui répondent aux complexités et aux avancées dans le contexte de l'industrie 4.0. Ainsi, I4.0-Onto est une ontologie enrichie et spécialisée, qui s'appuie sur les solides fondations posées par SOSA pour répondre à l'évolution du paysage de l'industrie 4.0.

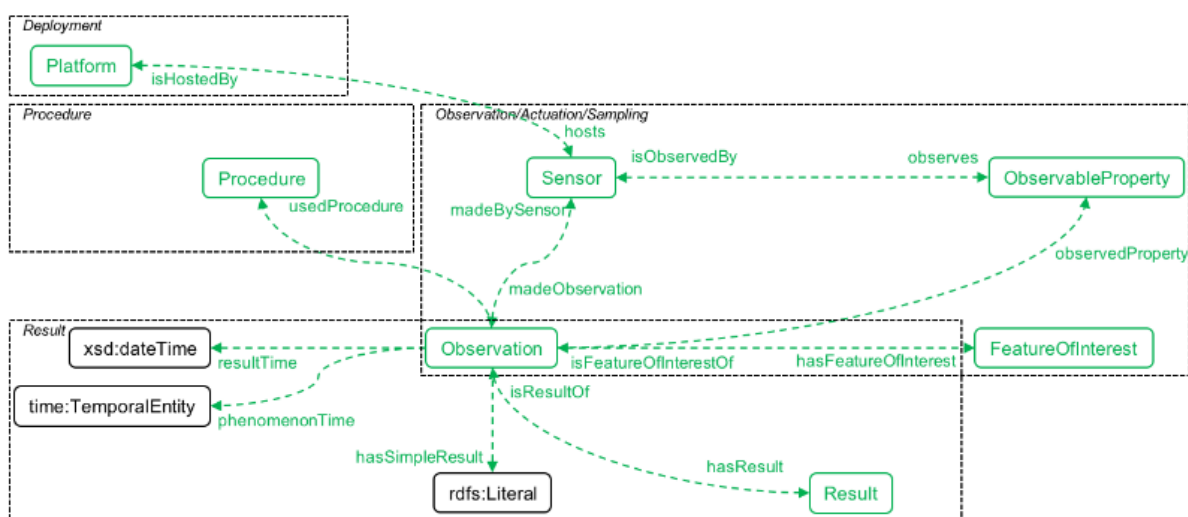


FIG. 4.1 : L'ontologie SOSA.

La réutilisation des ontologies présente plusieurs avantages, notamment :

- **Interopérabilité**

- Facilite l'échange de données entre différents systèmes et applications.
- Améliore la compréhension et la communication lorsque plusieurs systèmes partagent une ontologie commune.

- **Normalisation**

- Contribue à la normalisation dans un domaine spécifique.
- Établit des vocabulaires communs, assurant la cohérence et la clarté dans la communication et la représentation des données.

¹https://www.w3.org/2005/Incubator/ssn/wiki/SSN-XG_Liaison_activities

²<https://www.w3.org/2015/01/spatial>

- **Économies de temps et d'argent**
 - Réduit le temps de développement et les coûts en tirant parti des ontologies existantes.
 - Évite la nécessité de construire une ontologie à partir de zéro.
- **Consistance et Précision**
 - Bénéficie des efforts de la communauté pour valider et affiner les ontologies établies.
 - Assure la précision, la cohérence et la correction des concepts, des relations et des axiomes de l'ontologie.
- **Collaboration Communautaire**
 - Encourage la collaboration au sein de la communauté.
 - Permet aux développeurs et chercheurs d'améliorer collectivement l'ontologie au fil du temps.
- **Évitement de la Redondance**
 - Minimise la redondance dans le développement de l'ontologie.
 - Réduit le risque d'incohérence et de confusion en se référant aux ontologies existantes.
- **Intégration Facile**
 - Simplifie l'intégration entre des systèmes suivant des normes similaires.
 - Particulièrement important dans des scénarios où différentes organisations ou applications doivent travailler ensemble.
- **Alignement avec les Normes de l'Industrie**
 - S'aligne sur les normes et les meilleures pratiques de l'industrie.
 - Assure une large acceptation et compréhension des modèles de données au sein des communautés professionnelles pertinentes.
- **Facilitation du Transfert de Connaissances**
 - Favorise le transfert de connaissances au sein et entre les domaines.
 - Permet aux développeurs et chercheurs de tirer parti des connaissances intégrées dans les ontologies existantes pour obtenir des insights.
- **Adaptabilité et Extensibilité**
 - Fournit une base solide pour l'adaptation et l'extension.
 - Permet d'ajuster les ontologies existantes pour répondre aux besoins spécifiques des applications ou des domaines sans partir de zéro.

4.2 Méthodologie

Le développement d'une ontologie constitue une démarche complexe qui requiert une approche réfléchie en fonction du contexte, des objectifs spécifiques et des ressources disponibles. L'identification claire du contexte d'utilisation, que ce soit dans un domaine particulier, une

industrie spécifique, ou un projet de recherche, est cruciale pour orienter les choix méthodologiques. Les objectifs spécifiques de l'ontologie, qu'il s'agisse de faciliter l'intégration de données, d'améliorer la recherche d'informations, ou de soutenir la prise de décision, influencent également la méthode choisie. De plus, la disponibilité des ressources, humaines, financières, ou technologiques, joue un rôle déterminant dans le processus. La complexité du domaine à modéliser, l'interopérabilité avec d'autres systèmes ou ontologies, la nature des données à traiter, et la nécessité d'évolutivité sont autant de facteurs qui guident le choix méthodologique. Ainsi, le développement d'une ontologie est une entreprise stratégique où la compréhension approfondie de ces différents éléments est essentielle pour assurer le succès du projet.

Il existe plusieurs méthodes couramment utilisées dans le développement d'ontologies, chacune offrant des approches spécifiques pour la modélisation formelle des connaissances. Parmi ces méthodes, on retrouve notamment la METHONTOLOGY [132], NeOn [133], l'OIL (Ontology Inference Layer) [134], Sensus Methodology [135]. Ces méthodes, parmi d'autres, offrent des cadres structurés pour guider les développeurs d'ontologies dans la création de modèles sémantiques cohérents et adaptés à divers contextes d'application. Le choix de la méthode dépend souvent des objectifs spécifiques du projet, de la complexité du domaine et des ressources disponibles. Le choix de la méthode METHONTOLOGY (Figure 4.2 pour notre projet a été motivé par plusieurs facteurs spécifiques qui correspondent à nos besoins et objectifs particuliers. Voici quelques raisons pour lesquelles METHONTOLOGY a été choisie :

- **Structuration Rigoureuse** : METHONTOLOGY offre un cadre structuré avec des étapes claires, ce qui facilite la planification et le suivi du développement de l'ontologie. Cela nous permet d'assurer une conception méthodique et organisée.
- **Réutilisabilité et Modularité** : La méthodologie encourage la réutilisation de modules ontologiques existants, ce qui peut accélérer le processus de développement. La modularité nous permet d'ajouter, de modifier ou de réutiliser des composants en fonction des besoins spécifiques de notre projet.
- **Interopérabilité** : METHONTOLOGY met l'accent sur l'interopérabilité, ce qui est essentiel dans notre projet où l'ontologie doit s'intégrer à d'autres systèmes ou ontologies existantes. Cette approche standardisée facilitera la compatibilité avec d'autres initiatives.
- **Collaboration Facilitée** : METHONTOLOGY a été conçue pour soutenir une approche collaborative. Cela correspond à la nature de notre projet impliquant la contribution de plusieurs membres de l'équipe travaillant simultanément sur l'ontologie.
- **Conformité aux Standards** : En suivant les recommandations du W3C et les normes établies dans le domaine de l'ingénierie ontologique, nous assurons la conformité de notre ontologie aux meilleures pratiques et aux standards de l'industrie.
- **Expérience Préalable** : Les membres de notre équipe ont déjà de l'expérience avec la METHONTOLOGY et sont familiers avec ses principes. Cela facilitera la mise en œuvre efficace de la méthodologie dans notre contexte.
- **Validation et Qualité** : METHONTOLOGY intègre des étapes de validation, ce qui nous permet de maintenir un niveau élevé de qualité tout au long du processus de développement. Cela contribuera à la fiabilité et à la pertinence de notre ontologie.

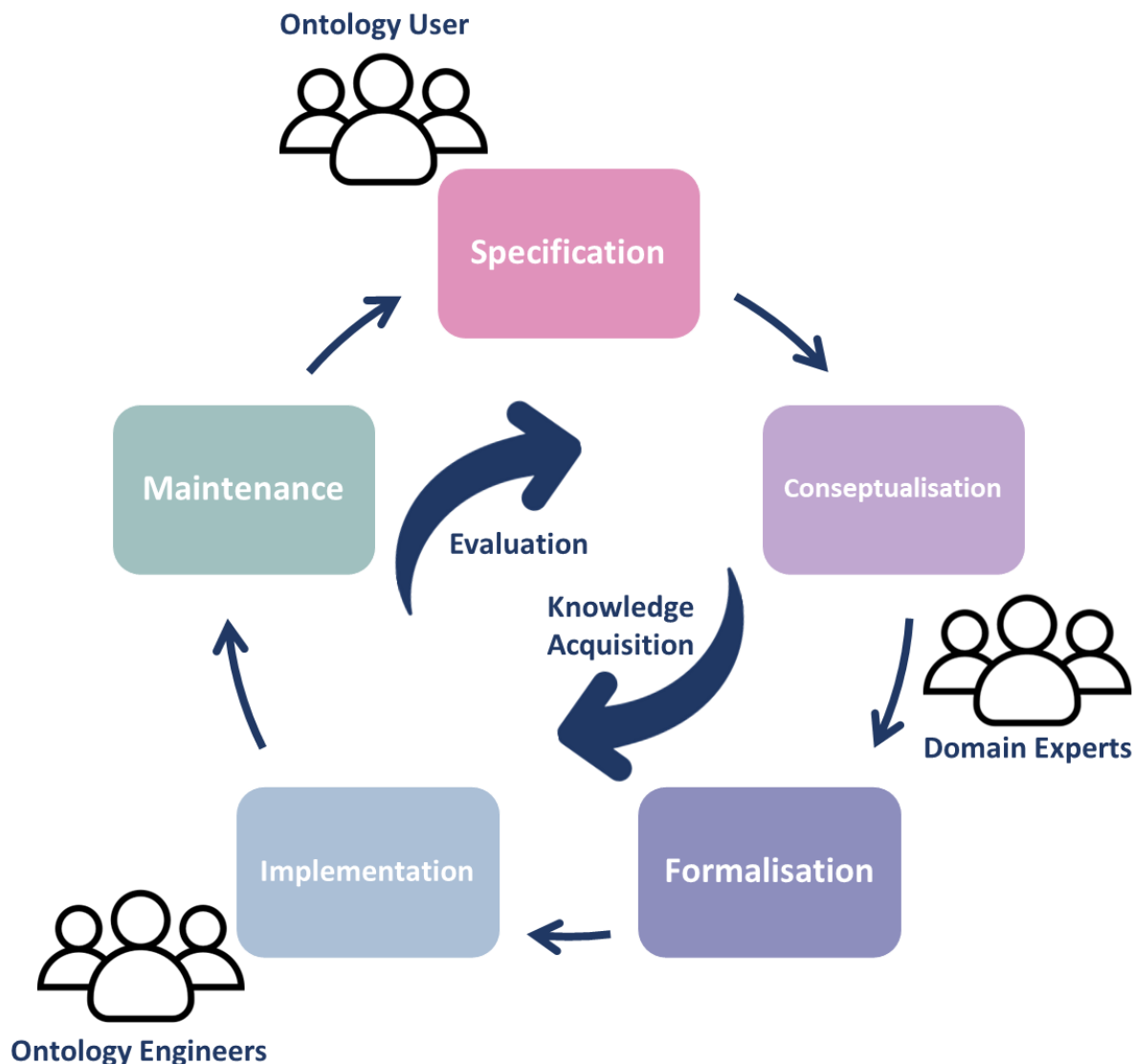


FIG. 4.2 : METHONTOLOGIE : Le processus de développement d'une ontologie.

4.3 Spécification du Domaine de l'Ontologie

La portée de l'ontologie (I4.0-Onto) englobe la représentation exhaustive de l'Industrie 4.0 (I4.0) et la vaste gamme de données collectées au sein d'un environnement industriel. Cette ontologie spécialisée est méticuleusement conçue pour servir de cadre dédié à l'avancement des initiatives de numérisation des entreprises manufacturières contemporaines. Son objectif est de capturer la toile complexe de concepts, de relations et de propriétés inhérents à l'Industrie 4.0, ainsi que les ensembles de données diversifiés issus du plancher de l'usine. En définissant méticuleusement les éléments clés, en élucidant leur interconnexion et en attribuant une signification sémantique, l'ontologie vise à établir un cadre structuré et normalisé. Ce cadre, à son tour, facilite l'intégration transparente et l'interprétation cohérente des données, permettant ainsi aux entités manufacturières d'améliorer l'efficacité opérationnelle, d'adopter l'automatisation et d'élever les performances globales au sein du paysage dynamique de la fabrication moderne.

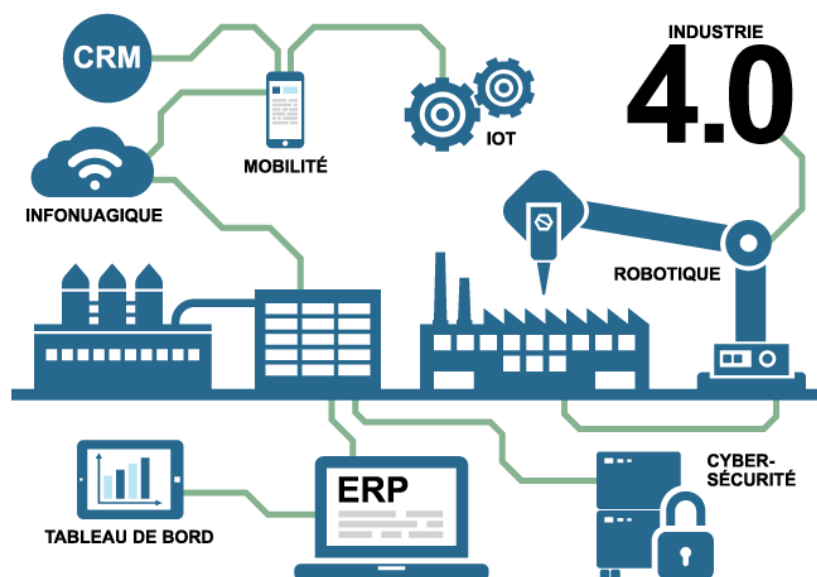


FIG. 4.3 : Composants de l'industrie 4.0.

4.4 Conceptualisation : Identifier les Concepts Clés

L'ontologie, en tant que cadre complet de représentation des connaissances, englobe divers composants qui définissent et structurent l'information au sein d'un domaine spécifique. Ces composants comprennent des classes, des individus, des relations, des attributs, des fonctions et des axiomes, chacun jouant un rôle crucial dans l'établissement d'un modèle sémantique robuste et interconnecté.

Dans le contexte de l'Industrie 4.0 (I4.0), il devient impératif de créer une liste exhaustive de tous les termes existants au sein de l'ontologie. Cette liste sert de fondement pour formuler des déclarations détaillées sur les fabricants, éclairant les aspects techniques complexes inhérents au paysage de l'I4.0. L'objectif est de capturer un large spectre de termes, indépendamment des éventuels chevauchements entre les classes représentées, des relations existantes entre les termes, ou des propriétés associées à ces classes.

Le domaine modélisé englobe diverses étendues pour assurer une représentation holistique. Ces étendues comprennent, sans s'y limiter, les Systèmes Cyber-Physiques (CPS), les capteurs, les observations, les caractéristiques d'intérêt, les actionneurs, les Interfaces Homme-Machine (HMI), les fonctions, les réseaux, les opérations, les propriétés observables, etc. En intégrant ces diverses étendues, l'ontologie vise à fournir un cadre complet et interconnecté qui facilite des déclarations nuancées et précises sur les entités et les relations au sein de l'écosystème de l'I4.0. Les propriétés d'objet connexes et les classes associées ont été conservées à partir de l'ontologie SOSA.

En substance, l'ontologie capture non seulement la structure statique du domaine à travers les classes et les individus, mais définit également des aspects dynamiques à travers les relations, les attributs et les fonctions. Cette approche garantit que l'ontologie est capable de représenter la nature multifacette de l'I4.0, permettant une compréhension nuancée des relations et des interactions entre divers éléments dans le paysage industriel.

Quelques classes de l'ontologie développée sont décrites ci-dessous :

- **Actionneur (Actuator)** : Un composant de machine responsable de l'exécution de mouvements physiques et du contrôle des mécanismes d'un système.
- **CPS (Cyber-Physical Systems)** : Des systèmes intégrés qui combinent la détection, le calcul, le contrôle et le réseau dans des objets physiques et une infrastructure, les connectant à Internet et entre eux.
- **Observation** : Le processus de collecte d'informations sur l'état ou le comportement d'une entité observée.
- **Propriété Observée (Observed Property)** : Identifie la propriété spécifique, telle que la température ou l'humidité, surveillée par un capteur dans un système cyber-physique.
- **Caractéristique d'Intérêt (Feature of Interest)** : Représente un portrait du monde réel, et les capteurs détectent et observent des propriétés liées à ces caractéristiques dans un système cyber-physique.
- **Information** : Fournit des détails sur un système cyber-physique, y compris l'équipement qu'il contient (capteurs, actionneurs, etc.) et sa localisation.
- **HMI (Human-Machine Interface)** : Une interface utilisateur permettant l'interaction entre les humains et les machines dans un système cyber-physique, facilitant le contrôle, la surveillance et la communication.
- **Localisation (Location)** : Décrit les coordonnées spatiales ou la position des éléments au sein d'un système cyber-physique, contribuant à la compréhension contextuelle de ses composants.
- **Réseau (Network)** : Le système interconnecté de canaux de communication qui facilite l'échange de données entre différents éléments dans un système cyber-physique.
- **Operation** : L'ensemble des actions et processus effectués au sein d'un système cyber-physique pour atteindre des objectifs spécifiques, impliquant la coordination entre ses composants.
- **Plateforme (Platform)** : Une base ou une infrastructure qui prend en charge l'exécution et l'intégration de divers composants au sein d'un système cyber-physique, fournissant un environnement stable pour leur fonctionnement.
- **URI (Uniform Resource Identifier)** : Une chaîne de caractères qui identifie de manière unique une ressource particulière, permettant sa récupération ou son interaction sur Internet ou au sein d'un système.
- **Paramètre (Parameter)** : Une variable ou un facteur qui peut se voir attribuer une valeur ou être utilisé en tant qu'entrée dans un système cyber-physique, influençant son comportement ou sa configuration.
- **Capteur (Sensor)** : Un dispositif qui mesure ou détecte des propriétés physiques telles que la lumière, le son, la pression, ou d'autres caractéristiques de l'environnement, fournissant des données pour l'observation dans l'IoT.
- **Passerelle (Gateway)** : Un composant du système cyber-physique responsable de la connexion et de la communication entre des réseaux hétérogènes ou des systèmes indépendants. Les passerelles facilitent l'échange d'informations et la coordination entre différents éléments au sein d'un environnement connecté.
- **Middleware** : Un ensemble de logiciels ou de composants qui agissent comme une couche intermédiaire entre les applications, les systèmes d'exploitation, ou les composants matériels dans un système cyber-physique. Le middleware facilite l'intégration, la communication et la gestion des données entre les différentes parties du système, favorisant ainsi l'interopérabilité et la cohérence.

- **Caractéristique (Feature)** : Une représentation abstraite d'une propriété ou d'une caractéristique d'une entité dans le monde réel au sein de l'IoT. Les caractéristiques peuvent être des attributs observables, des qualités distinctives ou des aspects spécifiques d'une entité qui sont pertinentes pour la modélisation dans le contexte de l'ontologie.
- **Possède_État (Has_State)** : Une relation indiquant que certaines entités ou caractéristiques au sein d'un système IoT peuvent avoir des états associés. Cette relation permet de modéliser la dynamique des entités, indiquant comment elles peuvent évoluer ou changer au fil du temps en fonction de différents états.
- **A une_Valeur (has_Value)** : Une relation qui indique qu'une propriété spécifique d'une entité dans un système IoT possède une valeur particulière. Cette relation est utilisée pour modéliser les attributs spécifiques ou les caractéristiques observables d'une entité, en précisant la valeur associée à ces propriétés.

4.5 Choisir un Langage d'Ontologie

Dans notre projet, nous avons choisi d'utiliser Protege 5.5.0³. comme environnement de développement et le langage OWL (RDF/XML) pour représenter notre ontologie, en raison de plusieurs avantages significatifs. Tout d'abord, Protege 5.5.0. est reconnu pour son interface utilisateur conviviale, offrant une expérience de modélisation ontologique intuitive. Cette convivialité facilite la conception, l'édition et la gestion de notre ontologie, contribuant ainsi à une productivité accrue au sein de l'équipe. De plus, le langage OWL est un standard établi dans le domaine de la modélisation ontologique. En optant pour OWL, nous avons accès à une expressivité sémantique puissante qui nous permet de représenter de manière précise et cohérente les relations complexes entre les entités de notre système cyber-physique. OWL propose des fonctionnalités avancées telles que la définition de classes, de propriétés, d'axiomes et de contraintes, offrant ainsi une modélisation ontologique robuste.



Le choix de la syntaxe RDF/XML pour représenter notre ontologie dans Protege est motivé par sa lisibilité par les machines et sa compatibilité avec d'autres systèmes et outils qui supportent cette syntaxe. Cela favorise l'interopérabilité et permet une intégration aisée avec d'autres composants de notre système.

En outre, Protege 5.5.0. s'inscrit dans un écosystème ontologique robuste avec une documentation détaillée et une communauté active. Cette communauté offre un support précieux, des conseils pratiques et des ressources pour résoudre des problèmes spécifiques liés au développement ontologique.

En résumé, ce choix de combiner Protege 5.5.0. et le langage OWL (RDF/XML) résulte de la volonté d'exploiter une plateforme conviviale, standardisée et performante pour la modélisation ontologique dans le cadre de notre projet de système cyber-physique.

³<https://protege.stanford.edu/software.php>

4.6 Développement et Implémentation de l'I4.0-Onto

4.6.1 Créer la structure de l'ontologie

4.6.1.1 Création des classes et sous-classes

Définir des classes et établir une hiérarchie de classes est un aspect fondamental de la modélisation ontologique. Dans ce contexte, les classes représentent des catégories ou types d'entités au sein d'un système, et une hiérarchie de classes organise ces entités de manière structurée.

En ontologie, les classes servent de représentations abstraites de concepts ou d'entités partageant des caractéristiques ou propriétés communes. Une hiérarchie de classes est un agencement structuré de ces classes, souvent organisé sous forme d'arborescence, où chaque classe a une relation spécifique avec ses classes parentes (super-classes) et filles (sous-classes).

La relation entre une super-classe et une sous-classe est fondamentale dans la hiérarchie de classes. Une classe A est considérée comme une super-classe de la classe B si et seulement si chaque instance de B est également une instance de A. Cette relation implique que la sous-classe hérite des propriétés et caractéristiques de sa super-classe, contribuant à une organisation hiérarchique basée sur la généralisation et la spécialisation.

La figure 4.4 illustre les classes ontologiques et les sous-classes principales pour I4.0-Onto, telles qu'elles sont représentées dans Protege 5.5.0.

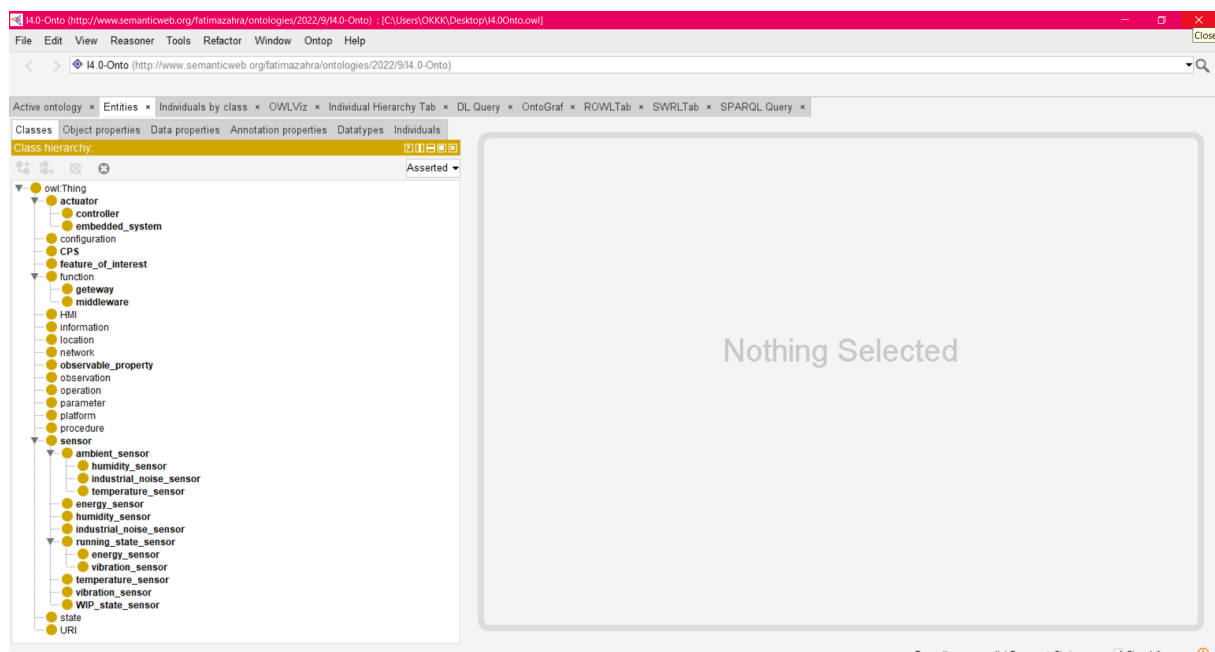


FIG. 4.4 : Classes et sous-classes de l'ontologie I4.0-Onto.

Le code suivant représente une partie du code OWL des classes et sous-classes de l'ontologie I4.0-Onto.

```
### http://www.semanticweb.org/fatimazahra/ontologies/2022/9/I4.0-Onto#gateway
:gateway rdf:type owl:Class ;
         rdfs:subClassOf :function .
```

```
### http://www.semanticweb.org/fatimazahra/ontologies/2022/9/I4.0-Onto#middleware
:middleware rdf:type owl:Class ;
    rdfs:subClassOf :function .

### http://www.semanticweb.org/fatimazahra/ontologies/2022/9/untitled-ontology-32#CPS
:CPS rdf:type owl:Class ;
    rdfs:comment "Cyber Physical System" ;
    rdfs:label "CPS" .

### http://www.semanticweb.org/fatimazahra/ontologies/2022/9/untitled-ontology-32#HMI
:HMI rdf:type owl:Class .

### http://www.semanticweb.org/fatimazahra/ontologies/2022/9/untitled-ontology-32#URI
:URI rdf:type owl:Class .

### http://www.semanticweb.org/fatimazahra/ontologies/2022/9/untitled-ontology-32#WIP_state_sensor
:WIP_state_sensor rdf:type owl:Class ;
    rdfs:subClassOf :sensor ;
    rdfs:comment "work in progress state data sensor" .
```

La Figure 4.5 illustre les classes et leur hiérarchie au sein de Protege 5.5.0 à l'aide du plugin OWLViz 5.0.3.



FIG. 4.5 : Hiérarchie de classes de l'ontologie I4.0-Onto..

4.6.1.2 Création des Propriétés

Définir les propriétés d'une ontologie implique de définir des relations entre les classes et de spécifier les caractéristiques de ces relations. Dans le contexte d'OWL (Web Ontology Language), les propriétés peuvent être largement catégorisées en propriétés d'objet et propriétés de données.

1. Propriétés d'Objet (Object Properties) : Les propriétés d'objet lient des individus (instances de classes) à d'autres individus.

Exemple du code OWL d'une Propriétés d'Objet "has_actuator" :

```
### http://www.semanticweb.org/fatimazahra/ontologies/2022/9/I4.0-Onto#has_actuator
:has_actuator rdf:type owl:ObjectProperty ;
               rdfs:domain :CPS ;
               rdfs:range :actuator.
```

2. Propriétés de Données (Data Properties) : Les propriétés de données lient des individus à des valeurs littérales, définissant le type de valeur de données qui leur est associé.

Exemple du code OWL d'une Propriétés de donnée "has_value" :

```
### http://www.semanticweb.org/fatimazahra/ontologies/2022/9/I4.0-Onto#has_value
:has_value rdf:type owl:DatatypeProperty ;
           rdfs:domain :observation ;
           rdfs:range xsd:int.
```

En incorporant des propriétés d'objet et des propriétés de données, nous établissons des relations significatives entre les classes de notre ontologie, permettant ainsi une représentation plus complète du domaine. De plus, l'utilisation d'ontologies établies comme SOSA contribue à assurer l'interopérabilité et l'alignement avec les normes de l'industrie dans le domaine des capteurs et des observations.

La figure 4.6 illustre les Propriétés d'Objet (Object Properties) principales pour I4.0-Onto, telles qu'elles sont représentées dans Protege 5.5.0.

La figure 4.7 illustre les Propriétés de Données (Data Properties) principales pour I4.0-Onto, telles qu'elles sont représentées dans Protege 5.5.0.

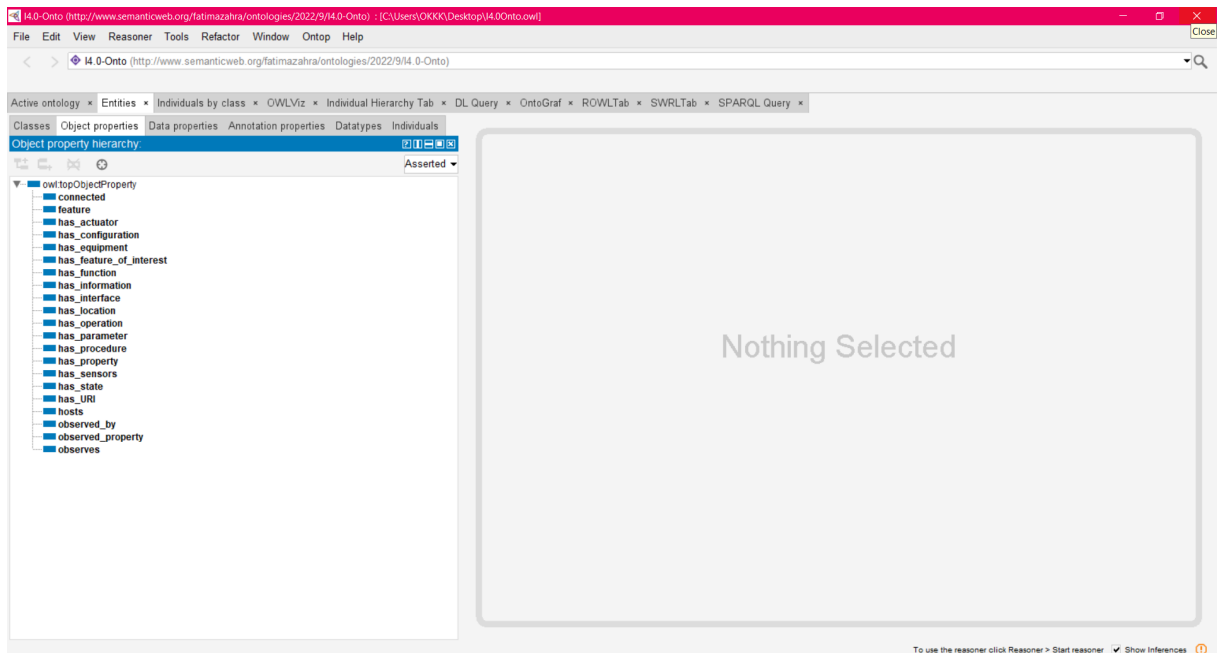


FIG. 4.6 : Propriétés d'Objet (Object Properties) de l'ontologie I4.0-Onto.

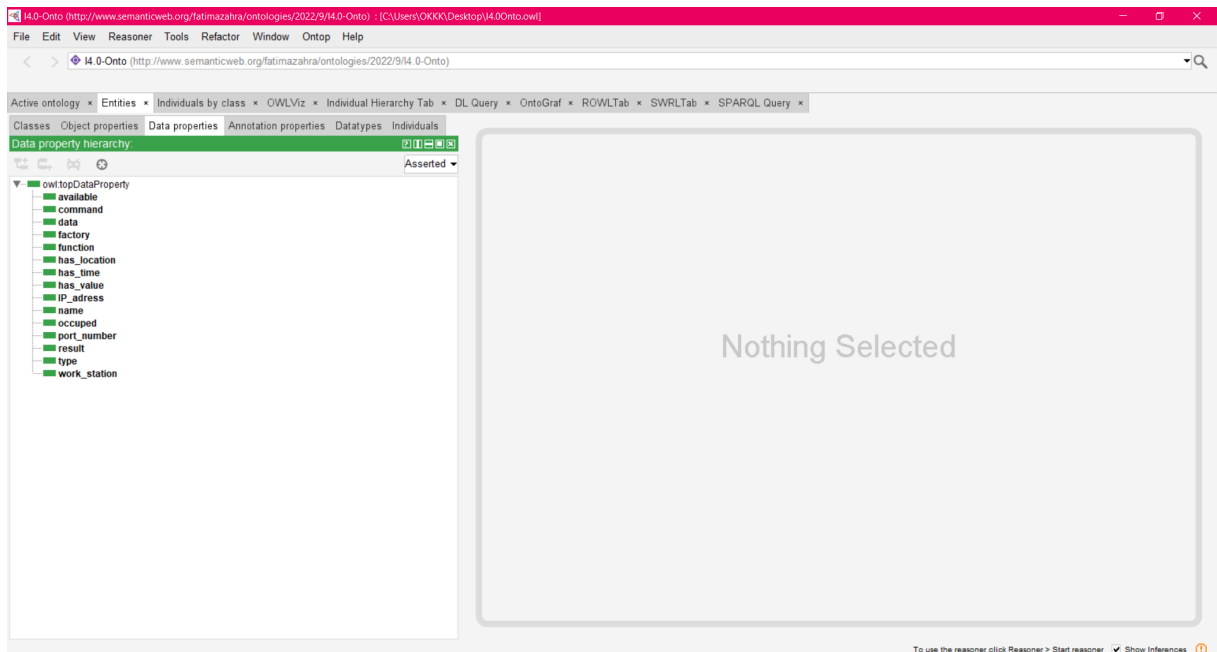


FIG. 4.7 : Propriétés de Données (Data Properties) de l'ontologie I4.0-Onto.

4.6.1.3 Création des Individus

La création d'individus au sein d'une ontologie représente le processus d'instanciation d'exemples spécifiques de classes pour symboliser des objets concrets ou des entités à l'intérieur d'un domaine donné. Dans ce contexte, le domaine modélisé englobe diverses classes afin d'assurer une représentation complète. Ces classes incluent, entre autres, les Systèmes Cyber-Physiques (CPS), les capteurs, les observations, les actionneurs, les Interfaces Homme-Machine (HMI), les fonctions, etc.

Les individus sont des instances de classes. Pour chaque type d'entité, créez une instance de la classe correspondante en utilisant la notation appropriée dans le langage de l'ontologie.

Exemple du code OWL de quelques individus de l'ontologie I4.0-Onto :

```
### http://www.semanticweb.org/fatimazahra/ontologies/2022/9/I4.0-Onto#humidity
:humidity rdf:type owl:NamedIndividual ,
           :observable_property .

### http://www.semanticweb.org/fatimazahra/ontologies/2022/9/I4.0-Onto#industrial_noise
:industrial_noise rdf:type owl:NamedIndividual ,
                    :observable_property .

### http://www.semanticweb.org/fatimazahra/ontologies/2022/9/I4.0-Onto#observation1
:observation1 rdf:type owl:NamedIndividual ,
              :observation ,
              :sensor ;
              :has_location :workstation1 ;
              :observed_by :sensor1 ;
              :observed_property :humidity .

### http://www.semanticweb.org/fatimazahra/ontologies/2022/9/I4.0-Onto#temperature
:temperature rdf:type owl:NamedIndividual ,
              :observable_property .
```

La figure 4.8 illustre quelques individus de l'ontologie I4.0-Onto, telles qu'ils sont représentées dans Protege 5.5.0.

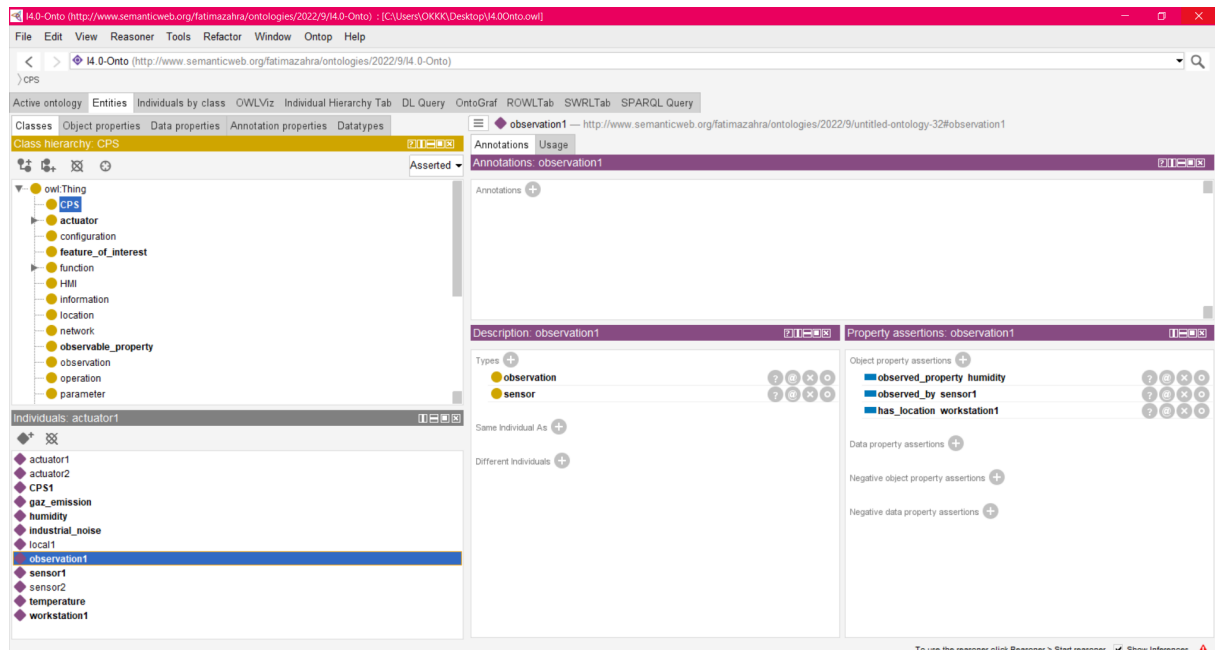


FIG. 4.8 : Individus de l'ontologie I4.0-Onto.

Le diagramme des relations binaires, illustré dans la Figure 4.9 et créé à l'aide du plug-in OntoGraph version 2.0.3, représente graphiquement une partie de l'ontologie développée. Ce diagramme sert de représentation visuelle, offrant une visualisation claire des relations binaires au sein de l'ontologie. L'utilisation du plug-in OntoGraph améliore la présentation en traduisant la structure abstraite en un format compréhensible et accessible. Grâce à cette visualisation, les utilisateurs peuvent obtenir des informations sur les relations binaires interconnectées, facilitant une compréhension plus intuitive des relations complexes codées dans l'ontologie.

4.7 Validation de l'ontologie

L'évaluation d'une ontologie est un processus crucial qui permet d'évaluer la qualité, l'efficacité et la pertinence d'une ontologie. L'évaluation d'une ontologie permet de s'assurer qu'elle répond à l'objectif visé, qu'elle représente correctement le domaine qu'elle modélise et qu'elle s'aligne sur les exigences de ses utilisateurs.

Themis est un outil de test qui aide les experts en ontologie et les utilisateurs à valider les ontologies sur la base d'exigences fonctionnelles qui définissent les connaissances que l'ontologie doit représenter⁴.

Themis automatise le processus de création et d'exécution des tests d'exigences pour les ontologies, en incorporant un certain niveau d'inférence dans les expressions de test spécifiées. L'outil effectue divers contrôles, tels que vérifier si l'ontologie inclut une classe spécifique, déterminer si une classe en englobe une autre, confirmer la présence d'une propriété dans l'ontologie, et d'autres évaluations similaires. La génération de tests est basée sur un glossaire de termes, et chaque test produit par Themis aboutit à l'un des quatre résultats potentiels.

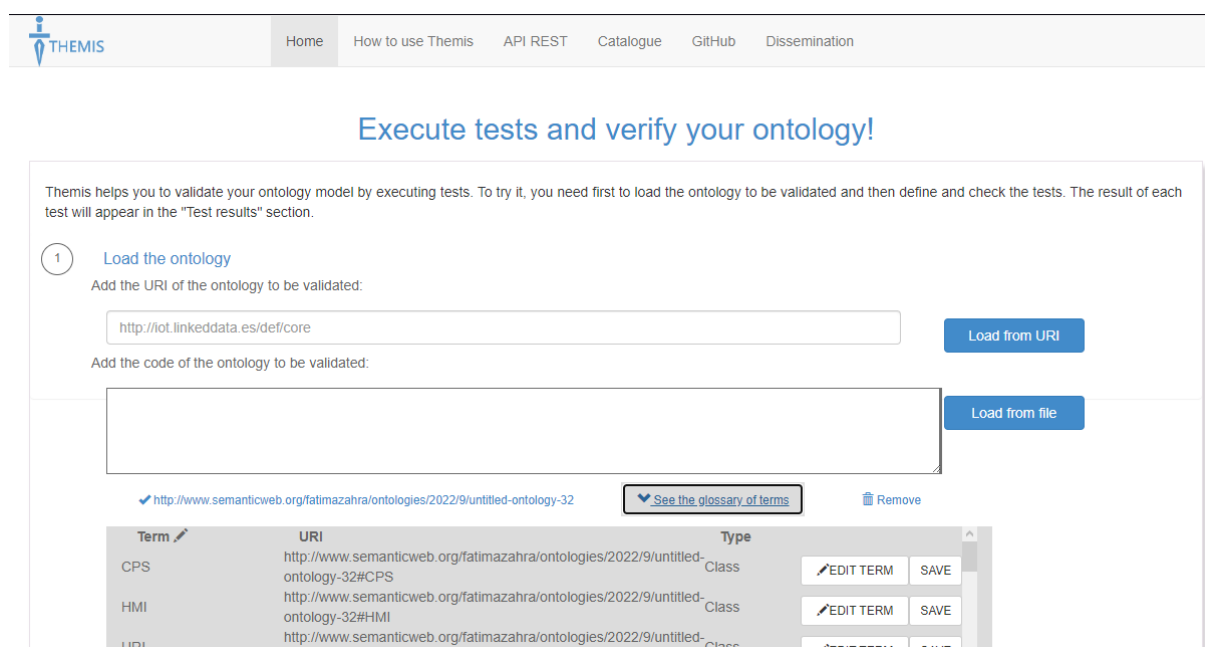


FIG. 4.10 : L'interface de Themis.

L'utilisation du glossaire garantit que les tests générés sont basés sur une compréhension claire du vocabulaire spécifique au domaine. Themis évalue ces tests par rapport à l'ontologie et fournit un retour d'information basé sur les résultats potentiels suivants :

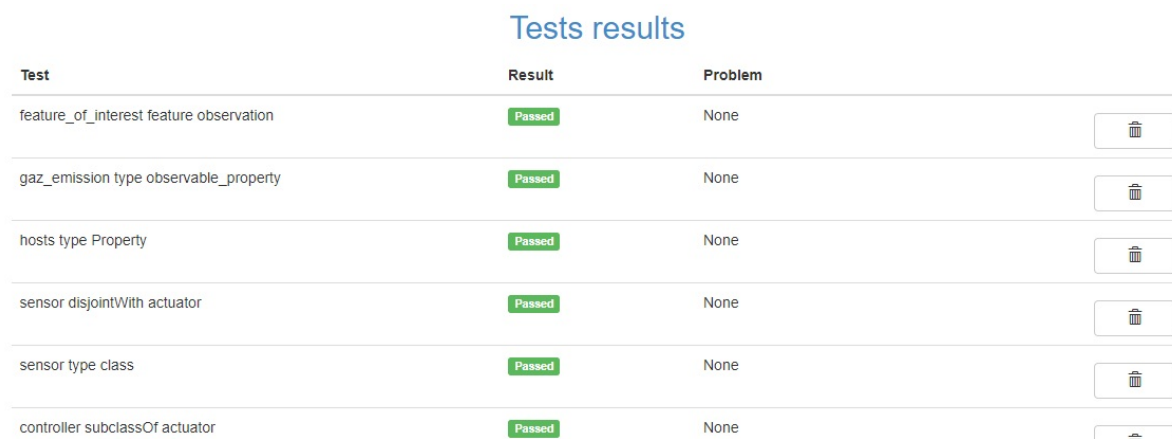
- Correct (Correct), si le cas de test est réussi et que les résultats de l'expression de test correspondent aux connaissances modélisées.
- Incorrect (undefined), si le cas de test échoue et que les expressions de test ne sont pas modélisées dans l'ontologie, les termes sont alors indéfinis.
- Information contradictoire (Conflicting information), lorsque le cas de test réussit mais que les résultats sont incohérents avec les connaissances modélisées, cela provoque un conflit dans l'ontologie.

⁴<https://themis.linkeddata.es/howto.html>

- Relation manquante (Missing relation), les résultats ne sont pas ceux qui sont souhaités.

En automatisant ces tests, Themis rationalise le processus d'assurance qualité des ontologies, en garantissant qu'elles répondent aux exigences spécifiées et qu'elles respectent la structure prévue. L'incorporation de l'inférence ajoute une couche d'intelligence au processus de test, permettant des évaluations plus nuancées que les simples vérifications de la présence de classes et de propriétés. Les quatre résultats potentiels permettent une compréhension globale de l'alignement de l'ontologie sur les critères définis, ce qui favorise un développement et une maintenance efficaces des structures ontologiques. La figure 4.10, représente l'interface de Themis⁵.

La figure 4.11 illustre un exemple d'évaluation de I4.0-Onto, en présentant des cas de test spécifiques qui ont été exécutés à l'aide de cet outil. La section des résultats fournit une vue d'ensemble de tous les résultats potentiels dérivés de l'exécution de ces tests. L'évaluation présentée donne un aperçu de l'efficacité et de l'alignement d'I4.0-Onto sur les expressions de test spécifiées.



Test	Result	Problem	
feature_of_interest feature observation	Passed	None	
gaz_emission type observable_property	Passed	None	
hosts type Property	Passed	None	
sensor disjointWith actuator	Passed	None	
sensor type class	Passed	None	
controller subclassOf actuator	Passed	None	

FIG. 4.11 : Tests et résultats.

Cette évaluation constitue une tâche précieuse pour évaluer la robustesse et la fiabilité d'I4.0-Onto en fournissant une description claire des résultats des tests et des domaines potentiels d'amélioration au sein de l'ontologie.

4.8 Conclusion

En conclusion de ce chapitre consacré au développement de l'Ontologie de l'Industrie 4.0, nous avons parcouru un cheminement méthodologique rigoureux, mettant en lumière des étapes cruciales. La réutilisation judicieuse d'ontologies existantes a constitué un point de départ stratégique, permettant une base solide et une cohérence avec les normes établies. La méthodologie adoptée, axée sur la spécification du domaine de l'ontologie, a permis une compréhension approfondie des exigences spécifiques de l'Industrie 4.0.

La phase de conceptualisation a été cruciale, mettant l'accent sur l'identification minutieuse des concepts clés de l'écosystème de l'Industrie 4.0, soutenue par un choix judicieux de langage d'ontologie. L'implémentation a constitué le point culminant, concrétisant les concepts en une structure ontologique robuste grâce à une architecture méticuleuse. La phase de validation a ensuite confirmé la qualité et la pertinence de l'ontologie, garantissant sa fidèle modélisation du domaine d'étude. Ainsi, ce chapitre a transformé la vision abstraite de l'Industrie 4.0 en un outil

⁵<https://themis.linkeddata.es/>

précieux pour la représentation sémantique, et le prochain chapitre explorera les applications concrètes de cette ontologie dans le contexte dynamique de l'industrie moderne.

Chapitre 5

Framework Sémantique : Modélisation en Temps Réel et Raisonnement

L'Internet des objets (IoT) se trouve à l'avant-garde d'une évolution rapide, exigeant le développement continu de l'infrastructure, des logiciels et de services innovants. Cette transformation en cours est cruciale pour soutenir des applications évolutives et interopérables, les applications IoT jouant déjà un rôle essentiel dans l'automatisation des processus et la prise de décision. La signification des données collectées par les dispositifs IoT augmente constamment, impactant les opérations quotidiennes dans divers secteurs. Dans le contexte de l'Industrie 4.0, un domaine émergent des applications IoT, la modélisation sémantique des usines intelligentes, des lignes de production manufacturière et de l'interopérabilité des systèmes de fabrication devient impérative. Cela implique d'établir des caractéristiques critiques dans le processus de production et de connecter des actifs physiques tels que des systèmes, des dispositifs et des capteurs via Internet.

Au milieu du paysage dynamique de l'IoT, le défi le plus évident réside dans la mise en réseau des éléments et la réalisation de l'interopérabilité sémantique. La diversité et l'hétérogénéité des données et des ressources IoT conduisent souvent à des éléments physiquement connectés mais sémantiquement déconnectés. Ce problème devient particulièrement prononcé dans l'Industrie 4.0, où l'on observe une transition vers des processus de fabrication dynamiques et reconfigurables, avec des systèmes d'automatisation complexes et une myriade de normes, composants, outils et services.

Pour relever ce défi, l'évolution du web sémantique des objets a joué un rôle crucial en convergent divers dispositifs hétérogènes. Elle révèle des relations cachées et apporte des solutions aux problèmes d'interopérabilité. Les technologies sémantiques jouent un rôle vital dans l'Industrie 4.0 en harmonisant les concepts, en étendant les connaissances et en facilitant le partage de représentations de données lisibles par machine. À mesure que les technologies IoT sont de plus en plus appliquées dans divers domaines, aborder le manque d'interopérabilité sémantique en temps réel pour le flux de données brutes devient primordial. Les technologies sémantiques émergent comme des outils essentiels dans ce contexte, garantissant que les flux de données IoT divers peuvent être harmonisés. Cela conduit à une amélioration de l'interopérabilité et à une utilisation plus efficace des applications IoT.

Pour répondre aux exigences de l'Industrie 4.0, en mettant fortement l'accent sur le traitement en temps réel des données, cela fait référence aux capacités des machines à traiter de manière continue et automatique les données, tout en fournissant des résultats en temps réel.

Dans ce chapitre, nous allons présenter en détail le framework que nous avons développé et son implémentation, spécifiquement conçu pour le domaine d'application de l'Internet des Objets (IoT) dans le contexte de l'Industrie 4.0. Ce framework représente une avancée significative, visant à réaliser l'automatisation, la personnalisation, la recherche d'informations, la réutilisation des données, et la découverte de connaissances. Il se distingue par son caractère novateur, basé sur la sémantique en temps réel. Le framework propose une série d'étapes soigneusement élaborées pour l'annotation sémantique en temps réel des données, le raisonnement, et la requête sur des flux de données sémantiquement annotés. De plus, il facilite la publication des données sous forme de Linked Data, favorisant ainsi une interconnexion intelligente et contextuelle des informations.

5.1 Vision Générale du Framework

À travers le framework, notre objectif est de créer une base solide pour répondre aux besoins d'automatisation des processus, de personnalisation des services, d'extraction d'informations pertinentes, de réutilisation efficiente des données, et de découverte proactive de connaissances, spécifiquement dans le contexte de l'IoT appliqué à l'Industrie 4.0.

La vision générale du framework et les flux de données représentés dans la figure 5.1. Le framework sémantique de l'Internet des objets offre un flux structuré de composants pour maximiser le potentiel des appareils interconnectés. En tête, la section entrée de Données des Flux IoT agit comme le point d'entrée pour les données diverses collectées à partir de différents dispositifs IoT tels que des capteurs. Cela englobe des lectures en temps réel, des images et des vidéos. La section Représentation des Connaissances suit, illustrant le stockage méticuleux et l'organisation de ces données à l'aide de méthodologies telles que les ontologies et la modélisation sémantique. Le Raisonnement Sémantique intervient ensuite, utilisant les connaissances stockées pour tirer des inférences, permettant l'identification de schémas dans les données des capteurs et la détection de problèmes potentiels. La section Linked Data souligne l'importance de connecter des pièces d'information disparates pour faciliter la découverte et l'utilisation plus simples de données pertinentes. Le framework Sémantique de l'IoT, en tant qu'architecture globale, englobe ces composants ainsi que des éléments tels que le stockage des données, les protocoles de communication et les mesures de sécurité. Enfin, le segment Applications de l'IoT met en avant l'impact transformateur de l'utilisation des données de l'IoT dans divers domaines, notamment les villes intelligentes, la maintenance prédictive et les soins de santé connectés.

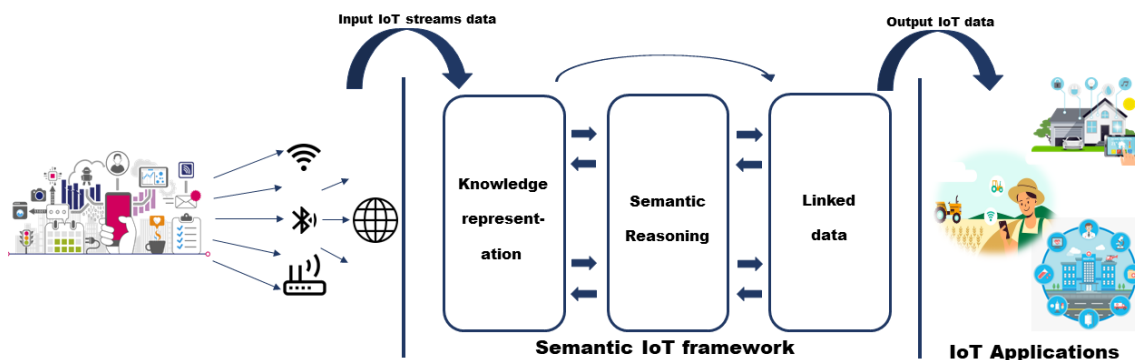


FIG. 5.1 : Présentation générale du framework proposé.

Dans le contexte de l'Industrie 4.0, ce framework prend une importance particulière en s'alignant sur le paysage transformateur de la fabrication intelligente et des processus industriels.

La facette Entrée de Données des Flux IoT est cruciale pour collecter des données en temps réel à partir de capteurs, de dispositifs et de machines sur le sol de l'usine, incluant des métriques de performance des machines, l'efficacité des lignes de production et les conditions environnementales.

En Industrie 4.0, le composant Représentation des Connaissances implique la structuration de ces données diverses à travers la modélisation sémantique et les données liées pour créer un référentiel d'informations cohérent et organisé. Ces connaissances structurées forment la base pour les analyses avancées et la prise de décision au sein des environnements de fabrication intelligents.

Le Raisonnement Sémantique joue un rôle crucial en Industrie 4.0 en interprétant les connaissances stockées pour tirer des enseignements exploitables. Par exemple, il peut analyser des données historiques de machines pour prédire des défaillances potentielles d'équipements, permettant une maintenance proactive et minimisant les temps d'arrêt.

L'aspect Données Liées (Linked Data) devient crucial en Industrie 4.0 pour établir des connexions entre différents aspects du processus de fabrication, créant un flux d'informations continu depuis l'entrée de matières premières jusqu'au produit fini. Cette interconnexion améliore l'efficacité des opérations et offre une vue holistique du cycle de production entier.

Enfin, le segment Applications de l'IoT dans le contexte de l'Industrie 4.0 met en avant les résultats tangibles de ce framework, notamment la maintenance prédictive, les calendriers de production optimisés et le contrôle de la qualité amélioré. Appliqué à l'Industrie 4.0, le framework a le potentiel de révolutionner les processus de fabrication, les rendant plus agiles, efficaces et réactifs aux demandes dynamiques du marché.

Le framework Sémantique de l'IoT, en tant qu'architecture globale, s'intègre non seulement avec les systèmes d'automatisation industrielle, les robots et les protocoles de communication adaptés à la fabrication intelligente. Il devient l'épine dorsale des mises en œuvre de l'Industrie 4.0, orchestrant l'interaction intelligente des dispositifs et des systèmes. La mise en œuvre de ces fonctionnalités repose sur une approche en temps réel, permettant une réactivité immédiate aux changements dans les flux de données.

5.2 Développement et Implémentation du Framework

Dans le contexte l'Industrie 4.0, une architecture de flux de données en couches sert de framework structuré illustrant le mouvement systématique des données de leur origine aux applications industrielles. Ce modèle architectural comprend des couches distinctes qui facilitent le déplacement et le traitement sans heurt des données.

La vision globale du framework et les flux de données représentés dans la figure 5.2. Chaque couche, avec ses fonctionnalités spécifiques, est détaillée ci-dessous. Elle offre une perspective globale sur la manière dont les données traversent les différentes couches définies, capturant l'essence de la conception du framework et illustrant l'interaction entre les différents composants. La section suivante se plonge dans une analyse approfondie de chaque couche, élucidant son rôle, son objectif et ses contributions au flux de données fluide au sein du framework. Cette exploration détaillée vise à améliorer la compréhension et à fournir des insights sur le fonctionnement complexe du framework en couches représentée.

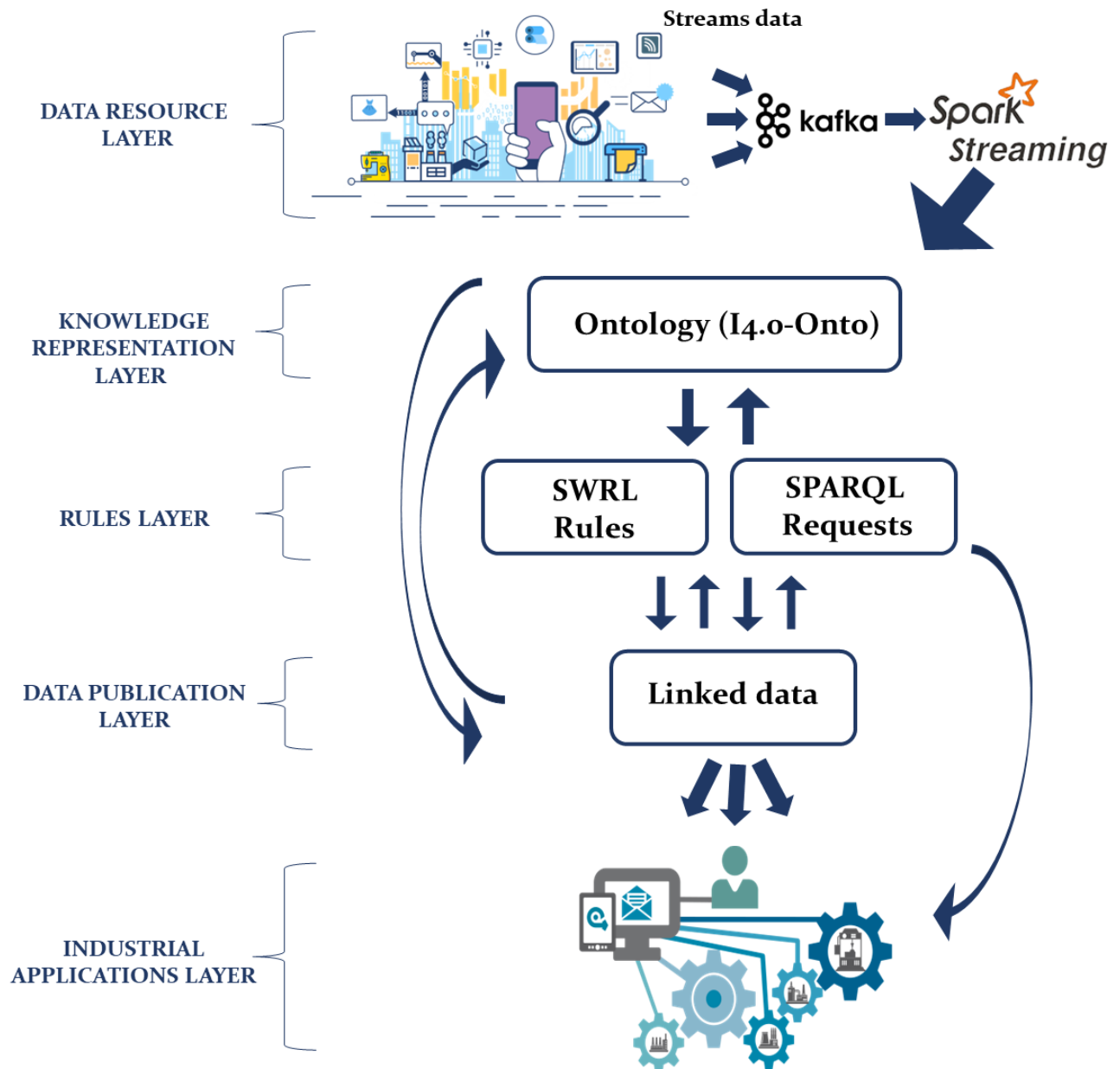


FIG. 5.2 : Framework proposé pour la modélisation et le raisonnement sur les données de flux IoT dans I4.0.

5.2.1 Couche de Ressources et de Traitement des Données

La couche actuelle englobe deux composants principaux : les éléments physiques ou fournisseurs de données, et le système de streaming. Au sein de l'usine, la couche de ressources physiques, également appelée couche de ressources, est responsable de la mise en œuvre des services de fabrication disponibles, pouvant être initiée par l'utilisateur. Cette couche est une combinaison de technologies d'automatisation, d'échange de données en continu et de technologies de fabrication, regroupées sous les termes génériques de Systèmes Cyber-Physiques, l'Internet Industriel des Objets et l'Internet des Services. La couche cyber agit comme un centre de données distribué, collectant activement une quantité importante de données provenant de

sources d'informations distribuées diverses pour faciliter les flux de données en temps réel. Pour construire un système de streaming efficace, nous utilisons Apache Kafka et Spark Streaming. Une description détaillée de ce processus est illustrée dans la Figure 5.3.

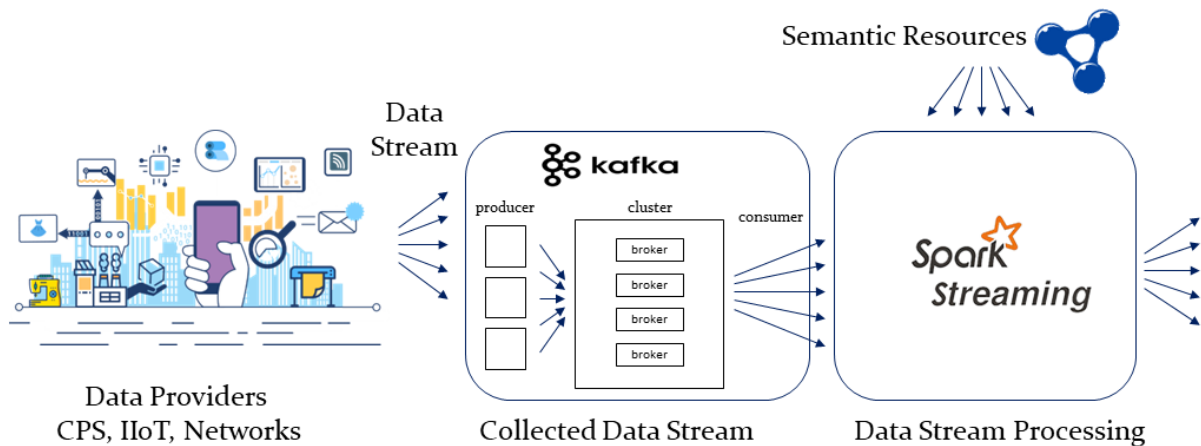


FIG. 5.3 : Couche de ressources et de traitement des données en temps réel.

Kafka fonctionne comme un transport de streaming qui reçoit divers flux de données de capteurs et les transforme en un format spécifique que Spark Streaming peut traiter. Les données hétérogènes des flux de capteurs sont transmises depuis les Systèmes Cyber-Physiques (CPS), l'Internet Industriel des Objets (IIoT), et les réseaux agissent en tant que producteurs pour le serveur Kafka. Un producteur représente un système ou un processus qui génère et transmet des données détectées. Ensuite, les données sont distribuées à travers des courtiers de cluster, qui sont des nœuds transférant un message d'un producteur de processus à une application consommatrice utilisant des sujets. Ceux-ci sont des référentiels virtuels de messages ayant un contenu identique ou similaire, à partir desquels une application consommatrice extrait les informations nécessaires. Apache Spark Streaming traite en parallèle et en temps réel les flux de données publiés par Kafka.

Spark Streaming permet une intégration en temps réel de la sémantique dans les données hétérogènes des flux de capteurs grâce à l'utilisation de sources sémantiques, favorisant ainsi la compréhension des données transmises. Les données enrichies du flux de capteurs, avec les résultats de l'annotation sémantique, seront stockées dans une ontologie élaborée au moyen d'un Framework de Description des Ressources (RDF). Cette approche offre une capacité accrue d'analyse et d'interprétation des données sensorielles, renforçant ainsi la valeur de l'information extraite à partir des flux en temps réel.

Implémentation : Dans les usines de l'Industrie 4.0 (I4.0), la surveillance en temps réel est réalisée en visualisant les données de flux de capteurs et en intégrant des annotations sémantiques grâce aux Systèmes Cyber-Physiques (CPS) et aux données de capteurs de l'Internet des Objets (IoT). Le système est conçu pour recevoir des flux de données brutes de différents types de capteurs.

Ce code Python utilise PySpark et PyKafka pour mettre en œuvre une application Spark Streaming destinée à traiter des données de capteurs en temps réel provenant de Kafka. Le programme configure un contexte Spark et un contexte de streaming avec un intervalle de lot de 5 secondes. Il s'abonne à un sujet Kafka nommé "I4.0Fram" et traite les données de capteurs entrantes à l'aide de la fonction 'process_sensor_data', où nous effectuons des annotations sémantiques et d'autres tâches de traitement des données. L'application s'exécute en continu,

Chapitre 5. Framework Sémantique : Modélisation en Temps Réel et Raisonnement

traitant et imprimant en temps réel les données de capteurs reçues. Assurez-vous de remplacer les valeurs de substitution par les adresses réelles des courtiers Kafka et le nom du sujet dans votre environnement.

```
1 from pyspark import SparkContext
2 from pyspark.streaming import StreamingContext
3 from pyspark.streaming.kafka import KafkaUtils
4
5 def process_sensor_data(sensor_data):
6     # Process the sensor data and perform semantic annotations
7     # enrich, analyze, and interpret the data here
8     print("Received sensor data:", sensor_data)
9
10 # Set up Spark context and streaming context
11 sc = SparkContext(appName="SensorDataProcessing")
12 ssc = StreamingContext(sc, 5) # Batch interval of 5 seconds
13
14 # Define Kafka parameters
15 kafka_params = {
16     "bootstrap.servers": "broker1,broker2",
17     "key.deserializer": "org.apache.kafka.common.serialization.StringDeserializer",
18     "value.deserializer": "org.apache.kafka.common.serialization.StringDeserializer",
19     "group.id": "sensor-data-group"
20 }
21
22 # Define Kafka topics to subscribe to
23 topics = {"I4.0Fram"}
24
25 # Create a DStream that represents streaming data from Kafka
26 kafka_stream = KafkaUtils.createDirectStream(ssc, topics, kafka_params).map(lambda x: x[9])
27
28 # Process the Kafka stream using Spark Streaming
29 kafka_stream.foreachRDD(lambda rdd: rdd.foreach(process_sensor_data))
30
31 # Start the Spark Streaming context
32 ssc.start()
33 ssc.awaitTermination()
```

Notre système utilise diverses annotations sémantiques pour les données de flux de capteurs, notamment :

- **Température (Temperature)** : Cela implique la surveillance et la régulation de la température d'un environnement spécifique. Le contrôle de la température est crucial dans l'industrie, avec des plages acceptables généralement comprises entre 40°C et 85°C.
- **Humidité (Humidity)** : Cette annotation détecte les changements affectant les courants électriques ou la température de l'air. L'humidité relative normale se situe entre 40% et 60%, mais les niveaux optimaux peuvent varier selon les applications industrielles.
- **Émissions de gaz (Gas Emission)** : Spécifiquement conçue pour les systèmes de détection de gaz, elle surveille et contrôle les niveaux de gaz, qu'ils soient toxiques ou inflam-

mables, déclenchant des alertes lorsque nécessaire.

- **Bruits industriels (Industrial Noise)** : Détectés par un capteur de niveau sonore ou un capteur sonore, ce module surveille l'intensité sonore, permettant l'observation des changements dans le niveau sonore dans l'industrie.

Le code JSON¹ (JavaScript Object Notation) suivant incarne un format sophistiqué d'échange de données, renommé pour sa légèreté et sa lisibilité. Il constitue un fragment des flux de données brutes que nous recevons régulièrement, soigneusement structuré selon les principes clés de JSON. Cette notation, dérivée du langage JavaScript, offre une approche efficace pour représenter des informations complexes de manière concise et facilement interprétable.

```
1  {
2  "sensor_1": {
3    "id": "senh1",
4    "type": "humidity_sen",
5    "location": "workstation_w54",
6    "observes": "humidity",
7    "value": 60,
8    "measurment_unit": "percent"
9  },
10 "cps": {
11   "uri": "http://cps256.org/",
12   "state": {
13     "available": true
14   },
15   "operation": "post",
16   "configuration": {
17     "parameter": {
18       "ip_adress": "255.154.129.1",
19       "port_number": 6
20     },
21     "information": {
22       "location": "factory_fw1e",
23       "sensors": [
24         {"id": "senh1"},
25         {"id": "seng31"}
26       ],
27       "actuators": [
28         {"id": "act_a31"},
29         {"id": "act_a20"}
30       ]
31     },
32     "function": {
33       "midlleware": "data_collecting"
34     }
35   }
36 },
37 "sensor_2": {
38   "id": "sents",
39   "type": "temperature_sen",
```

¹<https://www.json.org/json-en.html>

```
40     "location": "workstation_w8",
41     "observes": "temperature",
42     "value": 40,
43     "measurment_unit": "celcius"
44 }
45 }
```

La partie du code contient trois propriétés principales :

- **sensor_1**: Représente un capteur d’humidité avec son ID, son type, son emplacement, sa valeur observée et son unité.
- **cps** : Contient des informations sur un système cyber-physique (CPS), notamment son URI, son état, son fonctionnement, sa configuration et sa fonction.
- **sensor_2**: Représente un capteur de température ayant des propriétés similaires à celles du "sensor_1"

5.2.2 Couche de représentation des connaissances

L’I4.0-Onto3.5, ou Ontologie de l’Industrie 4.0, est une structure élaborée pour capturer et représenter de manière normalisée les connaissances liées à l’Industrie 4.0. L’Industrie 4.0, souvent appelée la quatrième révolution industrielle, implique l’intégration de technologies numériques, d’automatisation et d’échanges de données dans les processus de fabrication.

Cette ontologie est construite selon un processus standard qui définit les étapes et les tâches nécessaires à son développement. Ce processus garantit une approche systématique et organisée pour la création d’une représentation complète des connaissances dans le domaine de l’Industrie 4.0. L’objectif est de fournir une structure claire et normalisée qui facilite la transformation de données brutes en un modèle ontologique bien défini.

Les caractéristiques clés de l’I4.0-Onto comprennent :

1. **Normalisation** : L’ontologie respecte des normes établies, en utilisant notamment le langage Web Ontology Language (OWL). Cela garantit la compatibilité et l’interopérabilité avec d’autres systèmes et ontologies.
2. **Représentation des connaissances** : L’I4.0-Onto est conçu pour représenter des connaissances sur divers aspects de l’Industrie 4.0, y compris les technologies, les processus, les relations et les concepts. Il sert de base de connaissances structurée pouvant être utilisée pour la compréhension, l’analyse et la prise de décision.
3. **Modèle ontologique** : L’ontologie utilise un modèle ontologique, une représentation formelle qui définit des entités, leurs propriétés et leurs relations. Ce modèle offre un cadre sémantique pour interpréter et organiser l’information de manière significative.
4. **Transformation des données brutes** : L’un des principaux objectifs de l’I4.0-Onto est de permettre la transformation de données brutes en un format ontologique structuré. Cette transformation améliore la compréhension des données et permet une utilisation plus efficace dans le contexte de l’Industrie 4.0.

5. **Interopérabilité sémantique** : En utilisant OWL et en suivant les principes ontologiques, l'I4.0-Onto favorise l'interopérabilité sémantique. Cela signifie que les systèmes et les applications peuvent échanger et interpréter l'information de manière plus efficace, car la sémantique des données est bien définie.
6. **Facilitation de l'intégration** : L'ontologie facilite l'intégration de différentes sources de données, technologies et applications au sein de l'écosystème de l'Industrie 4.0. Elle agit comme un terrain commun pour différents acteurs afin de partager et de comprendre l'information.

l'I4.0-Onto développé dans le chapitre 3.5 est une approche normalisée et systématique pour représenter les connaissances dans le domaine de l'Industrie 4.0. Elle exploite la modélisation ontologique et le langage OWL pour fournir un cadre structuré et interopérable pour comprendre, organiser et utiliser des informations liées à la quatrième révolution industrielle.

5.2.3 Couche Règles Sémantiques

Dans le domaine de l'Internet des Objets (IoT), l'industrie 4.0 émerge comme une sphère d'application cruciale, où les règles sémantiques jouent un rôle essentiel dans la réalisation des objectifs de la fabrication intelligente et de l'intégration des technologies avancées. L'industrie 4.0 qui représente la quatrième révolution industrielle, caractérisée par l'intégration des technologies numériques, de l'internet des objets, du big data et de l'intelligence artificielle dans l'environnement de fabrication. Les règles sémantiques contribuent à divers aspects de l'industrie 4.0, notamment : l'intégration et la fusion des données, les processus de fabrication intelligents, la maintenance prédictive, l'intégration de la chaîne d'approvisionnement et le contrôle de la qualité.

La couche des règles sémantiques se divise en deux parties distinctes : le raisonnement sémantique et la recherche sémantique. Cette subdivision au sein de la couche sémantique crée une structure modulaire favorisant la gestion et le développement de la sémantique au sein du système. Elle permet ainsi une meilleure organisation et compréhension des différentes opérations sémantiques. Cette approche modulaire offre des avantages tels qu'une clarté dans l'organisation, une réutilisation efficace des composants, une facilité de maintenance, une évolutivité du système, et une amélioration de la compréhension des responsabilités de chaque composant.

Dans le contexte de l'Internet des Objets, l'Industrie 4.0 s'affirme comme un champ d'application privilégié où les règles sémantiques apportent une contribution cruciale à l'optimisation des processus industriels et à la création d'environnements de fabrication plus intelligents et interconnectés.

5.2.3.1 Raisonnement Sémantique

Dans les systèmes de l'industrie 4.0, le raisonnement sémantique améliore les capacités des systèmes de fabrication intelligents, favorisant un environnement industriel plus intelligent, plus adaptatif et plus interconnecté. Il donne aux machines les moyens de tirer des enseignements significatifs des données, facilitant ainsi la prise de décisions éclairées et l'optimisation de divers aspects du cycle de vie de la fabrication.

La capacité à déduire des conséquences logiques à partir d'un ensemble de faits ou d'axiomes déclarés est connue sous le nom de raisonnement sémantique. Le framework proposé utilise SWRL, où les règles de raisonnement se présentent sous la forme d'une implication entre un

antécédent et un conséquent. L'application de règles SWRL dans les processus de prise de décision nécessite l'utilisation d'un moteur de raisonnement capable de fonctionner avec des ontologies OWL et des règles SWRL. Ces règles de raisonnement ont été mises en œuvre dans SWRL, un langage de règles dédié au Web sémantique, ce qui nous permet de formaliser les concepts définis dans le modèle.

Implémentation : L'implémentation a été réalisée dans Protege en utilisant un plugin dédié (SWRLTab Plugin 2.0.11). Une partie des règles créées pour l'ontologie développée est présentée ci-dessous :

Règle 1: Si la valeur du capteur d'humidité de la station de travail définie est supérieure à 60 %, un raisonnement basé sur des règles en déduit que le niveau d'humidité est supérieur à la normale et le système de surveillance émettra une alerte.

$$\begin{aligned} & \text{observation}(?obs1) \wedge \text{observed_property}(?obs1, ?hum) \wedge \\ & \text{observable_property}(?hum) \wedge \text{has_value}(?obs1, ?hval) \wedge \\ & \text{swrlb :greaterThan}(?hval, 60) \rightarrow \text{result}(?obs1, \text{"HIGH HUMIDITY LEVEL"}) \end{aligned}$$

Règle 2: Si la température d'une station de travail mesurée par un capteur de température est supérieure à 85 degrés Celsius. Un moteur de raisonnement à base de règles détecte un problème de température susceptible d'affecter l'équipement de l'usine et alerte le système de surveillance.

$$\begin{aligned} & \text{observation}(?obs2) \wedge \text{observed_property}(?obs2, ?tem) \wedge \\ & \text{observable_property}(?tem) \wedge \text{has_value}(?obs2, ?tval) \wedge \\ & \text{swrlb :greaterThan}(?tval, 85) \\ & \rightarrow \text{result}(?obs2, \text{"VERY HIGH TEMPERATURE HAZARD"}) \end{aligned}$$

Règle 3: la règle stipule que si un contrôleur contrôle un actionneur et que l'actionneur a un certain état, le contrôleur doit hériter du même état.

$$\begin{aligned} & \text{controls}(?controller, ?actuator) \wedge \text{has_state}(?actuator, ?actuatorState) \wedge \\ & \rightarrow \text{has_state}(?controller, ?actuatorState) \end{aligned}$$

Règle 4: La règle stipule que si une CPS possède des capteurs et que ces capteurs observent certaines propriétés avec des fonctions associées, alors la CPS doit hériter de la fonction associée à ses capteurs.

$$\begin{aligned} & \text{has_sensors}(?cps, ?sensor) \wedge \text{observes}(?sensor, ?observation) \wedge \\ & \text{has_property}(?observation, ?property) \wedge \text{has_function}(?sensor, ?function) \wedge \\ & \rightarrow \text{has_function}(?cps, ?function) \end{aligned}$$

Règle 5: La règle stipule que si une observation est faite par un capteur connecté à un réseau, et que le réseau est connecté à une CPS, l'observation doit être associée à la CPS.

$$\begin{aligned} & \text{observed_by}(?observation, ?sensor) \wedge \text{connected}(?sensor, ?network) \wedge \\ & \text{connected}(?network, ?cps) \wedge \rightarrow \text{observed_by}(?observation, ?cps) \end{aligned}$$

Règle 6: la règle stipule que si une observation est faite par un capteur ayant une certaine localisation, l'observation doit hériter de la même localisation.

$$\text{Observation}(?obs) \wedge \text{observed_by}(?obs, ?sensor) \wedge \\
 \text{has_location}(?sensor, ?location) \wedge \rightarrow \text{has_location}(?obs, ?location)$$

Un aperçu de deux exemples de règles est donné ci-dessous et représenté en écriture SWRL dans la figure 5.4

Name	Rule	Comment
Rule 1	observation(?obs1) ^ autogen0. observed_property(?obs1, ?hum) ^ observable_property(?hum) ^ autogen0.has_value(?obs1, ?hval) ^ swrlb:greaterThan(?hval, 60) -> autogen0.result(?obs1, "HIGH HUMIDITY LEVEL", monitoring_humi...	monitoring_humi...
Rule 2	observation(?obs2) ^ autogen0. observed_property(?obs2, ?tem) ^ observable_property(?tem) ^ autogen0.has_value(?obs2, ?val) ^ swrlb:greaterThan(?val, 85) -> autogen0.result(?obs2, "VERY HIGH TEMPERATU...", temperature mo...	temperature mo...

Control Rules Asserted Axioms Inferred Axioms OWL 2 RL

Number of SWRL rules exported to rule engine: 2
 Number of OWL class declarations exported to rule engine: 30
 Number of OWL individual declarations exported to rule engine: 12
 Number of OWL object property declarations exported to rule engine: 21
 Number of OWL data property declarations exported to rule engine: 15
 Total number of OWL axioms exported to rule engine: 182
 The transfer took 970 milliseconds(s).

FIG. 5.4 : Exécution des règles SWRLTab.

5.2.3.2 Recherche sémantique

La recherche sémantique, dans le contexte de l'industrie 4.0, s'articule autour de l'utilisation des méthodes avancées pour extraire des informations significatives à partir de vastes ensembles de données. L'approche repose sur une compréhension approfondie des significations et des relations entre les termes, favorisant ainsi des analyses plus approfondies et des prises de décision éclairées.

Dans cette perspective, l'utilisation de SPARQL, un langage de requête spécifiquement conçu pour interroger des ensembles de données sémantiques, se révèle particulièrement pertinente. En intégrant SPARQL dans le framework de l'industrie 4.0, on peut exploiter la puissance de cette technologie pour interroger et extraire des informations pertinentes à partir de données complexes.

La maintenance prédictive, la gestion de la chaîne d'approvisionnement et d'autres aspects liés à la qualité et à l'efficacité de la fabrication peuvent bénéficier de manière significative de cette approche. En effet, en combinant la recherche sémantique avec SPARQL, les entreprises peuvent mieux comprendre les relations entre les données, anticiper les besoins de maintenance, optimiser les processus de fabrication et renforcer la gestion globale de la chaîne d'approvisionnement. Cette synergie favorise une approche plus intelligente et proactive dans la gestion des opérations industrielles, contribuant ainsi à maximiser la qualité et l'efficacité des processus dans le cadre de l'industrie 4.0

Les requêtes SPARQL peuvent produire des ensembles de résultats ou des graphes RDF. Grâce au modèle ontologique et aux triplets RDF, n'importe quel concept peut être accédé à travers ses attributs. La mise en œuvre de cette approche a été réalisée dans Protege, en utilisant un plugin dédié (SPARQL Query Plugin 3.0.0). Les Figures suivantes donne un aperçu des exemples de requêtes SPARQL.

Requête 1: Liste tous les systèmes de sécurité avec leurs capteurs associés (Figure 5.5).

```
1 PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
2 PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
3 PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
4 PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
5 PREFIX ionto: <http://www.semanticweb.org/fatimazahra/ontologies/2022/9/untitled-ontology-32#>
6 SELECT ?securitySystem ?securitySensor
7 WHERE {
8   ?securitySystem rdf:type ionto:security_system .
9   ?securitySensor rdf:type ionto:security_sensor .
10  ?securitySensor ionto:observes ?securityObservation .
11  ?securityObservation ionto:observed_by ?securitySensor .
12 }
```

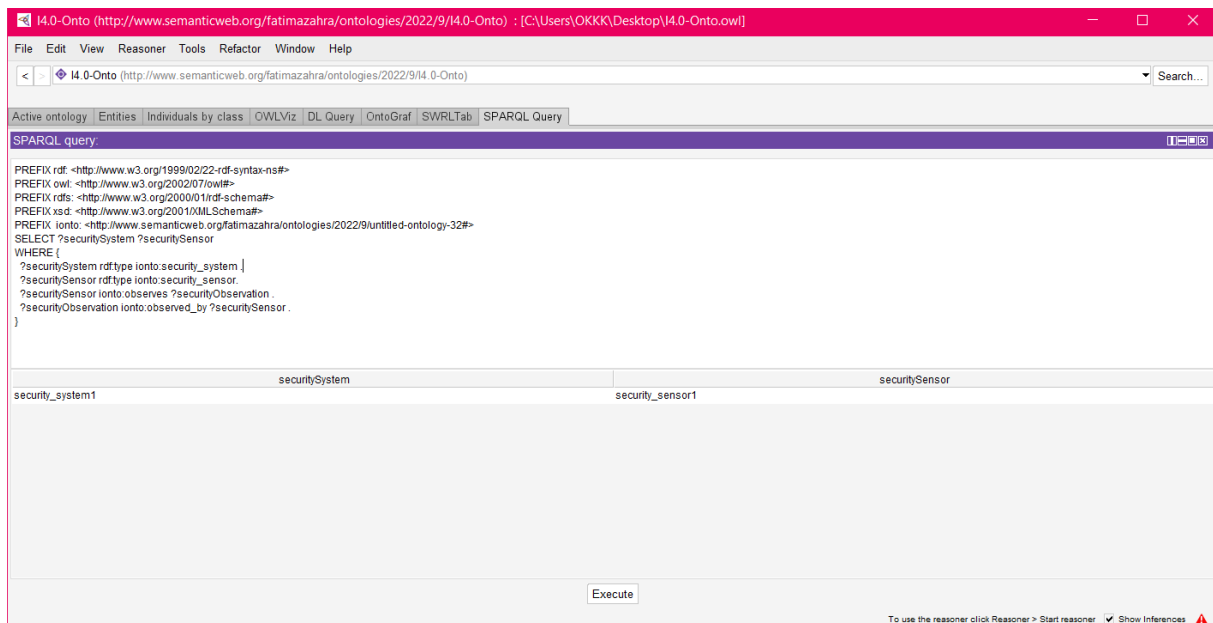


FIG. 5.5 : Résultat de la requête SPARQL 1 dans Protégé.

Requête 2: Obtenir toutes les observations avec leur localisation et valeur (Figure ??).

```
1 PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
2 PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
3 PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
4 PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
5 PREFIX ionto: <http://www.semanticweb.org/fatimazahra/ontologies/2022/9/untitled-ontology-32#>
6 SELECT ?observation ?location ?value
7 WHERE {
8   ?observation rdf:type ionto:observation .
9   ?observation ionto:has_location ?location .
10  ?observation ionto:has_value ?value .
11 }
```

Chapitre 5. Framework Sémantique : Modélisation en Temps Réel et Raisonnement

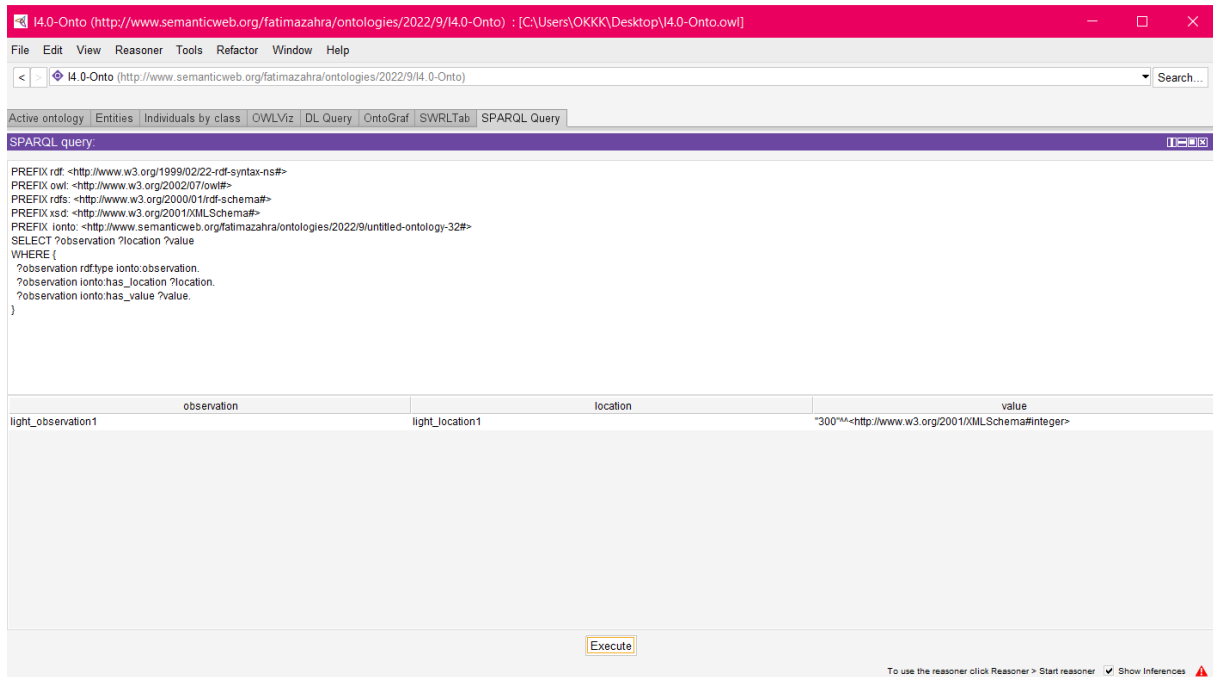
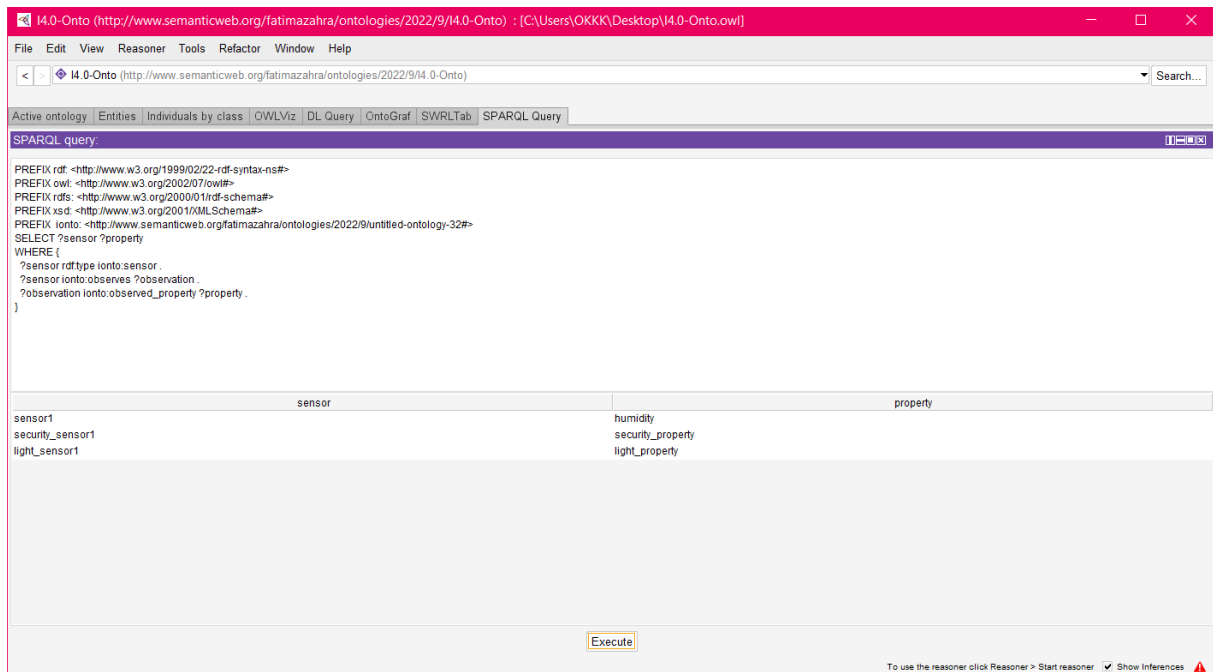


FIG. 5.6 : Résultat de la requête SPARQL 2 dans Protégé.

Requête 3: Lister tous les capteurs et leurs propriétés observées (Figure 5.7).

```
1 PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
2 PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
3 PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
4 PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
5 PREFIX ionto: <http://www.semanticweb.org/fatimazahra/ontologies/2022/9/untitled-ontology-32#>
6 SELECT ?sensor ?property
7 WHERE {
8   ?sensor rdf:type ionto:sensor .
9   ?sensor ionto:observes ?observation .
10  ?observation ionto:observed_property ?property .
11 }
```

Chapitre 5. Framework Sémantique : Modélisation en Temps Réel et Raisonnement



The screenshot shows the Protégé interface with a SPARQL query window. The query is as follows:

```
PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
PREFIX ionto: <http://www.semanticweb.org/fatimazahra/ontologies/2022/9/untitled-ontology-32#>
SELECT ?sensor ?property
WHERE {
  ?sensor rdf:type ionto:sensor .
  ?sensor ionto:observes ?observation .
  ?observation ionto:observed_property ?property .
}
```

The results table shows the following data:

sensor	property
sensor1	humidity
security_sensor1	security_property
light_sensor1	light_property

At the bottom of the window, there is an "Execute" button and a status bar that reads "To use the reasoner click Reasoner > Start reasoner" with a checked "Show Inferences" option.

FIG. 5.7 : Résultat de la requête SPARQL 3 dans Protégé.

Requête 4: Requête décrivant une observation (Figure 5.8).

```
1 PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
2 PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
3 PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
4 PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
5 PREFIX ionto: <http://www.semanticweb.org/fatimazahra/ontologies/2022/9/untitled-ontology-32#>
6 DESCRIBE ionto:observation1
```

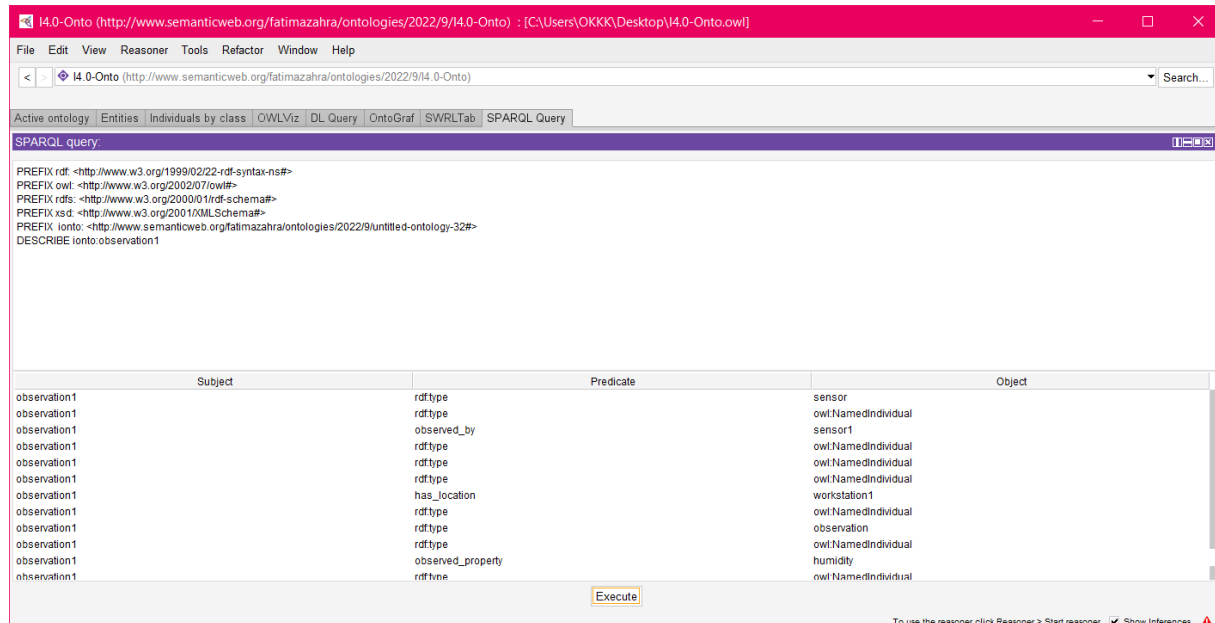


FIG. 5.8 : Résultat de la requête SPARQL 4 dans Protégé.

5.2.4 Couche Publication des Données

L'objectif de cette phase est de rendre les principaux produits du processus de génération, à savoir l'ontologie et l'ensemble de données RDF, accessibles via le Web. Afin d'atteindre le bénéfice réel prévu pour l'éditeur, cette étape devrait respecter soigneusement les principes et meilleures pratiques existants. Pour l'ontologie et l'ensemble de données RDF en particulier, elles devraient être publiées conformément aux principes des Données Liées (Linked Data). Nous proposons de publier notre ensemble de données sous forme de Données Liées pour permettre son enrichissement et sa réutilisation. Ensuite, à travers des requêtes sémantiques, il devient plus utile et atteint l'objectif principal du Web sémantique, c'est-à-dire l'intégration à grande échelle des données et le raisonnement sur les données sur le Web pour respecter le principe des données FAIR² (**F**indability, **A**ccessibility, **I**nteroperability, and **R**eusability) et les rendre réutilisables.

Pour publier nos données structurées OWL (RDF/XML) sur le web, la première étape cruciale consiste à stocker ces données RDF dans un référentiel RDF persistant, garantissant un accès et une interrogation aisés.

Notre choix de publication se porte sur le cloud LOD³, un environnement qui se présente comme un véritable graphe de connaissances, prenant la forme d'un Web sémantique de données liées. Cette plateforme offre une visibilité accrue et facilite la découverte et l'intégration de données pour les utilisateurs.

Notre ensemble de données (Figure 5.9) est désormais accessible au public via un DNS accessible publiquement, et les autorisations appropriées ont été soigneusement définies pour garantir un accès contrôlé et sécurisé. Cette approche garantit une collaboration transparente tout en préservant la confidentialité des informations sensibles, assurant ainsi une utilisation responsable des données.

Pour accéder à notre ensemble de données sur le cloud LOD, veuillez suivre le lien ⁴, où vous

²<https://www.go-fair.org/fair-principles/>

³<https://lod-cloud.net>

⁴<https://lod-cloud.net/dataset/fatimazahra>

I4.0-Onto (Edit)

About this dataset

The ontology I4.0-Onto, is built to represents knowledge in a standard process that identifies the tasks that must be completed when it is built. It enables the transformation of raw data into an ontological model represented in the OWL language.

License: <http://www.opendefinition.org/licenses/odc-by>

user_generated IoT CPS Industry 4.0

Contact Details

Contact Point: [Fatima Zahra AMARA](#)

Website: <https://github.com/khaoulafatima/I4.0-Onto.git>

Download Links

Data Facts

FIG. 5.9 : Modèle développé sur le cloud LOD.

pourrez explorer et tirer parti de ces données structurées RDF/XML pour des enrichissements ultérieurs et une réutilisation efficace conformément aux principes des Données Liées (Linked Data).

5.2.5 Couche d'application industrielle et IoT

Le niveau des Applications Industrielles trône au bas de la hiérarchie de traitement des données, occupant une position prépondérante. Sa responsabilité principale réside dans l'utilisation des connaissances et des insights extraits des couches supérieure de données pour informer et optimiser de manière judicieuse les applications industrielles.

Essentiellement, le niveau des Applications Industrielles ne se contente pas de l'utilisation des données ; il s'efforce de sculpter une synergie entre les données et les applications, insufflant un niveau de détail qui affine et élève les complexités opérationnelles des processus industriels. Cette harmonisation d'informations et de raffinement aboutit à une symphonie parfaitement réglée des applications industrielles, où chaque nuance est prise en compte et exploitée pour faire progresser les performances globales.

5.3 Avantages et Contributions du Framework

Cette recherche aborde de manière stratégique l'évolution du paysage de l'IoT que nous avons appliqué à l'industrie 4.0 pour illustré notre approche, mettant un accent particulier sur l'impératif du traitement des données en temps réel. Cela implique de doter les machines de la capacité continue et automatique de traiter les données, produisant des résultats instantanés. La contribution essentielle de cette étude réside dans la proposition d'un framework sophistiquée en temps réel basée sur la sémantique, déclinée en étapes clés.

Premièrement, l'approche englobe l'annotation en temps réel des données, une étape cruciale pour garantir que les données sont compréhensibles et catégorisées de manière exhaustive en temps réel. Ensuite, la recherche se penche sur la construction d'une ontologie adaptée à la représentation des connaissances. Cette facette facilite la mise en place d'un cadre structuré pour la capture et l'organisation de l'information, contribuant à une base plus solide pour les étapes suivantes.

Ensuite, l'étude intègre des capacités de raisonnement et de requête sur des flux de données sémantiquement annotés. Cela élève le pouvoir analytique, permettant aux systèmes d'extraire des idées significatives. La culmination de ces étapes se traduit par la publication des données en tant que données liées. Cette démarche stratégique facilite la réutilisation transparente des données, favorisant un environnement dynamique pour l'interrogation des flux de données. Elle agit comme un catalyseur pour la découverte de connaissances, permettant aux chercheurs et aux praticiens de tirer des enseignements précieux de l'amalgame de divers ensembles de données.

De plus, cette approche interconnectée permet l'enrichissement des flux de données avec des ensembles de données supplémentaires, offrant une perspective multidimensionnelle et améliorant la complétude de l'information. L'objectif ultime est de rationaliser les processus de récupération des données, garantissant que des informations précieuses sont facilement accessibles. En somme, l'approche en temps réel basée sur la sémantique décrite dans cette recherche répond non seulement aux exigences de l'Industrie 4.0, mais propulse les capacités de traitement des données vers de nouveaux sommets, favorisant un changement de paradigme vers des systèmes plus efficaces, perspicaces et interconnectés.

5.4 Conclusion

Ce chapitre dédié au "Framework Sémantique : Modélisation en Temps Réel et Raisonnement" a présenté une vision complète et approfondie du framework proposé. En explorant la vision générale, le développement, l'implémentation, et les différentes couches du framework, nous avons mis en évidence sa structure robuste et ses capacités avancées, notamment en matière de représentation des connaissances, de règles sémantiques, de raisonnement et de recherche sémantique. La couche de publication des données et d'application industrielle et IoT souligne son applicabilité concrète, tandis que les avantages et contributions identifiés démontrent son potentiel significatif pour optimiser les processus industriels et stimuler l'innovation dans le contexte de l'Industrie 4.0. En somme, ce framework émerge comme une solution prometteuse, offrant une perspective transformative pour l'évolution intelligente de l'industrie.

Conclusion et perspectives

La présente thèse explore de manière approfondie les défis et opportunités inhérents à l'Internet des Objets (IoT) dans le contexte de l'Industrie 4.0, mettant en lumière l'importance cruciale de l'interopérabilité sémantique en temps réel. Face à la croissance exponentielle de l'IoT et à la diversité des données générées, cette recherche a développé un cadre novateur axé sur la sémantique en temps réel, offrant des contributions significatives pour l'automatisation, la personnalisation, la récupération d'informations, la réutilisation des données et la découverte de connaissances.

Les contributions majeures de cette thèse comprennent la création de l'ontologie I4.0-Onto, un cadre robuste pour la représentation des connaissances IoT dans le contexte de l'Industrie 4.0. Cette ontologie complète englobe les concepts clés, les relations et les entités pertinents, facilitant ainsi l'organisation efficace des connaissances. L'annotation en temps réel des données a été mise en œuvre pour intégrer de manière transparente des informations sémantiques dans des flux de capteurs hétérogènes, améliorant ainsi la compréhension et l'interprétation des données en temps réel.

La thèse a également introduit des moteurs de requête et de raisonnement sophistiqués pour déduire et acquérir de nouvelles connaissances, permettant au système de répondre de manière efficace à des requêtes complexes. Enfin, la publication des données structurées en tant que données liées a été établie comme un mécanisme pour assurer l'accessibilité à partir de différentes sources, favorisant ainsi l'interopérabilité et la facilité d'intégration sur différentes plates-formes et applications.

Ce travail de recherche ouvre la voie à des applications avancées en fournissant un cadre complet intégrant des technologies sémantiques pour surmonter l'hétérogénéité des données et réaliser une interopérabilité sémantique efficace, notamment dans le contexte spécifique de l'IoT. En conclusion, cette thèse contribue de manière significative au domaine émergent de l'Industrie 4.0 en proposant des solutions novatrices pour relever les défis complexes liés à la diversité des données IoT, jetant ainsi les bases d'environnements industriels agiles et efficaces.

Bien que cette thèse ait apporté des contributions significatives en développant un framework novateur pour l'interopérabilité sémantique en temps réel de l'IoT dans le contexte de l'Industrie 4.0, il reste plusieurs avenues prometteuses pour des recherches futures :

- l'exploration des extensions possibles de l'ontologie I4.0-Onto pourrait enrichir davantage la représentation des connaissances, anticipant ainsi l'évolution constante des technologies et des domaines industriels.
- l'amélioration continue des techniques d'annotation en temps réel des données pourrait être explorée pour une intégration encore plus transparente d'informations sémantiques dans des flux de capteurs toujours plus diversifiés.
- le perfectionnement des moteurs de requête et de raisonnement, notamment en intégrant

des mécanismes avancés d'apprentissage automatique, pourrait renforcer la capacité du système à répondre à des requêtes de plus en plus complexes et dynamiques.

- L'application du framework proposé dans à d'autres domaines de l'Internet des Objets (IoT), notamment celui de l'Internet des Objets Médicaux (IoMT).

Ces pistes de recherche futures visent à étendre et à améliorer les fondements établis par cette thèse, contribuant ainsi à la progression continue de l'interopérabilité sémantique en temps réel dans le domaine de l'IoT et de l'Industrie 4.0.

Liste des publications

- **Articles de journal**

- Amara, F. Z., Djeddar, M., Hemam, M., & Tiwari, S. (2023). A real-time semantic based approach for modeling and reasoning in Industry 4.0. *International Journal of Information Technology*, 1-9.
- Amara, F. Z., Hemam, M., Djeddar, M., & Maimor, M. (2022). Semantic web and internet of things : Challenges, applications and perspectives. *Journal of ICT Standardization*, 261-292.

- **Chapitres**

- Amara, F. Z., Groppe, S., Tiwari, S., Hemam, M., & Djeddar, M. (2024). Exploring the Determinants of Semantic Internet of Things in Healthcare. In *Roles and Challenges of Semantic Intelligence in Healthcare Cognitive Computing* (pp. 68-87). IOS Press.
- Amara, F. Z., Hemam, M., Djeddar, M., & Maimour, M. (2022). Semantic web approach for smart health to enhance patient monitoring in resuscitation.

- **Conférences**

- Amara, F. Z., Hemam, M., Djeddar, M., & Maimour, M. (2022). Semantic web technologies for internet of things semantic interoperability. In *Advances in Information, Communication and Cybersecurity : Proceedings of ICI2C'21* (pp. 133-143). Springer International Publishing.
- Amara, F. Z., Djeddar, M., Hemam, M., Tiwari, S., & Hafidi, M. M. (2023, October). Unlocking the Power of Semantic Interoperability in Industry 4.0: A Comprehensive Overview. In *Iberoamerican Knowledge Graphs and Semantic Web Conference* (pp. 82-96). Cham : Springer Nature Switzerland.
- Amara, F. Z., Hemam, M., Amara, T., & Djeddar, M. (2022). Ontological Modeling of ERP for Industry 4.0.

Bibliographie

- [1] Jeretta Horn NORD, Alex KOOHANG et Joanna PALISZKIEWICZ. “The Internet of Things : Review and theoretical framework”. In : *Expert Systems with Applications* 133 (2019), p. 97-108. DOI : [10.1016/j.eswa.2019.05.014](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.05.014).
- [2] Radouan Ait MOUHA. “Internet of things (IoT)”. In : *Journal of Data Analysis and Information Processing* 9.2 (2021), p. 77-101.
- [3] G Umarani SRIKANTH, R GEETHA et S PRABHU. “An efficient Key Agreement and Authentication Scheme (KAAS) with enhanced security control for IIoT systems”. In : *International Journal of Information Technology* 15.3 (2023), p. 1221-1230. DOI : <https://doi.org/10.1007/s41870-023-01173-2>.
- [4] Payam BARNAGHI et al. “Semantics for the Internet of Things : early progress and back to the future”. In : *International Journal on Semantic Web and Information Systems (IJSWIS)* 8.1 (2012), p. 1-21. DOI : [10.4018/jswis.2012010101](https://doi.org/10.4018/jswis.2012010101).
- [5] Helbert da ROCHA, Antonio ESPIRITO-SANTO et Reza ABRISHAMBAF. “Semantic interoperability in the industry 4.0 using the IEEE 1451 standard”. In : *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE. 2020, p. 5243-5248. DOI : [10.1109/IECON43393.2020.9254274](https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9254274).
- [6] Darko ANDROČEC, Matija NOVAK et Dijana OREŠKI. “Using semantic web for internet of things interoperability : A systematic review”. In : *International Journal on Semantic Web and Information Systems (IJSWIS)* 14.4 (2018), p. 147-171. DOI : [10.4018/IJSWIS.2018100108](https://doi.org/10.4018/IJSWIS.2018100108).
- [7] Sandhya AVASTHI, Ritu CHAUHAN et Debi Prasanna ACHARJYA. “Extracting information and inferences from a large text corpus”. In : *International Journal of Information Technology* 15.1 (2023), p. 435-445. DOI : <https://doi.org/10.1007/s41870-022-01123-4>.
- [8] R GAYATHRI et V UMA. “Ontology based knowledge representation technique, domain modeling languages and planners for robotic path planning : A survey”. In : *ICT Express* 4.2 (2018), p. 69-74.
- [9] Paolo BOUQUET et al. “Theories and uses of context in knowledge representation and reasoning”. In : *Journal of pragmatics* 35.3 (2003), p. 455-484.
- [10] Michel R KLEIN et Leif B METHLIE. *Knowledge-based decision support systems : with applications in business*. John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [11] Christoph SIEBER et al. “Acquisition and Formalization of Knowledge to Ensure Safe Behavior of Heterogenous Unmanned Autonomous Systems-An Interdisciplinary Approach”. In : *2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. IEEE. 2023, p. 199-206.

- [12] Bo ZHANG et Ling ZHANG. *Theory and applications of problem solving*. Elsevier Science Inc., 1992.
- [13] Nikolas KOMPRIDIS. “So we need something else for reason to mean”. In : *International journal of philosophical studies* 8.3 (2000), p. 271-295.
- [14] Luis TARI. “Knowledge inference”. In : *Encyclopedia of systems biology* (2013), p. 1074-1078.
- [15] Xiaojun CHEN, Shengbin JIA et Yang XIANG. “A review : Knowledge reasoning over knowledge graph”. In : *Expert Systems with Applications* 141 (2020), p. 112948.
- [16] Elisa F KENDALL et Deborah L MCGUINNESS. “Ontology engineering”. In : *Synthesis Lectures on The Semantic Web : Theory and Technology* 9.1 (2019), p. i-102.
- [17] Pankaj DADURE, Partha PAKRAY et Sivaji BANDYOPADHYAY. “Challenges and Opportunities in Knowledge Representation and Reasoning”. In : *Encyclopedia of Data Science and Machine Learning* (2023), p. 2464-2477.
- [18] Nhon V DO et Hien D NGUYEN. “Knowledge-based Problem Solving and Reasoning methods”. In : *2022 14th International Conference on Knowledge and Systems Engineering (KSE)*. IEEE. 2022, p. 1-7.
- [19] Frank PUPPE. *Systematic introduction to expert systems : Knowledge representations and problem-solving methods*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [20] Lenhart K SCHUBERT. “NLP : SEMANTICS AND KNOWLEDGE REPRESENTATION”. In : ().
- [21] David PAULIUS et Yu SUN. “A survey of knowledge representation in service robotics”. In : *Robotics and Autonomous Systems* 118 (2019), p. 13-30.
- [22] Zongmin MA et al. “Knowledge representation and reasoning in the Semantic Web”. In : *Fuzzy Knowledge Management for the Semantic Web* (2014), p. 1-17.
- [23] Aradhana NEGI et Parminder KAUR. “Top-k% Concept Stratagem for Classifying Semantic Web Services”. In : *Intelligent Communication, Control and Devices : Proceedings of ICICCD 2018*. Springer. 2020, p. 203-211.
- [24] Tim BERNERS-LEE, James HENDLER et Ora LASSILA. “A new form of Web content that is meaningful to computers will unleash a revolution of new possibilities”. In : *Scientific american* 284.5 (2001), p. 34-43.
- [25] James HENDLER, Deborah L MCGUINNESS et al. “The DARPA agent markup language”. In : *IEEE Intelligent systems* 15.6 (2000), p. 67-73.
- [26] Michael DEBELLIS et Robert NECHES. “Knowledge representation and the semantic web : An historical overview of influences on emerging tools”. In : *Recent Advances in Computer Science and Communications (Formerly : Recent Patents on Computer Science)* 16.6 (2023), p. 22-36.
- [27] M MENEGHELLO. “XML (eXtensible Markup Language)—The New Language of Data Exchange”. In : *Cartography* 30.1 (2001), p. 51-57.
- [28] XML Core Working GROUP et al. “Extensible markup language (XML)”. In : <http://www.w3.org/XML/> (2012).
- [29] Mahesh Babu GANDRA. “eXtensible Markup Language-An extensive study”. Thèse de doct. 2002.
- [30] Pascal FRADET et al. “RDF : A Reconfigurable Dataflow Model of Computation”. In : *ACM Transactions on Embedded Computing Systems* 22.1 (2022), p. 1-30.

- [31] Alex ABRAMOVICH et Rashid KHUNAGOV. *Education in the Cyber-Physical Society*. 2013.
- [32] Thomas R GRUBER. “A translation approach to portable ontology specifications”. In : *Knowledge acquisition 5.2* (1993), p. 199-220.
- [33] Willem Nico BORST. “Construction of engineering ontologies for knowledge sharing and reuse.” In : (1999).
- [34] Parvin HASHEMI, Ameneh KHADIVAR et Mehdi SHAMIZANJANI. “Developing a domain ontology for knowledge management technologies”. In : *Online Information Review* (2018). DOI : [10.1108/OIR-07-2016-0177](https://doi.org/10.1108/OIR-07-2016-0177).
- [35] Adolfo LOZANO TELLO. “Ontologías en la Web semántica”. In : (2020).
- [36] Asunción GÓMEZ-PÉREZ. “Ontological engineering : A state of the art”. In : *Expert Update : Knowledge Based Systems and Applied Artificial Intelligence 2.3* (1999), p. 33-43.
- [37] Mariusz CHMIELEWSKI, Małgorzata PACIORKOWSKA et Maciej KIEDROWICZ. “A semantic similarity evaluation method and a tool utilised in security applications based on ontology structure and lexicon analysis”. In : *2017 Fourth International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry (MCSI)*. IEEE. 2017, p. 224-233.
- [38] Grigoris ANTONIOU et Frank van HARMELEN. “Web ontology language : Owl”. In : *Handbook on ontologies* (2009), p. 91-110.
- [39] Nick BASSILIADES. “A tool for transforming semantic web rule language to SPARQL inferencing notation”. In : *International Journal on Semantic Web and Information Systems (IJSWIS)* 16.1 (2020), p. 87-115.
- [40] Aidan HOGAN et Aidan HOGAN. “SPARQL query language”. In : *The Web of Data* (2020), p. 323-448.
- [41] Rupal GUPTA et Sanjay Kumar MALIK. “An analysis of SPARQL usage for information retrieval in heterogeneous domains through various tools”. In : *Journal of Discrete Mathematical Sciences and Cryptography* 25.4 (2022), p. 1031-1040.
- [42] Jaime SALAS. “Canonicalisation of SPARQL 1.1 Queries”. In : *Companion Proceedings of the Web Conference 2022*. 2022, p. 318-323.
- [43] Neli ZLATAREVA et Devansh AMIN. “Processing Natural Language Queries in Semantic Web Applications”. In : ().
- [44] Ian HORROCKS et al. “SWRL : A semantic web rule language combining OWL and RuleML”. In : *W3C Member submission* 21.79 (2004), p. 1-31.
- [45] Abba LAWAN et Abdur RAKIB. “The semantic web rule language expressiveness extensions-a survey”. In : *arXiv preprint arXiv :1903.11723* (2019).
- [46] Fatima Zahra AMARA et al. “Semantic web and internet of things : Challenges, applications and perspectives”. In : *Journal of ICT Standardization* (2022), p. 261-292.
- [47] Axel-Cyrille Ngonga NGOMO et al. “Introduction to linked data and its lifecycle on the web”. In : *Reasoning Web. Reasoning on the Web in the Big Data Era : 10th International Summer School 2014, Athens, Greece, September 8-13, 2014. Proceedings 10* (2014), p. 1-99.
- [48] Christian BIZER, Tom HEATH et Tim BERNERS-LEE. “Linked data : The story so far”. In : *Semantic services, interoperability and web applications : emerging concepts*. IGI global, 2011, p. 205-227.

- [49] Pascal HITZLER. “A review of the semantic web field”. In : *Communications of the ACM* 64.2 (2021), p. 76-83.
- [50] Luigi ATZORI, Antonio IERA et Giacomo MORABITO. “The internet of things : A survey”. In : *Computer networks* 54.15 (2010), p. 2787-2805.
- [51] Geoff NUNBERG. “The advent of the internet”. In : *12th April, Courses* (2012).
- [52] Charith PERERA, Chi Harold LIU et Srimal JAYAWARDENA. “The emerging internet of things marketplace from an industrial perspective : A survey”. In : *IEEE transactions on emerging topics in computing* 3.4 (2015), p. 585-598.
- [53] Nimra SAEED et al. “Incorporating big data and IoT in intelligent ecosystems : State-of-the-arts, challenges and opportunities, and future directions”. In : *Multimedia Tools and Applications* (2023), p. 1-43.
- [54] Lili YANG, Shuang-Hua YANG et Linda PLOTNICK. “How the internet of things technology enhances emergency response operations”. In : *Technological Forecasting and Social Change* 80.9 (2013), p. 1854-1867.
- [55] Daniele MIORANDI et al. “Internet of things : Vision, applications and research challenges”. In : *Ad hoc networks* 10.7 (2012), p. 1497-1516.
- [56] Jun ZHENG et al. “The internet of things [Guest Editorial]”. In : *IEEE Communications Magazine* 49.11 (2011), p. 30-31.
- [57] Teresa GUARDA et al. “Pervasive business intelligence as a competitive advantage”. In : *2016 11th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*. IEEE. 2016, p. 1-4.
- [58] Antonios PLIATSIOS, Christos GOUMOPOULOS et Konstantinos KOTIS. “A review on iot frameworks supporting multi-level interoperability—the semantic social network of things framework”. In : *Int. J. Adv. Internet Technol* 13.1 (2020), p. 46-64.
- [59] Michele RUTA et al. “Ubiquitous knowledge bases for the semantic web of things”. In : *First Internet of Things International Forum*. 2011.
- [60] Michele RUTA, Floriano SCIOSCIA et Eugenio DI SCIASCIO. “Enabling the Semantic Web of Things : framework and architecture”. In : *2012 IEEE Sixth International Conference on Semantic Computing*. IEEE. 2012, p. 345-347.
- [61] George HATZIVASILIS et al. “The Interoperability of Things : Interoperable solutions as an enabler for IoT and Web 3.0”. In : *2018 IEEE 23rd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*. IEEE. 2018, p. 1-7.
- [62] Thomas JELL et al. “BIG IoT : interconnecting IoT platforms from different domains—first success story”. In : *Information Technology-New Generations : 15th International Conference on Information Technology*. Springer. 2018, p. 721-724.
- [63] Rachit AGARWAL et al. “Unified IoT ontology to enable interoperability and federation of testbeds”. In : *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. IEEE. 2016, p. 70-75.
- [64] Francois CARREZ et al. “A Reference Architecture for federating IoT infrastructures supporting semantic interoperability”. In : *2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*. IEEE. 2017, p. 1-6.
- [65] Yajuan GUAN et al. “An open virtual neighbourhood network to connect IoT infrastructures and smart objects—Vicinity : IoT enables interoperability as a service”. In : *2017 Global Internet of Things Summit (GIoTS)*. IEEE. 2017, p. 1-6.

- [66] Giancarlo FORTINO et al. “Towards multi-layer interoperability of heterogeneous IoT platforms : The INTER-IoT approach”. In : *Integration, interconnection, and interoperability of IoT systems* (2018), p. 199-232.
- [67] John SOLDATOS et al. “Openiot : Open source internet-of-things in the cloud”. In : *Interoperability and Open-Source Solutions for the Internet of Things : International Workshop, FP7 OpenIoT Project, Held in Conjunction with SoftCOM 2014, Split, Croatia, September 18, 2014, Invited Papers*. Springer. 2015, p. 13-25.
- [68] Ivan GOJMERAC et al. “Bridging IoT islands : the symbIoTe project”. In : *Elektrotechnik und Informationstechnik* 133.7 (2016), p. 315-318.
- [69] Amelie GYRARD et al. “Standardizing generic cross-domain applications in Internet of Things”. In : *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. IEEE. 2014, p. 589-594.
- [70] Amelie GYRARD et Martin SERRANO. “A unified semantic engine for internet of things and smart cities : From sensor data to end-users applications”. In : *2015 IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems*. IEEE. 2015, p. 718-725.
- [71] Paolo BELLAVISTA et al. “Convergence of MANET and WSN in IoT urban scenarios”. In : *IEEE Sensors Journal* 13.10 (2013), p. 3558-3567.
- [72] Feifei SHI et al. “A survey of data semantization in internet of things”. In : *Sensors* 18.1 (2018), p. 313.
- [73] Alp USTUNDAG et Emre CEVIKCAN. *Industry 4.0: managing the digital transformation*. Springer, 2017. DOI : [10.1007/978-3-319-57870-5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5).
- [74] Andreas SCHROEDER et al. “Capturing the benefits of industry 4.0: a business network perspective”. In : *Production Planning & Control* 30.16 (2019), p. 1305-1321. DOI : [10.1080/09537287.2019.1612111](https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1612111).
- [75] Evgeny KHOROV et al. “A survey on IEEE 802.11 ah : An enabling networking technology for smart cities”. In : *Computer communications* 58 (2015), p. 53-69.
- [76] V VIJAYARAGHAVAN et J RIAN LEEVINSON. “Internet of things applications and use cases in the era of industry 4.0”. In : *The Internet of Things in the Industrial Sector : Security and Device Connectivity, Smart Environments, and Industry 4.0* (2019), p. 279-298.
- [77] Baotong CHEN et al. “Smart factory of industry 4.0: Key technologies, application case, and challenges”. In : *Ieee Access* 6 (2017), p. 6505-6519.
- [78] Zaigham MAHMOOD. *The internet of things in the industrial sector*. Springer, 2019. DOI : [10.1007/978-3-030-24892-5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24892-5).
- [79] P HELMIÖ. “Open Source in Industrial Internet of Things : A Systematic Literature Review Master’s Thesis”. In : *School of Business and Management, Lappeenranta University of Technology* 21 (2018).
- [80] Sabina JESCHKE et al. “Industrial internet of things and cyber manufacturing systems”. In : *Industrial internet of things*. Springer, 2017, p. 3-19. DOI : [10.1007/978-3-319-42559-7_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42559-7_1).
- [81] Basman M Hasan ALHAFIDH et William H ALLEN. “High level design of a home autonomous system based on cyber physical system modeling”. In : *2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW)*. IEEE. 2017, p. 45-52. DOI : [10.1109/ICDCSW.2017.14](https://doi.org/10.1109/ICDCSW.2017.14).

- [82] Ingo KUNOLD et al. “Semantic Interoperability in Cyber-Physical Systems”. In : *2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems : Technology and Applications (IDAACS)*. T. 2. 2019, p. 797-801. DOI : [10.1109/IDAACS.2019.8924274](https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924274).
- [83] Mohamed Madani HAFIDI et al. “Semantic web and machine learning techniques addressing semantic interoperability in Industry 4.0”. In : *International Journal of Web Information Systems* (2023).
- [84] Emiliano SISINNI et al. “Industrial internet of things : Challenges, opportunities, and directions”. In : *IEEE transactions on industrial informatics* 14.11 (2018), p. 4724-4734.
- [85] Davy PREUVENEERS et Elisabeth ILIE-ZUDOR. “The intelligent industry of the future : A survey on emerging trends, research challenges and opportunities in Industry 4.0”. In : *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments* 9.3 (2017), p. 287-298.
- [86] Ateeq KHAN et Klaus TUROWSKI. “A perspective on industry 4.0: From challenges to opportunities in production systems”. In : *International Conference on Internet of Things and Big Data*. T. 2. Scitepress. 2016, p. 441-448.
- [87] Sandra HEILER. “Semantic interoperability”. In : *ACM Computing Surveys (CSUR)* 27.2 (1995), p. 271-273.
- [88] Benoit DAIREAUX et al. “Towards The Correct Interpretation Of Real-time Signals On The Well-site”. In : *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. SPE. 2023, D021S014R003.
- [89] François B VERNADAT. “Interoperability and Standards for Automation”. In : *Springer Handbook of Automation*. Springer, 2023, p. 729-752.
- [90] Sami S ALBOUQ et al. “A survey of interoperability challenges and solutions for dealing with them in IoT environment”. In : *IEEE Access* 10 (2022), p. 36416-36428.
- [91] Kécia Souza Santana SANTOS, Larissa Barbosa Leoncio PINHEIRO et Rita Suzana Pitanguera MACIEL. “Interoperability Types Classifications : A Tertiary Study”. In : *XVII Brazilian Symposium on Information Systems*. 2021, p. 1-8.
- [92] John STRASSNER et Wael William DIAB. “A semantic interoperability architecture for Internet of Things data sharing and computing”. In : *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. IEEE. 2016, p. 609-614.
- [93] Tim BENSON et Grahame GRIEVE. “Principles of health interoperability”. In : *Cham : Springer International* (2021), p. 21-40.
- [94] Fatima Zahra AMARA et al. “Semantic web technologies for internet of things semantic interoperability”. In : *Advances in Information, Communication and Cybersecurity : Proceedings of ICI2C'21*. Springer. 2022, p. 133-143.
- [95] Anna BERNASCONI et al. “Semantic interoperability : ontological unpacking of a viral conceptual model”. In : *BMC bioinformatics* 23.11 (2022), p. 1-23.
- [96] Sören AUER. “Semantic Integration and Interoperability”. In : *Designing Data Spaces* (2022), p. 195.
- [97] Bran SELIĆ. “Modeling of Real-Time Software Systems”. In : *Handbook of Real-Time Computing*. Springer, 2022, p. 25-98.
- [98] Pliatsios ANTONIOS, Kotis KONSTANTINOS et Goumopoulos CHRISTOS. “A systematic review on semantic interoperability in the IoE-enabled smart cities”. In : *Internet of Things* (2023), p. 100754.

- [99] Devamekalai NAGASUNDARAM, Selvakumar MANICKAM et Shankar KARUPPAYAH. “Semantic Interoperability Issues and Challenges in IoT : A Brief Review”. In : *International Conference on Intelligence of Things*. Springer. 2022, p. 16-31.
- [100] Qi LI et al. “A semantic collaboration method based on uniform knowledge graph”. In : *IEEE Internet of Things Journal* 7.5 (2019), p. 4473-4484.
- [101] Yimin SHI et al. “Sensor ontology building in semantic sensor web”. In : *Internet of Things : International Workshop, IOT 2012, Changsha, China, August 17-19, 2012. Proceedings*. Springer. 2012, p. 277-284.
- [102] Rimel BENDADOUCHE et al. “Extension of the semantic sensor network ontology for wireless sensor networks : The stimulus-WSNnode-communication pattern”. In : *5th International Workshop on Semantic Sensor Networks in conjunction with the 11th International Semantic Web Conference (ISWC)*. 2012, 16-p.
- [103] Konstantinos KOTIS et Artem KATASONOV. “An iot-ontology for the representation of interconnected, clustered and aligned smart entities”. In : *Technical report, VTT Technical Research Center, Finland VTT Technical Research Center, Finland* (2012).
- [104] Amelie GYRARD, Christian BONNET et Karima BOUDAUD. “Enrich machine-to-machine data with semantic web technologies for cross-domain applications”. In : *2014 IEEE world forum on internet of things (WF-IoT)*. IEEE. 2014, p. 559-564.
- [105] Laura DANIELE, Frank den HARTOG et Jasper ROES. “Created in close interaction with the industry : the smart appliances reference (SAREF) ontology”. In : *Formal Ontologies Meet Industry : 7th International Workshop, FOMI 2015, Berlin, Germany, August 5, 2015, Proceedings 7*. Springer. 2015, p. 100-112.
- [106] Hyuncheol PARK et al. “Recent advancements in the Internet-of-Things related standards : A oneM2M perspective”. In : *Ict Express* 2.3 (2016), p. 126-129.
- [107] Nicolas SEYDOUX et al. “IoT-O, a core-domain IoT ontology to represent connected devices networks”. In : *European knowledge acquisition workshop*. Springer. 2016, p. 561-576.
- [108] Shaukat ALI et al. “Smartontosensor : ontology for semantic interpretation of smartphone sensors data for context-aware applications”. In : *Journal of Sensors* 2017 (2017).
- [109] Maria BERMUDEZ-EDO et al. “IoT-Lite : a lightweight semantic model for the internet of things and its use with dynamic semantics”. In : *Personal and Ubiquitous Computing* 21 (2017), p. 475-487.
- [110] Krzysztof JANOWICZ et al. “SOSA : A lightweight ontology for sensors, observations, samples, and actuators”. In : *Journal of Web Semantics* 56 (2019), p. 1-10.
- [111] Mingfu TUO et al. “Modeling and Real-Time Verification for CPS based on Time Automata”. In : *2022 IEEE 22nd International Conference on Software Quality, Reliability, and Security Companion (QRS-C)*. IEEE. 2022, p. 576-579.
- [112] Jacek DĄBROWSKI et Barbara RYCHALSKA. “Synerise Monad-Real-Time Multimodal Behavioral Modeling”. In : *Proceedings of the 31st ACM International Conference on Information & Knowledge Management*. 2022, p. 5083-5084.
- [113] Zhen HE et Lianghan YE. “Research and implementation of real-time transmission technology for industrial interconnection”. In : *2022 3rd International Conference on Computer Vision, Image and Deep Learning & International Conference on Computer Engineering and Applications (CVIDL & ICCEA)*. IEEE. 2022, p. 1133-1136.
- [114] Kayhan ERCIYES et K ERCIYES. *Distributed real-time systems*. Springer, 2019.

- [115] Ethan GOAN et Clinton FOOKES. “Uncertainty in Real-Time Semantic Segmentation on Embedded Systems”. In : *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2023, p. 4490-4500.
- [116] Felix STROHMEIER et al. “Semantic Integration Patterns for Industry 4.0.” In : *IN4PL*. 2022, p. 197-205.
- [117] Shengshi YAO et al. “Semantic Information Processing for Interoperability in the Industrial Internet of Things”. In : *Fundamental Research* (2023).
- [118] Erdem TEPE, Axel BUSBOOM et Michael MÜLLER. “A transformation framework for semantic interoperability in Industry 4.0”. In : *IECON 2022–48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE. 2022, p. 1-6.
- [119] Helbert DA ROCHA, António ESPÍRITO-SANTO et Reza ABRISHAMBAF. “Semantic Level of Interoperability by Proposing an IEEE 1451 Family of Standards Ontology”. In : *IECON 2022–48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE. 2022, p. 1-6.
- [120] Olga KOVALENKO et al. “AutomationML ontology : modeling cyber-physical systems for industry 4.0”. In : *IOS Press Journal 1* (2018).
- [121] Nikolay TESLYA et Igor RYABCHIKOV. “Ontology-driven approach for describing industrial socio-cyberphysical systems’ components”. In : *MATEC Web of Conferences*. T. 161. EDP Sciences. 2018, p. 03027.
- [122] Jiafu WAN et al. “An ontology-based resource reconfiguration method for manufacturing cyber-physical systems”. In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 23.6 (2018), p. 2537-2546.
- [123] Víctor Julio RAMÍREZ-DURÁN, Idoia BERGES et Arantza ILLARRAMENDI. “ExtruOnt : An ontology for describing a type of manufacturing machine for Industry 4.0 systems”. In : *Semantic Web* 11.6 (2020), p. 887-909.
- [124] Elem Güzel KALAYCI et al. “Semantic integration of Bosch manufacturing data using virtual knowledge graphs”. In : *International Semantic Web Conference*. Springer. 2020, p. 464-481. DOI : [10.1007/978-3-030-62466-8_29](https://doi.org/10.1007/978-3-030-62466-8_29).
- [125] Idoia BERGES, Víctor Julio RAMÍREZ-DURÁN et Arantza ILLARRAMENDI. “A semantic approach for big data exploration in industry 4.0”. In : *Big Data Research* 25 (2021), p. 100222. DOI : [10.1016/j.bdr.2021.100222](https://doi.org/10.1016/j.bdr.2021.100222).
- [126] Irlán GRANGEL-GONZÁLEZ et Maria Esther VIDAL. “Analyzing a knowledge graph of industry 4.0 standards”. In : *Companion Proceedings of the Web Conference 2021*. 2021, p. 16-25. DOI : [10.1145/3442442.3453542](https://doi.org/10.1145/3442442.3453542).
- [127] Haoyu REN, Darko ANICIC et Thomas A. RUNKLER. “Towards Semantic Management of On-Device Applications in Industrial IoT”. In : *ACM Transactions on Internet Technology* (fév. 2022). DOI : [10.1145/3510820](https://doi.org/10.1145/3510820).
- [128] Gokan MAY et al. “A Semantic Model in the Context of Maintenance : A Predictive Maintenance Case Study”. In : *Applied Sciences* 12.12 (2022), p. 6065. DOI : [10.3390/app12126065](https://doi.org/10.3390/app12126065).
- [129] Qiushi CAO, Sadeer BEDEN et Arnold BECKMANN. “A core reference ontology for steel-making process knowledge modelling and information management”. In : *Computers in Industry* 135 (2022), p. 103574. DOI : [10.1016/j.compind.2021.103574](https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103574).

- [130] Romil RAWAT. “Logical concept mapping and social media analytics relating to cyber criminal activities for ontology creation”. In : *International Journal of Information Technology* 15.2 (2023), p. 893-903. DOI : <https://doi.org/10.1007/s41870-022-00934-9>.
- [131] Bahareh BAHADORANI et Ahmad ZAERI. “A method for using temporal reasoners to answer the history of science questions”. In : *International Journal of Information Technology* 12 (2020), p. 181-188. DOI : <https://doi.org/10.1007/s41870-019-00373-z>.
- [132] Mariano FERNÁNDEZ-LÓPEZ, Asunción GÓMEZ-PÉREZ et Natalia JURISTO. “Methontology : from ontological art towards ontological engineering”. In : (1997).
- [133] Mari Carmen SUÁREZ-FIGUEROA, Asunción GÓMEZ-PÉREZ et Mariano FERNÁNDEZ-LÓPEZ. “The NeOn methodology for ontology engineering”. In : *Ontology engineering in a networked world*. Springer, 2011, p. 9-34.
- [134] Dieter FENSEL et al. “OIL : An ontology infrastructure for the semantic web”. In : *IEEE intelligent systems* 16.2 (2001), p. 38-45.
- [135] Bill SWARTOUT et al. “Toward distributed use of large-scale ontologies”. In : *Proc. of the Tenth Workshop on Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems*. T. 138. 148. 1996, p. 25.