

ÉTAT DE L'ART – SMARTGRAPH (théorie et techniques)

Description : **SmartGraph** est un projet visant à résoudre l'interopérabilité des données agricoles et robotiques en utilisant des **graphes de connaissances** et des **ontologies sémantiques**. Il permet de **relier** et d'**intégrer des données hétérogènes** provenant de capteurs IoT, drones, robots agricoles et bases de données ouvertes. L'objectif est de créer une **couche de médiation sémantique** au-dessus d'un **DataLake agricole** pour rendre ces données **exploitables** et **interrogeables** via des requêtes sémantiques, facilitant ainsi la prise de décision et l'automatisation des actions dans l'agriculture de précision.

Membres du groupe :

- CAKANYA Christian
- MOULIN Maël
- NZEUNDA NYASSI Willy Oliver
- NAGUE TADJEUTE Valdes

Client : HAMZAOU Idriss

Tutrice : CHIKY Raja

Établissement et année académique : 3iL Ingénieurs Limoges – 2025-2026

Date de soumission : le 08 janvier 2026

Table des matières

État de l'art : Graphes de connaissances et interopérabilité sémantique pour l'agriculture et la robotique.....	3
1. Introduction	3
2. Problématique de l'hétérogénéité des données agricoles et robotiques	3
3. Graphes de connaissances et recherche sémantique	4
4. Rôle des ontologies dans l'interopérabilité sémantique	5
5. Ontologies existantes pour l'agriculture et la robotique	6
6. Cadre théorique et positionnement de SmartGraph par rapport à l'état de l'art	7
7. Conclusion.....	7
État de l'art : Collecte, Transformation et Interopérabilité des Données pour SmartGraph	8
1. Introduction	8
2. Sources de données hétérogènes et méthodes de collecte.....	8
2.1. Données issues des capteurs IoT	8
2.2. Données provenant des drones et robots agricoles.....	9
2.3. Données agricoles de terrain	9
3. Transformation des données pour interopérabilité sémantique.....	9
3.1. Utilisation des ontologies et des graphes de connaissances	10
3.2. Règles de mappage et alignement sémantique	10
3.3. Traitement des données et inférence	10
4. Interopérabilité avec le Web Sémantique	10
5. Conclusion.....	11

État de l’art : Graphes de connaissances et interopérabilité sémantique pour l’agriculture et la robotique

1. Introduction

La transformation numérique du secteur agricole s’accompagne d’une multiplication des sources de données : capteurs IoT, robots agricoles, drones, images satellites, données météorologiques ou encore bases de connaissances agronomiques. Ces données, hétérogènes par leur nature, leur format et leur sémantique, constituent un levier majeur pour améliorer la prise de décision, la durabilité et l’efficacité des pratiques agricoles. Cependant, leur exploitation conjointe demeure complexe. Les systèmes d’information traditionnels, qu’ils soient relationnels ou centrés sur des plateformes IoT propriétaires, peinent à offrir une vision unifiée et intelligible de cette information distribuée.

Dans ce contexte, les graphes de connaissances et les technologies du Web sémantique apparaissent comme une réponse pertinente pour structurer, relier et interpréter des données hétérogènes. Cet état de l’art s’inscrit dans cette perspective et vise à analyser les concepts, modèles et ontologies existants permettant de construire des bases de connaissances interopérables, en particulier dans les domaines de l’agriculture intelligente et de la robotique. Il constitue le socle théorique du projet SmartGraph, dont l’objectif est de proposer une couche de médiation sémantique au-dessus d’un DataLake agricole.

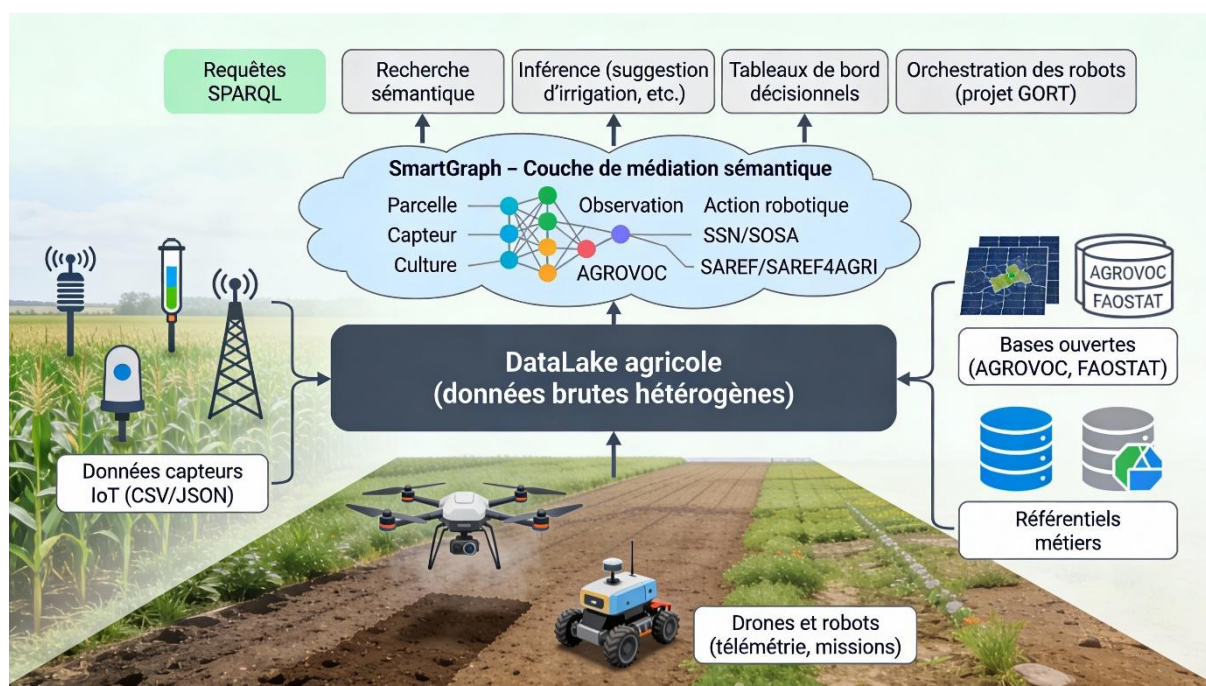
Statistique agricole annuelle par département : séries 2010 - 2024														
Les surfaces sont exprimées en hectare. Les postes 30 à 38 sont à l'échelle régionale et non à celle de l'exploitation.														
Données arrêtées au 10/10/2025. Données 2024 définitives.														
Source : Agreste - Statistique agricole annuelle - SSP/ Ministère en charge de l'agriculture														
LIB_REG2	LIB_DEP	LIB_SAA	SURF_2010	SURF_2011	SURF_2012	SURF_2013	SURF_2014	SURF_2015	SURF_2016	SURF_2017	SURF_2018	SURF_2019	S	
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 01 - Jachères			14 333	11 466	11 733	11 409	11 375	10 132	9 758	9 435	9 331	9 242		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 02 - Céréaliers (y compris)			204 806	212 938	213 590	217 755	217 715	219 750	218 515	217 075	215 635	231 250		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 03 - Oléagineux (y compris)			42 089	44 823	47 138	44 150	43 855	43 045	45 845	44 500	45 765	29 815		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 04 - Protéagineux (y compris)			28 709	19 381	16 506	14 810	14 320	14 485	11 775	8 720	5 620	7 130		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 05 - Betteraves industrielles			27 567	28 046	27 465	27 721	29 250	27 765	29 855	34 395	34 300	32 145		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 06 - Canne à sucre (DOM)														
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 07 - Plantes à fibres (y compris)			1 509	2 080	2 592	2 372	2 336	2 648	3 084	3 584	3 794	3 085		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 08 - Cultures industrielles			193	180	109	101	72	60	5	31	29	25		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 09 - Plantes aromatiques			221	158	84	97	133	161	173	215	188	255		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 10 - Pommes de terre (tubercules)			1 899	1 997	2 000	1 978	2 206	2 401	2 669	3 040	2 895	2 958		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 11 - Tubercules, racines et bulbes d'origine tropicale (DOM)														
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 12 - Légumes frais (non transformés)			1 485	1 571	1 558	1 615	1 636	1 665	1 686	1 769	1 793	1 842		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 13 - dont maraîchage (hors légumes secs)			335	358	370	391	423	439	447	450	417	423		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 14 - Légumes secs			76	99	125	145	174	198	217	334	374	396		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 15 - Fleurs et plantes ornementales			214	206	198	165	136	113	97	83	73	60		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 16 - Semences et plants			328	348	365	343	392	420	440	458	516	526		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 17 - Choux, racines et tubercules			10	12	13	15	17	18	20	23	26	30		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 18 - Fourrages annuels			1 453	1 551	1 681	1 971	2 252	2 013	2 104	1 839	1 950	2 085		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 19 - Prairies artificielles			3 117	2 962	2 830	2 704	2 789	3 006	3 068	3 579	4 210	5 500		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 20 - Jardins et vergers fruitiers			65	60	56	51	47	42	37	33	28	24		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 21 - TERRES ARABLES (hors céréales)			328 074	327 878	328 043	327 402	328 705	327 922	329 348	329 103	326 527	326 368		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 22 - Cultures fruitières (hors vergers fruitiers)			297	314	332	314	333	339	347	354	361	396		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 23 - Vignes			24	24	24	24	24	23	28	28	31	31		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 24 - Pépinières ligneuses			135	144	153	161	170	179	185	184	170	159		
11 - Île-de-France 077 - Seine-et-Ma 25 - Culture maraîchère			333	333	333	333	333	333	333	333	333	333		

2. Problématique de l’hétérogénéité des données agricoles et robotiques

Au-delà du constat largement partagé de l’hétérogénéité des données agricoles, la difficulté scientifique réside dans la capacité à agréger automatiquement ces sources sans perdre de sens ni introduire de rigidité excessive. En particulier, le passage à l’échelle, l’alignement sémantique entre vocabulaires hétérogènes et le risque de sur-modélisation constituent des points de tension majeurs identifiés dans la littérature.

L'agriculture moderne repose sur un écosystème numérique de plus en plus complexe. Les capteurs mesurent en continu des paramètres environnementaux tels que l'humidité du sol, la température ou la pluviométrie. Les drones et satellites produisent des images multispectrales à grande échelle. Les robots agricoles exécutent des actions physiques et génèrent leurs propres journaux d'événements. À cela s'ajoutent des référentiels métier décrivant les cultures, les sols, les pratiques agricoles et les intrants.

Ces sources de données présentent plusieurs formes d'hétérogénéité : hétérogénéité syntaxique (formats variés comme CSV, JSON, images), hétérogénéité structurelle (schémas et modèles différents) et hétérogénéité sémantique (vocabulaires et significations non alignés). Les bases de données relationnelles offrent un stockage robuste, mais imposent des schémas rigides peu adaptés à l'évolution des connaissances. Les plateformes IoT, quant à elles, se concentrent sur la collecte et la transmission des données, sans fournir de mécanismes natifs pour relier ces données à des concepts métier ou à des processus décisionnels. Les approches d'intelligence artificielle permettent d'extraire des motifs ou de faire des prédictions, mais elles fonctionnent souvent comme des boîtes noires, difficiles à interpréter et à intégrer dans un raisonnement global.



Face à ces limites, un besoin émerge : disposer d'un modèle capable d'agréger des données hétérogènes sans imposer une uniformisation forcée des sources, tout en offrant une compréhension explicite et exploitable de l'information. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les graphes de connaissances.

3. Graphes de connaissances et recherche sémantique

Si les graphes de connaissances offrent une flexibilité supérieure aux modèles relationnels, ils introduisent également des compromis importants entre expressivité sémantique et performance opérationnelle. La gestion de graphes volumineux, l'évolution continue des schémas et la

maîtrise des mécanismes d'inférence posent des défis techniques et méthodologiques qui conditionnent leur adoption à grande échelle.

Les graphes de connaissances trouvent leur origine dans les travaux sur le Web sémantique, initiés au début des années 2000. Ils reposent sur une représentation de l'information sous forme de graphes composés d'entités (nœuds) et de relations (arêtes), enrichies par une sémantique explicite. Contrairement aux graphes de données, qui se limitent à relier des objets par des relations souvent implicites, les graphes de connaissances s'appuient sur des modèles conceptuels formalisés, généralement exprimés à l'aide d'ontologies.

Un graphe de connaissances vise à donner du sens aux données. Il permet non seulement de stocker des faits, mais aussi de représenter leur contexte, leurs relations et leur signification. Cette structuration favorise une navigation contextuelle de l'information et ouvre la voie à la recherche sémantique, c'est-à-dire à des requêtes qui tiennent compte du sens des données plutôt que de leur simple structure. Par exemple, une requête peut viser des parcelles nécessitant une intervention spécifique en combinant des critères agronomiques, environnementaux et opérationnels, sans que ces relations aient été explicitement codées dans une table.

Dans le domaine agricole, les graphes de connaissances sont particulièrement adaptés en raison du caractère dynamique et interconnecté des systèmes étudiés. Ils permettent de relier des observations issues de capteurs à des cultures, des sols ou des pratiques agricoles, et de mettre ces informations en relation avec des actions robotiques ou des recommandations. Cette capacité à intégrer des données de nature différente au sein d'un même modèle conceptuel constitue un atout majeur par rapport aux approches classiques.

4. Rôle des ontologies dans l'interopérabilité sémantique

L'utilisation d'ontologies comme mécanisme d'interopérabilité automatique soulève toutefois plusieurs difficultés, notamment la complexité de l'alignement entre modèles existants et la nécessité de maintenir une cohérence sémantique dans le temps. Ces enjeux rendent indispensable une approche pragmatique, privilégiant des ontologies standards et des alignements légers plutôt qu'une uniformisation complète des modèles.

Au cœur des graphes de connaissances se trouvent les ontologies. Une ontologie peut être définie comme une spécification formelle et explicite d'un domaine de connaissance, décrivant les concepts, leurs propriétés et les relations qui les unissent. Dans un contexte d'interopérabilité, les ontologies jouent un rôle clé : elles fournissent un langage commun permettant à des systèmes hétérogènes de partager et d'interpréter des informations de manière cohérente.

L'interopérabilité sémantique ne se limite pas à l'échange de données ; elle implique la capacité pour un système de comprendre le sens des informations reçues et de les relier à ses propres connaissances. Les ontologies permettent cette compréhension en séparant clairement les données brutes des connaissances structurées. Les données issues des capteurs ou des robots restent inchangées, mais elles sont contextualisées et interprétées à travers des concepts ontologiques.

Cette approche s'inscrit dans une logique de médiation sémantique, telle que décrite dans les travaux sur l'interopérabilité du Web. Plutôt que d'imposer un modèle unique à toutes les sources, une couche intermédiaire fournit une vue unifiée et interprétable, tout en conservant l'autonomie des systèmes sous-jacents. Les ontologies constituent le mécanisme central de cette médiation.

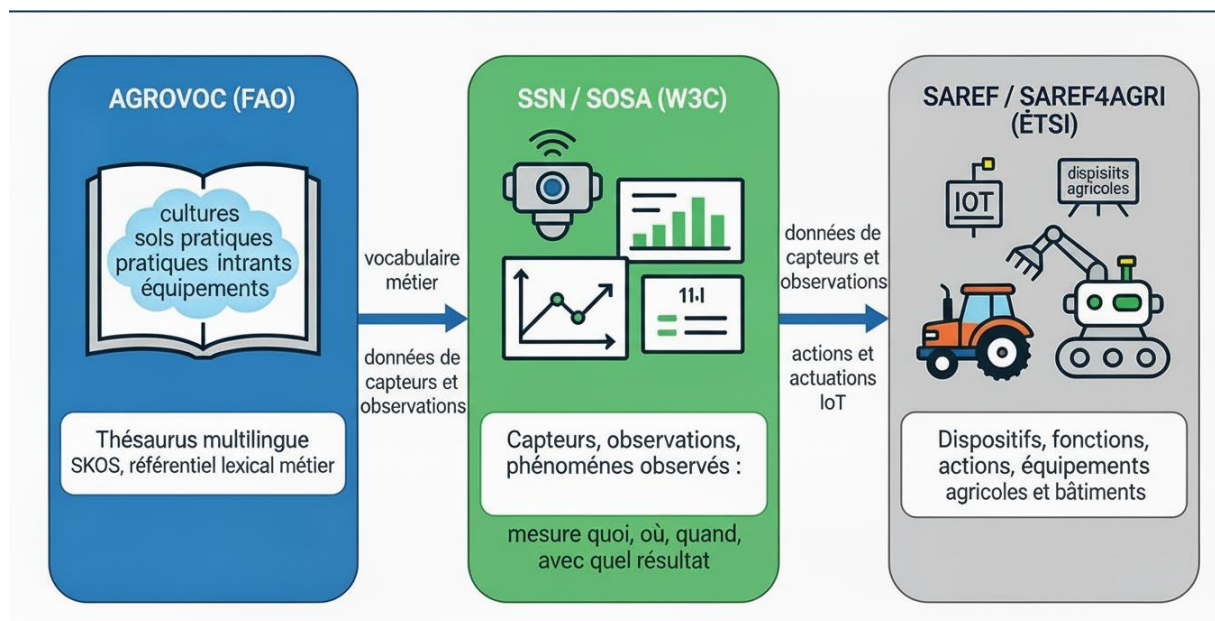
5. Ontologies existantes pour l'agriculture et la robotique

Plusieurs ontologies standards ont été développées.

AGROVOC est un thésaurus multilingue développé par la FAO pour le domaine agricole. Publié selon le standard SKOS, il propose un vaste vocabulaire couvrant les cultures, les sols, les pratiques agricoles, les intrants et les équipements. AGROVOC joue principalement un rôle de référentiel lexical : il permet d'assurer que différents systèmes utilisent les mêmes concepts pour désigner une culture ou une pratique donnée. Toutefois, son modèle hiérarchique reste limité pour représenter des processus dynamiques ou des interactions techniques.

Les ontologies SSN et SOSA, standardisées par le W3C, se concentrent sur la description des capteurs, des observations et des phénomènes observés. Elles fournissent un cadre formel pour représenter qui mesure quoi, quand et où, ainsi que le résultat de la mesure. Dans un contexte agricole, elles sont essentielles pour assurer la traçabilité et la contextualisation des données issues du terrain. Néanmoins, elles sont volontairement neutres vis-à-vis du domaine métier et ne décrivent pas les actions ou les équipements au sens opérationnel.

SAREF, normalisée par l'ETSI, est une ontologie dédiée à l'Internet des Objets et à la description des dispositifs, de leurs fonctions et des actions qu'ils peuvent exécuter. Son extension SAREF4AGRI introduit des concepts spécifiques au domaine agricole, notamment pour les équipements, les bâtiments et certaines tâches. SAREF complète ainsi SSN/SOSA en couvrant la dimension actionnelle et opérationnelle des systèmes robotiques.



L'analyse de ces ontologies montre qu'aucune ne suffit à elle seule pour modéliser l'ensemble d'un système agricole intelligent. AGROVOC apporte le vocabulaire métier, SSN/SOSA structure les observations et leur contexte, tandis que SAREF décrit les dispositifs et leurs actions. Leur complémentarité constitue une base solide pour construire une chaîne sémantique complète, allant de la mesure à l'action.

6. Cadre théorique et positionnement de SmartGraph par rapport à l'état de l'art

Les travaux sur l'interopérabilité du Web ont montré que l'hétérogénéité des systèmes ne peut être résolue par une uniformisation globale des modèles, mais par des mécanismes de médiation sémantique faiblement couplés. Cette approche, notamment développée dans les travaux d'*Antoine Zimmermann (Docteur en sciences de l'informatique de l'Université de Grenoble)* sur l'interopérabilité du Web sémantique, fournit un cadre conceptuel pertinent pour positionner SmartGraph comme une couche intermédiaire entre données hétérogènes et connaissances exploitables.

Au regard de l'état de l'art, SmartGraph s'inscrit dans cette logique de médiation. Néanmoins, la littérature met en évidence un manque d'outils intégrant de manière opérationnelle, au sein d'un même système, les dimensions agricoles, robotiques et sémantiques.

La contribution de SmartGraph réside précisément dans cette articulation. En s'intégrant concrètement au projet GORT, il vise à relier des données issues de capteurs, de robots et de référentiels métier à travers des ontologies standards, tout en conservant une architecture modulaire et évolutive. SmartGraph ne se contente pas d'exploiter des modèles existants : il propose une mise en œuvre opérationnelle de la médiation sémantique dans un contexte agricole réel, comblant ainsi l'écart entre cadres théoriques et applications de terrain.

Au regard de l'état de l'art, SmartGraph s'inscrit dans une approche de médiation sémantique faiblement couplée. Il ne cherche pas à remplacer les systèmes existants de collecte ou de stockage des données, mais à proposer une couche de connaissances au-dessus d'un DataLake agricole. En s'appuyant sur des ontologies standards et sur un graphe de connaissances, SmartGraph vise à relier des données hétérogènes et à les rendre exploitables par des mécanismes de recherche sémantique et d'interrogation intelligente.

Ce positionnement permet de répondre aux enjeux identifiés dans la littérature : interopérabilité automatique, évolutivité du modèle, et capacité à intégrer de nouvelles sources de données ou de nouveaux domaines sans remise en cause de l'architecture globale. SmartGraph se présente ainsi comme une application concrète des principes théoriques issus des travaux sur le Web sémantique et l'interopérabilité, adaptée aux spécificités de l'agriculture et de la robotique.

7. Conclusion

Cet état de l'art a mis en évidence l'intérêt des graphes de connaissances et des ontologies pour répondre aux défis posés par l'hétérogénéité des données agricoles et robotiques. Les graphes de connaissances offrent un modèle flexible et expressif pour relier des informations de nature diverse, tandis que les ontologies fournissent le cadre conceptuel nécessaire à l'interopérabilité

sémantique. L'analyse des ontologies existantes montre que leur combinaison est indispensable pour couvrir l'ensemble du cycle allant de l'observation à l'action.

Dans ce contexte, le projet SmartGraph s'inscrit dans une continuité logique des travaux existants, en proposant une couche de médiation sémantique orientée vers la recherche et l'interrogation intelligente de données agricoles. Cet état de l'art constitue ainsi le fondement théorique sur lequel s'appuiera la conception et l'expérimentation de la solution SmartGraph.

État de l'art : Collecte, Transformation et Interopérabilité des Données pour SmartGraph

1. Introduction

Dans un projet tel que **SmartGraph**, l'un des principaux défis réside dans la **gestion de données hétérogènes** en provenance de différentes sources comme des **capteurs IoT**, des **robots agricoles**, des **drones**, et des **bases de données ouvertes**. Ces données sont souvent stockées dans des **formats différents**, ont des **vocabulaires distincts**, et n'ont pas de **structures unifiées**. Cela complique leur exploitation conjointe dans un système unifié.

L'objectif principal de SmartGraph est de **relier ces données diverses** en un seul modèle cohérent, afin de rendre possible des requêtes sémantiques avancées et une prise de décision optimisée pour l'agriculture de précision et la robotique. Ce processus implique l'utilisation de **graphes de connaissances** et d'**ontologies standards** pour garantir une interopérabilité entre des systèmes variés. Cette approche, s'appuyant sur les principes du **Web sémantique**, permet à SmartGraph de servir de **couche intermédiaire** dans le projet **GORT**, facilitant ainsi l'accès aux données agrégées tout en assurant une **interopérabilité automatique**.

2. Sources de données hétérogènes et méthodes de collecte

2.1. Données issues des capteurs IoT

Les capteurs IoT sont de plus en plus utilisés dans l'agriculture de précision pour surveiller en temps réel les conditions environnementales. Ces capteurs mesurent des paramètres tels que l'humidité du sol, la température, la luminosité, ou encore la composition chimique du sol. Les données collectées par ces capteurs sont généralement stockées sous des formats **CSV**, **JSON** ou dans des **bases de données relationnelles**. Cependant, elles sont souvent difficiles à exploiter de manière cohérente car chaque capteur utilise son propre vocabulaire et format de données.

Méthodes de collecte :

- **API ouvertes** : De nombreuses villes et organisations mettent à disposition des **API ouvertes** (par exemple, **OpenData** en France ou **Data.gov** aux États-Unis) permettant d'accéder aux données collectées par des capteurs IoT urbains et environnementaux.

- **OpenStreetMap** : Bien que principalement utilisé pour des données géospatiales, **OpenStreetMap** peut fournir des informations utiles pour l'agriculture en reliant les données de terrain avec des cartes géospatiales, en particulier pour le suivi de l'utilisation des sols.

2.2. Données provenant des drones et robots agricoles

Les **drones agricoles** sont capables de collecter des images de haute qualité (par exemple, des images multispectrales) qui fournissent des informations détaillées sur l'état des cultures, la santé des plantes, ou la distribution de l'humidité du sol. Ces données sont souvent stockées sous forme d'**images aériennes** ou de **fichiers de points 3D**, mais peuvent aussi inclure des **métriques sur les actions réalisées par le drone** (par exemple, pulvérisation de produits phytosanitaires).

Méthodes de collecte :

- **OpenAerialMap** : Cette plateforme offre des images aériennes ouvertes et des cartes qui peuvent être utilisées pour l'analyse agricole et environnementale.
- **API des drones** : Les systèmes de drones agricoles modernes, tels que **Parrot** ou **DJI**, offrent des API permettant de récupérer en temps réel des données géospatiales et des métriques relatives à la mission effectuée (position, altitude, etc.).

2.3. Données agricoles de terrain

Les **bases de données agricoles** comme **AGROVOC** et **FAOSTAT** contiennent des informations détaillées sur les cultures, les types de sols, les pratiques agricoles, et les conditions climatiques. Ces données sont essentielles pour croiser les résultats des capteurs IoT avec des connaissances globales et contextualisées.

- **AGROVOC** : AGROVOC est un thésaurus multilingue standardisé, développé par la FAO, qui décrit des concepts relatifs à l'agriculture. Il permet de garantir que les différentes sources de données utilisent un vocabulaire cohérent pour désigner des concepts comme les types de cultures, les méthodes agricoles, ou les équipements utilisés.
- **FAOSTAT** : FAOSTAT offre des statistiques détaillées sur les productions agricoles mondiales, les pratiques de culture et les données environnementales.

3. Transformation des données pour interopérabilité sémantique

Une fois les données collectées, elles doivent être **transformées** pour être intégrées dans un **graphe de connaissances** cohérent et exploitable. La transformation des données permet de les **aligner sur un modèle commun** (basé sur des ontologies), ce qui garantit leur **interopérabilité**.

3.1. Utilisation des ontologies et des graphes de connaissances

Les **ontologies** servent à formaliser les concepts et les relations entre ces concepts dans un domaine donné. Elles permettent de donner un sens aux données brutes et de structurer l'information de manière cohérente.

- **AGROVOC**, **SSN/SOSA**, et **SAREF** sont trois ontologies essentielles dans le cadre de l'agriculture et de la robotique, chacune apportant une **dimension sémantique** différente. Par exemple, **AGROVOC** est utilisé pour les concepts agricoles, **SSN/SOSA** pour les observations et les capteurs, et **SAREF** pour les actions robotiques.
- **Neosemantics (n10s)** est un module permettant d'intégrer des ontologies RDF dans **Neo4j**, ce qui permet de représenter et de manipuler les données sous forme de **graphes de connaissances**.

3.2. Règles de mappage et alignement sémantique

Le mappage des données vers un modèle RDF s'appuie sur des **règles d'alignement sémantique**, qui relient les concepts d'un modèle de données spécifique (par exemple, un capteur de température) aux **concepts d'AGROVOC**, de **SSN/SOSA**, ou de **SAREF**.

- **RDF/OWL** permet de définir des relations formelles entre les concepts (par exemple, température → mesurée par → capteur_1).
- **SPARQL-Generate** peut être utilisé pour générer des **triplets RDF** à partir de données non-RDF (par exemple, des fichiers CSV ou JSON), permettant de **connecter les données hétérogènes** dans un modèle RDF.

3.3. Traitement des données et inférence

Une fois les données mappées dans un graphe RDF, des mécanismes d'**inférence** peuvent être utilisés pour déduire de nouvelles informations. Par exemple :

- Si une parcelle est associée à une faible humidité du sol, et que cette parcelle appartient à une culture sensible à la sécheresse, une action d'irrigation peut être automatiquement suggérée.

Les mécanismes d'inférence dans **Neo4j** permettent de propager ces connaissances au sein du graphe de manière dynamique.

4. Interopérabilité avec le Web Sémantique

L'**interopérabilité sémantique** dans SmartGraph repose sur l'utilisation de **SPARQL** pour interroger et manipuler les données du graphe. **SPARQL** permet d'exécuter des requêtes complexes sur des graphes RDF et de relier différentes sources de données hétérogènes.

- **SPARQL-Generate** permet de transformer des données non-RDF en RDF, un processus clé pour connecter des données issues de capteurs IoT ou de robots dans un graphe de connaissances sémantique.

- **Moteur de requêtes fédérées (PolyWeb)** : Cette technique permet d'effectuer des requêtes **SPARQL** sur des sources de données hétérogènes sans que celles-ci soient toutes au format RDF.

5. Conclusion

Le développement de **SmartGraph** repose sur des technologies éprouvées pour la **gestion de données hétérogènes**, la **transformation en RDF** et l'**interopérabilité sémantique**. L'utilisation de graphes de connaissances et d'ontologies comme **AGROVOC**, **SSN/SOSA**, et **SAREF** permet de relier les données disparates collectées par les capteurs IoT, les robots agricoles et les drones. Grâce à des outils comme **SPARQL**, **Neo4j** et **SPARQL-Generate**, SmartGraph est en mesure de transformer des données brutes en informations exploitables dans un environnement de travail connecté.