



HAL
open science

Modélisation spatio-temporelle multi-niveau à base d'ontologies pour le suivi de la dynamique en imagerie satellitaire

Fethi Ghazouani

► **To cite this version:**

Fethi Ghazouani. Modélisation spatio-temporelle multi-niveau à base d'ontologies pour le suivi de la dynamique en imagerie satellitaire. Intelligence artificielle [cs.AI]. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique; Ecole Nationale des Sciences Informatiques (Tunis), 2018. Français. NNT : 2018IMTA0122 . tel-02064710

HAL Id: tel-02064710

<https://theses.hal.science/tel-02064710>

Submitted on 12 Mar 2019

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

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

THESE DE DOCTORAT DE

L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE MINES-TELECOM ATLANTIQUE
BRETAGNE PAYS DE LA LOIRE - IMT ATLANTIQUE
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 601
*Mathématiques et Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication*
Et en cotutelle avec l'Ecole Nationale des Sciences de l'Informatique
Spécialité : *Signal, Image, Vision*

Par

Fethi GHAZOUANI

Modélisation spatio-temporelle multi-niveaux à base d'ontologies pour le suivi de la dynamique en imagerie satellitaire

Thèse présentée et soutenue à IMT Atlantique, le 10 décembre 2018

Unité de recherche : Image & Traitement de l'Information (ITI)

Thèse N° : 2018IMTA0122

Rapporteurs avant soutenance :

Jean-Paul HATON Professeur Université Henri Poincaré

Mohamed Saber NACEUR Professeur INSAT

Composition du Jury :

Président : Ali KHENCHAF Professeur ENSTA Bretagne

Rapporteurs : Jean-Paul HATON Professeur Université Henri Poincaré

 Mohamed Saber NACEUR Professeur INSAT

Examineurs : Sami FAIZ Professeur Inria – Rennes

 Touria BAJJOUK Cadre de recherche IFREMER – Brest

Dir. de thèse : Basel SOLAIMAN Professeur ENSTA Bretagne

Co-dir. de thèse : Imed Riadh FARAH Professeur ISAMM, Université Manouba

Résumé

La modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels fait partie des sujets de recherche pour le suivi et l'interprétation des changements affectant le globe terrestre. Pour cela, l'exploitation des images satellitaires se présente comme un moyen efficace qui aide à l'étude la dynamique des phénomènes spatio-temporels qui peuvent se produire sur la surface de la Terre notamment l'urbanisation, la déforestation, l'inondation, la désertification, etc. Ces données fournissent des informations multi-spectrales, multi-capteurs, multi-temporelles et multi-résolutions permettant une bonne classification de la couverture du sol. La modélisation et l'interprétation de la dynamique de changement de ces données permettent l'extraction des connaissances importantes qui seront utilisées pour l'aménagement territoire et comme un support pour promouvoir la bonne gestion de l'occupation/l'utilisation des sols et pour souligner des politiques de prise de décisions pour protéger la surface de la Terre contre divers risques et catastrophes naturelles. Divers modèles et approches ont été proposés pour modéliser les évolutions des objets spatio-temporels. Toutes fois, chaque modèle présente une capacité limitée pour capturer l'évolution des différentes caractéristiques de l'environnement, en plus la structure de représentation utilisée par chaque modèle ne permet pas de saisir complètement la sémantique de l'évolution d'un objet spatio-temporel. C'est dans ce cadre que se situent les travaux de notre thèse qui s'intéresse à la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels pour l'interprétation des changements en imagerie satellitaire. Ainsi, deux principaux défis sont à lever dans cette thèse : le premier concerne la modélisation de la dynamique des objets et des phénomènes spatio-temporels. Cela revient à trouver le modèle adéquat permettant de représenter les différents concepts. Le deuxième défi concerne l'interprétation sémantique d'images satellites pour l'interprétation des changements en imagerie satellitaire. Cela pose les questions suivantes : comment extraire les connaissances d'une scène d'images? Et quelle est la meilleure stratégie à suivre pour interpréter les changements? Dans ce travail, nous proposons une architecture ontologiques multi-niveaux pour la représentation et la modélisation des objets et des processus spatio-temporels dynamiques. L'approche proposée consiste à utiliser différents niveaux d'ontologies : une ontologie de domaine de télédétection permettant de représenter les concepts du domaine et leurs relations, une ontologie de processus modélisant les phénomènes dynamiques et une ontologie de haut niveau utilisée pour distinguer les concepts statiques et dynamiques. Nous proposons également, une nouvelle stratégie d'interprétation sémantiques de scènes d'images satellites pour l'interprétation de changements. L'approche proposée permet la description sémantique du contenu de scènes d'images à travers un mécanisme de raisonnement inférentiel tout en se guidant par les connaissances *a priori* et contextuelles formulées dans l'ontologie. Une spécificité de cette approche est qu'elle permet l'extraction des connaissances dans différents niveaux d'abstraction de l'image, c'est-à-dire, à partir du niveau perceptuel (niveau bas) de l'image jusqu'au niveau sémantique plus élevé (niveau de changement). Le cadre applicatif concerne l'interprétation sémantique d'une scène d'images satellites pour l'interprétation des phénomènes de changements, tels que l'urbanisation et la déforestation. Le résultat obtenu est une carte de changements qui pourra guider une meilleure gestion de l'utilisation/couverture des sols.

Mots-clés : Images satellites, objets spatio-temporels, modélisation de la dynamique, ontologies, interprétation sémantique, interprétation de changements, extraction de connaissances, raisonnement spatio-temporel.

Abstract

Modeling the dynamics of spatio-temporal objects is part of the research subjects for monitoring and interpretation of the changes affecting the Earth. Satellite images are an effective way for studying the dynamics of spatio-temporal phenomena, including urbanization, deforestation, flooding, desertification, and so on, that can occur on the surface of the Earth. This data provides multi-spectral, multi-sensors, and multi-temporal information for accurate land cover classification. Modeling and interpreting the dynamics of change through this data allows the extraction of important knowledge that will be used by the territory managers as a support to promote the better management of the land use/cover and to emphasize decision-making policies to protect the earth's surface from various natural hazards and disasters. Various models and approaches have been proposed to model evolution of spatio-temporal objects. However, each of these models has a limited ability to capture the evolution of the different characteristics of the environment and the representation structure used by each model does not fully capture the semantics of the evolution of a spatio-temporal object. In this context, the works of our thesis are interested in modeling the dynamics of spatio-temporal objects in the goal to interpreting changes in remote sensing imagery. Thus, two main challenges are emphasized in this thesis, the first concerns the modeling of the dynamics of objects and spatio-temporal phenomena. That allows finding a suitable model to represent the different concepts. The second challenge concerns the semantic interpretation of satellite images for change interpretation in remote sensing imagery. This raises the following questions: how to extract knowledge from an image's scene? And what is the best strategy for change interpretation? In this work, we propose a multilevel ontological architecture for representing and modeling dynamic spatio-temporal objects and processes. The proposed approach consists to use different levels of ontologies: a remote sensing domain ontology to represent domain concepts and their relationships, a process ontology modeling dynamic phenomena and high-level ontology used to distinguish between static and dynamic concepts. Furthermore, we propose a new strategy for semantic satellite images scene interpretation of the aims of the changes interpretation. The proposed approach allows the semantic description of the images scenes content through an inferential reasoning mechanism while guiding by *a priori* and contextual knowledge formulated in the ontology. A specificity of this approach is that it allows the extraction of knowledge in different abstraction levels of the image, that is to say, from the perceptual level (low level) of the image up to higher semantic level (level of change). The obtained result is a change map that can be used to guide the better management of land use/cover. The application framework concerns the semantic interpretation of a satellite images scenes for change interpretation of phenomena, such as urbanization and deforestation.

Key-Words : Satellite images, spatio-temporal objects, Modeling the dynamics, ontologies, semantic interpretation, change interpretation, knowledge extraction, spatio-temporal reasoning.

Dédicace

Je dédie mes travaux de thèse

À mes chers parents de leurs soutiens illimités et de leurs sacrifices,

À mes frères et à ma sœur pour leurs amours,

À mon oncle Med Elhedi pour son encouragement et sa confiance,

À tous mes amis et mes collègues, en leur souhaitant tout le succès...tous le bonheur

Fethi

Remerciements

Je tiens tout d'abord à adresser mes vifs remerciements et ma profonde reconnaissance à mes directeurs de thèse : Monsieur Imed Riadh FARAH, Professeur à l'Université de la Mannouba, et Monsieur Basel SOLAIMAN, professeur et directeur du département Image et Traitement de l'Information à IMT-Atlantique, pour la qualité de leurs encadrements et leurs orientations tout au long de l'élaboration de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Ali KHENCHAF, Professeur à l'ENSTA Bretagne, pour l'honneur qu'il m'a accordé en présidant mon jury de thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Jean-Paul HATON, Professeur à l'université Henri Poincaré, et Monsieur Mohamed Saber NACEUR, Professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie, d'avoir accepté la fastidieuse tâche de rapporter ce travail. Je les remercie pour les remarques constructives qu'ils m'ont permis de perfectionner le présent manuscrit.

Je remercie également Monsieur Sami FAIZ, Professeur à l'Université de la Mannouba, et Madame Touria BAJJOUK Cadre de recherche à l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, qui m'ont fait plaisir d'examiner ce travail.

Mes remerciements vont également à tous les membres du laboratoire RIADI et du département ITI et à tous ceux qui m'ont aidé et encouragé tout au long de cette thèse.

Table des matières

<i>Dédicace</i>	iii
<i>Remerciements</i>	v
Table des matières	vii
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xii
Introduction Générale	1
Partie I: État de l'Art	9
Chapitre 1 Détection et suivi de changements des objets spatio-temporels en imagerie satellitaire	10
1.1 Introduction	11
1.2 Imagerie satellitaire	11
1.2.1 Processus général d'acquisition	12
1.2.2 Les résolutions d'images satellitaires	12
1.2.3 Types d'images satellitaires	13
1.3 Détection de changement en imagerie satellitaire	14
1.3.1 Changement d'occupation et d'utilisation des sols	14
1.3.2 Détection de changement	16
1.3.3 Processus de détection de changement	16
1.4 Suivi de changements en télédétection	25
1.4.1 La télédétection en tant qu'outil potentiel pour suivre les changements	25
1.4.2 Exemples de travaux de suivi de changements	25
1.5 Conclusion	29
Chapitre 2 Modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels	31
2.1 Introduction	33
2.2 Dynamique de changement des objets spatio-temporels	33
2.3 Approches classique pour la modélisation des objets spatio-temporels	34
2.3.1 Approches basées sur les entités	34
2.3.2 Approches basées sur les événements/processus	39
2.4 Les limites des approches classiques et les nouvelles tendances	41
2.5 Approches à base d'ontologies pour la modélisation des objets spatio-temporels	43
2.5.1 Les ontologies	43
2.5.2 Alignement des ontologies	46
2.6 Représentation des connaissances spatio-temporelles dans les ontologies	47
2.6.1 Ontologies des données spatio-temporelles	47
2.6.2 Modélisation de la dynamique avec les ontologies de fluent	50

2.6.3	Modélisation de la dynamique avec les ontologies de haut niveau	53
2.6.4	Le modèle Continuum	57
2.6.5	Les ontologie de modélisation de changement en télédétection	57
2.7	Synthèse	60
2.8	Conclusion	64
Partie II : Contributions		66
Chapitre 3 Modélisation de la dynamique spatio-temporelle à base des ontologies en imagerie satellitaire		67
3.1	Introduction	68
3.2	Cadre ontologique pour la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels	68
3.3	Formalisation du changement	69
3.3.1	Ontologie de domaine de télédétection	69
3.3.2	Ontologie des processus	73
3.3.3	Exploitation de l'ontologie de haut niveau BFO	74
3.3.4	Formalisation de l'ontologie proposée	80
3.4	Conclusion	81
Chapitre 4 Une nouvelle stratégie pour l'interprétation Sémantique de changements en imagerie satellitaire		83
4.1	Introduction	84
4.2	L'interprétation sémantique des images	84
4.2.1	Définition	84
4.2.2	Les points de vue de la sémantique	85
4.3	Interprétation sémantique d'images satellites	86
4.3.1	Classification d'objets basée sur les ontologies	86
4.3.2	Reconnaissance d'objets basée sur l'ontologie	87
4.3.3	Détection de changements basée sur l'ontologie	87
4.4	Nouvelle approche pour l'interprétation sémantique de changements en imagerie satellitaire	88
4.4.1	Approches multi-niveaux pour l'interprétation de changements	90
4.4.2	Stratégie de l'interprétation sémantique des scènes (ISS)	96
4.4.3	Méthodologie de raisonnement sur les objets spatio-temporels	105
4.5	Conclusion	110
Chapitre 5 Expérimentation et évaluation de la méthodologie proposée		111
5.1	Introduction	112
5.2	Présentation de la zone d'étude	112
5.2.1	Zone d'étude	112
5.2.2	Ensemble de données utilisé	113
5.3	Application de la stratégie d'interprétation sémantique	113
5.3.1	Prétraitement et extraction des caractéristiques	113
5.3.2	Interprétation sémantique niveau bas : étiquetage sémantique des pixels .	115
5.3.3	Interprétation au niveau sémantique d'objets : classification sémantique d'objets	117
5.3.4	Interprétation au niveau sémantique partiel : extraction des relations spatiales	118
5.3.5	Interprétation au niveau sémantique plein : extraction des relations spatio-temporelles	119
5.3.6	Interprétation au niveau sémantique plus élevé : interprétation sémantique des changements	120

5.4	Évaluation des résultats	128
5.4.1	Évaluation des résultats du niveau bas	129
5.4.2	Évaluation des résultats du niveau sémantique d'objets	130
5.4.3	Évaluation des résultats au deux niveaux sémantique partielle et pleine	131
5.4.4	Évaluation des résultats au niveau changement	133
5.5	Conclusion	135
Conclusion Générale et Perspectives		137
Bibliographie		164
Liste des Publications		165
Annexes		167
Annexes A Liste des acronymes		I
Annexes B Glossaire		III
Annexes C Ontologies		IV
C.1	Formes d'hétérogénéité	IV
C.2	Techniques d'alignement des ontologies	V
C.3	Ontologies et base de connaissances	VII
C.3.1	Base de connaissances	VII
C.3.2	Logiques de description	IX
C.3.3	Logiques de description et domaines concrets	XI
C.4	Le langage de représentation des ontologies	XII
C.4.1	Le langage RDF	XIV
C.4.2	Le langage OWL	XIV
C.4.3	SPARQL : un langage d'interrogation des données	XVI
C.4.4	SWRL : un langage de règles	XVI
Annexes D La télédétection : exemples de satellites, prétraitement et traitement d'images satellites		XVIII
D.1	Les différents satellites	XVIII
D.1.1	LANDSAT	XIX
D.1.2	SPOT	XIX
D.2	Prétraitement d'images	XXII
D.2.1	Correction géométrique : géo-référencement	XXII
D.2.2	Correction radiométrique	XXIII
D.3	Segmentation d'images satellites	XXV
D.3.1	Segmentation par seuillage	XXV
D.3.2	Segmentation basée sur le contour	XXV
D.3.3	Segmentation par régions	XXVI
D.3.4	Segmentation basée sur des théories spéciales	XXVI
D.3.5	Autres méthodes de segmentation	XXVI
Annexes E Calibration Radiométrique		XXVIII
E.1	Conversion en radiance spectrale au-capteur	XXVIII
E.1.1	Conversion en radiance spectrale au-capteur pour Landsat 7 (ETM+)	XXVIII
E.1.2	Conversion en radiance spectrale au-capteur pour Landsat 8 (OLI)	XXIX
E.2	Conversion en en réflectance au sommet de l'atmosphère (Top-Of-Atmosphere (TOA))	XXIX
E.2.1	Conversion en réflectance TOA pour Landsat 7 (ETM+)	XXX
E.2.2	Conversion en réflectance TOA pour Landsat 8 (OLI)	XXX

E.3 Conversion en température de luminosité au niveau du capteurXXXI

Liste des figures

1.1	Illustration du processus général d'acquisition. [TERRE, 2013]	12
1.2	Exemple de métadonnées.	14
1.3	Les étapes principales de processus de détection de changement.	16
1.4	Le principe de comparaison post-classification.	21
2.1	Illustration des relations topologiques	35
2.2	Illustration des relation temporelle	36
2.3	Les relations de filiations	36
2.4	Illustration des modèles snapshot et Temporal Map Sets	37
2.5	Le modèle Space-Time Composites [Langran and Chrisman, 1988].	38
2.6	Le modèle Spatio-temporal Object [Worboys, 1992].	38
2.7	Modélisation basé sur l'identité	39
2.8	Modèle Event-Based Spatiot-emporal Data Model (ESTDM) basé sur les évènements et les données raster. (Figures extraites de [Peuquet and Duan, 1995])	39
2.9	Le modèle des processus composites. (Figures extraites de [Claramunt and Thériault, 1995])	40
2.10	Le modèle conceptuel représentant les objets et les évènements dérivés des trois types de données spatio-temporelles : <i>séries temporelles</i> , <i>couverture</i> et <i>trajectoire</i> . (Figures extraites de [Ferreira et al., 2014])	41
2.11	Différents types d'ontologies selon leur degré de dépendance vis-à-vis d'une tâche particulière ou d'un point de vue. Les flèches représentent des relations de spécialisation.	46
2.12	Processus d'alignement des ontologies	46
2.13	Exemple d'ontologies intégrant les dimensions spatiales, temporelles et thématiques. Figure extraite de [PERRY, 2008]	47
2.14	Représentation graphique de l'information dans stRDF	48
2.15	Exemple de représentation stRDF. (Selon [Bereta, 2013])	49
2.16	L'ontologie GeoSPARQL : classes essentielles. Figure extraite de [Balaban, 2017]	50
2.17	Principe général de la réification	51
2.18	Modèle des relations n-aires	52
2.19	Ontologie pour la représentation d'objets dynamiques en utilisant l'approche 4D-fluents. Figure extraite de [Batsakis and Petrakis, 2010]	52
2.20	structure taxonomique de haut niveau de l'ontologie Basic Formal Ontology (BFO)	54
2.21	Partie supérieure de la taxonomie de Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering (DOLCE)	56
2.22	Les composantes du modèle Continuum. Figure extraite de [Harbelot, 2015]	57
2.23	Construction d'un réseau bayésien de détection des glissements de terrain en utilisant l'ontologie et les heuristiques. Figure extraite de [Hashimoto et al., 2011]	59
2.24	Illustration de détection des glissements de terrain. Figures extraites de [Hashimoto et al., 2011]	59
2.25	Ontologie géospatiale pour la modélisation sémantique des informations de changements. Figure extraite de [Li et al., 2016]	59

3.1	Architecture ontologique multi-niveau adaptée.	68
3.2	Structure de l'ontologie de domaine.	69
3.3	Structure de l'ontologie de domaine.	70
3.4	Intégration des relations spatiales dans l'ontologie de domaine	71
3.5	Exemples de changements	73
3.6	Extrait de la structure de l'ontologie des processus	74
3.7	Architecture ontologique multi-niveau adaptée.	75
3.8	Processus d'ancrage adoptée.	77
3.9	L'ontologie des relations (Ontologie des relations –ou <i>Relations Ontology</i> – (RO)) . .	79
3.10	Illustration du processus d'ancrage	80
4.1	Paradigme multi-niveaux pour la sémantique d'une image. Figure extraite de [Hud- delot et al., 2005]	86
4.2	Architecture générale multi-niveau pour l'interprétation de scènes d'images satel- litaire	89
4.3	Exemple de métadonnées	91
4.4	Extrait de l'ontologie des primitives visuelles (Ontologie des Primitives Visuelles (OPV))	93
4.5	Partitions de plan utilisant un point par objet [Papadias and Theodoridis, 1997] . .	102
4.6	Partitions de plan utilisant un point par objet (63)	102
4.7	Illustration graphique des différents événements	108
4.8	Représentation de l'évènement de fusion	109
4.9	Représentation de l'évènement de division	109
5.1	Illustration de la zone d'étude (5.1a avec un exemple de risque (5.1b)	113
5.2	Illustration des deux zones sélectionnées	113
5.3	Exemple d'individu : ce code représente un objet d'image (pixel) et ses caractéris- tiques associées	115
5.4	Extrait des concepts et relations de l'ontologie des primitives visuelles	115
5.5	Résultat de l'interprétation sémantique au niveau bas pour la scène Landsat ETM+ (figure 5.2a)	119
5.6	Résultat de l'interprétation sémantique au niveau bas pour la scène Landsat 8 (fi- gure 5.2c)	119
5.7	Résultat de l'interprétation sémantique d'objet pour la scène Landsat ETM+ (figure 5.2a)	120
5.8	Résultat de l'interprétation sémantique d'objet la scène Landsat 8 (figure 5.2c) . . .	121
5.9	Extrait de relations spatiales entre différents objets (5.7)	122
5.10	Extrait de relations spatio-temporelles entre différentes zones urbaines	124
5.11	Exemple d'extension d'une zone urbaine	127
5.12	Requête SPARQL Protocol and RDF Query Language (SPARQL) pour l'extraction d'évènement d'expansion et de processus d'urbanisation	127
5.13	Carte de changements générée	127
5.14	Petit sous ensemble utilisé pour l'analyse visuelle	129
5.15	Étiquetage des objets de la scène 2000	132
5.16	Évaluation des résultats d'extraction des relations spatio-temporelles par une ana- lyse visuelle (superposition des objets de deux images différentes)	132
5.17	Illustration du code et du résultat de la <i>Requête1</i>	132
5.18	Illustration du code et du résultat de la <i>Requête2</i>	133
5.19	Illustration du code et du résultat de la <i>Requête 3</i>	133
5.20	Illustration du code et du résultat de la <i>Requête 4</i>	133
5.21	Illustration du code et du résultat de la <i>Requête 5</i>	134
5.22	Exemples de cas où le résultat de la méthode de dérivation des relations spatiales est erroné	134

5.23	Illustration des codes et des résultats de requêtes SPARQL pour l'extraction des processus et des évènements	135
C.1	Schéma général d'une base de connaissances [Baader et al.,]	IX
C.2	Architecture générale du Web Sémantique (Semantic web stack) [Shadbolt et al., 2006]	XII
C.3	Exemple de triplet RDF	XIV
C.4	Un exemple d'extension de triplet RDF	XV
C.5	Exemple de requête SPARQL	XVI
D.1	Effets atmosphère sur un rayonnement.	XXII
D.2	Les différentes étapes de prétraitement. (Figure extraite de ([Young et al., 2017]) . .	XXII
D.3	Exemple fr processus de recalage.	XXIII

Liste des tableaux

1.1	Résumé des méthodes de détection des changements	23
3.1	Extrait de l'ensemble de règles d'ancrage et de dérivation	78
4.1	Différentes extension de la LD \mathcal{ALC} standard	105
5.1	Caractéristiques des satellites LANDSAT	114
5.2	Illustration des métriques de rappel (proportion de l'aire des bien-classés par rapport à l'aire des échantillons de validation) et de précision (proportion de l'aire des bien-classés par rapport à l'aire de la classification) [Masse, 2013]	129
5.3	Valeurs des critères d'évaluation pour la classification spectrale	130
5.4	Illustration de résultats d'extraction des objets sémantiques par des requêtes SPARQL pour les deux scènes 2000 (5.2a) et 2017 (5.2c)	131
5.5	Valeurs des critères d'évaluation pour la classification sémantique d'objets	131
5.6	Valeurs des critères d'évaluation pour la classification sémantique d'objets	134
C.1	Les constructeurs du langage \mathcal{AL}	X
C.2	Les constructeurs possibles en DL et leurs lettres	X
D.1	Caractéristiques des satellites LANDSAT ([Satellites, 2016])	XX
D.2	Caractéristiques des satellites SPOT ([Satellites, 2016], [SPOT, 2016])	XXI

Introduction Générale

“Il ne faut pas attendre d’être parfait pour commencer quelque chose de bien.”¹

Contexte général et problématiques

Plusieurs facteurs comme le développement économique, la croissance démographique, la variabilité climatique et d’autres ont provoqué des changements rapides dans l’écosystème de la terre. En conséquence, plusieurs phénomènes géographiques sont apparus et qui ont causé un impact sur la surface du globe. Cela a été possible grâce à la télédétection qui a montré de grands potentiels pour l’étude et l’analyse de la surface de la Terre. En plus, avec l’apparition de nouveaux capteurs et le progrès des techniques d’analyse et de traitement d’images, la télédétection se présente comme un outil essentiel et efficace qui fournit des images de satellites d’observation de la Terre, valables pour de multiples applications souhaitées, notamment la détection, le suivi et d’interprétation de changements. L’objectif principal de l’interprétation des images de télédétection est d’identifier et de mesurer les différentes « cibles » dans l’image afin d’en extraire des informations. Dans ce cas, le traitement et l’analyse numérique peuvent être effectuées de façon automatique pour identifier les cibles et d’extraire des informations avec ou sans présence de l’interprétation humaine. Généralement, l’interprétation des images est définie comme l’extraction automatique des connaissances à partir des images. Elle fournit des informations utiles sur les relations entre les objets et des informations thématiques basées sur les connaissances d’experts. Ces dernières peuvent être formalisées comme des connaissances *a priori* et contextuelles dans le processus de l’interprétation des images.

L’un des objectifs fondamentaux de la télédétection est de diffuser les connaissances sur notre environnement et de faciliter l’interprétation des différents phénomènes affectant la surface de la Terre. En fait, les images satellitaires permettent d’observer de plus en plus de phénomènes en fonction de volume important de données acquises à partir de multiples capteurs. Par exemple, ces phénomènes incluent les changements relatifs au climat, l’urbanisation, la déforestation, la désertification, l’inondation, etc. L’analyse et l’étude de ces différents phénomènes sont devenues un sujet central à la fois dans les communautés de la science de l’information géographique et de la télédétection. Des outils et des stratégies ont été mis en place pour étudier et analyser la

1. ABBÉ PIERRE

dynamique de la surface de la Terre. Notre objectif principal est la compréhension et l'interprétation des changements qui peuvent survenir, ce qui permet par la suite de planifier et de définir des stratégies et de prendre les décisions politiques adaptées pour une meilleure gestion et une meilleure protection des sols contre les risques naturels pouvant avoir des conséquences graves sur l'utilisation et l'occupation de la couverture végétale.

Détection de changement en télédétection

La détection de changement est l'une des applications principales de la communauté de la télédétection. Elle est définie par [Singh, 1989], comme le processus d'identification des différences dans l'état d'un objet ou d'un phénomène en l'observant à des moments différents. Plusieurs applications comme le changement de l'occupation/la couverture de sol, le changement climatique, l'évolution du niveau de la mer, etc. sont associées à la détection de changements. Des informations sur les changements de l'occupation/la couverture de sol sont utiles pour divers domaines, y compris la déforestation, l'évaluation des dommages, le suivi des catastrophes, le suivi de changement des surfaces, le suivi de l'évolution spatiale de la végétation, l'expansion urbaine, la planification, la gestion des sols, etc. Les données de télédétection, en particulier les séries temporelles d'images satellitaires, deviennent une source importante pour étudier la détection et/ou le suivi de changement en raison de leur haute fréquence temporelle, leur format numérique approprié pour le calcul, leur aperçu synoptique, et de plus large sélection de résolutions spatiales et spectrales. Ce type d'images fournissent des mesures et des observations qui peuvent être utilisées pour la détection, le suivi et l'interprétation des changements.

Plusieurs approches ont été proposées pour la détection et le suivi de changements en imagerie satellitaire. Les principaux objectifs de la plupart de ces approches de détection de changement sont : la localisation géographique et l'identification du type de changements, la quantification des changements et l'évaluation de la précision des résultats de la détection de changements. Les niveaux d'informations sur les changements de l'imagerie de télédétection peuvent être classés en deux niveaux : (1) le niveau de détection de changement qui permet de détecter un changement binaire simple (c'est-à-dire, « changement versus non-changement ») et (2) niveau de changement thématique, permet l'identification de changement détaillé ((c'est-à-dire, « de-à »).

Jusqu'à présent, les méthodes de détection de changement ont réussi soit pour détecter des changements binaires simples (de type changement/non-changement) permettant ainsi de répondre à la question « y-a-t-il des changements? ») ou bien d'identifier la nature de changement (changement de-à entre les différentes classes) permettant ainsi de répondre à la question « quel changement? ». Cependant, dans les deux niveaux de détection de changement, les approches existantes ne fournissent aucune information sur la cause et les conséquences des changements (c.-à-d., « comment les changements sont produits? ») et par conséquent, ils n'ont aucune idée sur la manière d'évaluer leur importance pour la tâche de prise de décision.

Dynamique des objets spatio-temporels

Les objets géographiques présents dans les images satellitaires sont souvent dynamiques. Des objets géographiques comme les lacs, les rivières et les fronts pluviaux ont des propriétés dynamiques très spatiales et présentent par nature un comportement spatio-temporel. Il est possible qu'un objet change ses attributs et sa représentation spatiale avec du temps. Par exemple, les objets avec la représentation spatiale pourraient croître, rétrécir (le cas de l'espace urbain), changer leur forme (par exemple quand une ville change ses frontières), se diviser (dans le cas où une forêt est divisée en une zone urbaine et une forêt), disparaître (un lac peut disparaître) ou se fusionner en un nouvel objet (des sous-parcelles sont fusionnées en une seule parcelle) dans le temps. Ces types « d'événements » sont réalisés suite à un ou plusieurs phénomènes » (processus) géographiques tels que la déforestation, l'urbanisation, la désertification, etc. Par exemple, la disparition d'une forêt est supposée causée par un processus d'urbanisation. D'autre part, les connaissances associées à un objet spatio-temporel peuvent évoluer lorsque des changements surviennent. À titre d'exemple, une parcelle de terrain peut changer de l'état forêt à une zone urbaine. Dans cet exemple, la géométrie n'a pas changé, mais il y a un changement d'identité (changement sémantique). Une des solutions pour la manipulation de la sémantique des objets spatio-temporels est d'ajouter la dimension sémantique dans les bases des données traditionnelles. Cependant, cette solution n'offre pas la capacité d'effectuer l'inférence ou le raisonnement sur des informations provenant des phénomènes dynamiques spatio-temporels [Harbelot, 2015]. Ainsi, il est devenu important de modéliser la dynamique de ces informations spatio-temporelles dans le but de la détection, le suivi et l'interprétation des changements.

En partant, de l'hypothèse que la modélisation et la représentation de la dynamique de l'information spatio-temporelle sont souhaitables pour le suivi et la détection de changement, la communauté des sciences de l'information géographique (SIG et télédétection) a souligné le rôle joué par les approches de représentation des connaissances pour le développement des applications modernes. En effet, la représentation des connaissances est l'un des domaines centraux de l'Intelligence Artificielle (IA) qui vise à fournir des représentations appropriées des éléments et des faits dans un domaine de connaissance à travers un dispositif logique formel, afin d'atteindre un comportement intelligent en fournissant des méthodes de raisonnement et de tirer des conclusions. Dans ce contexte, le raisonnement spatio-temporel [Harbelot, 2015] et le raisonnement sur les changements spatio-temporels [Hornsby and Egenhofer, 2000] ont été considérés dans le but de fournir une modélisation appropriée des objets et des phénomènes géographiques dynamiques.

Les avancées dans la théorie spatio-temporelle pour modéliser les phénomènes environnementaux, des changements, des événements et des processus, conduisent à proposer de nouvelles approches en matière de gestion de données. La conception d'une telle approche doit tenir compte des changements qui se produisent dans les dimensions (à savoir la dimension spatiale, spectrale, temporelle et sémantique) des entités géographiques qui composent un tel phénomène, ainsi que les changements dans les relations qui unissent ces entités [Del Mondo et al., 2013a]. En conséquence, différentes approches ont été proposées pour la modélisation et le raisonnement sur la dynamique des objets spatio-temporels et des phénomènes géographiques. La plupart des approches considèrent que les entités spatiales évoluent sous l'impulsion d'un événe-

ment ou d'un processus et dont l'objectif est d'analyser les causes et les conséquences. Tous les travaux présentés dans la littérature considèrent que les objets, le temps, l'espace, l'état, les événements et le processus comme des concepts clé pour la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels.

De ce fait, les approches existantes se distinguent par la manière de la représentation et la modélisation des différents concepts pour raisonner sur la dynamique des objets spatio-temporels. Dans les modèles comme le modèle snapshot, le modèle Space-Time Composites (STC) et le modèle Spatio-temporal Objet, la dynamique d'une entité spatiale peut être représentée soit par une succession d'états dans le temps, soit par la modélisation des occurrences (événements et/ou processus) qui agissent sur cette entité. Une limite de ces modèles est **qu'il est difficile de détecter les processus comme un changement d'une entité** puisqu'ils ne modélisent que des changements soudains sur une période de temps discrète. D'autres modèles basés sur l'identité pour décrire les changements d'une entité. Ce type de modèle permet de prédire ou de prévoir les modifications futures d'un objet, mais **ne modélise pas les relations spatio-temporelles entre les objets et présente des difficultés quant à l'analyser et l'interprétation des changements**. Dans les modèles à base des événements/processus comme le modèle Event-Based SpatiotemporalData-Model (ESTDM), le modèle d'algèbre conceptuel, modèle des processus composite et modèle de changement topologique, la dynamique d'une entité spatiale est faite à travers la description et le raisonnement sur les événements ou les processus qui agissent sur cette entité. La limite majeure liée à ces modèles est qu'ils **n'expriment pas des relations de composition et de causalité entre les objets et les événements/processus ou entre les événements/processus et les événements/processus**. Bien que ces modèles utilisent les relations spatiales et temporelles pour déterminer les changements spatiaux illustrant la dynamique des entités, **la dimension sémantique n'est pas prise en compte pour modéliser les changements liés à l'identité**. Les modèles basés sur les graphes spatio-temporels ont montré plus d'avantages pour suivre l'identité d'une entité dans le temps. Deux limites majeures sont à souligner pour ce type de modèles : la première est que la représentation de changement pour l'entité est explicite dans les graphes spatio-temporels. Le manque de sémantique pour découvrir et déduire des phénomènes géographiques représente la deuxième limite pour ces modèles.

Contribution

Les ontologies pour la modélisation spatio-temporelle

Les modèles classiques pour la modélisation de l'information spatio-temporelle ont présenté certains avantages pour la modélisation de la dynamique des objets géographiques. Cependant, ces modèles ne permettent pas de représenter explicitement des connaissances géographiques et d'effectuer des mécanismes de raisonnement pour inférer de nouvelles connaissances et pour raisonner sur la dynamique des objets spatio-temporels.

Dans le domaine de représentation des connaissances, un nombre considérable de travaux se concentrent sur le développement des ontologies pour la modélisation et la représentation des

connaissances associées à un tel domaine. L'ontologie est présentée comme un modèle de données capable de représenter les concepts d'un domaine avec un caractère dynamique, et les relations entre ses concepts. Gruber [Gruber, 2009] définit l'ontologie comme une spécification explicite d'une conceptualisation. Ces dernières années, les chercheurs sont de plus en plus conscients de l'importance des ontologies en tant que ressource efficace pour représenter les connaissances dans le domaine géographique, en fournissant une conceptualisation précise des entités présentes dans l'espace géographique et les relations entre elles.

Notre première contribution dans ces travaux consiste à explorer les ontologies comme un support de modélisation spatio-temporelle dans lequel nous proposons un **cadre conceptuel ontologique permettant la représentation des connaissances spatio-temporelles et de raisonner sur la dynamique des objets et des phénomènes spatio-temporels en imagerie satellitaire**. Il s'agit d'une architecture ontologique multi-niveaux qui permet :

- ✓ de représenter les connaissances (objets et relations) contenues dans une scène d'image satellitaire,
- ✓ de représenter et décrire les événements et les processus géographiques ainsi que leurs relations,
- ✓ de distinguer entre les concepts statiques et dynamiques dans le domaine de télédétection.

Les ontologies pour l'interprétation sémantique de changement

L'interprétation sémantique d'image est définie comme étant le processus d'extraction de la sémantique et d'inférence de connaissances de haut niveau à partir d'une image observée. Le processus d'extraction de la sémantique peut être considéré comme des tâches de catégorisation, de classification et de compréhension qui partagent les mêmes efforts pour résoudre le fossé sémantique (gap sémantique). Le fossé sémantique est défini par « le manque de concordance entre les informations perceptuelles que nous pouvons extraire des images et l'interprétation de données pour un utilisateur dans une situation déterminée ». L'interprétation sémantique d'une image satellite consiste à extraire la sémantique (c.-à-d., la signification) à partir des données issues d'une scène, où une scène est définie comme une section spatio-temporelle du monde réel en fonction de ses objets physiques avec leurs propriétés et leurs relations. L'extraction de la sémantique des images avec l'objectif de leurs interprétations est une tâche complexe qui ne dépend seulement des informations perceptuelles dérivées de l'image, mais dépend aussi des connaissances *a priori* et contextuelles du domaine d'application. Il est important donc de modéliser ces connaissances (expertes) pour résoudre le problème du *fossé sémantique* pour guider le processus d'interprétation sémantique.

Notre deuxième contribution dans ces travaux consiste à proposer **une approche pour l'interprétation sémantique de scènes d'images satellites pour l'interprétation de changement en imagerie satellitaire**. Dans cette approche, nous exploitons les ontologies pour encoder les connaissances *a priori* et contextuelles du domaine de télédétection et pour guider le processus d'interprétation. L'approche proposée présente plusieurs niveaux d'interprétation où chacun présente un objectif bien précis à savoir :

- ✓ L'extraction des caractéristiques à partir des images de télédétection ;
- ✓ La classification spectrale d'une scène d'images satellitaires ;
- ✓ L'extraction des objets sémantiques présents dans une scène d'images ;
- ✓ L'extraction des relations spatiales, temporelles et spatio-temporelles ;
- ✓ L'interprétation sémantique de changement à travers la modélisation de la dynamique des objets et des phénomènes spatio-temporels ;
- ✓ De fournir des résultats permettant aux utilisateurs de souligner des stratégies et des politiques de prise de décision.

Plan de la thèse

Ce manuscrit s'ouvre sur une introduction générale, ensuite il s'organise en trois parties et s'achève par une conclusion générale et des perspectives. Dans cette section, nous présentons un aperçu sur chacune de ces parties.

Introduction générale

Dans l'introduction générale, nous présentons le contexte général de la thèse, les problématiques ainsi que nos principales contributions.

PARTIE I

Dans la première partie, composée de deux chapitres, nous présentons un état de l'art sur les domaines traités dans notre thèse.

Chapitre I : Détection et suivi de changements des objets spatio-temporels en imagerie satellitaire

Ce chapitre a pour objectif d'introduire le processus général de détection de changement en imagerie satellitaire. Nous y montrons l'importance des images de télédétection pour la détection et le suivi de changements et nous y présentons une étude bibliographique sur les principaux techniques et approches de détection et de suivi de changements.

Chapitre II : Modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels

Ce chapitre présente les différents travaux proposés dans la littérature pour la modélisation de la dynamique des objets et des phénomènes spatio-temporels et il met en avant leurs avantages et leurs limites. En premier lieu, nous étudions les approches classiques pour la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels tout en présentant les différents aspects et concepts

utilisés pour la modélisation. Puis, nous introduisons l'importance des ontologies pour la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels tout en évoquant les différents travaux et outils consacrés à une telle modélisation.

PARTIE II

Dans la deuxième partie, composée de trois chapitres, nous présentons nos contributions à la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels et à l'interprétation sémantique d'images satellites ainsi que l'expérimentation et l'évaluation des résultats.

Chapitre III : Modélisation de la dynamique spatio-temporelle à base des ontologies en imagerie satellitaire

Ce chapitre présente la première contribution concernant la proposition d'une ontologie spatio-temporelle pour la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels en imagerie satellitaire. Dans un premier temps, nous présentons le processus d'élaboration de l'approche proposée tout en se basant sur l'utilisation de différents niveaux d'ontologies : la réutilisation d'une ontologie de domaine de télédétection d'une part, la conception d'une ontologie des processus géographiques et l'exploitation d'une ontologie de haut niveau d'autre part. Ensuite, nous montrons le mécanisme d'ancrage proposé des ontologies permettant d'aboutir à une ontologie résultante.

Chapitre IV : Une nouvelle stratégie pour l'interprétation sémantique de changements en imagerie satellitaire

Dans ce chapitre, nous expliquons l'approche proposée pour l'interprétation sémantique de scènes d'images satellites qui sera utilisée pour l'interprétation de changement en imagerie satellitaire. Dans un premier temps, nous expliquons le mécanisme général d'interprétation sémantique d'images. Les points de vue de la notion de la sémantique sont ainsi soulignés et les différentes approches liées à l'interprétation sémantique d'images satellites sont étudiées. Ensuite, une grande partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation de la stratégie proposée pour l'interprétation de scène d'images satellites. Cette deuxième partie présente en détail les différentes composantes de l'architecture proposée et explique le processus suivi pour l'interprétation sémantique de scènes d'images qui se base essentiellement sur l'ontologie spatio-temporelle développée. Ainsi, nous montrons comment la méthodologie proposée permet l'interprétation de scènes d'images du niveau bas jusqu'au niveau de changement plus élevé.

Chapitre V : Expérimentation et évaluation de la méthodologie proposée

Ce chapitre présente le cadre applicatif de la méthodologie proposée pour l'interprétation sémantique de scènes d'images satellites. Nous présentons, en premier lieu la zone d'étude choisie pour étudier la dynamique des objets spatio-temporels et des phénomènes géographiques en par-

ticulier, l'urbanisation, la dégradation et la déforestation. Ensuite, nous illustrons les principaux résultats obtenus à la suite de l'application de l'approche. Enfin, nous évaluons et discutons la performance de cette approche.

Conclusion générale et perspectives

Le dernier chapitre fournit un bilan global des contributions apportées par nos travaux présentés dans cette thèse et présente un ensemble de futures orientations afin d'améliorer les performances et étendre les capacités des approches proposées.

Première partie

ÉTAT DE L'ART

Chapitre 1

Détection et suivi de changements des objets spatio-temporels en imagerie satellitaire

Sommaire

1.1	Introduction	11
1.2	Imagerie satellitaire	11
1.2.1	Processus général d'acquisition	12
1.2.2	Les résolutions d'images satellitaires	12
1.2.3	Types d'images satellitaires	13
1.3	Détection de changement en imagerie satellitaire	14
1.3.1	Changement d'occupation et d'utilisation des sols	14
1.3.2	Détection de changement	16
1.3.3	Processus de détection de changement	16
1.3.3.1	Nature des problèmes de détection de changements	16
1.3.3.2	Sélection des données de télédétection	17
1.3.3.3	Prétraitement d'images	17
1.3.3.4	Traitement ou classification des images satellites	17
1.3.3.5	Sélection des techniques de détection de changement	19
1.3.3.6	Évaluation des résultats de détection de changement	24
1.4	Suivi de changements en télédétection	25
1.4.1	La télédétection en tant qu'outil potentiel pour suivre les changements	25
1.4.2	Exemples de travaux de suivi de changements	25
1.5	Conclusion	29

1.1 Introduction

Depuis longtemps, la surface de notre globe terrestre est en perceptuelle évolution dynamique suite à des phénomènes naturels ou à des activités humaines. Les incendies, les éclaires, les tempêtes, l'agro-foresterie, l'expansion agricole, la croissance urbaine et d'autres facteurs sociaux-économiques ou technologiques sont des exemples de facteurs qui ont provoqué des changements dans la surface de la Terre. En conséquence, des outils et stratégies ont été mises au point pour étudier et analyser les changements qui peuvent se produire à fin de souligner et de mettre en place les politiques de décisions permettant de protéger notre globe terrestre de différents risques et catastrophes naturelles. Dans ce premier chapitre, nous commençons par présenter un aperçu général sur l'imagerie satellitaire dont le quel nous définissons les concepts et les termes relatif à ce domaine. Ensuite nous présentons une étude bibliographique, non exhaustive, sur les différentes approches utilisées pour la détection et le suivi de changements en particulier dans le domaine de télédétection.

1.2 Imagerie satellitaire

Avec les progrès réalisés en matière de géocapteurs, les images satellitaires sont devenues une source majeure pour le suivi et la détection de changement. En effet, la télédétection fournit une énorme quantité de données précieuses sur la surface de notre planète, y compris des photographies aériennes, des images satellites, un ensemble de données spatiales et d'autres données. La disponibilité accrue des images satellites de moyenne à fine résolution depuis le début des années 1990 offre une variance de données répétitive entre eux en termes de résolution spatiale, radiométrique, spectrale, temporelle et de vue synoptique [Stoney, 2006]. L'ensemble de satellites, utilisés en télédétection pour observer notre globe terrestre, est équipé par différents types de capteurs pour enregistrer des rayons de la surface cible observée. Ces capteurs mesurent des objets étudiés dans une bande donnée de longueur d'onde [Michel-Claude and Colette, 1999]. Généralement, ils existent deux types de capteurs : les capteurs passifs et les capteurs actifs [TERRE, 2013]. Les capteurs passifs perçoivent l'énergie du soleil réfléchi et l'énergie émise naturellement par l'objet cible. Les capteurs passifs quant à eux envoient leur propre énergie et recueillent l'énergie réfléchi par la cible.

Tous ces facteurs ont fait des données de télédétection une source principale pour diverses applications de télédétection, y compris le changement de l'occupation des sols [Cardille and Foley, 2003]. Dans cette section, nous exposons les différents aspects liés à l'imagerie satellitaire à savoir : le processus d'acquisition des images satellites, les types d'images satellites et leurs différentes résolutions, ensuite, nous montrons le rôle de l'imagerie satellitaire pour le suivi et la détection de changement.

1.2.1 Processus général d'acquisition

La télédétection regroupe l'ensemble des moyens permettant l'acquisition, la mise en disposition, l'analyse, le traitement et l'interprétation des images satellites. Une définition populaire pour cette discipline est donnée par le centre canadien de cartographie et d'observation de la Terre comme : « la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. Elle englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information ». Dans cette section, une présentation du processus général d'acquisition des images satellites par des capteurs passifs sera discutée. En effet, d'après [Pouget, 2005], le processus général de la télédétection est décomposé de la manière suivante :

1. Source d'énergie : le soleil représente généralement la source d'énergie pour les capteurs passifs;
2. Les rayonnements : l'énergie traverse l'atmosphère pour atteindre la cible;
3. La cible : avec laquelle l'énergie émise interagit. La cible est la surface de la Terre observée;
4. L'énergie émise ou réfléctée par la surface observée traverse l'atmosphère jusqu'au capteur embarqué dans le satellite;
5. Le satellite d'observation recueille et enregistre l'énergie par le capteur après discrétisation;
6. Le satellite transmet l'énergie enregistrée à une station de réception;
7. La station de réception reçoit l'information du satellite et la transforme en image(s) numérique(s). Cette image sera interprétée et analysée visuellement et/ou numériquement.

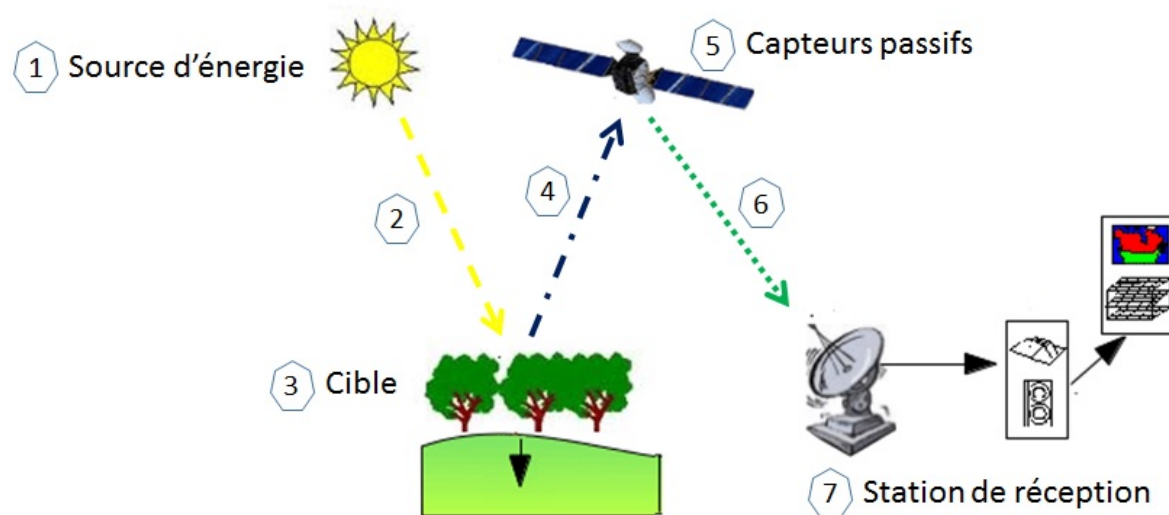


FIGURE 1.1 – Illustration du processus général d'acquisition. [TERRE, 2013]

Alors, les images satellites sont donc obtenues par différents satellites d'observation de la terre tout en suivant les étapes de processus de télédétection. En conséquence, plusieurs types d'images sont acquises en fonction du satellite mis en question et de la résolution de son capteur. Dans ce qui suit, nous présentons l'ensemble des résolutions caractérisant un capteur, les différents satellites d'observation de la Terre et les types d'images satellites.

1.2.2 Les résolutions d'images satellitaires

Un capteur est caractérisé par quatre types de résolutions : la résolution spectrale, spatiale, temporelle et radiométrique. La résolution est employée, en cas d'image, pour désigner l'aptitude d'un instrument à rendre distincts deux points voisins.

— **Résolution spatiale**

La résolution spatiale (appelée également résolution géométrique) est définie par la plus petite distance entre deux objets adjacents qu'un capteur peut identifier. Elle désigne aussi la taille de ce que représente un pixel par rapport à la surface de la Terre. C'est par exemple, un pixel représentant une surface carrée de taille 5 m, on parle d'une résolution de 5 mètres. Les objets spatiaux de petite taille, comme les bâtiments et les petites parcelles, ne peuvent pas être distingués par une résolution spatiale grossière. Mais une résolution spatiale élevée autorise la distinction de ces objets.

— **Résolution spectrale**

La résolution spectrale d'un satellite indique le nombre de bandes spectrales qu'un satellite est capable de détecter et les intervalles (fenêtres) sur chacune de ses longueurs d'onde. Plus la résolution spectrale est fine, plus les fenêtres des différents canaux du capteur sont étroites. La résolution spectrale nous permet aussi de connaître le type de capteur utilisé par un satellite : capteur multi-spectral, capteur hyperspectral, etc.

— **Résolution temporelle**

La résolution temporelle désigne la période du temps que prend un satellite pour revisiter la même cible observée à partir de la même position. Pour la plupart des satellites, cette résolution dépend généralement de l'orbite qui définit la fréquence de passage de la plate-forme au-dessus du même point de la surface terrestre, la capacité du satellite et de l'attitude.

— **Résolution radiométrique**

La résolution radiométrique indique la capacité des capteurs du satellite à reconnaître de petites variations dans l'énergie électromagnétique. En télédétection, les données sont numérisées et enregistrées sous la forme d'un nombre numérique positif (**nombre digital – ou Digital Number– (DN)**) qui varie de zéro à une puissance de 2 sélectionnée. Le nombre maximal de niveaux de luminosité dans une image dépend du nombre de bits utilisés par le capteur pour représenter les informations spectrales. Par exemple, si une image a une résolution de 4 bits, il y aurait $2^4 = 16$ valeurs numériques allant de zéro à 15. Plus la résolution radiométrique est fine, plus le capteur est sensible à des petites différences dans l'intensité de l'énergie reçue et plus la résolution radiométrique est élevée, plus un capteur est capable de différencier de petites variations d'énergies.

1.2.3 Types d'images satellitaires

Différents types d'images satellitaires sont recueillies par les satellites d'observation de la terre. Ces images sont classées en fonction de la nature des capteurs optique et radar embarqués au bord des satellites et en fonction de nombre de bandes d'observation. Elles dépendent aussi de

l'application qu'on souhaite obtenir. Nous présentons ici les différents types d'images en fonction des bandes spectrales :

— *L'image monospectrale (ou panchromatique)*

Une image monospectrale est une image en "niveau de gris" où la valeur de chacun des pixels est comprise entre 0 et 255. Ce type d'image est obtenu à partir de l'enregistrement du rayonnement dans un intervalle unique de longueur d'onde (fenêtre spectrale). Lorsque la fenêtre spectrale utilisée est de caractéristiques étroites, on parle des images spectrales. Quand la fenêtre est plus large, on utilise le terme images panchromatiques. Les images panchromatique offrent une résolution spatiale très importante. Cela permet de obtenir des informations géométriques telles que la forme, la surface et le périmètre.

— *L'image multi-spectrale*

Une image multi-spectrale est peut-être définie comme une collection d'images mono-spectrale de la même scène, où le nombre de bandes utilisées ne dépasse pas généralement 10. Autrement dit, elle est obtenue par des enregistrements d'un petit nombre de bandes spectrales. Ainsi, les valeurs des pixels constituant l'image sont réparties sur l'ensemble des bandes composant l'image. Dans ce cas, un pixel est représenté par un vecteur de valeur à l'inverse de l'image mono-spectrale (une seule valeur). Les informations obtenues à partir des images multi-spectrales sont à caractère "qualificatif" (utilisées par exemple pour la classification des types de végétation).

— *L'image hyper-spectrale*

Une image hyper-spectrale est une image qui contient une centaine de bandes ou plus. Elle est obtenue à partir d'un ensemble de bandes de longueurs d'onde différentes. Ce type d'images fournit des informations plus précises sur les propriétés spectrales de la scène observée. Le traitement des images hyper-spectrales est plus complexe que les images multi-spectrales vu leur grande dimension.

Les images satellites sont représentées généralement sous forme des matrices contenant les valeurs numériques des pixels de ces images. En plus, elles sont accompagnées par d'autres informations représentées souvent sous forme de « **métadonnées** » (Figure 1.2). Une métadonnée, au sens large, est une information portant sur une autre information. D'après le Consortium du Web—ou *World Wide Web Consortium*— (W3C), une métadonnée est une information compréhensible par une machine portant sur une ressource web ou d'une autre nature (**Metadonnée**). En ce qui concerne l'image satellitaires, une métadonnée fournit de nombreuses informations à savoir sur le format ou sur l'affichage des données (par exemple, l'information sur la localisation du satellite lors de la prise de vue et sur l'éclairement solaire dans chaque bande spectrale), ou bien elle peut contenir des informations relatives au format des données au niveau de prétraitements, au système de coordonnées, etc. Une métadonnée fournit donc des connaissances contextuelles sur les images en questions nécessaires pour l'analyse et l'interprétation de ces images.


```
<global_metadata>
<data_provider>USGS/EROS</data_provider>
<satellite>LANDSAT_8</satellite>
<instrument>OLI_TIRS</instrument>
<acquisition_date>2013-06-28</acquisition_date>
<scene_center_time>18:40:39.8204854Z</scene_center_time>
<level1_production_date>2014-11-13T15:01:34Z</level1_production_date>
<solar_angles zenith="24.733788" azimuth="131.660614" units="degrees"/>
<wrs system="2" path="43" row="31"/>
<lpgs_metadata_file>LC80430312013179LGN00_MTL.txt</lpgs_metadata_file>
<corner location="UL" latitude="42.801350" longitude="-120.700400"/>
<corner location="LR" latitude="40.691440" longitude="-117.783500"/>
<west>-120.700594</west>
<east>-117.783319</east>
<north>42.858456</north>
<south>40.638480</south>
</bounding_coordinates>
<projection_information projection="UTM" datum="WGS84" units="meters">
<corner_point location="UL" x="197400.000000" y="4745400.000000"/>
<corner_point location="LR" x="433800.000000" y="4504800.000000"/>
<grid_origin>CENTER</grid_origin>
<utm_proj_params>
<zone_code>11</zone_code>
</utm_proj_params>
</projection_information>
<orientation_angle>0.000000</orientation_angle>
</global_metadata>
```

FIGURE 1.2 – Exemple de métadonnées.

1.3 Détection de changement en imagerie satellitaire

1.3.1 Changement d'occupation et d'utilisation des sols

Selon, [Barnsley et al., 2003] les changements de surface de la Terre se divisent en deux catégories : l'utilisation des sols et l'occupation des sols. L'occupation des sols décrit l'état physique de la surface terrestre, qui comprend les terres cultivées, les forêts et les zones humides, mais elle s'est élargie pour contenir des structures humaines telles que les bâtiments, les trottoirs et autres aspects de l'environnement naturel, y compris le type de sol, la biodiversité, l'eau de surface et les eaux souterraines [Cheng et al., 2008]. Alors que l'utilisation des sols fait référence à la manière dont les êtres humains exploitent la terre et ses ressources, y compris l'agriculture, le développement urbain, l'exploitation forestière, etc.

Indépendamment de l'utilisation des termes d'utilisation des sols et d'occupation des sols, le changement d'utilisation/occupation des sols—ou *Land-use/land-cover*— (LULC) est défini comme la transformation du sol ou le remplacement d'un type de couverture terrestre sur la surface de la Terre [Meyer and Turner, 1992]. Selon [Lambin and Ehrlich, 1997], il existe trois causes majeures de changements de LULC, avec des taux et des échelles différents : les facteurs biophysiques, les considérations technologiques et économiques et les arrangements institutionnels et politiques. Connaître les formes de l'utilisation/l'occupation des sols pour une région donnée permet déterminer les causes et les résultats du changement en relation avec les activités humaines [Cardille and Foley, 2003]. En conséquences, l'identification et l'analyse des informations sur le change-

ment de LULC sont nécessaires pour la gestion des ressources naturelles et à la prédiction des trajectoires d'occupation du sol [Giri et al., 2003]. En plus, elles permettent de connaître les différents changements qui surviennent, où et quand ils se produisent, les taux auxquels ils se produisent et les facteurs sociaux et physiques qui entraînent ces changements [Lambin et al., 2003].

Dans la littérature, les auteurs ([Lambin et al., 2003], [Turner et al., 1995]) distinguent généralement deux formes de changement de LULC : la conversion et la modification. La conversion désigne le remplacement complet d'un type d'occupation de sol par un autre, par exemple, la conversion des zones forestières en zones agricoles (la déforestation). Au contraire, la modification concerne les changements les plus subtils qui affectent le caractère d'une occupation de sol sans en modifier sa classification globale. L'évolution d'une forêt non aménagée vers une aménagée et l'intensification agricole sont des exemples de modification. Les modifications d'occupation de sol sont généralement plus fréquentes que les conversions d'occupation de sol. Certaines modifications de l'écosystème sont induites par l'homme, par exemple l'enlèvement des arbres pour l'expansion agricole. D'autres ont des origines naturelles résultant, par exemple, d'inondations et d'épidémies de maladies.

Les informations de changements de LULC sont utiles pour divers domaines, notamment la déforestation, l'évaluation des dommages, le suivi des catastrophes, le suivi des changements de surfaces, le suivi de la progression spatiale de la végétation, l'expansion urbaine, la planification et la gestion des sols, etc. Généralement des méthodes traditionnelles et les techniques de télédétection sont utilisés pour extraire des informations de changements de LULC. Cependant, les méthodes traditionnelles telles que les enquêtes de terrain, l'interprétation des cartes, l'analyse des données collatérales et auxiliaires ne sont pas efficaces pour acquérir des changements LULC car elles prennent du temps sont retardées et souvent trop chères [Allen et al., 2013]. Tandis que la technologie de télédétection inclut l'utilisation des photographies aériennes, des images satellitaires, des séries de données spatiales et d'autres données [Paradzayi et al., 2008], constitue un moyen beaucoup plus rentable et plus rapide pour étudier les changements de LULC, en particulier sur les zones régionales ou nationales, par rapport aux méthodes traditionnelles [Nordberg and Evertson, 2003]. Dans ce qui suit, nous montrons l'importance de l'imagerie satellitaire pour le suivi de changement d'occupation des sols.

1.3.2 Détection de changement

En général, la détection de changement implique l'utilisation d'un ensemble de données multi-temporelles pour produire une analyse quantitative de la répartition spatiale de la population d'intérêt. [Singh, 1989] a défini la détection de changement comme « le processus d'identification des différences d'état d'un objet ou d'un phénomène en l'observant à des moments différents ». Ce processus est généralement appliqué aux changements de surface de la Terre à deux reprises ou plus. Ainsi, la détection de changement est un processus utile dans de nombreuses applications telles que les changements d'occupation des sols, la fragmentation de l'habitat, le taux de déforestation, les changements côtiers, l'expansion urbaine et d'autres changements cumulatifs.

1.3.3 Processus de détection de changement

[Jensen, 2005] a mentionné six étapes principales et importantes pour la détection de changements de LULC en utilisant les données de télédétection. Les différentes étapes sont présentées dans figure 1.3. Nous présentons dans ce qui suit chacune de ces étapes en plus de détail.



FIGURE 1.3 – Les étapes principales de processus de détection de changement.

1.3.3.1 Nature des problèmes de détection de changements

Cette étape consiste à définir la zone d'étude et identifier la nature des problèmes de changements. Identifier la nature des problèmes de changement consiste à savoir quels sont les problèmes de détection de changements? et quel type de changement à considérer? En général, il existe trois catégories majeures qui permettent de définir la nature des problèmes de détection de changements ([Lu et al., 2004], [Sui et al., 2008], [Gao, 2008]) détection de changement binaire, détection de changement multi-classes et détection de changements dans de longues séries temporelles d'images. Le changement binaire (appelé aussi changement vs non-changement) a pour objectif la production des cartes binaires dans lesquelles les zones changées et non-changées sont séparées ([Frauman and Wolff, 2005], [Im et al., 2007], [Liu et al., 2018]). Ce type de détection changement utilise généralement deux paires d'images extraites d'une série temporelle. La détection des changements abrupts est un exemple d'application de ce type de détection de changement. Le changement multi-classes, appelé aussi changement au niveau thématique, définit des changements détaillés « de-à » entre les différentes classes [Ouma et al., 2008]. Il utilise aussi deux paires d'images extraites d'une série d'images pour générer une carte de détection de changement dans laquelle les transitions d'occupation du sol sont explicitement identifiées. La mise à jour des cartes thématiques et la détection de multiples changements sont des exemples applications associées à ce type de changements. Les changements dans de longues séries temporelles d'images ou encore les changements détaillés définissent en détail les changements spatiaux en nouvel objet et objet disparu [Zhang and Couloigner, 2004] et les trajectoires des changements [Zhou et al., 2008]. Ce type de changement a pour objectif la détection des changements associés à la modification

du comportement de la signature temporelle d'une couverture terrestre entre deux séries temporelles (détection des changements à long terme). Généralement, le nombre d'images utilisées dans ce type de changement est égal à deux séries temporelles composées de n images (avec $n \gg 2$). Le domaine d'application pour le changement détaillé inclut le suivi des changements saisonniers/annuels. Le type de changement au niveau détaillé est considéré le plus difficile et il est placé au plus haut niveau des types de changements. Il nécessite des algorithmes de détection de changement plus efficaces et des sources des données plus complètes.

1.3.3.2 Sélection des données de télédétection

La détection des changements implique l'application d'ensembles de données multi-dates pour une analyse quantitative des effets temporels des phénomènes à détecter. La sélection des données est une étape cruciale dans une étude de détection de changement. Généralement, les données sont collectées soit à partir des images satellitaires et/ou d'enquêtes sur terrain. En conséquence, des conditions doivent être soulignées avant la mise en œuvre de l'analyse de détection de changement, il est donc important d'acquérir les données de détection de changements les plus appropriées [Jensen, 2005]. Les images utilisées doivent être issues du même capteur et que des opérations de calibrage radiométrique et atmosphérique de différentes images multi-temporelles doivent être réalisées. Par exemple, la scène à étudier doit être de bonne qualité radiométrique, la couverture nuageuse doit être minimale et bien sûr elle doit couvrir toute la zone d'intérêt. Une autre condition exige l'utilisation de la même résolution spatiale et spectrale des images multi-temporelles. Il faut noter aussi que le choix des images est parfois dirigé par le but et le contexte de la recherche, par exemple pour étudier le phénomène de déforestation, il est nécessaire d'utiliser une scène d'image qui contient une forêt.

1.3.3.3 Prétraitement d'images

Le prétraitement des images satellites avant la détection du changement est essentiel et a pour objectif unique d'établir un lien plus direct entre les données et les phénomènes biophysiques [Coppin et al., 2004]. Ainsi, une étape de prétraitement, qui tente de faire minimiser les différents effets dans la mesure souhaitée pour une application particulière, est donc nécessaire pour de meilleures analyses et interprétations des images satellites. Les images satellitaires, en particulier les séries temporelles, sont souvent acquises par différents capteurs et sous différentes conditions atmosphériques et géométriques (par exemples, illumination solaire, angles de prise de vue). La normalisation radiométrique de ces images est donc nécessaire pour enlever les distorsions radiométriques et pour les rendre comparables. Les effets d'artefacts, de directionnalité de surface et de l'atmosphère peuvent être corrigés d'une manière absolue ou relative.

1.3.3.4 Traitement ou classification des images satellites

Le traitement des images satellitaires implique généralement des opérations comme la segmentation des images, l'extraction des caractéristiques et la classification. Nous présentons ci-

dessous une explication détaillée de chacune de ces opérations.

1. *Segmentation d'images satellites*

La segmentation est l'étape suivante après le prétraitement de l'image. D'après [Hay and Castilla, 2008], une segmentation est une partition de l'ensemble de l'image en un ensemble de régions mutuellement disjointes. Autrement dit, c'est le processus de subdivision d'une image numérique en plusieurs régions ou objets consistant en des ensembles de pixels partageant les mêmes propriétés ou caractéristiques auxquelles sont assignées des étiquettes différentes pour représenter différentes régions ou objets. Le but de la segmentation est de simplifier et/ou de changer la représentation d'une image en quelque chose de plus significatif et plus facile à analyser [Acharya et al., 2013].

2. *Extraction des caractéristiques*

L'extraction des caractéristiques est le processus pour lequel certaines caractéristiques d'intérêt dans une image sont détectées et représentées pour un traitement ultérieur. La représentation résultante peut être ensuite utilisée comme entrée pour un certain nombre de techniques de reconnaissance de formes et de classification, qui vont ensuite labéliser, classer ou reconnaître le contenu sémantique de l'image ou de ses objets. Cette étape aide à réduire la complexité des problèmes de classification et en conséquence la classification peut être rendue plus efficace [Comaniciu and Meer, 2002]. Différents types de caractéristiques tels que la texture, le contour, la géométrie, la couleur, etc., peuvent être présentes et extraites d'une image.

- **Texture** : c'est le motif visuel formé par une disposition de couleur ou une homogénéité d'intensité importante. Elle contient des informations importantes sur la disposition structurelle des surfaces et leur relation avec l'environnement. Les représentations communes des informations de texture incluent : la représentation de la matrice de co-occurrence [Haralick et al., 1973], la rugosité, le contraste, la directionnalité, la régularité, les mesures de rugosité [Tamura et al., 1978], l'utilisation du filtre de Gabor [Manjunath and Ma, 1996].
- **Caractéristiques géométriques** : elles incluent des caractéristiques comme la forme, la taille et la localisation des objets du monde réel.
- **Le contour** : c'est un repère visuel important pour la détection et la reconnaissance d'objets dans une image. Cette information est obtenue en recherchant des contrastes nets dans les pixels proches. Les contours peuvent être regroupés pour former des régions.

3. *Classification d'images satellites*

Le but de l'étape de classification est de classer l'image segmentée en utilisant des caractéristiques extraites. La classification d'image vise à trouver une description qui décrit le mieux les images d'une classe et à distinguer ces images de toutes les autres classes. Cette étape utilise une analyse statistique des caractéristiques et des algorithmes d'apprentissage automatique pour prendre une décision [Parikh and Shah, 2013].

En imagerie satellitaire, la classification peut s'appliquer soit sur les individus, soit sur des groupes de pixels ou bien sur l'image en entier. D'après [Pouget, 2005], la classe

d'appartenance de chaque pixel est définie en fonction de sa valeur dans une ou plusieurs bandes. L'attribution d'une classe thématique (végétation, eau, urbaine, etc.) rapproche l'image de sa description sémantique. Généralement, deux grandes catégories de techniques de classification d'images incluant la classification non supervisée et supervisée sont distinguées.

— **Classification non supervisée :**

Ce type de classification groupe initialement les pixels en clusters en se basant sur leurs propriétés. Les résultats obtenus sont basés sur l'analyse logicielle d'une image sans que l'utilisateur fournisse des classes d'échantillons. L'ordinateur utilise des algorithmes pour déterminer quels pixels sont liés et les regroupe en classes. Exemples des algorithmes utilisés sont : l'algorithme *K-means* et *ISODATA*. Dans une deuxième étape, chaque *cluster* est identifié manuellement avec des classes de couverture terrestre (végétation ou non-végétation par exemple).

— **Classification supervisée :**

Cette classification est basée sur l'idée qu'un utilisateur peut sélectionner des pixels échantillons, appelés données-tests, dans une image représentative de classes spécifiques. Ensuite, l'algorithme de classification utilise ces données d'apprentissage comme références pour la classification de tous les autres pixels de l'image. Il faut noter ici que l'ensemble de données de test est sélectionné en fonction des connaissances de l'utilisateur. La classification supervisée utilise la « signature spectrale » définie dans l'ensemble d'apprentissages pour déterminer chaque classe sur ce qu'elle ressemble le plus à l'ensemble d'apprentissages. Les algorithmes communs de classification supervisée sont la classification du maximum de vraisemblance et de la distance minimale.

1.3.3.5 Sélection des techniques de détection de changement

La détection de changements est affectée par des contraintes spatiales, spectrales, radiométriques et temporelles. Par conséquent, de nombreuses techniques et méthodes de détection des changements pour analyser et détecter les changements de LULC ont été proposées. Selon [Lu et al., 2004], les méthodes de détection de changement sont classées en deux catégories : les techniques de détection des changements pré-classification (pre-classification) et après-classification (post-classification).

— ***Techniques de pré-classification***

Ces techniques sont appelées aussi les techniques de détection binaire de changement ou non-changement. Elles utilisent directement des images satellitaires multi-datées pour générer des cartes de "changement" vs "non-changement". Autrement dit, ces techniques cherchent à localiser si un changement a été produit ou non. Plusieurs techniques de pré-classification ont été utilisées pour l'évaluation et l'identification des changements de LULC.

La différenciation d'images est l'une des méthodes appartenant aux techniques de pré-classification. Elle consiste à soustraire les valeurs radiométriques des images. Le résultat d'une soustraction est

une nouvelle image comprenant des informations sur les changements recherchés. Cette technique est très simple à utiliser. Cependant, elle présente certaines limites, comme la difficulté de la séparation des pixels changés et non changés, la sensibilité à la qualité de la superposition des images et la difficulté d'obtention de la nature des changements [Lunetta and Elvidge, 1999]. La différenciation d'images a été utilisée pour la détection de changement dans la couverture du sol urbaine [Quarmby and Cushnie, 1989] et pour la détection des changements dans les écosystèmes forestiers ([Coppin and Bauer, 1996], [Hayes and Sader, 2001]). [Chavez and MacKinnon, 1994] ont utilisé la technique de différenciation d'images pour une détection automatique des changements de végétation dans le sud-ouest des États-Unis.

La division d'images est une autre technique de pré-classification, qui similaire à la différenciation d'images, mais qu'elle consiste à diviser deux bandes spectrales identiques des images en question pour avoir une nouvelle image de changements. Elle est aussi facile à réaliser et qu'elle partage les mêmes limite de la technique (Images Differencing ID). Cette technique a été utilisée par [Howarth and Wickware, 1981] pour la détection des changements environnementaux.

Une autre technique est appelée analyse de vecteur de changement (Improved Change-Vector Analysis) qui se base sur un espace de n variables spectrales pour déterminer un vecteur de changements entre deux dates (date 1 et date 2). Cette technique produit une image d'intensité qui indique l'importance des changements et une image de direction du changement qui peut être utilisée pour classifier les types changements. L'analyse de vecteur de changement possède la capacité de traiter un nombre quelconque de bandes spectrales souhaitées et à produire des informations détaillées sur la détection des changements. Cependant, il est difficile d'identifier des changements complexes comme les trajectoires de changements de la couverture terrestre avec cette technique et qu'elle est sensible à l'erreur géométrique et à la différence radiométrique des images d'origine. Cette méthode a été utilisée dans diverses études, notamment le suivi de la couverture des sols [Johnson and Kasischke, 1998] la détection des changements de LULC ([Chen et al., 2003], [Green et al., 1994], [Wen and Yang, 2009]), la détection des changements forestiers [Nackaerts et al., 2005] et l'évaluation des catastrophes [Bayarjargal et al., 2006].

D'autres méthodes de pré-classification incluent la méthode d'analyse en composantes principales (ACP), la méthode de détection de changement RVB-indice de végétation par différence normalisé –ou *Normalized Difference Vegetation Index*– (NDVI), la régression d'images et la transformation de Tasseled Cap sont aussi utilisées pour la détection des changements de LULC.

Selon [Lu et al., 2004], le principe de base de ces techniques consiste à mesurer la nature des changements, ce qui signifie des changements dans les caractéristiques d'intérêt qui entraîneront des changements dans les valeurs de rayonnement ou de réflectance. La plupart des techniques de pré-classification sont identifiées comme les techniques de détection des changements les plus précises car, elles sont simples, efficaces pour identifier et localiser les changements et sont faciles à implémenter [Sunar, 1998]. Cependant, trois aspects sont essentiels pour les techniques de pré-classification : la sélection des seuils (qui demande une grande maîtrise des techniques), étant sensibles au mauvais recalage des pixels et elles ne peuvent pas fournir des détails sur la nature du changement [Lu et al., 2004].

— *Techniques de post-classification*

Cette deuxième famille (également appelée niveau thématique de changement) permet l'identification de changement détaillé "de-à-". [Foody, 2002] a prouvé que la comparaison de post-classification s'est avérée être l'approche la plus populaire dans l'analyse de la détection des changements. Cette approche repose sur la rectification de plusieurs images classifiées; où cela implique la classification de chacune des images indépendamment, ensuite des cartes thématiques sont générées, suivies par une comparaison des étiquettes ou des thèmes correspondants pour identifier les zones où des changements ont eu lieu. La figure montre le principe général suivi par l'approche de comparaison post-classification.

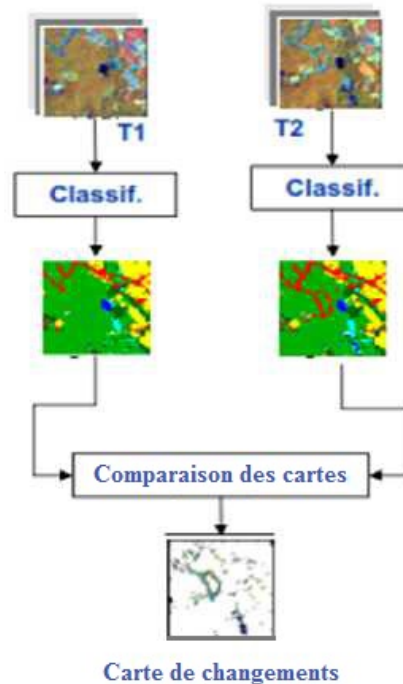


FIGURE 1.4 – Le principe de comparaison post-classification.

Plusieurs travaux présentés dans la littérature ont utilisé l'approche de comparaison de post-classification. Par exemple, les auteurs ([Diallo et al., 2009], [Bayarsaikhan et al., 2009], [Torahi and Rai, 2011]) ont utilisé des techniques de détection des changements de post-classification basée sur la classification supervisée du maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood Supervised Classification) pour la détection des changements de LULC et ils ont conclu qu'elles étaient très précises pour diverses données. [Diallo et al., 2009] ont appliqué les techniques de la classification supervisée du maximum de vraisemblance et de détection des changements post-classification sur des images Landsat pour cartographier et suivre les changements de la couverture des sols et de l'utilisation des sols dans la zone côtière du nord-ouest de l'Égypte. [Sun et al., 2009] ont utilisé la méthode de l'approche de comparaison de post-classification basée sur l'algorithme du maximum de vraisemblance pour déterminer les changements d'utilisation du sol dans le bassin de Datong, en Chine, en utilisant des données Landsat multi-temporelles. De même, la procédure de vraisemblance maximale (ML) et les images de post-classification fusionnées de la classification des données Landsat Thematic Mapper (TM) et Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) ont été utilisées par [Fan et al., 2007] d'une manière efficace pour rechercher les changements de LULC d'une façon dynamique. Récemment, cette technique est aussi exploitée par [Akyürek et al., 2018a] pour la détection et le suivi de changement de LULC tout en utilisant des ensembles

d'images multi-temporelles acquises à partir des satellites Landsat 8 OLI/TIRS (Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) et Sentinel 2A MSI (Multi Spectral Instrument) respectivement.

Selon ([Lu et al., 2004], [Jensen, 2005], [Teng et al., 2008]), la technique de post-classification présente plusieurs avantages : elle minimise les différences entre les capteurs, l'atmosphère et l'environnement, car les données provenant de deux dates sont classées séparément, minimisant ainsi le problème de normalisation des différences atmosphériques et de détection entre deux dates et fournissant une matrice complète lors de l'utilisation de plusieurs images. Cependant, les résultats obtenus à partir de cette méthode ne sont aussi précis que les images de classification individuelles elles-mêmes ([Civco et al., 2002], [Coppin et al., 2004], [Jensen, 2005]). C'est-à-dire, la qualité de ces résultats dépend en particulier de l'exactitude de chacune des classifications. De plus, cette méthode pourrait conduire à des résultats erronés, par exemple ils ont tendance de surestimer les changements, en particulier lors de l'utilisation d'images multi-date ou multi-capteurs en raison des différences dans les caractéristiques radiométriques des images à partir desquelles des cartes thématiques ont été obtenues [Foody, 2002]. Pour surmonter ces limites, des auteurs ont combiné ces techniques avec des méthodes de pré-classification à savoir la soustraction d'images, l'analyse de vecteur de changements et l'analyse de texture.

— *Techniques hybrides*

Les deux familles de détections de changements précédentes se focalisent sur les changements de types changement/non-changement et de-à à travers l'utilisation d'une technique individuelle, cependant chaque technique individuelle est associée avec des avantages spécifiques. Selon ces auteurs ([Jensen, 2005], [Chen et al., 2013] et [Cassidy et al., 2013]), la combinaison de plus d'une technique est préférable pour aboutir à une performance meilleure comparée aux techniques individuelles employées. Généralement, de telles techniques hybrides peuvent être appliquées de deux manières [Deilami et al., 2015] : la combinaison d'un certain nombre de techniques en une seule technique de détection de changements ou la combinaison des résultats de de détection de changements à partir d'un certain nombre de techniques dans un nouveau résultat en utilisant des règles spécifiques telles que la fusion au niveau de la décision [Lu et al., 2008].

[Lu et al., 2008] ont combiné la détection de « changement/non-changement » binaire avec la technique de comparaison post-classification pour étudier la dégradation/restauration de la végétation à travers l'Amazonie au Brésil à l'aide de données extraites des satellites Landsat TM et Système Pour l'Observation de la Terre (SPOT). Les auteurs ont utilisé l'ACP pour intégrer les données panchromatiques TM et SPOT, suivie d'une technique de différenciation d'image basée sur l'image fusionnée et l'image TM originale pour produire la croissance/dégradation de la végétation. Ici, une procédure basée sur des règles a été appliquée pour classifier les images multi-spectrales Landsat TM et SPOT en trois classes de couvertures du sol, à savoir les forêts, la végétation non forestière et les terres non végétales, suivies de la technique de comparaison post-classification pour la détection les principaux changements de LULC.

L'avantage de la méthode hybride est d'utiliser pleinement des vertus de nombreux algorithmes et d'obtenir de meilleurs résultats de détection de changement qu'une méthode unique. Cependant, pour des cas d'application spécifiques, la sélection des méthodes hybrides est difficile et

il est confus d'harmoniser les conflits de résultats de détection causés par différentes méthodes [Jianya et al., 2008]. Ces problèmes entraînent un algorithme complexe et une faible efficacité.

En conclusion, un grand nombre de techniques de détection de changements ont été proposées pour la mise en œuvre d'un grand nombre de détections de changements. Le tableau 1.1 présente un résumé des différentes méthodes de détection de changements. Cependant, aucune méthode unique n'est appropriée et universelle pour tous les cas d'application, même si, pour une application spécifique, le choix de la meilleure méthode est inconnu, qui est influencé par les différentes sources de données, la qualité de l'image, les caractéristiques de la zone d'étude, les connaissances des analystes sur les méthodes de détection des changements et l'habileté de la manipulation des données de télédétection [Jianya et al., 2008]. En raison de la difficulté d'identifier une méthode appropriée, différentes techniques de détection de changement sont souvent testées et comparées dans la pratique afin d'obtenir le meilleur résultat possible sur la base de l'évaluation de la précision (*accuracy assessment*) ou de l'évaluation qualitative [Lu et al., 2004].

Catégorie	Techniques	Avantage	Limites	Exemples
Pré-classification	Différence d'images	Simplicité de mise en œuvre, facile à interpréter les résultats	Ne peut pas fournir une matrice de changement détaillée. Exige une sélection de seuils, Pas d'information sur la nature du changement	Défoliation des forêts, Changement de couverture des sols et suivi des cultures irriguées
	Différence d'indices de végétation	Souligne les différences dans la réponse spectrale de différentes caractéristiques, réduit les impacts des effets topographiques et de l'éclairage	Sensible au bruit aléatoire ou bruit de cohérence	Changement de végétation, changement du couvert forestier
	Division d'images	Réduit les impacts de l'angle solaire, de l'ombre et de la topographie	Distribution non-normale du résultat souvent critique	Cartographie de l'utilisation des sols
	Tasseled Cap	Réduit la redondance des données entre les bandes, il est indépendant de la scène	Difficile à interpréter et à évaluer les informations de changement, pas d'information complète sur la nature de changement, exige la détermination de seuils pour identifier les zones modifiées.	Suivi de la mortalité forestière, suivi de la biomasse verte et changement d'utilisation des sols
	Analyse par vecteur de changement	Capacité de traiter tout nombre de bandes spectrales désirées, Information sur la nature du changement	Difficulté à identifier les changements trajectoires de l'occupation du sol	changements de couverture des sols et évaluation des catastrophes
Post-classification	Régression d'images	Réduction des impacts du capteur et des différences environnementales entre deux images acquises à deux périodes différentes de l'année	Sensibilité à la qualité de la superposition des images, Pas d'information sur la nature du changement	Changement de forêt tropicale et conversion de forêt
	Analyse en composantes principales (ACP)	Moindre sensibilité à la superposition des images, Réduit la redondance des données entre les bandes	Interprétation difficile des composantes, Pas d'information sur la nature du changement	Changement de couverture du sol, expansion urbaine et conversion de forêt tropicale
	Classification non supervisée	Moindre sensibilité à la superposition des images Possibilité d'identifier la nature du changement	Complexité de l'identification a posteriori des classes spectrales	Changement de forêt
	Classification supervisée	Moindre sensibilité à la superposition des images Possibilité d'identifier la nature du changement	Complexité de la phase d'apprentissage	Changements de LU/LC
	Classification visuelle	Correction radiométrique non nécessaire, Moindre sensibilité à la superposition des images, Avantages de l'interprétation visuelle	Information sur la nature du changement difficile à extraire	Changements de LU/LC, changement de forêt et suivi des zones de coupe sélectives
Hybrides	Combinaison : Pré-classification + Post-classification	Identification de la nature du changement, Possibilité d'intégrer des données de nature différente	Nécessite une grande quantité d'heures et d'expertise à créer des classifications, La précision finale dépend de la qualité de l'image classifiée de chaque date	Changements de LU/LC, changement des zones humides et expansion urbaine
		Exclusion des pixels non-changés de la classification afin de réduire les erreurs de classification	Choix des seuils à classifier, Complexité à identifier le changement trajectoire	Changements de LU/LC, changement de la végétation et suivi de la zostère

Tableau défini à partir de (Hussain et al., 2013), [Mishra et al., 2016] et [Marwaha et al., 2017].

TABLEAU 1.1 – Résumé des méthodes de détection des changements

1.3.3.6 Évaluation des résultats de détection de changement

L'objectif général de détection de changement dans l'imagerie satellitaire inclut l'identification de la localisation géographique et le type des changements, la quantification des changements et l'évaluation de la précision des résultats de DC ([Jensen, 2005], [Coppin et al., 2004]). L'évaluation des résultats de DC est la dernière étape dans le processus de DC. Les évaluations de la précision sont importantes pour comprendre les résultats de la détection des changements et utiliser ces résultats dans la prise de décision. Elles sont difficiles à réaliser parce que la précision de DC dépend de plusieurs facteurs, y compris le recalage géométrique précis et la calibration ou la normalisation, la disponibilité et la qualité des données de référence de terrain, la complexité du paysage et de l'environnement, les méthodes et les algorithmes utilisés, les compétences et l'expérience de l'analyste, ainsi que le temps et le coût des restrictions [Jianya et al., 2008].

Selon [Jianya et al., 2008], les techniques d'évaluation de la précision dans la détection des changements proviennent généralement de la classification des images de télédétection. La matrice d'erreur (en anglais, *error matrix*) est l'une des techniques d'évaluation la plus efficace et la plus courante d'évaluation de la précision. En plus, certaines méthodes alternatives ont également été utilisées pour analyser et évaluer la détection de changement de la couverture terrestre. Comme il est souvent difficile, voire impossible, de collecter des ensembles de données multi-temporelles de référence de terrain fiable, certaines approches alternatives doivent être utilisées pour évaluer la précision de la détection de changement. Il existe trois approches générales pour obtenir les références de terrain pour la détection de changement bi-temporel, à savoir (1) une enquête sur le terrain avec l'assistance des données Science de l'Information Géographique–ou *Heographic Information System*– (SIG) historiques, simultanées ou à proximité du temps, (2) des images haute résolution et (3) une interprétation visuelle. Chacune des trois méthodes a ses propres avantages et inconvénients et dépend de l'application en question [Jianya et al., 2008]. En outre, il faut plus d'efforts sur l'évaluation de la précision pour la détection de changement d'images de séquences de longue date, en particulier lorsque les données de référence de terrain sont insuffisantes ou impossibles à obtenir.

Actuellement, l'évaluation de la précision de la détection de changement est principalement basée sur les pixels et peu de travaux ont été réalisés pour évaluer la précision de la détection de changement au niveau des caractéristiques ou au niveau d'objets. La matrice d'erreurs est encore utilisée dans la plupart des études de détection de changements basées sur les objets et que [Hernando et al., 2012] ont affirmé qu'elle est établie pour une approche basée sur les pixels et qu'une approche de l'état de l'art pour l'évaluation de la précision basée sur les objets n'est pas disponible. Peu d'approches ont été développées récemment, incluent la mesure de la précision de la cartographie potentielle pour évaluer (avec une variable binaire) le nombre de segments de pixels correctement classés [Van Coillie et al., 2008], et une stratégie d'échantillonnage basée sur les objets de [Radoux et al., 2010]. Certains chercheurs ont utilisé des données ponctuelles pour vérifier la précision du changement. Il est relativement facile d'acquérir des points et de les superposer pour changer d'image ([Conchedda et al., 2008], [Im et al., 2008]). Aussi, il est possible d'évaluer les différentes propriétés des objets comme la taille, la forme et la variabilité de l'étendue des bornes et élaborer un cadre pour la validation de changement dans les études de détection de

changements basée sur des objets [Hussain et al., 2013].

1.4 Suivi de changements en télédétection

1.4.1 La télédétection en tant qu'outil potentiel pour suivre les changements

Les données de télédétection représentent une solution efficace pour cartographier et identifier les changements de LULC, en particulier pour l'évaluation de la déforestation ([Binh et al., 2005], [Schulz et al., 2010], [Mujtaba and Karam, 2017]), la détection de la dégradation et la désertification des sols ([Adamo and Crews-Meyer, 2006], [Gao and Liu, 2010]), la cartographie de la végétation [Xie et al., 2008], les changements de paysage des zones humides [Wang et al., 2009], la détection des changements urbains [Martínez et al., 2007] et pour d'autres applications.

Selon [Matinfar et al., 2007], la télédétection présente un outil utile pour l'interprétation et la gestion des ressources de la Terre et la détection des changements de LULC. En conséquence, des efforts considérables ont été faits pour délimiter les LULC à l'échelle locale et à l'échelle globale en appliquant données de télédétection multi-temporelles et multi-sources provenant de capteurs différents. L'information multi-temporelle est extraite d'une série d'images acquises à quelques jours, semaines, mois ou années d'intervalle. L'intervalle de temps entre les images est choisi de façon à surveiller un événement dynamique [TERRE, 2013]. Les événements catastrophiques (comme, les glissements de terrain, les inondations, les feux) nécessitent un intervalle de quelques jours, tandis que les événements plus lents (tels que la croissance urbaine, la disparition d'une zone forestière) requièrent quelques années d'intervalle. Multi-sources signifie que des informations différentes et complémentaires proviennent de différents capteurs. L'intégration et la fusion de ces informations peuvent faciliter l'analyse et l'interprétation des images.

1.4.2 Exemples de travaux de suivi de changements

Selon [Coppin et al., 2004], les techniques comme la comparaison post-classification, l'analyse composite, la différenciation des images, la division d'images, la transformation de données linéaire bi-temporelle (comme l'ACP) et l'analyse par vecteur de changement, sont le plus fréquemment utilisés pour le suivi de la couverture végétative, tandis que les autres algorithmes sont moins courants et/ou restent au stade expérimental [Coppin et al., 2004]. Un exemple de travaux significatif de l'utilisation de la méthode de comparaison post-classification est celui de [Hall et al., 1991a] dans lequel les images Landsat acquises en 1973 et 1983 ont été classées en cinq classes de succession forestière (coupe, régénération, feuillus, conifère et mixte). Dans ce travail, l'application de la normalisation basée sur les caractéristiques pseudo-invariantes [Hall et al., 1991b] a permis la classification de l'image (acquise en 1973) tout en utilisant les données de sol (c.-à-d., l'image de 1983) pour l'apprentissage du classifieur. Ensuite, après les deux classifications, une matrice de changements de classes sur un intervalle de 10 ans a été construite et les taux de transition entre les classes ont été calculés. De même, [Adepoju et al., 2006] ont adopté une approche de post-classification avec un algorithme de classification du maximum de vraisemblance dans le

but d'examiner l'évolution de l'utilisation des sols et de la couverture végétale à Lagos au cours des deux dernières décennies en raison de l'urbanisation rapide. L'algorithme de maximum de vraisemblance (Maximum likelihood algorithm : MLA) est l'une des méthodes de classification supervisée les plus populaires utilisées avec des données d'images de télédétection. Cette méthode est basée sur la probabilité qu'un pixel appartienne à une classe particulière. La théorie de base suppose que ces probabilités sont égales pour toutes les classes et que les bandes d'entrées ont des distributions normales. Cependant, selon [Rawat and Kumar, 2015], cette méthode nécessite beaucoup de temps de calcul, repose fortement sur une distribution normale des données dans chaque bande en entrée et a tendance à sur-classer les signatures avec des valeurs relativement grandes dans la matrice de covariance.

D'une manière similaire, [Rawat and Kumar, 2015] ont exploité la technique de post-classification pour le suivi de changement de l'utilisation/couverture des sols. Pour élaborer la classification de l'utilisation/couverture du sol, les auteurs ont utilisé une méthodologie de classification supervisée à savoir la technique du maximum de vraisemblance. Dans le but d'obtenir de meilleurs résultats de classification, les auteurs ont aussi calculé des indices tels que l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), l'indice indice d'eau par différence normalisé –ou *Normalized Difference Water Index*– (NDWI) et l'indice de construction par différence normalisée (NDBI) pour classer les images Landsat. Les paires d'images classifiées de deux décennies de données différentes ont été comparées à l'aide de tableaux croisés afin de déterminer les aspects qualitatifs et quantitatifs des changements survenus pour les périodes de 1990 à 2010. Récemment, [Akyürek et al., 2018b] ont présenté une approche pour le suivi de changements de l'utilisation/couverture des sols en particulier dans les zones forestières et les plans d'eau en utilisant deux différents ensembles de données d'images satellitaires. Dans leur travail, la méthode de classification supervisée, maximum de vraisemblance et différents indices spectraux est appliquée à la fois sur les deux ensembles de données d'images Landsat-8 (2013-2017) et Sentinel 2A (2015-2017) pour illustrer les changements totaux et annuels.

En se basant sur le principe de l'analyse composite, [El Gammal et al., 2010] ont utilisé plusieurs images prises à différentes dates (1972, 1982, 1987, 2000, 2003 et 2008) et ont traité ces images avec les logiciels ERDAS et ARC-GIS afin d'analyser les changements dans les rives du lac et dans son volume d'eau. [Rimal, 2011] a présenté une analyse des changements sur la base des statistiques extraites de quatre cartes de couvertures/d'occupation des sols de la région métropolitaine de Katmandou tout en utilisant le SIG. Selon lui, les statistiques d'utilisation des terres et les matrices de transition sont des informations importantes pour suivre et analyser les changements d'utilisation des sols. [Rawat et al., 2014] ont réalisé une étude sur l'utilisation/occupation des sols de cinq grandes villes (Ramnagar, Nainital, Bhimtal, Almora et Haldwani) (Inde). Dans ce travail, les auteurs ont fait une analyse des changements de l'utilisation/occupation des sols sur la base de 20 années de données satellitaires de 1990 à 2010 et ils ont constaté que la zone de construction avait fortement augmenté en raison de la construction de nouveaux bâtiments sur des terres agricoles et végétales. Bien que cette technique ne nécessite qu'une seule classification, elle est très complexe, en partie à cause de la dimensionnalité ajoutée de deux dates de données [Coppin et al., 2004]. De plus, il nécessite des connaissances *a priori* sur les relations logiques entre les classes et ne doit être utilisé que lorsque le chercheur connaît intimement le domaine d'étude

[Jensen, 1981].

[Banner et al., 1981] ont montré l'utilité de la différenciation d'image pour suivre la concurrence végétative au sein des cultures. Ils ont utilisé une différence d'indice de végétation multi-temporelle calculée sur la base d'indice de végétation (NDVI) pour des ensembles de données MSS. Ils ont ensuite découpé en densité l'image différentielle d'indice de végétation. De manière analogue, Lyon et al. (1998) ont appliqué la différenciation de l'indice NDVI et ont constaté qu'il s'agissait de la meilleure technique de détection de changement de végétation pour suivre la déforestation et la perte de végétation. [El-Asmar et al., 2013] ont aussi utilisé le principe de différenciation d'images appliqué sur des indices de télédétection, à savoir, l'indice NDWI et l'indice de l'eau par différence normalisée modifiée (MNDWI) pour suivre l'évolution de la surface d'eau dans la lagune de Burullus, Nord du delta du Nil, Egypte pendant 1973 à 2011.

([Williams et al., 2006] et [Loveland and Dwyer, 2012]) ont montré que les images satellites à résolution moyenne, telles que les données satellitaires Landsat, sont les données les plus utilisées pour le suivi et la cartographie des changements de la couverture des sols, en particulier pour les sols affectés par des activités humaines. Les données satellitaires, en particulier les séries de capteurs Landsat TM et ETM+, sont des outils importants pour l'étude interdisciplinaire des forêts tropicales qui sont de plus en plus intégrés aux études qui suivent les changements dans couverture végétale dans les forêts tropicales et les zones tropicales protégées et également utilisées avec d'autres types de données pour étudier les facteurs de changement de la couverture de sol ([Trigg et al., 2006], [Kumar et al., 2010]). [Trigg et al., 2006] ont suivi les changements du couvert forestier à l'aide des séries de données du capteur Landsat dans la zone protégée de l'Asie du Sud-Est. Ils ont quantifié les changements dans la couverture forestière en utilisant une série de données Landsat (Multi Spectral Scanner (MSS), TM et ETM+) pour suivre les changements spatiaux et temporels dans la zone protégée du point chaud indo-burma.

[Fan et al., 2007] ont aussi utilisé des données de télédétection Landsat TM et ETM+ pour suivre et prédire les changements de l'utilisation/l'occupation des sols dans le couloir central du Delta de la rivière des Perles (en Chine). Dans ce travail, l'étude a porté sur deux images Landsat TM et ETM+ pendant la saison sèche pour détecter les motifs de LULC en 1998 et 2003, et d'examiner les changements de LULC pendant la période 1998-2003. Le type, le taux et le motif des changements dans cinq départements de la municipalité de Guangzhou ont été analysés en détail par une méthode de post-classification. Une matrice de conversion LULC a été produite pour chaque département afin d'explorer et d'expliquer l'expansion urbaine et la perte de terres cultivées, qui sont les types les plus importants de changements LULC. [Junfeng et al., 2011] ont utilisé des images TM et ETM+ pour suivre les changements de la couverture terrestre. Pour mieux comprendre les changements de l'utilisation/couverture des sols au cours des 15 dernières années, les auteurs ont utilisé des images Landsat obtenues en 1990 et 2005 pour établir des bases de données sur l'utilisation et la couverture des sols. Ensuite ils ont dérivé des informations de LUCC, par une analyse visuelle, en superposant ces couches à l'aide du logiciel SIG. Enfin, pour examiner les processus responsables du LUCC, les auteurs ont discuté de ses forces motrices, notamment les changements climatiques, les activités humaines, les dommages causés par les animaux et les insectes.

[Zaki et al., 2011] ont utilisé des images Landsat TM pour le suivi et la détection des changements de la couverture terrestre dans le nord-est du Caire, en Égypte. Dans ce travail, les images multi-temporelles Landsat (TM) entre 1990 et 2003 ont été utilisées avec les techniques du SIG) pour évaluer les changements environnementaux dans la région autour de Gabal El Hamza et l'expansion urbaine environnante dans les nouvelles villes urbaines du nord-est du Grand Caire. Les auteurs ont utilisé la technique de détection de changement de post-classification et une enquête sur le terrain afin de déterminer cinq unités principales à savoir les terres cultivées, les zones urbaines, les dunes de sable de l'Holocène, basalte de l'Oligocène et sédiments du Miocène-Pléistocène [Zaki et al., 2011]. En effet, une classification supervisée (basée sur l'algorithme maximum de vraisemblance supervisé) et une classification non supervisée (basée sur l'algorithme isodata) ont été utilisées tout d'abord dans la production de cartes d'occupation du sol pour la zone d'étude. Ensuite, la technique de détection du changement post-classification a été appliquée et les cartes de changement temporel ont été produites à l'aide d'un modèle SIG. Enfin, les auteurs ont sélectionné des points de vérité terrain pour évaluer l'exactitude des classifications en utilisant des images SPOT à haute résolution et une enquête sur le terrain avec un système de positionnement global (GPS).

Des données provenant d'autres satellites ont montré leur capacité et utilité pour le suivi de changements des LULC. Par exemple, [Chavula et al., 2011] ont montré la capacité des données des capteurs AVHRR et MODIS pour le suivi des changements dans le bassin versant du lac Malawi. Dans ce travail, les changements d'utilisation/couverture des sols dans le bassin versant du lac Malawi entre 1982 et 2005 ont été estimés à l'aide d'images satellitaires et les relations possibles entre quatre classes principales de couverture de sols : terre cultivée, forêt, eau et savane/arbusste/bois. Les auteurs ont utilisé des données AVHRR avec une résolution de 8 km pour les dates 1982-2000 et données de réflectance MODIS à 7 bandes pour les dates 2000-2005, pour conduire l'analyse des changements. L'analyse de LULC a été réalisée à l'aide de la méthode de [Homyouni and Roux, 2004], qui implique le développement d'une classe par des techniques d'appariement spectral (SMT), suivi de l'identification et de la fusion de la classe à l'aide d'observations au sol, d'images Google Earth et d'autres données secondaires afin de produire des cartes des classes LULC pour chaque année de données. Les auteurs ont utilisé deux variations SMT pour classifier les changements de LULC : la similarité de corrélation spectrale (SCS) et la valeur de similarité spectrale (SSV) [Chavula et al., 2011].

De plus, plusieurs auteurs ont fusionné différentes données de différents capteurs pour le suivi des changements de LULC. Par exemple, [Zhou et al., 2008] ont utilisés des données de télédétection multi-échelles et multi-temporelles, y compris Landsat MSS, TM et ETM+ et SPOT HRV pour suivre et détecter les changements de la couverture de sol au cours des 30 dernières années dans la rivière Tarim, Xinjiang, en Chine. L'approche proposée est basée sur la technique de post-classification pour la détection de changement. Les auteurs ont établi un système unifié de classification de la couverture terrestre pour la classification des images. Ensuite, ils ont utilisé les images classifiées pour l'analyse des trajectoires temporelles et des motifs spatiaux de changements de la couverture de sol au cours des 30 dernières années dans la zone d'étude. [Wen, 2011] a utilisé les données Landsat MSS et Quick Bird pour obtenir des informations sur la couverture terrestre et les changements à Guam, aux États-Unis. [Geymen and Baz, 2008] ont utilisé des images

satellites Landsat TM et Landsat Geo-Cover LC pour détecter les changements de la couverture des sols dans la zone métropolitaine d'Istanbul. Cependant, certains de ces travaux ont montré la capacité des données multi-temporelles et multi-sources à partir des capteurs ayant des résolutions spatiales, temporelles et spectrales différentes pouvant être utilisées pour les changements de LULC globaux, alors que d'autres ne peuvent pas fournir de cartes régionales de la couverture des sols à cause de leur résolution spatiale [Al-doski et al., 2013]. Franklin et al. et Wulder [Franklin and Wulder, 2002] suggèrent que l'imagerie par satellite à moyenne résolution, comme Landsat est idéale pour le suivi des changements régionaux de la couverture des sols.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le contexte général concerné par nos travaux, qui est le suivi et la détection de changements en imagerie satellitaire. Nous avons présenté le processus de détection des changements en imagerie satellitaire à travers lequel nous avons montré le rôle joué par les images satellites pour réaliser ce processus. Nous avons montré que les images satellites sont de différents types en fonction de résolution spectrale, spatiale et temporelle et qu'elles sont de nature complexe. En conséquence, le processus de détection de changements exige généralement l'application des étapes de prétraitement, telles que les corrections radiométriques, géométriques et atmosphériques, sur ces images. Ensuite, une classification des techniques utilisées pour la détection et le suivi de changements en particulier dans le domaine de télédétection, a été abordée. Finalement, nous avons présenté certains travaux qui exploitent les images de télédétection pour le suivi de changements de LULC.

Le suivi de changements de LULC nécessite la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels, impliqués dans les LULC, dans le temps. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les différents aspects et approches liés à la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels.

Chapitre 2

Modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels

Sommaire

2.1	Introduction	33
2.2	Dynamique de changement des objets spatio-temporels	33
2.3	Approches classique pour la modélisation des objets spatio-temporels	34
2.3.1	Approches basées sur les entités	34
2.3.1.1	Le modèle « snapshot »	37
2.3.1.2	Le modèle Space-Time Composites	37
2.3.1.3	Le modèle Spatio-temporal Object	38
2.3.1.4	Les modèles basés sur l'identité	38
2.3.2	Approches basées sur les évènements/processus	39
2.4	Les limites des approches classiques et les nouvelles tendances	41
2.5	Approches à base d'ontologies pour la modélisation des objets spatio-temporels	43
2.5.1	Les ontologies	43
2.5.1.1	Définitions	43
2.5.1.2	Les composantes d'une ontologie	44
2.5.1.3	Les niveaux de généralité des ontologies	45
2.5.2	Alignement des ontologies	46
2.5.2.1	Processus d'alignement des ontologies	46
2.6	Représentation des connaissances spatio-temporelles dans les ontologies	47
2.6.1	Ontologies des données spatio-temporelles	47
2.6.1.1	Le modèle stRDF/stSPARQL	48
2.6.1.2	L'ontologie GeoSPARQL	50
2.6.2	Modélisation de la dynamique avec les ontologies de fluent	50
2.6.2.1	Le versioning	51
2.6.2.2	La Réification	51
2.6.2.3	Relation n-aire	51
2.6.2.4	4D-fluent	52

2.6.2.5	L'ontology SOWL	52
2.6.3	Modélisation de la dynamique avec les ontologies de haut niveau	53
2.6.3.1	Modélisation avec l'ontology BFO	54
2.6.3.2	Modélisation avec l'ontology DOLCE	55
2.6.4	Le modèle Continuum	57
2.6.5	Les ontologie de modélisation de changement en télédétection	57
2.7	Synthèse	60
2.8	Conclusion	64

2.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre une étude bibliographique sur les différents travaux proposés dans la littérature pour la modélisation de la dynamique des objets et des phénomènes spatio-temporels. Nous étudions tout d'abord les approches de modélisation classiques tout en présentant les différents aspects et concepts utilisés pour la modélisation. Ensuite, nous établissons une discussion sur ces approches afin de souligner leurs limites. Enfin, nous introduisons l'importance des ontologies pour la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels tout en présentant les différents travaux et outils consacrés à une telle modélisation.

2.2 Dynamique de changement des objets spatio-temporels

Des objets géographiques comme les lacs, les rivières et les fronts pluviaux ont des propriétés dynamiques très spatiales et présentent un comportement spatio-temporel par nature. Il est possible qu'un objet change ses attributs et la représentation spatiale le long du temps. Par exemple, les objets avec la représentation spatiale pourraient croître, rétrécir (le cas de l'espace urbain), changer leur forme (par exemple quand une ville change ses frontières), se diviser (dans le cas où une forêt est divisée en une zone urbaine et une forêt), disparaître (un lac peut disparaître) ou se fusionner en un nouvel objet (des sous-parcelles sont fusionnées en une seule parcelle) dans le temps. Ces types « d'événement » sont réalisés suite à un ou plusieurs « phénomènes » (processus) géographiques tels que la déforestation, l'urbanisation, désertification, etc. Par exemple, la disparition d'une forêt est supposée causée par un processus d'urbanisation. Selon [Claramunt et al., 1997], le changement est constitué par l'altération des propriétés d'un objet persistant ou d'une région d'espace. En télédétection, le changement est défini comme étant le processus d'identification des différences dans l'état d'un objet ou d'un phénomène en l'observant à des moments différents [Singh, 1989]. Les changements dans les états des objets sont le résultat d'événements et/ou des processus. L'état d'une entité spatiale représente une valeur stable de cette entité dans un intervalle de temps.

D'une manière générale, l'analyse et la modélisation des phénomènes géographiques impliquent à connaître : (i) quels sont les éléments consécutifs qui les caractérisent « le Quoi », la répartition spatiale de ces éléments « le Où », et à quel moment ces phénomènes surviennent « le Quand » [Peuquet and Wentz, 1994].

La composante Quoi consiste généralement à identifier les différents types d'entités rencontrées, leurs propriétés géométriques (i.e. leur forme) et les attributs permettant d'en calculer la sémantique. L'identité d'une entité est un attribut unique qui permet de donner une signification sémantique à un objet (par exemple : une forêt, zone urbaine, lac, etc.). Ainsi, l'identité permet de distinguer un objet à d'autres. Par conséquent, une manière de modéliser les changements qui s'opèrent sur une entité est d'utiliser le concept de l'identité ([Hornsby and Egenhofer, 2000], [Hornsby and Egenhofer, 1997]).

Où le phénomène se produit renvoie à des informations spatiales de localisation, données par

exemple par la distance ou la position relative d'un objet par rapport à un autre (par exemple : inclusion, en dehors de). Cette composante est étroitement liée à la caractérisation des relations spatiales entre les entités.

La troisième composante, le « Quand », fait naturellement référence à la dimension temporelle ([Allen, 1984], [Ladkin, 1987], [Freksa, 1992], [Frank, 1994]) dans laquelle s'inscrit le phénomène. L'étude peut être statique s'il s'agit d'un "arrêt sur image" limité à un instant ou une période en particulier, ou dynamique si elle prend en compte des changements se produisant sur un ensemble d'instantanés ou de périodes [Del Mondo et al., 2013b].

A ces trois composantes, il faut ajouter la description des processus qui produisent ce (ces) phénomène(s) « le Comment » [Thériault and Claramunt, 1999]. Cette dernière exprime la façon dont un phénomène se déroule, les différents processus et événements mis en jeu et leurs origines.

2.3 Approches classique pour la modélisation des objets spatio-temporels

Dans la littérature, de nombreux modèles ont été proposés pour la modélisation de la dynamique des phénomènes géographiques. La plupart des approches ([Campelo and Bennett, 2012], [Devaraju et al., 2015], [Bennett and Galton, 2004], [Galton, 2008], [Bhatt and Wallgrün, 2014], [Grenon and Smith, 2004], [Worboys and Hornsby, 2004], [Claramunt and Theriault, 1996]), pour la modélisation de la dynamique spatio-temporelle, considèrent que l'espace, le temps, l'objet, l'état, l'événement et le processus sont des concepts clés pour le développement d'un modèle permettant la représentation et le raisonnement sur la dynamique des objets et des phénomènes géographiques. Généralement, les approches de modélisation des objets spatio-temporels sont présentées sur la base de différentes méthodes à savoir les modèles orienté-objet (-entité) ou caractéristiques et les modèles orientés-événements ou processus.

Dans la section suivante nous présentons les différentes approches proposées pour la modélisation des objets spatio-temporels.

2.3.1 Approches basées sur les entités

Les modèles orientés-objets ou caractéristiques [Langran and Chrisman, 1988] permettent une représentation des changements des objets dans les termes spatiaux et d'attributs. Ces approches sont basées sur les entités spatiales pour étudier la dynamique. Dans ce qui suit, nous présentons tout d'abord les différentes dimensions liées à la modélisation d'une entité spatio-temporelle.

— *Dimension spatiale*

Une entité spatiale est généralement caractérisée par deux propriétés spatiales : une localisation et une forme géométrique. La position (la localisation) est fournie par des coordonnées géographiques ou planaires ou par une approximation [Pierkot et al., 2013]. La dimension spatiale est

étroitement liée à la caractérisation des relations spatiales entre les entités. Ces relations sont des associations entre les géométries des entités spatiales qu'elles concernent. Par exemple, la relation « traverse » entre la ville et la rivière relie les géométries de ces deux entités spatiales.

Généralement, les relations spatiales sont divisées en trois catégories : topologique, direction (d'orientation) et métrique (de distance). Ces relations peuvent être qualitatives (c'est-à-dire décrite avec des termes lexicaux) ou quantitatives (décrites avec des valeurs numériques).

Les relations de métriques incluent les distances ou les angles. Elles peuvent être définies par : des méthodes mesurables (par exemple : la ville est située à 5 km de la plage), des méthodes qualitatives (par exemple : la forêt se trouve près de la rivière) ou par ou des méthodes floues.

Les relations de directions (d'orientations) ont été étudiées par [Frank, 1996] et [LIGOZAT, 1998]. Ces relations décrivent les directions relatives des objets. Elles sont décrites par l'espace des projections, tels que les relations cardinales (« à l'Est de », « au Nord de ») [Frank, 1996], ou les relations d'orientation des objets les uns par rapport aux autres (par exemple : « à gauche », « en bas », « avant ») [Hernandez, 1994].

Les relations topologiques concernent les connexions entre les objets spatiaux. Elles permettent de décrire la topologie des objets dans l'espace géographique. Par définition, la topologie désigne l'ensemble des relations vues qui nous permettent d'indiquer la position des objets les uns par rapport aux autres. Les relations topologiques sont généralement définies par des méthodes mesurables, mais peuvent également être exprimées par des méthodes terminologiques qualitatives (par exemple : « à côté de », « touches », « intérieures »). Plusieurs modèles ont été proposés pour décrire les relations topologiques. Parmi ces modèles, deux sont les plus utilisés : le modèle *Region Connection Calculus* (RCC8) [Randell et al., 1992a] et le modèle *Dimensionally Extended Nine-Intersection Model* (DE-9IM) ([Egenhofer and Franzosa, 1991], [Strobl, 2008]). Le modèle RCC8 décrit les relations spatiales topologiques sous forme de 8 relations topologiques. Ce modèle a été utilisé pour étudier des intersections entre différents types d'objets comme les points [Kurata, 2009], les lignes ([Schlieder, 1995], [Freksa, 1992], [Kurata and Egenhofer, 2006]) ou les polygones [Randell et al., 1992a]. La figure 2.1 illustre les différentes relations topologiques qui peuvent exister entre deux polygones.

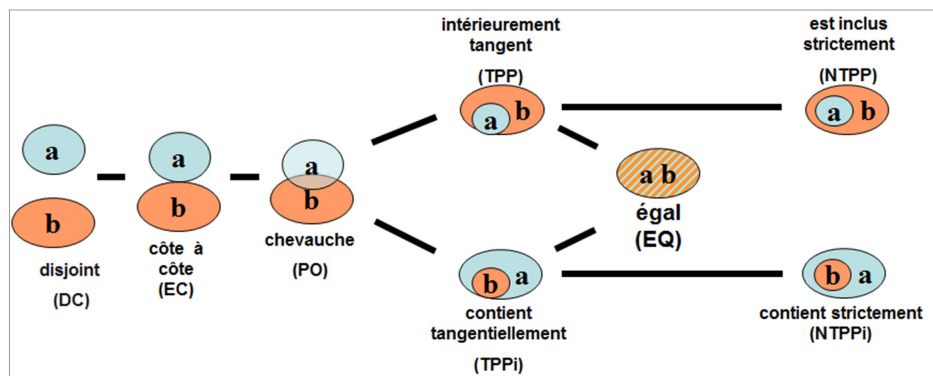


FIGURE 2.1 – Illustration des relations topologiques

Le modèle DE-9IM proposé par [Clementini and Di Felice, 1996] est une extension du modèle 9-IM de Egenhofer et Herring (Egenhofer). Ce modèle utilise les mêmes primitives topologiques

que Egenhofer, mais en prenant en compte le type de dimension de l'intersection. Le modèle DE-9IM est accepté par la norme l'ISO/TC 211 [ISO, 2003] et par l'Open Geospatial Consortium (OGC) [Consortium et al., 2011], pour le calcul des relations spatiales entre les géométries.

— *Dimension temporelle*

Si l'espace est un ordre de phénomènes coexistants, le temps étant un ordre de phénomènes successifs Evangelidis. [BORDIN, 2010] suggère que l'analyse et la représentation de l'évolution d'une entité implique l'intégration temps comme une autre dimension de cette entité. Selon [Claramunt et al., 1997], le temps est identifié comme un système d'entités spatiales ayant une existence dans l'espace, c'est-à-dire des choses dans le temps. En conséquence, il est intégré en tant que structure pour représenter et étiqueter les entités spatiales en évolution [Claramunt et al., 1997].

Quel que soit l'objet modélisé, le phénomène observé, il ne peut pas se produire une seconde fois exactement de la même manière. Ce qui est passé est passé. La dimension temporelle est donc orientée. Le temps est considéré comme des éléments discrets (à savoir une succession d'instants) dans lesquels des entités peuvent être observées. Un ensemble d'instants forme un ensemble d'ordre partiel $<$. Par exemple, nous pouvons décrire l'évolution des entités le long des heures, des jours, des semaines, des saisons, des années et ainsi de suite, dont chacun d'entre eux définit une granularité de temps [Del Mondo et al., 2013b].

Selon [Langran and Chrisman, 1988], la dimension temporelle est topologiquement similaire à la dimension spatiale. Les relations entre les entités dans le temps sont décrites par les relations temporelles. Ces relations sont des propriétés binaires qui détiennent entre les éléments et/ou les structures d'un modèle de temps [Ermolayev et al., 2014]. L'analyse des entités en évolution dans le temps nécessite de formaliser les relations temporelles observées. Allen a proposé une algèbre de 13 relations de bases entre deux intervalles de temps. La logique d'intervalle d'Allen fournit un ensemble complet d'opérateurs temporels [Allen, 1984]. Les opérateurs temporels sont définis par des relations mutuellement exclusives entre des intervalles de temps. La figure 2.2 illustre les différentes relations temporelles ainsi que leurs définitions.

Le temps pourra être aussi caractérisé par des relations structurelles appelées aussi relation de filiations [Del Mondo et al., 2013b]. Ces relations permettent d'induire la notion de parenté (c.à.d., ascendance et descendance) entre les objets temporels et d'inclure des notions pour suivre une entité à travers le temps. [Del Mondo et al., 2013b] distingue deux types de filiations : la *continuation* et la *dérivation*. La continuation se produit lorsqu'une entité continue d'exister d'une fois à l'autre avec la même identité (par exemple, une zone urbaine reste une zone urbaine après une expansion) (figure 2.3a). La dérivation se produit lorsqu'une entité en crée d'autres avec de nouvelles identités (par exemple, la dérivation de deux zones de parcelles différentes d'une seule) (figure 2.3b).

— *Dimension sémantique*

La dimension sémantique d'un objet a pour but de décrire les connaissances associées avec l'objet. En effet, elle permet de définir les caractéristiques de l'objet géographique à savoir son identité et ses propriétés. Cette dimension est définie par un ensemble de concepts qui sont reliés au domaine étudié. Par exemple pour une image satellitaire, les concepts sont les propriétés physiques

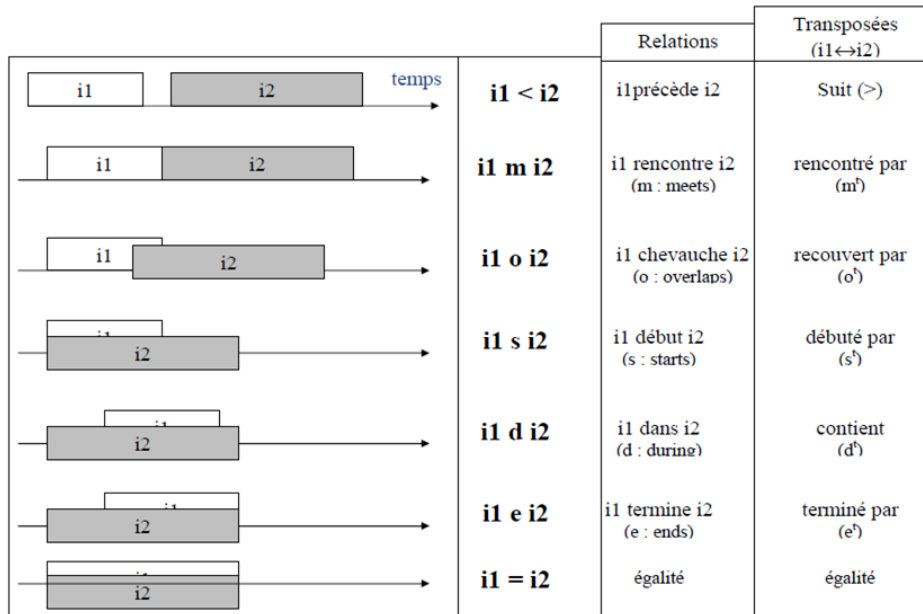


FIGURE 2.2 – Illustration des relation temporelle

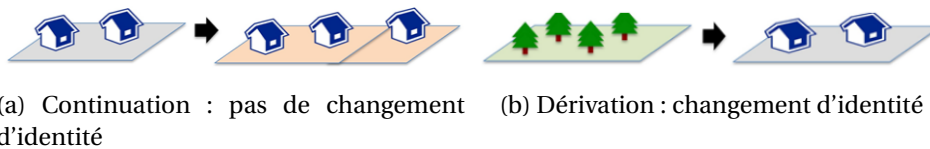


FIGURE 2.3 – Les relations de filiations

de l'image (bande spectrale, texture, etc.) ou la description du paysage [Pierkot et al., 2013]. L'identité une caractéristique unique qui permet d'identifier un objet par aux autres. L'identité d'un objet peut changer dans le temps. Par exemple, une parcelle de terrain peut changer d'une forêt pour être une zone urbaine. Dans cet exemple la géométrie de l'objet n'a pas changé, cependant son identité qui a été changée, nous parlons donc d'un changement sémantique. Ainsi, la dimension sémantique d'une entité permettant de décrire les connaissances associées à une entité est orientée dans la modélisation spatio-temporelle.

Comme pour relations spatiales et temporelles, des relations sémantiques peuvent exister. Les relations sémantiques incluent toutes les autres associations qui peuvent exister entre les différents synonymes des concepts. Exemple des relations sémantiques : la relation de subsumption « est-un (is-a) », la relation de composition « partie-de (part-of) », d'association « a-un (has-a) », etc. Comme pour la dimension sémantique, la définition des relations sémantiques dépend du domaine et ne peut pas être explicitement spécifique. Elles peuvent être spécifiées seulement si l'on connaît le domaine d'application. Les relations de filiations présentées précédemment sont utilisées pour suivre l'identité d'un objet dans le temps. Dans le cas d'une continuation, l'identité d'une entité ne change pas, mais pour une dérivation, l'identité a changé (changement sémantique).

2.3.1.1 Le modèle « snapshot »

Connu sous le nom « snapshot model », ce modèle permet de représenter les états d'une distribution géographique (entité ou ensembles d'entités) à des différents moments sous forme des couches, sans relations temporelles explicites entre les couches. À chaque couche correspond un ensemble temporellement homogène ou hétérogène d'entités géographiques. La figure montre un exemple du modèle snapshot selon [ARMSTRONG, 1988]. Dans ce modèle, les couches sont indépendantes, la représentation d'un changement n'est pas explicite ce qui exige à chaque fois la comparaison de deux états différents pour représenter un tel changement. En plus de manque de relations temporelles entre les différentes couches, ce modèle souffre de la redondance des données.

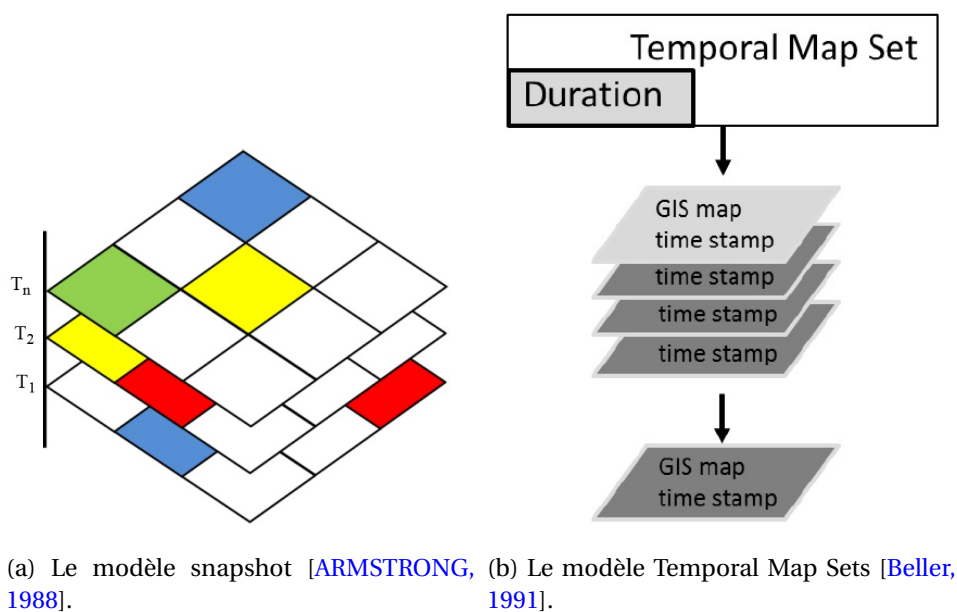


FIGURE 2.4 – Illustration des modèles snapshot et Temporal Map Sets

Dans la littérature, le modèle Temporal Map Sets (TMS) de [Beller, 1991] est considéré comme des extensions du modèle snapshot [YUAN, 1996]. L'objectif de ce modèle est de modéliser les événements géographiques dans une zone définie (Figure 2.4b). Les inconvénients majeurs de ces modèles sont la redondance des données et le risque d'incohérence des données.

2.3.1.2 Le modèle Space-Time Composites

Le modèle Space-Time Composites (STC) [Langran and Chrisman, 1988] représente le monde comme un ensemble d'objets spatialement homogènes et temporellement uniformes dans un espace 2D (une couche, Figure 2.5), où chaque couche uniforme est appelée « Composite ». Chaque composite espace-temps décrit son parcours unique des changements temporels dans les attributs. Le changement d'un objet géographique est décrit conceptuellement à travers une période de temps dans un composite espace-temps. Les changements d'attributs sont enregistrés à des temps discrets, bien que sa résolution temporelle ne soit pas nécessairement exacte. L'inconvénient majeur du modèle STC est qu'il ne parvient pas à saisir la temporalité entre attributs dans

l'espace, malgré sa capacité de stocker la temporalité dans les plus grandes unités communes d'attribut, d'espace et de temps. En plus, la mise à jour d'une base de données de *STC* nécessite la reconstruction des unités *STC* est une autre limite du modèle.

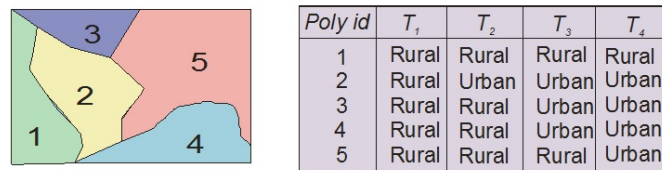


FIGURE 2.5 – Le modèle Space-Time Composites [Langran and Chrisman, 1988].

2.3.1.3 Le modèle Spatio-temporal Object

Le modèle *Spatio-temporal Object* (ST-Object), proposé par [Worboys, 1992], représente le monde comme un ensemble d'objets incorporant une dimension temporelle orthogonale à l'espace 2D. La figure 2.6, montre que chaque entité (c.-à-d., l'objet) est composée d'un ensemble d'atomes spatio-temporels. Ce modèle a une capacité de repérer les changements qui peuvent se produire dans les attributs d'un objet spatio-temporel que ce soit dans la dimension spatiale, temporelle ou les deux ensembles, tout en projetant les atomes spatio-temporels sur l'une ou les dimensions souhaitées (spatial et/ou temporel). Une limite de ce modèle est qu'il ne permet de représenter que les changements soudains sur une structure de temps discrète et linéaire.

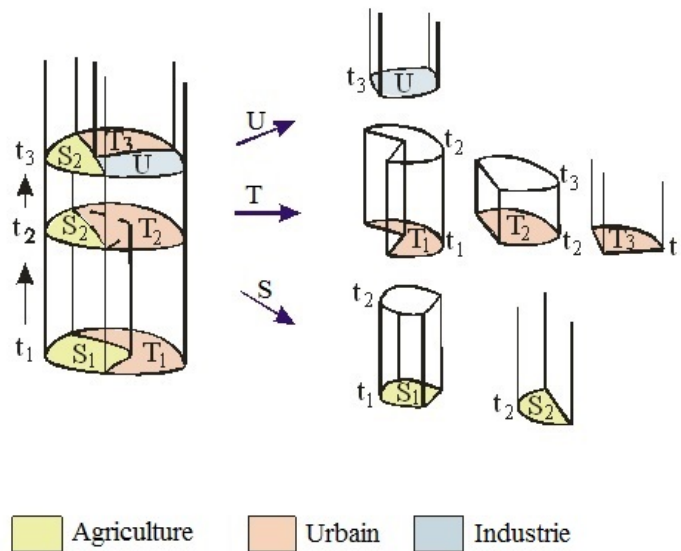


FIGURE 2.6 – Le modèle Spatio-temporal Object [Worboys, 1992].

Remarque : aucun des modèles présentés ne modélise les changements liés à l'identité d'une entité (c.à.d, les changements sémantique) et ne permet pas d'identifier les événements et/ou les processus.

2.3.1.4 Les modèles basés sur l'identité

Nous avons présenté que l'identité est un attribut unique d'une entité. Cette composante joue un rôle important pour suivre l'évolution des entités dans l'espace et dans le temps. En fait, une modification de l'identité dans une entité implique qu'un changement a été produit sur cette entité ([Hornsby and Egenhofer, 1997], [Hornsby and Egenhofer, 2000]). À ce stade, les auteurs ont créé le langage *Change Description Language* (CDL) graphique, pour modéliser explicitement les changements. Le langage CDL utilise les concepts d'existence et/ou de non-existence d'une entité en fonction de son identité pour modéliser les changements. Pour représenter les changements, les auteurs ont défini un ensemble d'opérations de base qui agissent sur une entité (création, destruction, continuation), ou sur des transitions (séparation, fusion). Ces opérations de base sont assez puissantes pour distinguer la sémantique de différents changements tels que l'élimination d'un objet (figure 2.7c) et la création d'un nouvel objet avec une identité différente (figure 2.7a) par exemple. Compte tenu de ces opérations de changement, il est possible de connecter des séquences de ces opérations ensemble afin de modéliser des scénarios de changements. La figure 2.7 illustre un exemple de modélisation basé sur l'identité.

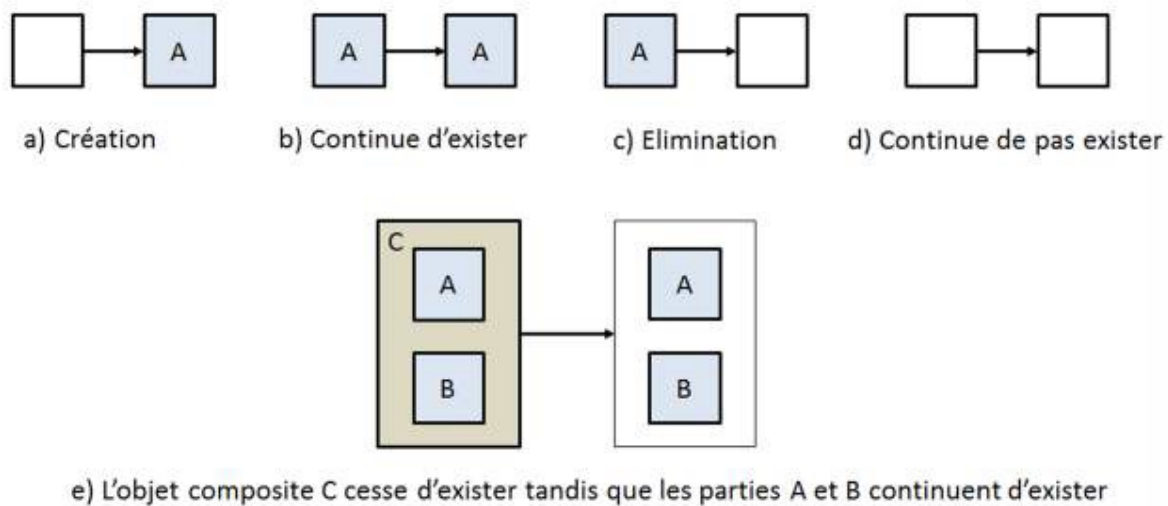


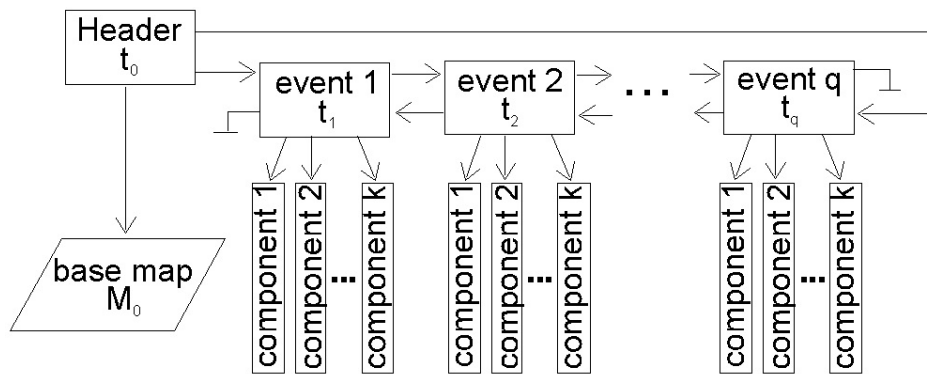
FIGURE 2.7 – Modélisation basé sur l'identité

2.3.2 Approches basées sur les évènements/processus

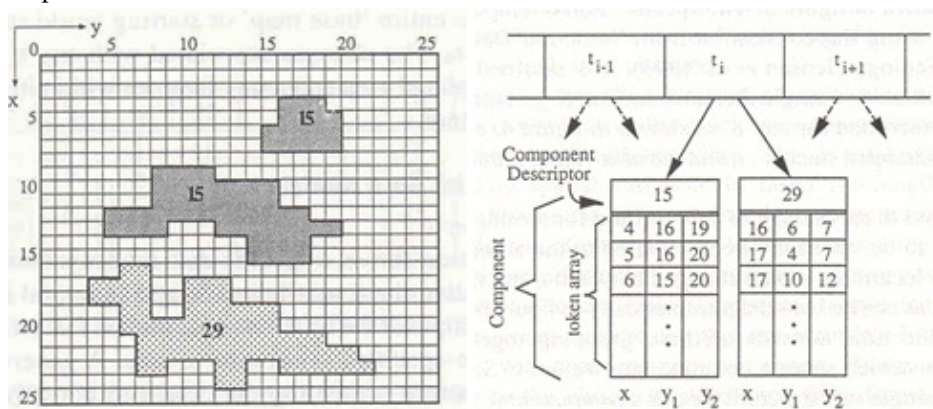
Dans les modèles orientés-événements ou processus les occurrences, qui sont, les événements ou les processus sont traités comme des entités de modélisation primaires [Worboys, 2005]. Selon Bestougeff et al. [Bestougeff et al., 1993], un événement est défini par un ensemble des processus et qu'un processus représente une action qui modifie une entité. Les approches existantes considèrent que les entités évoluent sous l'influence de ces éléments externes. Elles se distinguent par la façon dont les concepts clés (processus et événements) sont définis et reliés pour représenter et raisonner sur le changement qui se produit sur les entités spatio-temporelles. Les approches qui distinguent entre les événements et les processus utilisent, par exemple, les événements pour indiquer un résumé sur ce qui a été passé et les processus pour décrire la progression d'une occur-

rence. Dans certains cas, les évènements sont introduits en tant que primitifs de changement. Les processus sont également considérés sous la forme d'actions qui entraînent les changements d'un objet géographique. Les approches qui ne distinguent pas entre les évènements et les processus utilisent le terme « évènement » pour englober toutes sortes d'occurrences. Une occurrence avec des limites temporelles bien définies, c'est-à-dire un début et une fin. L'accent est mis sur tout ce qui se passe, c'est-à-dire qu'une occurrence représente un résumé de ce qui s'est passé.

[Peuquet and Duan, 1995] ont présenté le modèle ESTDM pour l'organisation des changements de localisation à partir des données raster. Dans ce modèle, l'ensemble des évènements sont organisés sur une droite de temps. Pour chaque temps, un fichier (header) contenant des informations sur une thématique particulière pointe à la fois sur une carte référence et sur le premier et le dernier évènement de la liste d'évènements. Si un changement est détecté, un nouvel évènement sera ajouté à la liste des évènements. Cette liste d'évènements donne la possibilité d'étudier la dynamique spatio-temporelle d'une thématique [Yuan, 1999]. Un composant du modèle ESTDM indique où changement ont eu lieu et montre les changements qui sont produits sur les zones de la carte. Le modèle ESTDM ne traite que les données de type raster et l'application du modèle à des données vectorielles nécessite des modifications au niveau de ses composants.



(a) la liste des évènements modélisés sous la forme des différents changements qui s'opèrent sur la carte de base



(b) Représentation d'un changement de t_{i-1} à t_i

FIGURE 2.8 – Modèle ESTDM basé sur les évènements et les données raster. (Figures extraites de [Peuquet and Duan, 1995])

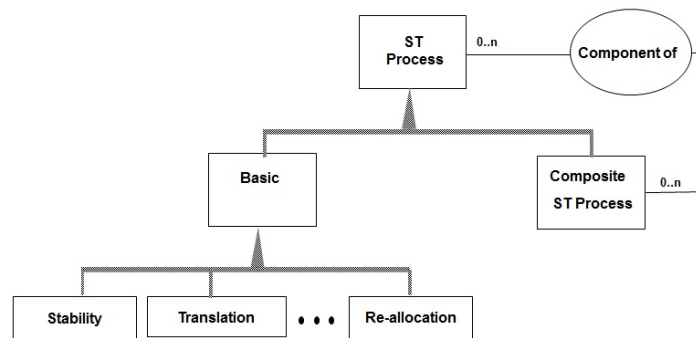
Malgré que la représentation des évènements est bien intégrée dans le modèle ESTDM, les relations entre ces évènements restent difficiles et que les objets ne sont pas définis et identifiés dans ce modèle. Cependant, selon [Claramunt and Thériault, 1995], « un modèle devrait préserver

explicitement des liens connus entre les évènements et leurs conséquences. Les relations observées doivent être notées (par exemple, les entités A et B génèrent entité C) pour aider les scientifiques à développer des modèles qui reproduisent la dynamique des processus spatio-temporels. Les chercheurs pourront ainsi capables d'étudier des relations complexes, tirer des conclusions et de vérifier les liens de causalité qui associent des entités à travers des processus d'influences et de transformations ». En conséquence, les auteurs ont proposé un modèle basé sur une taxonomie des processus spatio-temporels (figure 2.9a), identifiés dans l'espace géographique ([Claramunt and Thériault, 1995], [Claramunt and Theriault, 1996], [Claramunt et al., 1998]), pour étudier et représenter les changements. Le modèle présenté prend en compte les trois dimensions : spatiale, temporelle et thématique. Il permet de suivre l'évolution spatiale d'une seule entité et d'un ensemble d'entités. Les processus décrivant l'évolution d'une seule entité (figure 2.9b) sont définis comme suit :

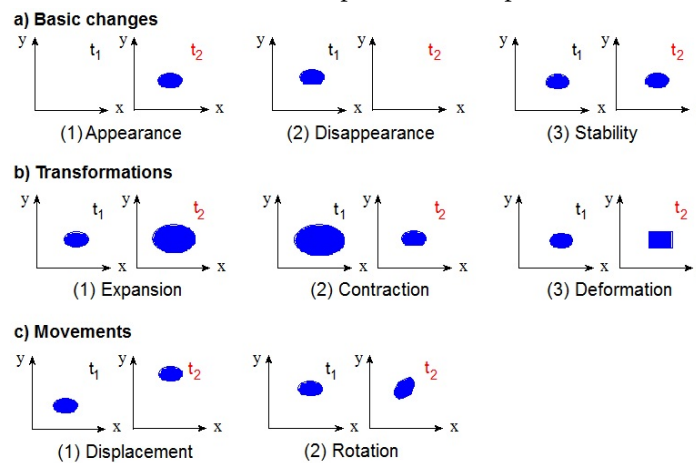
- L'**apparence** se produit lorsqu'une version d'objet n'a pas de version précédente.
- La **disparition** se produit lorsqu'une version d'objet n'a pas de version ultérieure.
- La **stabilité** est utilisée lorsqu'une version d'objet a le même état pendant une certaine période (elle est nécessaire pour gérer le cas d'une entité qui change dans le domaine thématique sans évolution de ses propriétés spatiales).
- Les processus de transformation impliquent des changements dans la taille et la forme de l'entité. Ils sont l'**expansion**, la **contraction** et la **déformation**.
- Les processus de mouvement transmettent les changements d'emplacement liés au déplacement et à la **rotation**.

Les processus composites permettent de décrire des phénomènes naturels complexes en reproduisant leur dynamique (épidémiologie, entités mobiles, évolution du feu, diffusion de l'innovation, etc.). Une représentation des connaissances des processus composites nécessite un langage formel pour comprendre et décrire leur sémantique. [Claramunt and Theriault, 1996] ont utilisé le langage de modèle d'événement –ou *Event Pattern Language*– (EPL) ([Gehani et al., 1992], [Motakis and Zaniolo, 1995]) pour décrire la sémantique des processus composites. Un processus composite est défini comme une expression formée par des processus et des opérateurs. Les attributs thématiques d'un processus composite sont incorporés dans ses constituants (processus de base).

Dans la même direction, [Bennett and Galton, 2004] ont utilisé un langage hautement expressif appelé *Versatile Event Logic* (VEL) pour représenter les relations temporelles et les évènements. [Bhatt and Wallgrün, 2014] ont proposé une approche permettant une analyse explicative de la dynamique géospatiale avec un niveau qualitatif d'abstraction. Ils ont commencé par traiter les données quantitatives réelles pour effectuer une description qualitative cohérente de la réalité, puis un raisonnement basé sur l'abduction a été utilisé pour obtenir des explications narratives des évènements pour la reconnaissance des processus de haut niveau. Ici, le raisonnement d'abduction a été réalisé pour déduire de meilleures explications (hypothèses) permettant de raisonner sur des phénomènes géographiques. Selon [Bhatt and Wallgrün, 2014], il est possible d'expliquer les phénomènes spatiaux à un niveau élevé, soit en termes d'occurrences spécifiques du domaine

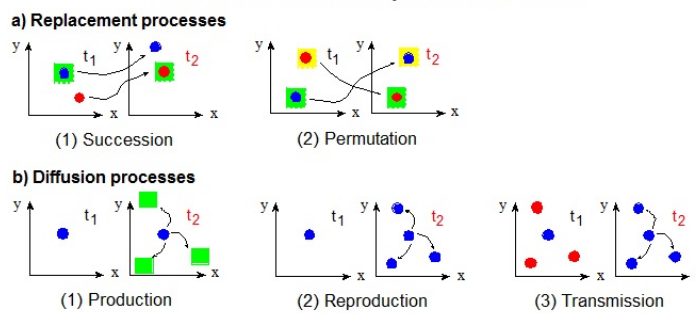


(a) Le modèle des processus composites

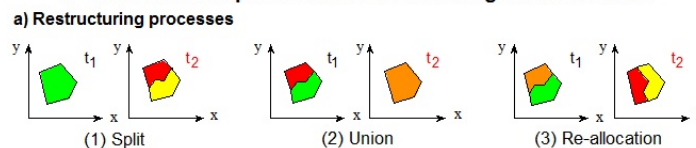


(b) Évolution spatiale d'une seule entité

I - Functional relationships between entities



II - Evolution of spatial structures involving several entities



(c) Les évolutions sous contraintes (changements fonctionnels)

FIGURE 2.9 – Le modèle des processus composites. (Figures extraites de [Claramunt and Thériault, 1995])

causant les changements observés, soit de manière indépendante du domaine à partir d'une théorie fondamentale des changements spatiaux tels que la division, la croissance, le mouvement, etc.

[Jiang and Worboys, 2009] ont proposé un modèle topologique basé sur les événements pour représenter et raisonner sur les changements spatiaux. Ce modèle utilise une structure en arbre pour représenter les relations topologiques entre les objets d'un même snapshot (à un instant T). L'analyse des différents arbres modélisant les objets aux différents temps permet de déduire des changements comme la fusion, la division, la séparation, etc.

[Ferreira et al., 2014] suggèrent que toutes les combinaisons possibles des attributs (espace, temps et thème) peuvent être modélisées comme trois types de données, appelés *séries temporelles*, *couverture* et *trajectoire* à partir de laquelle on peut dériver les types d'objets et d'événements, où si un attribut est mesuré, le second est fixe et le troisième est contrôlé. Une *série temporelle* représente les variations mesurées d'un thème sur une durée contrôlée dans un lieu fixe. Une *trajectoire* mesure les emplacements d'un thème fixe sur une durée contrôlée. Une *couverture* mesure un thème d'attribut dans une étendue spatiale contrôlée à un temps fixe. En conséquence, les auteurs ont proposé une algèbre pour les données spatio-temporelles. Comme illustré dans la figure 2.10, le modèle proposé spécifie trois types de données (c-à-d, *les séries temporelles*, *la couverture* et *la trajectoire*) comme des abstractions génériques fondées sur des observations réelles. En se basant sur ces abstractions, le modèle permet de définir les types d'objets et d'événements. Dans ce modèle, les auteurs commencent par des observations pour évaluer les phénomènes spatio-temporels dans le monde réel. Ensuite, en utilisant les *séries temporelles*, les *trajectoires* et les types de *couverture*, les différentes vues sur le même ensemble d'observations seront définies.

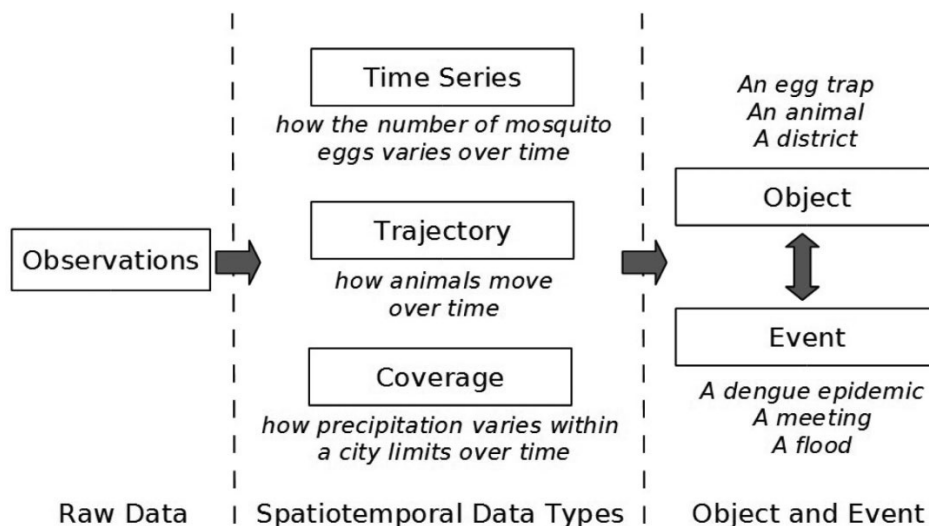


FIGURE 2.10 – Le modèle conceptuel représentant les objets et les événements dérivés des trois types de données spatio-temporelles : *séries temporelles*, *couverture* et *trajectoire*. (Figures extraites de [Ferreira et al., 2014])

2.4 Les limites des approches classiques et les nouvelles tendances

La description des phénomènes spatio-temporels par rapport au changement ouvre de nouvelles portes pour comprendre les composantes sous-jacentes du changement et en reconnaissant la sémantique associée au changement. Différentes approches ont été présentées pour modéliser la dynamique des objets spatio-temporels et des phénomènes géographiques et en conséquence de conclure les changements produits. La plupart des travaux affirment que l'espace, le temps, l'objet, l'état, l'évènement et le processus sont des concepts importants pour la modélisation la dynamique des entités spatio-temporelles. En fait, la dynamique d'une entité spatiale peut être représentée soit par une succession d'états dans le temps, soit par la modélisation des occurrences (événements et/ou processus) qui agissent sur cette entité. Le modèle snapshot, le modèle Space-Time Composites (STC) et le modèle Spatio-temporal Objet sont des exemples des modèles de la première catégorie. Une limite de ces modèles est qu'il est difficile de détecter les processus comme de changement d'une entité puisqu'ils ne modélisent que des changements soudains sur une période de temps discrète. Pour pallier cette limite, le modèle basé sur l'identité, présenté par [Hornsby and Egenhofer, 2000], permet de décrire les changements liés à l'identité d'une entité et en conséquence permet de prédire ou prévoir les modifications futures d'un objet. Une première limite de ce modèle est qu'il ne modélise pas les relations spatiale et/ou temporelle entre les objets. Aussi, la difficulté d'analyser les causes de changements est un autre inconvénient pour ce modèle.

Pour surmonter ces limites, les modèles basés sur les événements/processus ont été proposés. La modélisation de la dynamique d'une entité spatiale est faite à travers la description et le raisonnement sur les événements ou les processus qui agissent sur cette entité. Le le modèle Event-Based Spatiotemporal Data Model (ESTDM), le modèle d'algèbre conceptuel de [Ferreira et al., 2014], modèle des processus composites [Claramunt and Theriault, 1996] et le modèle de changement topologique [Jiang and Worboys, 2009] appartiennent à cette famille de modélisation. La limite majeure liée à ces modèles est qu'ils n'expriment pas les relations entre les objets et les événements/processus ou entre les événements/processus et les événements/processus. Ce type relations tels que définis par [Worboys and Hornsby, 2004] et [Galton and Worboys, 2005], inclut des relations comme cause, initialise, termine, compose, etc. En plus, bien que les trois derniers modèles utilisent les relations spatiales et temporelles pour déterminer les changements spatiaux illustrant la dynamique des entités, une limite commune pour ces modèles est qu'ils ne tiennent pas compte de la dimension sémantique pour modélise les changements liés à l'identité. Dans cette direction, [Del Mondo et al., 2013b] ont proposé un modèle basé sur les graphes spatio-temporels pour suivre l'identité d'une entité dans le temps. Dans ce travail, les auteurs utilisent deux relations de filiations : la continuation et la dérivation décrites précédemment. La représentation de changement pour l'entité est explicite dans les graphes spatio-temporels et la manque de la sémantique pour découvrir et déduire des phénomènes géographiques est un inconvénient majeur pour le modèle proposé.

Ainsi, afin de représenter et raisonner sur la dynamique des objets spatio-temporels, une telle modélisation doit supporter les liens entre les événements observés et leurs conséquences. Les relations observées entre les différentes entités doivent être prises en compte. En conséquence,

un modèle doit supporter les connaissances et le contexte liés à un domaine d'application et doter d'un mécanisme de raisonnement pour être capable d'étudier des relations complexes, tirer des conclusions à partir des connaissances déjà existantes et de vérifier les liens de causalité qui associent des entités à travers les occurrences (événements ou processus) d'influences et de transformations.

Afin de résoudre les problèmes cités auparavant, les chercheurs se sont investis dans les ontologies en tant que ressource efficace pour représenter les connaissances dans le domaine géographique, en fournissant une conceptualisation précise des entités présentes dans l'espace géographique et les relations entre elles. En outre, les ontologies sont capables d'appliquer des raisonnements à travers des dispositifs logiques formels tels que les logiques de description lui permettant de tirer des conclusions et d'inférer de nouvelles connaissances à partir de celles existantes. Ainsi et pour répondre aux besoins soulignés, nous nous orientons à l'utilisation des ontologies comme support de modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels en imagerie satellitaire.

2.5 Approches à base d'ontologies pour la modélisation des objets spatio-temporels

Les ontologies présentent un moyen prometteur qui permet la modélisation des connaissances d'un domaine particulier. Leurs applications sont multiples à savoir la recherche d'informations, l'analyse d'images, l'indexation, la reconnaissance, la traduction automatique, l'e-learning, etc. Les principaux buts de la construction des ontologies sont la partageabilité, la portabilité, la réutilisabilité et la capitalisation de la connaissance et de l'expertise d'un domaine. Dans cette section, nous présentons un aperçu horizontal sur la notion d'ontologie et ses constituants. Ensuite, nous soulignons le rôle des ontologies pour la représentation des connaissances en particulier pour la modélisation des objets spatio-temporels à travers les approches ontologiques proposées dans la littérature.

2.5.1 Les ontologies

2.5.1.1 Définitions

La littérature est pleine de définitions dérivées du terme ontologie. Chaque communauté adopte sa propre interprétation selon l'usage qui en est fait et le but visé. Une, des premières, définition du terme « ontologie » est donnée en 1991 par [Neches et al., 1991], en citant : « An ontology defines the basic terms and relations comprising the vocabulary of a topic area as well as the rules for combining terms and relations to define extensions to the vocabulary ». À savoir : « Une ontologie définit les termes et les relations de base du vocabulaire d'un domaine ainsi que les règles qui indiquent comment combiner les termes et les relations de façon à pouvoir étendre le vocabulaire ».

En 1993, [Guber, 1993] propose une deuxième définition de l'ontologie : « An ontology is an

explicit specification of conceptualization » à savoir « Une ontologie est une spécification explicite d'une conceptualisation ». Cette définition a été clarifiée en 1995 par [Guarino, 1995] en énonçant que : « Les ontologies sont des spécifications partielles et formelles d'une conceptualisation ». En 1998, [Studer et al., 1998] présentent une nouvelle définition de l'ontologie en énonçant « Une ontologie est une spécification formelle et explicite d'une conceptualisation commune ». La « conceptualisation » permet d'orienter les ontologies sur l'aspect sémantique c'est-à-dire le sens des termes. Alors que, le terme « spécification explicite » oriente les ontologies sur le côté syntaxique. Une définition plus simple est donnée par les développeurs du langage d'ontologie standardisé Web Ontology Language (OWL) du W3C [Horrocks et al., 2003] comme « une ontologie étant équivalente à une base de connaissances de logique de description ». [Swartout and Tate, 1999] la définissent comme suit : « une ontologie est un ensemble de termes structurés de façon hiérarchique, conçue afin de décrire un domaine et qui peut servir de charpente à une base de connaissances ».

Les ontologies peuvent être utilisées pour différents usages. Parmi ces usages, nous citons par exemple que :

➔ **Communication**

Les ontologies offrent un cadre unificateur améliorant la communication entre les personnes, entre les personnes et les systèmes, et entre les systèmes. Dans ce cadre, l'ontologie est un cadre commun qui favorise la communication en éliminant toute ambiguïté en termes de donnée et signification. Cette communication peut se faire entre les personnes, entre les personnes et le système, mais aussi entre les systèmes.

➔ **Interopérabilité**

Les ontologies formelles contribuent à résoudre le problème d'hétérogénéité sémantique entre les applications en préservant la cohérence et en éliminant la confusion terminologique concernant les termes utilisés. Elles sont alors la clé pour l'interopérabilité et l'échange d'information et le partage.

➔ **Réutilisation**

L'ontologie permet la réutilisation partielle ou totale des connaissances de domaine (les concepts, les relations et les instances) selon le besoin des applications afin de réduire le temps et le coût de développement des systèmes. En fait, elle permet de créer et de conserver des bases de connaissances réutilisables ou bien d'assembler des bases de connaissances à partir des modules réutilisables.

➔ **Raisonnement**

Une ontologie offre la possibilité de construire et découvrir des nouvelles connaissances à partir des ontologies existantes.

➔ **Web sémantique**

Dans le Web sémantique, les ontologies y sont utilisées pour déterminer les index conceptuels décrivant les ressources sur le Web.

2.5.1.2 Les composantes d'une ontologie

En général, une ontologie représente un vocabulaire commun d'un domaine et définit des termes et des relations entre elle. Selon [Guber, 1993], la formalisation d'une ontologie se met en place grâce à 5 types de composants (primitives) à savoir : concepts (ou classes), relations (ou propriétés), fonctions, axiomes (ou règles) et instances (ou individus). Autrement, la connaissance au sein d'une ontologie est formalisée en fonction de ces cinq composantes. Une *classe* ou un *concept*, représente un type d'objet dans l'univers. Les concepts peuvent être abstraits ou concrets, élémentaires (électrons) ou composés (atome), réels ou fictifs. Les *relations* représentent les associations ou les liens pouvant exister entre les concepts de l'ontologie. Les *fonctions* sont aussi des cas particuliers de relations dans lesquelles le $n^{ième}$ élément d'une relation est défini à partir des n -premiers. Exemple de fonctions, les fonctions binaires « mère-de » ou « carré-de ». Les *axiomes* représentent des assertions, acceptées comme vraies, à propos des abstractions du domaine traduites par l'ontologie. Ils permettent de contraindre les valeurs de classes ou d'instances. Les instances, constituant la définition extensionnelle de l'ontologie, sont utilisées pour représenter des éléments dans un domaine. Le *rôle* caractérise une entité par quelques rôles qu'elle joue dans sa relation à une autre entité [Sowa et al., 2000]. Le type « Humain », par exemple, est un type de phénomène qui dépend de la forme interne de l'entité ; mais la même entité peut être caractérisée par des rôles du type, Mère, Employé ou Piéton » [Sowa et al., 2000].

2.5.1.3 Les niveaux de généralité des ontologies

Les ontologies peuvent être classifiées en fonction de deux dimensions : leur niveau de détail et leur niveau de dépendance par rapport à une tâche particulière, un point de vue. Plus précisément, [Guarino, 1998] propose une classification des ontologies selon leurs niveaux de généralité.

○ *Les ontologies de haut-niveau/supérieures (Top-Level / Upper-Level)*

Appelées encore les ontologies fondationnelles, ces ontologies écrivent les concepts très généraux ou des connaissances de sens telles que l'espace, le temps, la matière, les objets, les événements, les actions, etc., qui sont indépendants d'un problème ou d'un domaine d'application particulier [Guarino, 1998]. Ces ontologies fournissent des notions générales auxquelles tous les termes des ontologies existantes doivent être reliés.

○ *Les ontologies de domaine (domain ontologies)*

Les ontologies de domaine sont spécialisées pour un certain type d'artefact. Elles décrivent le vocabulaire lié à un domaine générique (comme l'enseignement, la médecine ou les automobiles), en spécialisant les concepts présentés dans les ontologies de haut-niveau [Guarino, 1998]. Selon [Mizoguchi et al., 1995], ce type d'ontologies caractérise la connaissance du domaine ou la tâche est réalisée. Les ontologies de domaine donnent une représentation formelle des concepts du domaine étudié ainsi que des différentes relations qui lient ces derniers.

○ *Les ontologies de tâche (task ontologies)*

Elles décrivent le vocabulaire en relation avec une tâche ou une activité générique (comme le diagnostic ou la vente) notamment en spécialisant les concepts d'une ontologie de haut niveau [Guarino, 1998]. Les ontologies de tâche fournissent un lexique systématisé de termes utilisés pour résoudre les problèmes associés à des tâches particulières (dépendantes ou non du domaine).

○ *Les ontologies d'application (application ontologies)*

Elles décrivent des concepts dépendant à la fois d'un domaine et d'une tâche particulière, qui sont souvent des spécialisations des deux ontologies relatives. Ces concepts correspondent souvent aux rôles joués par des entités de domaine tout en exécutant une certaine activité [Guarino, 1998].

Les ontologies de haut niveau, les ontologies de domaine et les ontologies d'application saisissent les connaissances statiques indépendamment de la façon dont on résout les problèmes alors que les ontologies de tâches sont axées sur les connaissances visant à résoudre des problèmes. Tous ces types d'ontologie peuvent être fusionnés de façon à construire une nouvelle ontologie (c'est alors, une ontologie partagée qui peut être une ontologie ou une combinaison de quelques-unes d'entre-elles). Ces différents niveaux sont récapitulés dans la figure 2.11.

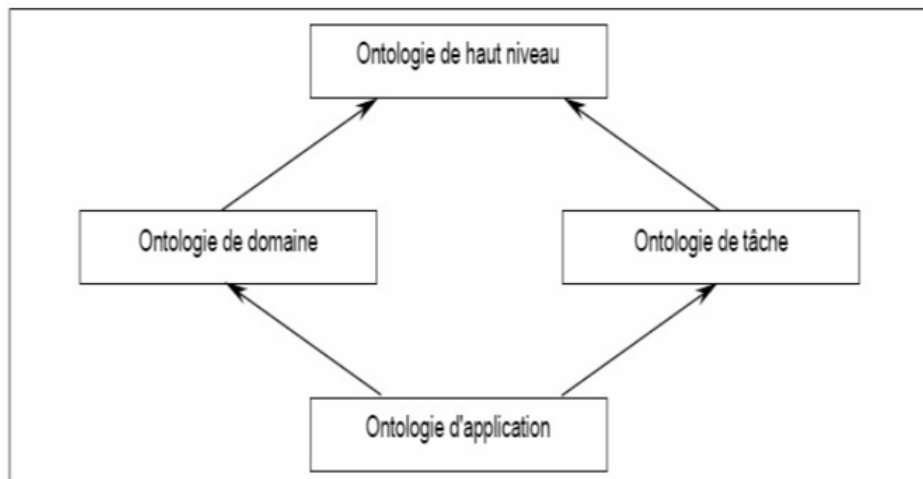


FIGURE 2.11 – Différents types d'ontologies selon leur degré de dépendance vis-à-vis d'une tâche particulière ou d'un point de vue. Les flèches représentent des relations de spécialisation.

2.5.2 Alignement des ontologies

Une ontologie se présente comme une structure informatique permettant de modéliser les connaissances d'un domaine et destinée à être utilisée par différentes applications. Ainsi, au sein d'un même domaine, différents types d'ontologies peuvent exister dont chacune représente une tâche particulière pour une telle application. Parfois, certains domaines évolutifs nécessitent l'utilisation d'une ontologie particulière ou l'exploitation d'entre elles pour résoudre des problèmes peu complexes. L'intégration ou la combinaison de plus d'une ontologie devient une tâche nécessaire. Ainsi, une ontologie partagée peut être une ontologie ou une combinaison de certaines. Cependant, différentes formes d'hétérogénéité peuvent exister entre les ontologies, même entre les ontologies modélisant le même domaine. L'alignement d'ontologies est une solution au problème de l'hétérogénéité sémantique et qui a comme objectifs de maintenir automatiquement les types de correspondances possibles entre différents concepts des ontologies tout en garantissant

la consistance entre les connaissances représentées.

2.5.2.1 Processus d'alignement des ontologies

L'alignement est une solution pour réduire n'importe quel type d'hétérogénéité. Selon [Euze-
nat, 2007], l'alignement d'ontologies ou le « matching » d'ontologies est le processus de détermi-
nation de l'ensemble de correspondances entre les concepts ontologiques. Le processus d'alignement
comme illustré dans la figure, peut-être décrit comme une fonction f , qui qui à partir d'une
paire d'ontologies et O_1 et O_2 , un alignement en entrée A (optionnel), un ensemble de paramètres
 p (ex : paramètres de pondération, seuils ...) et un ensemble de ressources externes r (ex : thésau-
rus spécifique au domaine, connaissances communes, ensemble de règles morphologiques, etc.),
détermine un alignement A' entre ces deux ontologies, avec :

$$A' = f(O_1, O_2, p, r) \quad (2.1)$$

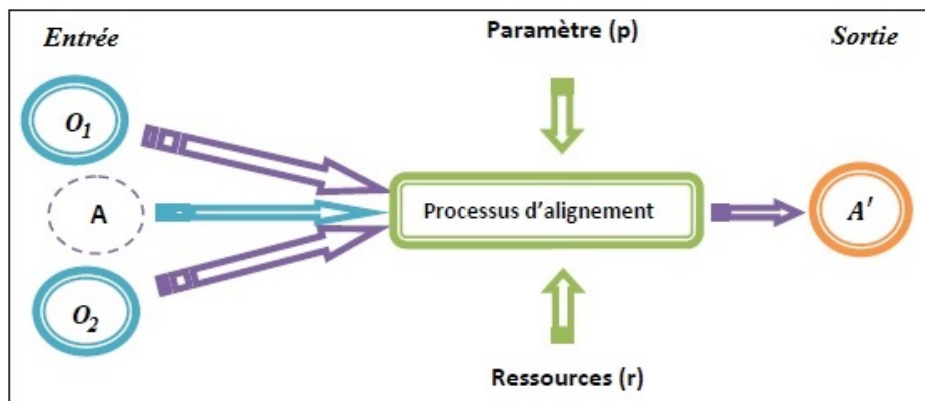


FIGURE 2.12 – Processus d'alignement des ontologies

Ainsi, un alignement est décrit comme un ensemble de cinq éléments comme suit :

$$\langle id, e_1, e_2, r, n \rangle \quad (2.2)$$

Où

id - un identifiant d'une correspondance donnée;

e_1 et e_2 - des entités, par exemple des classes et des propriétés des ontologies correspondantes;

r - une relation, par exemple, d'égalité ($=$), d'équivalence (\equiv), plus générale (\supseteq, \geq), moins générale (\leq, \subseteq), disjonction (\perp), partie-de ou toute relation spécifiée par l'utilisateur entre les entités;

n - une mesure de confiance (typiquement dans l'intervalle $[0, 1]$) pour maintenir la correspondance entre e_1 et e_2 .

2.6 Représentation des connaissances spatio-temporelles dans les ontologies

2.6.1 Ontologies des données spatio-temporelles

La représentation des connaissances spatio-temporelles a également motivé la recherche au sein de la communauté du Web sémantique. Les approches de modélisation générales et les langages ont été étendus pour les données spatio-temporelles. Dans cette direction, [Chen et al., 2004] ont utilisé une ontologie temporelle, enrichie par les relations temporelles d'Allen, combinée avec les relations spatiales RCC8 pour représenter des connaissances spatio-temporelles. [Wang et al., 2004] introduisent une représentation spatio-temporelle dans le langage OWL, supportant le raisonnement logique tout en limitant les relations spatiales aux relations d'inclusion. Dans le travail de [Perry et al., 2009], un moteur de requête spatiale SPIRIT [Jones et al., 2004] est combiné avec à un modèle de description de ressources –ou *Resource Description Framework*– (RDF) temporel [Gutierrez et al., 2007]) dans un mécanisme de représentation spatio-temporelle intégré. Le moteur de recherche spatiale SPIRIT [Jones et al., 2004] combine une ontologie décrivant le domaine géospatial avec la capacité de recherche et d'indexation d'Oracle Spatial afin de rechercher des documents en se basant sur les caractéristiques spatiales associées aux lieux nommés mentionnés dans le document. RDF temporel représente une extension du standard RDF qui permet d'étiqueter les propriétés du graphe RDF avec les intervalles de temps correspondants, permettant ainsi la gestion explicite du temps. Ainsi, en combinant SPIRIT et le RDF temporel, [Perry et al., 2009] ont présenté une ontologie de haut niveau définissant une hiérarchie générale des classes d'entités thématiques et spatiales et des relations associées reliant ces classes d'entités. L'information temporelle est intégrée dans cette l'ontologie en étiquetant les instances de relation avec leurs temps de valides. La figure 2.13 illustre un exemple de modélisation spatio-temporelle avec cette ontologie, où une ontologie de domaine (représentant les connaissances de la Seconde Guerre mondiale) a été intégrée avec l'ontologie de haut niveau et chaque relation est annotée avec un intervalle indiquant le temps valide de la relation.

D'autres travaux proposent l'intégration des approches basées sur le raisonnement qualitatif spatial et temporel dans un cadre de raisonnement du Web Sémantique, comme alternative pour l'ajout de capacités spatiales et temporelles pour interroger les langages. Par exemple, [Hobbs and Pan, 2004] ont traduit un sous-ensemble du calcul d'intervalles d'Allen [Allen, 1984] en OWL pour créer l'ontologie OWL-Time. Cette ontologie permet décrire le contenu temporel des pages web ainsi que les propriétés temporelles des services web. Les relations d'Allen ont été utilisées pour spécifier les relations entre les intervalles. Pour chaque intervalle de temps des propriétés ont été définies permettant de dire, par exemple, qu'un instant *début* ou *termine* un intervalle. Cependant, [Abdelmoty et al., 2005] ont démontré que le langage OWL est insuffisant pour supporter pleinement le raisonnement spatial requis pour une géo-ontologie (par exemple, il est très difficile de définir une classe de maisons construites à partir de types de maisons situées à une certaine distance des autoroutes [Abdelmoty et al., 2005]).

Dans la même direction, [O'Connor and Das, 2011] ont présenté une ontologie appelée SWRL

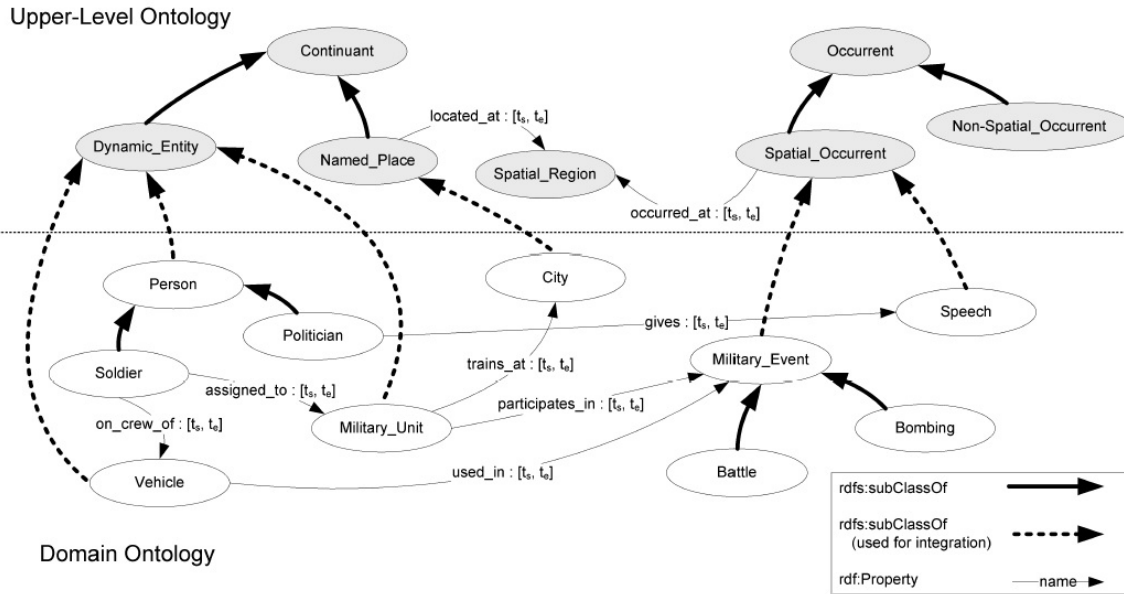


FIGURE 2.13 – Exemple d’ontologies intégrant les dimensions spatiales, temporelles et thématiques. Figure extraite de [PERRY, 2008]

Temporal Ontology (SWRLTO) pour encoder des informations temporelles au format OWL tout en se basant sur des intervalles de temps. SWRLTO est donc une ontologie des relations temporelles qui permet d’implémenter les relations d’Allen (par exemple : *before*, *meets*, *during*, etc.) via des built-ins temporels spécifiques au langage basé sur des règles langage de règles pour le web sémantique –ou *Semantic Web Rule Language*– (SWRL). Par exemple, dans la règle (2.3) nous utilisons le built-ins temporel *temporal:before* pour définir la propriété *hasOlderBrother* qui permet d’exprimer qu’un frère est plus âgé qu’un autre.

$$\begin{aligned}
 &hasBrother(?x1,?x2) \wedge hasBirth(?x1,?date1) \wedge hasBirth(?x2,?date2) \\
 &\wedge temporal:before(?date1,?date2) \rightarrow hasOlderBrother(?x2,?x1) \quad (2.3)
 \end{aligned}$$

D’autres approches ont été aussi proposées dans le but d’enrichir le Web sémantique avec des données spatiales et temporelles. stRDF/stSPARQL et GeoSPARQL sont deux exemples de propositions qui sont construites pour (i) développer des ontologies pour des données spatiales et temporelles, (ii) encodage de données spatiales et temporelles utilisant ces ontologies dans RDF et (iii) l’extension du langage SPARQL pour interroger des données spatiales et temporelles.

2.6.1.1 Le modèle stRDF/stSPARQL

[Koubarakis et al., 2012] ont présenté une extension, à base de contraintes, de RDF, appelée stRDF, qui peut être utilisée pour représenter des données thématiques et spatiales qui pourraient changer dans le temps. La contribution principale de stRDF est d’apporter au monde RDF les avantages des bases de données de contraintes et du raisonnement basé sur des contraintes pour que les données spatiales et temporelles puissent être représentées dans RDF en utilisant

des contraintes. Dans le modèle stRDF, les auteurs ont utilisé des standards OGC pour représenter les informations spatiales. Dans ce cas, les auteurs ont introduit des types de données comme *strdf:WKT* et *strdf:GML* pour représenter les géométries sérialisées en utilisant les standards Well-Known Text (WKT) et Geography Markup Language (GML) de l'OGC. La figure 2.14a illustre une représentation des types de données spatiales.

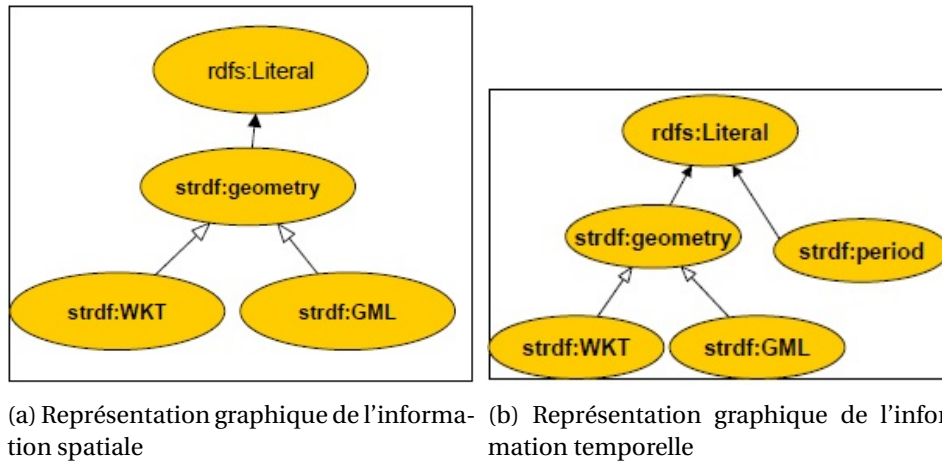
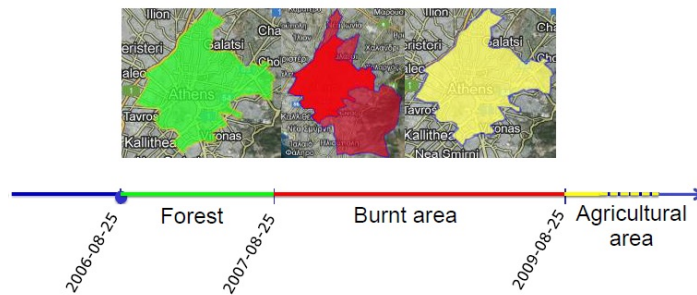


FIGURE 2.14 – Représentation graphique de l'information dans stRDF

stRDF étend RDF avec la capacité de représenter la dimension du temps valide (*valid time*) d'un triplet où un quatrième composant est ajouté à chaque triplet RDF [Koubarakis et al., 2012]. Dans la représentation stRDF, la ligne de temps considérée est l'espace de valeurs (discret) du type de données *xsd:dateTime* du schéma XML. Deux types de primitives temporelles sont supportés : les instants et les périodes de temps. Un *instant* de temps est un élément de la ligne de temps. Une période de temps (ou simplement une période) est une expression de la forme [B, E), (B, E], (B, E) ou [B, E] où B et E sont des instants de temps appelés respectivement le *début* (the *beginning*) et la *fin* (the *ending*) de la période. À partir du fait que la ligne temporelle est discrète, les auteurs ne supposent que des périodes de la forme [B, E) sans perte de généralité [Bereta et al., 2013]. Syntaxiquement, les périodes de temps sont représentées via un littéral du nouveau type de données *strdf:period* introduit dans le modèle stRDF (figure b). Un graphe stRDF est un ensemble de triplets et triples temporels. un triple temporel (appelé quad) une expression sous la forme $\langle s, p, o, t \rangle$ où $\langle s, p, o \rangle$ est un triplet RDF et t est instant ou période de temps appelé temps valide du triplet. En outre, les auteurs ont introduit deux constantes temporelles dans le modèle stRDF. Ces deux constantes ont été inspirées de la littérature des bases de données temporelles [Bereta et al., 2013]. *NOW* représente le temps actuel et peut apparaître au *début* ou à la *fin* d'une période. *UC* signifie "Until changed", est utilisé pour introduire des temps valides d'un triple qui persistent jusqu'à ce qu'ils soient explicitement terminés par une mise à jour. La figure 2.15 montre un exemple de représentation de l'état d'un objet (figure 2.15a) dans un graphe stRDF (figure 2.15b).

stSPARQL est le langage de requête correspondant au modèle stRDF. Il représente une extension du langage SPARQL pour interroger les données spatiales et temporelles exprimées dans stRDF, de manière déclarative [Koubarakis et al., 2012]. Cette nouvelle version stSPARQL étend le langage SPARQL 1.1 avec d'autres nouvelles fonctions que les utilisateurs peuvent être familiers avec. L'ensemble de fonctions comprend (i) des fonctions permettant de demander la représentation souhaitée d'une géométrie, de vérifier si une condition est valable pour une géométrie et de



(a) Différents état d'un objet dans le temps

```

clc:region1 rdf:type clc:Region .
clc:region1 strdf:hasGeometry
"POLYGON((23.38 40.48, ... 23.38 40.48))"^^strdf:WKT .

clc:region1 clc:hasLandCover clc:Forest
"[2006-08-25T11:00:00+02,2007-08-25T11:00:00+02]"^^strdf:period .

noa:bal rdf:type noa:BurntArea
"[2007-08-25T11:00:00+02,2009-08-25T11:00:00+02]"^^strdf:period .
noa:bal strdf:hasGeometry
"POLYGON((23.26 40.51, ... 23.26 0.51))"^^strdf:WKT .

clc:region1 clc:hasLandCover clc:AgriculturalArea
"[2009-08-25T11:00:00+02, "UC"]"^^strdf:period .
    
```

(b) stRDF correspondant (l'état de l'objet est montré par les trois couleurs)

FIGURE 2.15 – Exemple de représentation stRDF. (Selon [Bereta, 2013])

renvoyer certaines propriétés de la géométrie. `strdf:isEmpty(strdf:geometry g)` est un exemple de fonction appartenant à cette famille, qui prend comme argument un terme spatial `g` et renvoie `true` si `g` est la géométrie vide. De même (ii) des fonctions booléennes permettant de vérifier les relations topologiques entre deux géométries des objets. En utilisant ces fonctions, stSPARQL peut exprimer des sélections spatiales, c'est-à-dire des requêtes avec une fonction `FILTER` avec des arguments une variable et une constante (par exemple, `strdf:contains(?geo, "POINT(1 2)"^strdf:WKT)`), et les jointures spatiales, c'est-à-dire les requêtes avec une fonction `FILTER` avec des arguments deux variables (par exemple, `strdf:contains(?geoA, ?geoB)`) [Bereta, 2013]. En fin (iii) des fonctions d'agrégation ont été aussi introduites pour la construction de nouveaux objets géométriques à partir d'objets géométriques existants. Exemple de ces fonctions est la fonction `strdf:geometry union(set of strdf:geometry a)` qui retourne un objet géométrique qui est l'union de l'ensemble des géométries d'entrée [Koubarakis et al., 2012].

En outre, stSPARQL supporte la dimension temporelle et en conséquence permet l'interrogation des temps valides [Koubarakis et al., 2012]. Pour cela, les auteurs ont introduit des nouvelles fonctionnalités du langage : motifs de triplets temporels, les fonctions d'extension temporelle et les constantes temporelles. Selon [Bereta et al., 2013], les motifs de triples temporels sont présentés comme le moyen le plus fondamental pour interroger les triplets temporels. Un motif de triplet temporel est une expression de la forme `s p o t`, où `s p o` est un motif de triple et `t` est une période de temps ou une variable. Les fonctions d'extension temporelle sont définies afin d'exprimer des relations temporelles entre des expressions qui évaluent les valeurs des types de données `xsd:dateTime` et `strdf:period`.

2.6.1.2 L'ontologie GeoSPARQL

GeoSPARQL est un standard OGC qui prend en charge la représentation et l'interrogation de données géospatiales sur le Web sémantique. GeoSPARQL fournit un vocabulaire (classes, propriétés et fonctions) de représentation des données géospatiales dans RDF et définit une extension du langage de requête SPARQL pour le traitement des données géospatiales [Perry and Herring, 2012]. La spécification GeoSPARQL contient trois composants principaux : la définition d'un vocabulaire pour représenter les features, les géométries et leurs relations, un ensemble de fonctions spatiales spécifiques au domaine à utiliser dans les requêtes SPARQL et un ensemble de règles de transformation de requête. L'ontologie GeoSPARQL fournit une représentation des « features » (caractéristiques) et des géométries permettant ainsi de construire et interroger des données spatiales. Cette ontologie est basée sur le modèle Simple Features de l'OGC, avec quelques adaptations pour RDF. L'ontologie GeoSPARQL inclut une classe *geo:SpatialObject*, avec deux sous-classes primaires, *geo:Feature* et *geo:Geometry*. Les Features sont connectés à leurs géométries via la propriété *geo:hasGeometry* (figure 2.16).

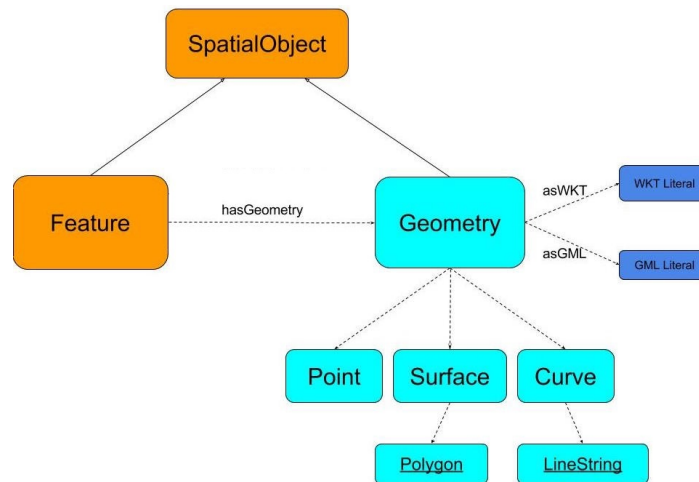


FIGURE 2.16 – L'ontologie GeoSPARQL : classes essentielles. Figure extraite de [Balaban, 2017]

De plus, GeoSPARQL inclut un moyen standard pour interroger des relations topologiques, comme la relation « se chevauche » (overlaps), entre des entités spatiales. Ces relations topologiques se présentent sous la forme de propriétés binaires entre les entités et les fonctions de filtre géospatial. Ces propriétés peuvent être exprimées à l'aide de trois vocabulaires distincts à savoir les caractéristiques simples de l'OGC, le modèle DE-9IM de [Egenhofer and Herring, 1990] et le modèle RCC8 [Randell et al., 1992a]. GeoSPARSL fourni aussi un ensemble de règles de transformation de requête à travers le composant « Extension de réécriture de requête » (en anglais, *Query rewrite extension*). Ce composant définit des règles pour transformer un simple motif de triplet qui teste une relation topologique entre deux paires d'objets spatiaux (Features ou géométries) en une requête équivalente impliquant des géométries concrètes et des fonctions de requête topologique.

2.6.2 Modélisation de la dynamique avec les ontologies de fluent

Les ontologies temporelles tels que *SWRLTO* et *OWL-Time* ontologie permettent la description du contenu temporel des pages Web et les propriétés temporelles des services Web. Outre les constructions de langage pour la représentation du temps dans les ontologies, il faut un mécanisme pour la représentation de l'évolution des concepts (événements) dans le temps [Batsakis and Petrakis, 2012]. La représentation des concepts dynamiques est réalisée en utilisant les ontologies de fluent tels que : le versioning, la Réification, relation n-aire et l'approche 4D-fluent. Une description de ces ontologies sera présentée dans cette section.

2.6.2.1 Le versioning

Le versioning [Klein and Fensel, 2001] est décrit comme la capacité de gérer les changements dans ontologies en créant et gérant de multiples variantes d'entre eux. Lorsqu'un changement a lieu, une nouvelle version est créée. Cependant cette méthode souffre de plusieurs inconvénients : (a) les changements mêmes sur les attributs simples exigent qu'une nouvelle version de l'ontologie soit créée menant à la redondance de l'information (b) la recherche d'événements qui sont produits à des instances de temps ou pendant des intervalles de temps nécessite des recherches exhaustives dans plusieurs versions de l'ontologie, (c) on ne sait pas comment la relation entre les classes en évolution est représentée.

2.6.2.2 La Réification

Selon [Andronikos et al., 2009], la Réification est une technique générale permettant de représenter les relations n-aires en utilisant un langage comme *OWL* qui ne permet que des relations binaires. Plus précisément, une relation n-aire est représentée comme un nouvel objet qui a tous les arguments de la relation n-aire sous forme d'objets de propriétés. Par exemple, lorsque'une relation *R* détient entre deux objets *A* et *B* à un instant *t*, alors un nouvel objet est créé et qui a les trois propriétés : les objets *A* et *B* et la valeur temporelle *t*, exprimée par $R(A,B,t)$. La figure 2.17 illustre le principe général de cette méthode. La redondance des données est le premier inconvénient de la réification, parce que quand un nouvel objet est créé chaque fois qu'une relation temporelle doit être représentée. De plus, puisque les relations sont représentées comme des objets et non comme des relations *OWL*, la sémantique offerte par la spécification *OWL* en ce qui concerne les relations d'objet ne peut pas être appliquée avec l'approche de la réification.

2.6.2.3 Relation n-aire

Une relation N-aire [Noy et al., 2006] est également une technique à usage général qui représente une relation n-aire en utilisant un objet supplémentaire. Contrairement à la réification, la relation n-aire n'est pas représentée comme objet d'une propriété, mais comme deux propriétés liées chacune au nouvel objet. Cette approche ne nécessite qu'un seul objet supplémentaire pour

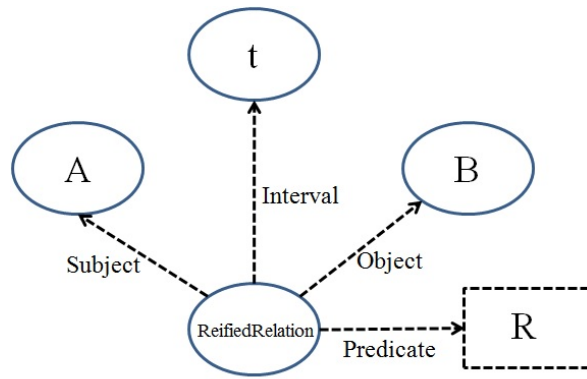


FIGURE 2.17 – Principe général de la réification

chaque intervalle temporel, elle conserve la sémantique de la propriété, mais elle souffre de la redondance des données dans le cas des propriétés inverses et symétriques [Batsakis and Petrakis, 2010]. La figure 2.18 montre une représentation générale du modèle des relations n-aires.

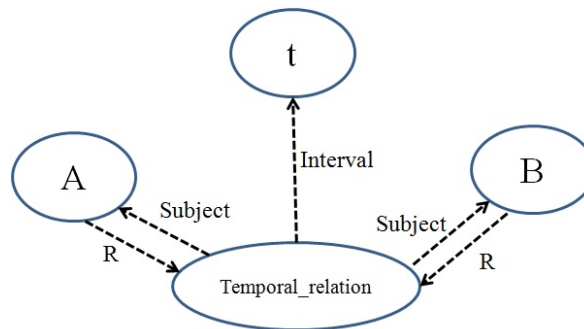


FIGURE 2.18 – Modèle des relations n-aires

2.6.2.4 4D-fluent

L'approche 4D-fluent de [Welty et al., 2006] est basée sur l'approche philosophique du perdurantisme. Cette approche montre comment les informations temporelles et l'évolution des concepts temporels peuvent être représentées dans OWL. L'approche 4D-fluent considère que les objets ont une dimension temporelle composée de plusieurs représentations temporelles, chacune correspondant à un intervalle de temps défini appelé *timeslices*. La représentation du changement de propriétés d'un objet est réalisée par l'utilisation de *fluent*. Un fluent est une propriété valide uniquement à certains intervalles ou instants dans le temps. Lorsque la propriété d'un objet varie, un nouveau *timeslices* est établi, présentant la nouvelle propriété de l'objet. L'approche 4D-fluent souffre encore de la redondance des données, mais contrairement à d'autres approches, elle maintient un support complet de l'expressivité et du raisonnement pour OWL. La figure 2.19 montre un exemple d'ontologie illustrant le principe de l'approche 4D-fluent. Dans cette ontologie deux classes sont représentées : la classe *Company* avec la propriété de type de données *companyName* et *Product* avec le prix des propriétés de type de données et *productName*. Dans cet exemple, *CompanyName* est une propriété statique (sa valeur ne change pas dans le temps), tandis que les propriétés *produces*, *productName* et *price* sont des propriétés dynamiques (*fluent*) dont les valeurs peuvent changer dans le temps. Comme ils sont des propriétés *fluent*, leur domaine (et leur

range) est de la classe *TimeSlice*. *CompanyTimeSlice* et *ProductTimeSlice* sont des instances de la classe *TimeSlice* et indiquent que le domaine des propriétés *produces*, *productName* et *price* sont des *time slices* restreints aux *slices* d'une classe spécifique [Batsakis and Petrakis, 2010].

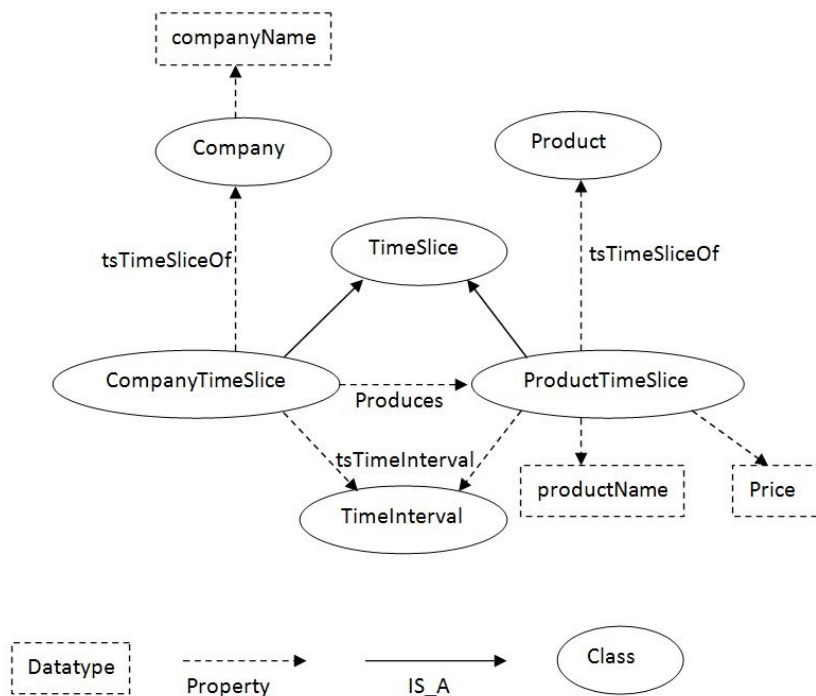


FIGURE 2.19 – Ontologie pour la représentation d’objets dynamiques en utilisant l’approche 4D-fluents. Figure extraite de [Batsakis and Petrakis, 2010]

Dans la littérature, l’approche 4D-fluent est la méthode la plus connue pour gérer les propriétés dynamiques dans l’ontologie. Elle possède une structure simple permettant de transformer facilement une ontologie statique en une dynamique. Cependant, cette approche ne définit pas les relations qualitatives pour décrire le type de changement qui a eu lieu ou pour décrire les relations temporelles entre les objets [Harbelot, 2015]. Pour pallier cette limite, [Batsakis and Petrakis, 2010] ont introduit l’ontologie Semantic Web Ontology Language (SOWL) pour gérer les informations spatio-temporelles dans les ontologies tout en se basant sur le mécanisme de 4D-fluent.

2.6.2.5 L’ontologie SOWL

L’ontologie SOWL a été présentée par [Batsakis and Petrakis, 2010] dans le but de représenter les informations spatiales et spatio-temporelles et leur évolution dans l’espace et le temps dans OWL. Cette approche montre également comment les relations temporelles et spatiales qualitatives sont représentées dans une ontologie. L’ontologie SOWL étend l’approche 4D-Fluent par des expressions temporelles qualitatives (en plus des expressions quantitatives) permettant la représentation des intervalles temporels avec des points de début et des points de fin inconnus à travers leur relation (par exemple, « avant », « après ») à d’autres intervalles de temps. En plus, SOWL supporte à la fois les expressions quantitatives et qualitatives pour des représentations spatiales. Les relations spatiales sont généralement exprimées par des méthodes qualitatives (par exemple « au

nord de») plutôt que par des relations quantitatives. Dans cette ontologie, deux types de relations spatiales sont supportées : les relations topologiques et de directions. Une autre caractéristique qui distingue le modèle SOWL est qu'il supporte le raisonnement spatio-temporel qui se compose d'un ensemble de règles d'inférence applicables sur des relations temporelles et spatiales. Le raisonnement dans SOWL est réalisé à travers un ensemble de règles SWRL opérant sur des relations spatiales (topologiques ou directionnelles) ainsi que par un ensemble de règles temporelles d'Allen pour affirmer des relations temporelles inférées. Exemples de règles SWRL utilisées pour inférer respectivement des relations spatiales et temporelles sont présentées par les règles (2.4) et (2.5) respectivement.

$$\text{TPP}(x, y) \wedge \text{DC}(y, z) \rightarrow \text{DC}(x, z) \quad (2.4)$$

$$\text{DURING}(x, y) \wedge \text{MEETS}(y, z) \rightarrow \text{BEFORE}(x, z) \quad (2.5)$$

2.6.3 Modélisation de la dynamique avec les ontologies de haut niveau

Les représentations spatio-temporelles sont également offertes par des ontologies de haut niveau (ou ontologies fondamentales) telles que DOLCE [Masolo et al., 2003]), BFO [Grenon and Smith, 2004], General Formal Ontology (GFO) [Herre et al., 2006] et d'autres. Ces ontologies fondamentales fournissent un méta-langage (Mizoguchi et al., 1995) aux approches ontologiques qui leur permet de modéliser la dynamique des objets et des phénomènes spatio-temporels dans un domaine. Comme nous avons présenté dans la section 2.5.1.3, les ontologies de haut niveau sont réutilisables d'un domaine à un autre. Elles fournissent des concepts généraux avec lesquels tous les termes des ontologies existantes doivent être connectés ou liés. Les ontologies de haut niveau incluent un vocabulaire lié aux objets, temps, à l'espace, événements, processus, etc. En exploitant ces ontologies, les travaux existants dans la littérature ([Bittner and Smith, 2003], [Gangemi et al., 2002], [Grenon and Smith, 2004], [Masolo et al., 2003]) visent à fournir une description et une catégorisation des entités spatio-temporelles telles que les états, les événements et les processus.

D'un point de vue de ces ontologies, les états sont assimilés à des objets appelés *continuants* (également appelés *endurants*). Les transitions, qui décrivent le changement d'un état à un autre, peuvent être assimilées à des objets nommés *occurrents* (également appelés *perdurants*). Les continuants sont décrits comme la classe d'entités qui « *existent entièrement à tout instant dans lequel ils existent et conservent leur identité dans le temps à travers une variété de changements* ». Des exemples de continuants sont une zone urbaine, un être humain, un arbre, etc. Les occurrents sont des entités qui se produisent et qui se terminent. Ainsi, ils sont associés à des limites temporelles. Les occurrents sont souvent assimilés à des événements et des processus tels que l'expansion urbaine, la déforestation, etc. [Grenon and Smith, 2004] affirment que « les occurrences dépendent des objets continuants en tant que leurs porteurs ». Cela signifie que ce qui est décrit lors de la définition d'un objet continuant est toujours décrit en référence à un occurrent. Par exemple, l'occurrent *expansion urbaine* (respectivement de la *déforestation*) fait référence à une *zone urbaine* (respectivement à un *zone de forêt*) en tant que continuant.

2.6.3.1 Modélisation avec l'ontologie BFO

Pour décrire les caractéristiques dynamiques de la réalité, [Grenon and Smith, 2004] ont présenté une ontologie de haut niveau appelée BFO. BFO est une ontologie modulaire qui comprend deux sous-ontologies : l'ontologie SNAP pour les continuants tels que les individus et les objets, et l'ontologie SPAN qui contient les occurrents comme les changements, les événements et les processus. Des interrelations sont définies entre les deux types d'ontologies d'une manière qui permet à BFO de traiter à la fois les caractéristiques statiques/spatiales et dynamiques/temporelles de la réalité. La structure taxonomique de haut niveau de l'ontologie BFO est illustrée dans la figure 2.20. Nous avons choisi d'utiliser cette ontologie dans notre travail et les composants de cette ontologie seront présentés en détail le chapitre suivant.

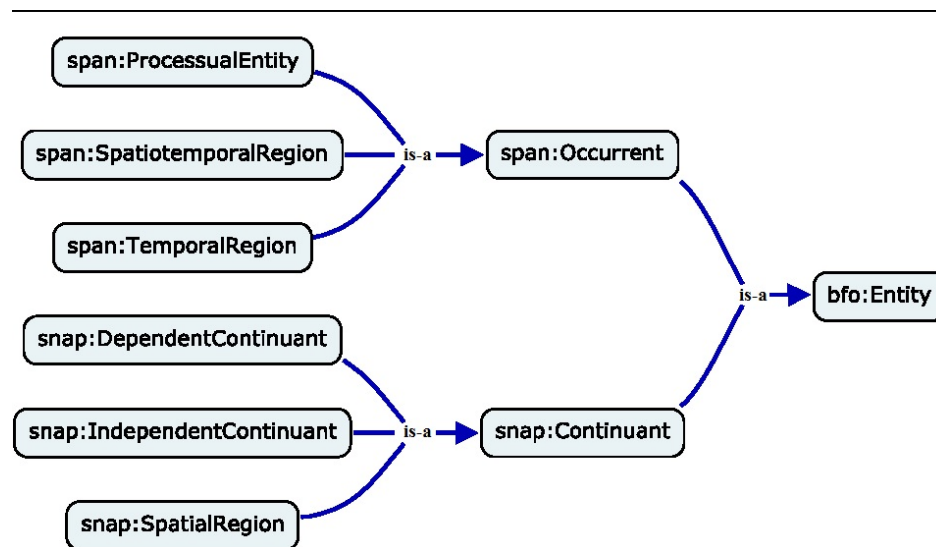


FIGURE 2.20 – structure taxonomique de haut niveau de l'ontologie BFO

L'ontologie BFO a été réutilisée par [Weichert et al., 2013] pour simuler la dynamique du flux sanguin dans le domaine biomédical. Dans ce travail, les concepts du domaine biomédical tels que les processus de flux sanguin et de l'injection d'un médicament ont été tout d'abord identifiés et catégorisés en se basant sur BFO. Par la suite, les concepts de domaine ont été connectés à leur super-catégories dans BFO en utilisant des relations sémantiques, spatiales et temporelles à travers l'importation des deux ontologies : l'ontologie temporelle SWRLTO et l'ontologie des relations (RO). L'ontologie RO définit une théorie des universels et des particuliers et utilise un petit ensemble de relations axiomatiques de base pour fournir des définitions non ambiguës et calculables des relations [Robinson and Bauer, 2011]. L'intégration de RO permet de représenter des relations fondamentales telles que les relations de participation (comme *has participant*), les relations partielles (comme *part_of*), les relations spatiales (comme *adjacent to*) et les relations temporelles (comme *preceded by*).

En suivant le même principe, [Camara et al., 2014] ont proposé un cadre conceptuel basé sur une architecture ontologique multi-niveau pour le suivi et la prévention de la propagation d'une maladie infectieuse. La solution proposée permet d'apporter une contribution au domaine des maladies par la modélisation de la dynamique des processus sous-jacents dans le domaine des maladies infectieuses. Les auteurs ont relié l'ontologie de domaine des maladies infectieuses

(IDO) à BFO à travers une couche noyau qui contient deux ontologies noyaux appelées respectivement IDO-Core et IDSDO-Core. L'ontologie IDO-Core couvre les concepts et les relations généraux du domaine des maladies infectieuses et leurs relations. Tandis que l'ontologie IDSDO-Core contient les concepts de la propagation des maladies infectieuses. Les auteurs ont aussi importé les ontologies RO et SWRLTO pour implémenter les relations spatiales, temporelles et sémantiques entre les différentes couches d'ontologies.

Dans [Iwaniak et al., 2013], en se basant sur l'ontologie BFO, les auteurs ont présenté une manière pour construire des ontologies de domaine pour la planification spatiale, y compris la représentation des phénomènes spatio-temporels. La modélisation en utilisant BFO peut prendre deux stratégies. La première serait implémentée par l'instanciation directe des universels de BFO, ce qui rend une classification implicite en attribuant les qualités appropriées. La seconde est l'extension explicite de l'ontologie par des sous-classes de l'utilisateur. Dans leur travail, [Iwaniak et al., 2013] ont choisi la deuxième stratégie qui leur permet d'étendre l'ontologie BFO avec une hiérarchie de classes en utilisant la relation *rdfs :subClassOf*. En effet, les classes d'objets spatial du monde réel, en relation avec le sujet de la gestion spatiale, ont été associées à la hiérarchie de la catégorie formelle des continuants (endurants) dans BFO. Par exemple, les classes de la couverture de sols comme *forêt, eau, zone humide, etc.*, et les classes qualitatives comme la *densité d'arbres* sont classées respectivement en tant que sous-classes des catégories *Independant-continuant* et *Dependant-continuant* dans BFO. En parallèle, les auteurs ont étendu BFO par des classes représentant des processus et des événements en relation avec le domaine de la gestion spatiale. Exemples de classes incluent la *déforestation, l'urbanisation* et le *boisement*. Ces classes ont été liées la catégorie formelle des *occurrent* dans BFO. Cette première étape permet de construire une ontologie de domaine comme une extension de BFO.

Par la suite, les auteurs ont présenté, dans [Lukowicz and Iwaniak,], comment l'ontologie de domaine alignée avec des ensembles de données RDF décrivant des informations spatiales permet de découvrir la nature des phénomènes spatio-temporels. Les ensembles des données RDF sont utilisés en tant que structures de stockage d'informations spatiales extraites de ressources de données spatiales hétérogènes. Ces structures permettent de tenir compte des contextes spatio-temporels de ces données et de les lier à l'ontologie de domaine (construite à partir de BFO). Pour représenter les relations spatio-temporelles, les auteurs ont importé des classes, des propriétés et des types de données des ontologies comme GeoSPARQL [Perry and Herring, 2012] et l'ontologie de temps (OWL-Time) [Hobbs and Pan, 2006]. GeoSPARQL fournit au modèle proposé des classes spatiales et des types de données ainsi que des relations topologiques entre des objets géométriques en utilisant l'ensemble d'opérateurs RCC8 [Randell et al., 1992a]. L'ontologie de temps (Time ontology) introduit un ensemble de classes et de propriétés décrivant des périodes de temps (Instant, Interval) et durée, ainsi que des opérateurs temporels topologiques (opérateurs d'Allen [Allen, 1984]). La découverte des processus de changement dans l'ontologie proposée est effectuée par des raisonneurs sémantiques (moteurs de raisonnement) existants.

2.6.3.2 Modélisation avec l'ontologie DOLCE

DOLCE [Masolo et al., 2003] est aussi une autre ontologie de haut niveau qui a été utilisée pour simplifier et guider la représentation des entités fondamentales nécessaires pour représenter des phénomènes dynamiques. DOLCE appartient au projet WonderWeb Foundational Ontology Library (WFOL)¹ et elle est conçue pour être minimaliste dans le sens qu'elle ne comprend que les catégories de haut-niveau les plus réutilisables et largement applicables, rigoureuses en termes d'axiomatisation et largement étudiées et documentées [Masolo et al., 2003]. La partie supérieure de la taxonomie de DOLCE est montrée dans la figure 2.21. Les catégories principales de DOLCE sont *endurant*, *perdurant*, *qualité* (*quality*) et *abstrait* (*abstract*). *Endurant* comprend les objets physiques tels qu'un lac et une forêt et des matière quantitative comme l'eau. *Perdurant* classe tous les types d'occurrences tels que les processus, les événements et les états. La relation principale entre les endurants (à savoir les objets ou les substances) et les perdurants (à savoir les événements ou les processus) est la *participation* : un endurant « vit » dans le temps en participant à un perdurant [Mika et al., 2004]. Par exemple, une personne, qui est un endurant, peut participer à une discussion, qui est un perdurant. La vie d'une personne est aussi un perdurant dans lequel une personne participe tout au long de sa durée. Les qualités peuvent être considérées comme les entités de base que nous pouvons percevoir ou mesurer : formes, couleurs, tailles, poids, etc. Par exemple, le niveau d'eau d'une rivière et la durée d'un feu de forêt. Les qualités spatiales et temporelles décrivent les attributs spatio-temporels des objets ou des événements. Enfin, les abstraits sont les concepts qui n'ont pas des qualités spatiales ou temporelles, et ils ne sont pas eux-mêmes des qualités, par exemple, des régions. Selon [Mika et al., 2004], les régions en particulier sont utilisées pour coder la mesure des qualités comme conventionnalisées dans un espace métrique ou conceptuel.

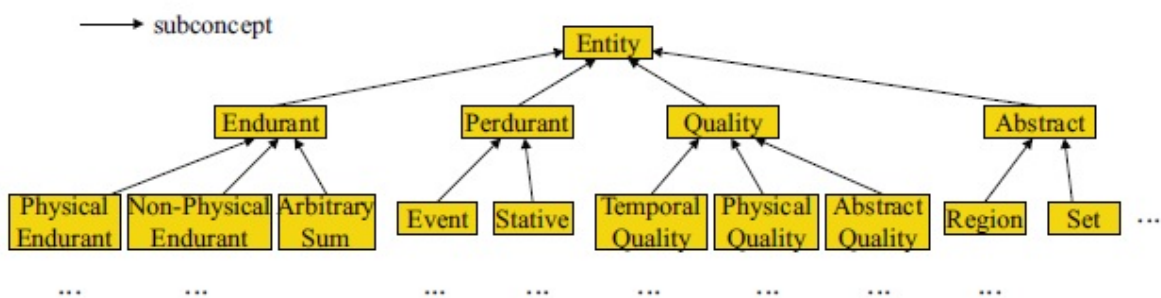


FIGURE 2.21 – Partie supérieure de la taxonomie de DOLCE

DOLCE a été largement raffinée dans le sens où plusieurs ontologies ([Brodaric and Probst, 2009], [Kuhn, 2009], [Devaraju and Kuhn, 2010], [Devaraju et al., 2015]) abordant différents aspects de domaines géospatiaux et de détection ont été déjà alignées sur DOLCE. Par exemple, en se basant sur DOLCE, [Devaraju and Kuhn, 2010] ont présenté une ontologie centrée sur le processus pour représenter les relations entre les processus hydrologiques (tels que les précipitations et l'évapotranspiration) et les propriétés observées provenant des réseaux de géo-capteurs (GSN), en définissant une terminologie contrôlée permettant une représentation explicite d'un processus et ses participants. Les auteurs soutiennent que les faits concernant les géo-processus peuvent

1. <http://wonderweb.semanticweb.org/deliverables/D17.shtml>

être déduits des données des capteurs. Le travail présenté est centré sur le développement d'une ontologie pour représenter des concepts d'hydrologie de surface, en se basant sur l'ontologie de haut-niveau DOLCE. Les auteurs ont montré comment les relations et les processus peuvent être alignés sur des catégories générales définies dans DOLCE.

[Devaraju et al., 2015] ont appliqué une ensemble de raffinement à DOLCE et ils ont développé un modèle formel, appelé *Sensing Geographic Occurrences Ontology (SGEO)*, pour inférer des événements géographiques à partir d'observations de capteurs. L'ontologie supporte les inférences des événements institutionnalisés en se basant sur les séries temporelles produites par les capteurs *in-situ*. Les événements institutionnalisés se réfèrent aux événements naturels réels dont les définitions sont définies institutionnellement [Devaraju et al., 2015]. Le modèle proposé inclut aussi la représentation des instants, des intervalles et des éléments temporels. Ces informations temporelles sont représentées dans le modèle à travers l'importation de l'ontologie temporelle *SWRLTO*. Les auteurs n'ont pas aller loin pour la représentation de l'information spatiale. Seulement, ils ont représenté la localisation des évènements. La localisation d'un événement à exprimer en termes de localisation physique (par exemple, des coordonnées géographiques) ou de conventions sociales (par exemple, des unités administratives). Le modèle *SGEO* est exploité avec un mécanisme de raisonnement et d'interrogation pour récupérer les événements et leurs informations de détection. Ce modèle a été appliqué pour raisonner sur les tempêtes de neige et leurs événements liés aux propriétés observées par les stations météorologiques.

2.6.4 Le modèle Continuum

Récemment, [Harbelot et al., 2015] ont introduit une ontologie spatio-temporelle sémantique comme un modèle pour l'analyse des phénomènes dynamiques au sein d'environnements géo-spatiaux. Le modèle proposé est capable de découvrir la connaissance sur des données parcelaires et permettant l'analyse des phénomènes dynamiques à l'aide de données temporelles, spatiales et thématiques. Ce modèle est appelé *Continuum* et il se base sur les technologies du Web Sémantique pour permettre une représentation accrue du contexte de l'environnement géospatial et fournir des résultats d'analyses proches de ceux des experts du domaine via des opérations de raisonnement automatiques et valides [Harbelot, 2015]. Le modèle Continuum est basé sur l'approche 4D-fluent et développe le concept de continuum dans le contexte d'un SIG spatio-temporel. En conséquence, un continuum est un ensemble de représentations d'une entité dans le temps, chaque représentation ayant un intervalle de temps valide. Le modèle Continuum représente les objets avec trois différents aspects : l'espace, le temps et la sémantique. L'espace est utilisé pour définir la représentation graphique de l'objet. Le temps permet de représenter les instants ou les intervalles de temps qui décrivent l'existence temporelle de l'objet. Enfin, la partie sémantique permet d'identifier un objet et de décrire ses connaissances associées.

La figure 2.22 montre les différentes composantes du modèle Continuum. Ce modèle intègre une ontologie de domaine, une ontologie de fluent (temporelle) et l'ontologie GeoSPARQL. L'ontologie de domaine permet de stocker les connaissances et le contexte lié à l'environnement géo-spatial. Elle sert comme connaissance métier afin de définir des règles d'inférence pour améliorer la dynamique de l'environnement [Harbelot, 2015]. L'ontologie de fluent est utilisée pour définir

plusieurs états pour une même entité au cours du temps. Les relations de filiation permettent de lier les différents états d'une entité au cours de son cycle de vie. GeoSPARQL se compose d'une petite ontologie utilisée pour une représentation spatiale des entités définies dans l'ontologie de domaine. GeoSPARQL est implémenté dans des triplestores efficaces permettant des calculs basés sur la topologie ainsi que d'autres opérations géospatiales. En plus, le modèle Continuum inclut un ensemble de règles et des built-ins (c.-à-d., des fonctions intégrés) permettant d'inférer des relations qualitatives à partir de données quantitatives. L'inférence est faite par l'intégration d'un ensemble de règles SWRL.

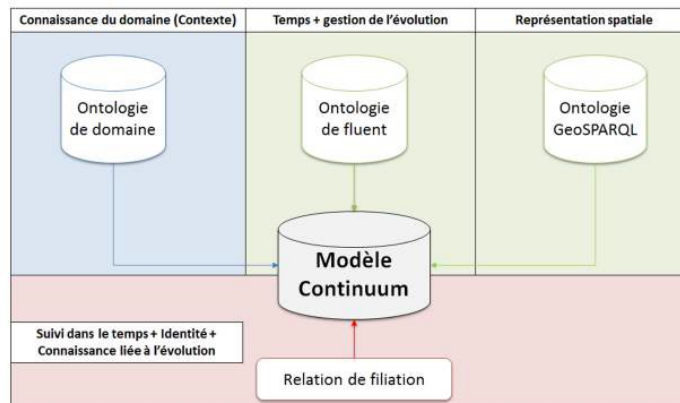


FIGURE 2.22 – Les composantes du modèle Continuum. Figure extraite de [Harbelot, 2015]

2.6.5 Les ontologie de modélisation de changement en télédétection

La construction d'une ontologie de changements et des processus géographiques est un objectif à moyen terme visant à établir les fondements ontologiques de la SIG [Mark et al., 2004]. Cette observation est particulièrement vraie dans le cas de la télédétection, car les principales applications sont associées à la détection des changements (changement d'utilisation/couverture des sols, changement climatique, évolution du niveau de la mer, etc.). Comme la description des objets géographiques reste « statique » dans une ontologie, par exemple la définition d'une « forêt », une ontologie des changements d'identité des objets améliorerait notre capacité à suivre et interpréter les facteurs de changements. Des études ont montré comment les ontologies pouvaient être exploitées pour l'identification et la détection de changements dans les images satellites.

Dans cet axe, [Kauppinen and de Espindola, 2011] ont réalisé un travail intéressant pour la représentation ontologique des processus de déforestation et de la trajectoire de changement de la terre en Amazonie Brésilienne. Dans ce travail, les auteurs ont exploité l'ontologie DOLCE pour développer une approche ontologique pour la modélisation des changements des trajectoires de sol en Amazonie brésilienne. Les auteurs ont commencé par identifier et classifier les concepts liés au processus de déforestation en se basant sur les concepts de haut niveau de l'ontologie DOLCE. Par la suite, ces concepts sont reliés directement à leurs super-concepts dans l'ontologie DOLCE. Le résultat obtenu est une ontologie de domaine appelé Process-oriented Land Use and Tenure Ontology (PLUTO), qui permet la modélisation du processus de déforestation. En parallèle, les auteurs ont présenté un ensemble de règles pour raisonner sur ce processus.

[Hashimoto et al., 2011] ont présenté un cadre de traitement des informations basé sur l'ontologie pour la détection des changements dans les données de télédétection. Le cadre proposé considère l'analyse des données de télédétection comme un traitement de l'information de la connaissance qui dérive de nouvelles informations sur les cibles avec l'inférence des données observées et des connaissances *a priori* pour la télédétection. Pour gérer une grande quantité de connaissances sur les ordinateurs de manière cohérente, les auteurs ont utilisé une structure de connaissances à double couche : une couche d'ontologie et une couche heuristique, pour implémenter leur modèle. L'ontologie est utilisée comme dictionnaire conceptuel sur le domaine de la télédétection. Cette ontologie est formée par 420 concepts et un ensemble de relation entre ces concepts à savoir la relation d'héritage « is-a », la relation « part-of », la relation « attribute-of », etc. En effet, l'ontologie est composée principalement de six groupes de concepts : 1) substance, 2) objet géographique, 3) cluster, 4) caractéristique géographique (feature), 5) changement superficiel et changement contextuel. La « substance » est un attribut basique qui définit la propriété du matériel. « Objet géographique », « cluster » et « caractéristique géographique » représentent des matières géographiques qui sont composées de substances ou d'autres matières géographiques. Les « changements superficiels » et les « changements contextuels » représentent tous deux des changements géographiques. La différence entre ces deux changements se réside dans l'inclusion ou non de la sémantique contextuelle. Un « changement superficiel », par exemple l'apparence ou la disparition des matières géographiques, n'a pas de contexte, mais un « changement contextuel » à savoir les types de hasard, par exemple un glissement de terrain, a des contextes.

L'heuristique est une connaissance expérimentale contenant une incertitude [Hashimoto et al., 2011]. Dans le modèle proposé, l'heuristique est décrite par les concepts de l'ontologie de domaine utilisée. En plus, le cadre conceptuel proposé permet la construction d'un réseau bayésien pour inférer les objets cibles et les changements à détecter en utilisant l'ontologie et les heuristiques sans assistance des utilisateurs. Ainsi, après que le réseau bayésien est construit, le modèle implémente une inférence probabiliste avec le réseau bayésien et en déduit la probabilité de changement de cible [Hashimoto et al., 2011].

La figure 2.23 illustre un exemple de processus d'inférence (un réseau bayésien) permettant la détection d'un glissement de terrain en utilisant l'ontologie de domaine et les heuristiques. Dans cet exemple, le processus de construction du réseau bayésien s'exécute en trois étapes. Dans la première étape, le système récupère le mot de la requête « *glissement de terrain* » de l'ontologie. Ensuite, il construit un réseau bayésien à partir de la structure de définition du mot de requête « *glissement de terrain* ». Enfin, pour chaque nœud du réseau bayésien, le système recherche et implémente les heuristiques applicables et mets à jour les probabilités de tout le réseau bayésien [Hashimoto et al., 2011].

Les auteurs ont testé leur modèle pour la détection changement en utilisant deux d'images multi-spectrale bi-temporelles acquises par le satellite AVNIR-2 en 14 juin 2009 (figure 2.24a) et en 30 juillet 2009 (figure 2.24b) respectivement. La détection d'un changement comme le « *glissement de terrain* » se déduit à travers la probabilité d'existence de ce phénomène dont le nom représente une requête entrée par l'utilisateur, par exemple, « *glissement de terrain* ». Une probabilité élevée montre l'existence du phénomène de « *glissement de terrain* » comme montré dans la figure 2.24c.

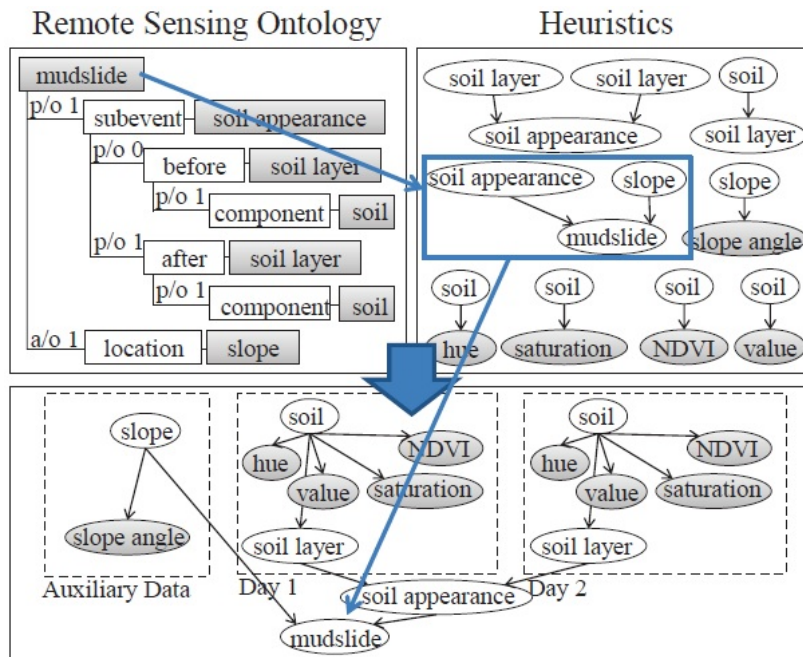


FIGURE 2.23 – Construction d’un réseau bayésien de détection des glissements de terrain en utilisant l’ontologie et les heuristiques. Figure extraite de [Hashimoto et al., 2011]



(a) Image AVNIR-2 acquise en 14 Juin 2009 (avant la catastrophe)
 (b) Image AVNIR-2 acquise en 30 Juillet 2009 (après la catastrophe)
 (c) Résultats de détection de glissements de terrain

FIGURE 2.24 – Illustration de détection des glissements de terrain. Figures extraites de [Hashimoto et al., 2011]

Plus récemment, [Li et al., 2016] ont proposé un modèle conceptuel intégré pour supporter la modélisation sémantique et le raisonnement du changement spatio-temporel des objets géographiques. Dans ce travail, les auteurs ont commencé par développer un modèle conceptuel pour représenter formellement la variation spatio-temporelle des données de changement, qui sont des connaissances essentielles pour soutenir diverses études environnementales et sociales, telles que les études de déforestation et d'urbanisation. Ensuite, une ontologie spatiale a été créée pour encoder ces données spatio-temporelles sémantiques dans un format compréhensible par la machine. En se basant sur les connaissances définies dans l'ontologie et les règles de raisonnement associées, la plate-forme sémantique développée peut supporter des requêtes sémantiques et un raisonnement des trajectoires de changement des zones présentant un changement de LULC [Li et al., 2016]. L'ontologie géospatiale proposée pour la modélisation sémantique des informations de changement est présentée dans la figure 2.25.

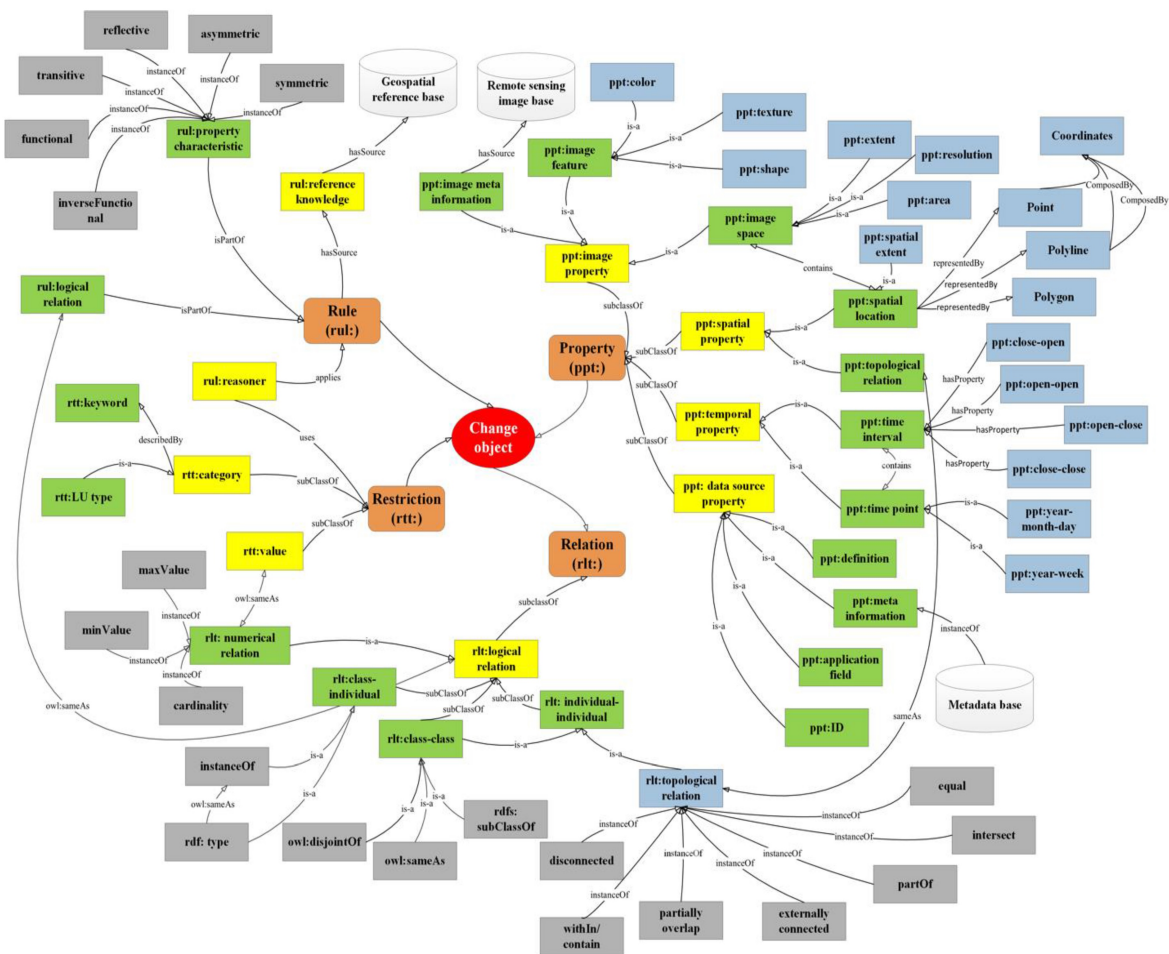


FIGURE 2.25 – Ontologie géospatiale pour la modélisation sémantique des informations de changements. Figure extraite de [Li et al., 2016]

Cette ontologie représente un objet spatial, ses propriétés statique (c.-à-d., la propriété de l'image à partir de laquelle un objet géospatial est obtenu) et dynamique (c.-à-d., l'information de changement dans le temps) et ses relations avec d'autres objets spatiaux à proximité. Cette ontologie géospatiale de changements de LULC utilise quatre composantes principales pour décrire les objets de changement qui sont : propriété, relation, règle et restriction (colorées en orange dans la figure). En plus des quatre composantes principales, les entités en jaune et en vert repré-

sentent respectivement les sous-classes de premier et de deuxième niveau. Par exemple la sous-classe « *property* » est en outre divisée en des sous-classes comme « *spatial_property* », « *temporal_property* », « *thematic_property* », « *image_property* » et « *data_source_property* » décrivant la propriété spatiale, temporelle et thématique d'un objet spatial, ainsi que les caractéristiques de l'image de télédétection à partir de laquelle l'objet est extrait. Les nœuds bleus représentent le type d'une instance. Par exemple, la classe « *polygon* » est un type de la classe « *spatial location* » utilisée pour décrire la propriété spatiale d'une entité ayant une propriété de zone, comme une parcelle. Les nœuds en gris dans la sous-arborescence de la classe « *relation* » sont les sous-types d'instances de ses parents. Les données externes pour ce modèle ontologique proviennent des bases de données de référence, d'images de télédétection et de méta-données. La composante « *rule* » décrit les règles d'inférence dans un format compréhensible par une machine. Selon [Li et al., 2016], ces règles sont classées en règle réflexive ou une règle symétrique pour supporter le raisonnement sémantique. Le modèle sémantique proposé supporte deux types de raisonnement pour la détection de changement spatio-temporel : un raisonnement logique et un raisonnement spatial. Le raisonnement logique utilise les caractéristiques d'une propriété OWL comme étant transitive ou réflexive pour déduire des connaissances spatiales. Ce type de raisonnement est basé sur la connaissance de référence provenant de diverses sources [Li et al., 2016]. La connaissance de référence est la compréhension professionnelle des experts extraite de la base de référence géospatiale et constitue la base du raisonnement. Le raisonnement spatial utilise des relations spatiales, par exemple les relations topologiques, pour inférer des changements.

2.7 Synthèse

L'ontologie joue un rôle important pour la modélisation de l'ensemble de connaissances dans un domaine donné. Elle fournit la structure de base autour de laquelle une base de connaissances peut être construite. Souvent assimilée à une base de connaissances, l'ontologie offre une modélisation flexible, accessible et compréhensible sans perte de sémantique. Les communautés SIG et de télédétection utilisent l'ontologie pour spécifier explicitement et formaliser la signification des concepts de domaine dans un langage lisible par machine qui permet l'indexation d'informations spatiales sur un niveau sémantique. Le rôle de l'ontologie dans l'interprétation de l'image par télédétection est de capturer les connaissances de domaine d'une manière générique et de fournir une compréhension commune d'un domaine géographique.

Le problème d'interopérabilité sémantique dans les systèmes de classification des classes d'utilisation et de couverture des sols est l'un des principaux défis qui a encouragé l'exploitation des ontologies dans le domaine géographique. En effet, les systèmes de classification classique définissent les classes LULC différemment, empêchant ainsi l'échange, l'intégration et la réutilisation des données [Li et al., 2016]. Pour résoudre le problème d'interopérabilité sémantique, plusieurs travaux ont été présentés et ont considérablement amélioré l'interopérabilité sémantique entre les systèmes existants de classification LULC par la formalisation ontologique. Ces travaux se concentrent principalement sur l'appariement de la définition conceptuelle des types d'utilisation des terres, plutôt que sur des objets spatiaux spécifiques identifiés à partir d'images de télédétection, qui contiennent plus d'informations qu'un seul type de LULC. Cependant, la modélisation

sémantique du changement spatio-temporel d'une région donnée n'est pas étudiée dans ces travaux.

Les ontologies constituent un support riche pour la représentation des connaissances qui satisfait aux exigences de la modélisation spatio-temporelle. D'autre part, elles donnent le moyen de raisonner sur les informations de contexte via des règles et des moteurs d'inférences. En conséquence, le développement d'un système de raisonnement spatio-temporel sémantique est un autre défi qui a encouragé l'utilisation des ontologies par les deux communautés SIG et télédétection pour le développement d'un cadre permettant de représenter la dynamique des objets spatio-temporels et de raisonner sur les changements qui peuvent se produire. Cependant, en comparaison avec plusieurs travaux qui ont étudié le problème d'interopérabilité sémantique dans les systèmes de classification des LULC, moins d'études sur la modélisation sémantique de l'information de changement en fonction de ses attributs spatiaux, temporels et d'autres, et en particulier sur l'intégration de ces modèles sémantiques dans un cadre de raisonnement spatio-temporel opérationnel, ont été présentés. Une opinion partagée avec [Li et al., 2016], ceci est partiellement dû à la complexité de la modélisation des objets spatio-temporels, vu les différentes dimensions associées à ces types d'objets à savoir la dimension spatiale, temporelle et thématique. Dans certains cas, il est important de connaître les causes qui ont provoqué un processus de changement pour interpréter les conséquences d'un tel processus. Par exemple, la disparition d'une forêt est supposée causée par un processus d'urbanisation. Ainsi, dans un système de modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels, ces événements et ces processus doivent être capturés. En conséquence, ces concepts complexes augmentent également de façon spectaculaire la modélisation sémantique de la dynamique des objets spatio-temporels.

Parmi les travaux innovateurs dans ce domaine sont ceux de [Claramunt and Theriault, 1996], [Worboys and Hornsby, 2004] [Jiang and Worboys, 2009] et [Galton and Worboys, 2005] qui posent les bases théoriques pour représenter le changement d'un objet spatial, ont été présentés dans la première partie de l'état de l'art. Ces approches modélisent la dynamique d'une entité spatiale à travers la description des événements ou des processus qui agissent sur cette entité. Nous avons montré que la majorité de ces travaux ne tiennent pas compte de la dimension sémantique pour modéliser les changements liés à l'identité. En plus, les modèles proposés par ces travaux ne modélisent pas les relations qui peuvent se tenir soit entre les objets et les événements/processus ou bien entre les événements/processus et les événements/processus.

Pour représenter ces relations et intégrer le raisonnement sémantique, des approches basées sur les ontologies ont été proposées. Les approches basées sur les ontologies 4D-Fluent offrent une première solution permettant de surmonter les limites des approches classiques de modélisation de la dynamique d'une entité. Par exemple le modèle développé par [Batsakis and Petrakis, 2010] est le modèle le plus connu qui peut capturer la dynamique d'une entité dans une ontologie. Bien que ce modèle intègre la représentation et le raisonnement spatio-temporel, il est limité à la modélisation des propriétés d'utilisation des sols et des informations de changement comme les processus et les événements. En plus, ce modèle augmente la complexité pour interroger les changements temporels. Pour pallier ces limites, des modèles permettant la modélisation des processus de changements ont été présentés. Par exemple le modèle LC3 de [Harbelot et al., 2015] permet de définir plusieurs de changement à savoir la division, la fusion, la séparation et l'annexion.

Ce modèle présente un avantage clair dans la modélisation des informations de changement. Cependant, toutes les relations topologiques, comme les relations « contient » et « intérieur » sont prédéfinies dans l'ontologie. Cela entraîne des problèmes dans la modélisation et l'interrogation d'un grand nombre d'objets spatiaux, dont les relations spatiales sont l'exposant du nombre total d'objets [Li et al., 2016]. Le modèle développé par [Li et al., 2016] dans le contexte de la modélisation et de l'interrogation de changements de LULC permet de surmonter cette limite. Ce modèle permet la modélisation et le raisonnement sémantique du changement spatio-temporel des objets géographiques par l'intégration de l'espace, le temps, la topologie et un ensemble de règles sémantiques. Néanmoins, la définition ontologique des classes et instances, dans ce modèle, est centrée sur des objets géo-spatiaux discrets et non sur des objets et des relations (c.-à-d., sur toute la scène de l'image). Aussi, le modèle ne présente pas des mécanismes de raisonnement sur les processus géographiques et leurs relations.

Une limite commune des modèles mentionnés ci-dessus est qu'ils ne permettent pas la classification des entités géographiques. Nous avons besoin d'un système qui distingue les entités statiques comme une « forêt » des entités dynamique telle que la « déforestation ». Une telle solution est offerte par les approches basées sur les ontologies de haut-niveau. En fait, les ontologies de haut-niveau comme BFO et DOLCE distinguent respectivement entités dépendantes du temps, comme les événements et/ou les processus et les entités indépendantes du temps, comme les objets et les individus par l'utilisation du concept *occurrent* (également connues sous le nom de *perdurant*) et concept *continuant* (également appelé *endurant*) respectivement. Cependant, ces ontologies se concentrent sur la représentation des concepts dans un sens général et ne sont pas associées au domaine géographique. En plus, elles sont principalement descriptives ou contiennent un certain nombre de concepts qui ne sont pas définis dans un niveau de détail suffisant pour permettre leur utilisation à des fins de raisonnement [Campelo and Bennett, 2012]. Ainsi, les approches ([Brodaric and Probst, 2009], [Kuhn, 2009], [Devaraju and Kuhn, 2010], [Kauppinen and de Espindola, 2011], [Weichert et al., 2013], [Iwaniak et al., 2013], [Camara et al., 2014], [Devaraju et al., 2015]), exploitant les ontologies de haut-niveau pour modéliser la dynamique dans un domaine, proposent des raffinements supplémentaires à ces ontologies.

Dans certaines approches comme celles présentées dans ([Brodaric and Probst, 2009], [Kuhn, 2009], [Devaraju and Kuhn, 2010] et [Devaraju et al., 2015]), la modélisation des concepts dynamiques, comme les processus et les événements, est effectuée en fonction des observations mesurées à partir des capteurs Web. Selon un point de vue d'observations, les processus géographiques sont conceptualisés comme des entités « expérimentales » et les événements sont conceptualisés comme des entités « historiques » inférées à partir des observations ([Kuhn, 2009], [Devaraju et al., 2015]). Par exemple, dans [Devaraju et al., 2015], les processus géographiques sont représentés comme un stimulus qui actionne des capteurs permettant ainsi de produire des observations et par la suite les événements seront déduits ou inférés. Selon [Campelo and Bennett, 2012], les approches combinant les ontologies de haut-niveau et les observations offrent une solution importante pour la classification des événements et des processus. Cela représente une étape importante pour surmonter le défi de remplir le gap entre les mesures de bas niveau et les conceptualisations de haut niveau dans le domaine géographique. Cependant, ces approches conçues pour des domaines d'application spécifiques (par exemple, l'hydrologie, la météorologie, etc.). En

revanche, les processus géographiques (comme l'urbanisation, la déforestation, la désertification) ne sont pas forcément des stimuli si nous considérons le point de vue d'observations. Le modèle proposé par [Iwaniak et al., 2013] et [Łukowicz and Iwaniak,] représente une étape importante pour la classification des entités géographiques et la modélisation des processus de changements. La découverte des processus de changements, tels que la déforestation, l'urbanisation et le boisement, dans ce modèle est réalisée à travers un raisonnement sémantique sur des ensembles de données décrivant des informations spatiales provenant de plusieurs ressources accessibles dans le Web. Par exemple, la découverte du processus de *déforestation* est effectuée en fonction du nombre d'arbres collecté d'une région donnée, décrivant un objet *forêt*. La diminution de la densité des arbres provoque un reclassement de cet objet et en conséquence, cette diminution pourrait être classée comme un processus (occurent) de la déforestation. Cependant, le terme déforestation peut sembler excessif dans le cas d'une réduction minimale de la taille de la forêt. Une des solutions pour de meilleures interprétations de ces phénomènes est fournie par les informations provenant des images satellitaires. À titre d'exemple, la valeur de l'indice de végétation (NDVI) pourrait être utilisée pour étudier et interpréter des phénomènes géographiques comme la déforestation, la dégradation et la désertification. Ainsi, une analyse et un raisonnement sur la dynamique des objets spatio-temporels et sur les processus géographiques selon une perspective de télédétection seront orientés.

Étant donné que les approches existantes pour la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels et des phénomènes géographiques se distinguent par la façon par laquelle des concepts dynamiques comme les événements et les processus sont décrits et définis. D'autre part, le raisonnement sur les informations de changement est aussi fonction de la manière utilisée pour relier ces concepts. Des relations entre les occurrents, c.-à-d., entre événements-événements, événements-processus ou processus-événements sont importantes et leur modélisation est nécessaire pour la phase d'interprétation de changement. Plusieurs types d'interrelations peuvent exister entre les processus et les événements. Selon [Galton, 2008], ces interrelations incluent la **composition** (un événement complexe est composé de plusieurs événements primitifs), la **spécification** (un événement peut être regardé comme une spécification d'autres événements), la constitution (un événement peut constituer un ou plusieurs processus ou un processus peut constituer plusieurs événements). D'autres relations telles que des relations causales peuvent exister entre les événements et les processus ou entre les processus eux-mêmes. Selon [Galton and Worboys, 2005], les relations causales possibles entre les événements et les états (où un état est un état d'objet ou un processus) sont : causer, initier, terminer, activer, perpétuer, autoriser et prévenir. [Harbelot, 2015] ont examiné le sujet de la causalité afin de comprendre les évolutions des entités géographiques. Dans leur travail, l'analyse de causalité de production des phénomènes géographiques est déduite à partir d'une analyse des motifs spatiaux tels que la réduction, la croissance, etc. À titre d'exemple, une relation de réduction intervenant sur les parcelles de type forêt permet d'établir une relation de déforestation entre ces parcelles. Bien que les auteurs ont discuté la causalité de l'évolution des entités, ils n'ont pas élaboré plus loin sa représentation sémantique. En plus, selon ces auteurs, l'analyse de causalités est explicite et elle ne peut être réalisée que par l'assistance d'un expert. Les relations causales entre les événements (apparition, disparition, croissance, division, etc.) et les processus géographiques (déforestation, urbanisation, dégradation, etc.) et aussi entre les processus eux-mêmes n'ont pas encore discuté et représenté dans toutes les approches

présentées ci-dessus. Exemples de relations de causalités entre (i) évènement-processus : un processus d'urbanisation active l'apparition ou la croissance d'une zone urbaine, un processus de dégradation initie la disparition d'une forêt, (ii) processus-processus : la déforestation initie la dégradation des forêts, l'urbanisation cause la déforestation, la dégradation initie le processus de désertification et ainsi de suite. Alors, ce qui manque actuellement un cadre ontologique pour modéliser les relations de causalité existantes entre les événements et les processus géographiques. Un tel cadre devrait supporter l'ensemble des relations de causalité entre les différents concepts pour simplifier le processus d'interprétation de changement. Donc l'intégration de ces relations dans un modèle sémantique est orientée dans ce travail.

En résumé, étant donné l'ensemble de concepts à savoir des objets, des événements et des processus et l'ensemble de relations entre eux, comment pouvons représenter la dynamique des objets spatio-temporels et inférer des descriptions magnifiques des processus géographiques à partir des données fournies à partir des images satellitaires? Ce qui est actuellement manquant est une spécification formelle qui éclaire les concepts associés à des phénomènes géographiques qui sont particulièrement importants du point de vue de la télédétection. Une opinion partagée avec [Devaraju and Kuhn, 2010] est qu'une telle approche doit être capable d'une part de représenter les processus géographiques, les objets spatio-temporels et les relations entre eux et d'une autre part doit être dotée d'un mécanisme de raisonnement et d'interrogation à fin d'inférer les changements qui se produisent ainsi que leurs informations de détection.

Notre objectif principal est donc de développer un cadre ontologique permettant de représenter et de raisonner sur la dynamique en imagerie satellitaire. Dans ce cadre, le raisonnement sur les informations de changement (comme les événements et les processus géographiques) sera exécuté selon une sémantique multi-perspectives :

- ✓ Selon un point de vue d'une ontologie de haut-niveau vu son importance pour la catégorisation des entités d'un domaine et le raisonnement sur le changement,
- ✓ Selon une théorie générale permettant de représenter les occurrents (processus et évènements) et leurs relations,
- ✓ Selon un point de vue de télédétection pour classifier les objets géographiques et détecter les informations de changement à partir des images satellites.

En outre, ce cadre ontologique est doté d'un mécanisme de raisonnement et d'interrogation permettant d'inférer et déduire les changements qui se produisent ainsi que leurs informations de détection.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit les notions fondamentales pour la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels. Nous avons montré que les objets, le temps, l'espace, l'état, les événements et le processus sont considérés comme des concepts clés pour la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporel. Dans une première partie, nous avons pré-

senté les approches classiques liées à ce contexte qui sont dans la suite, discutées pour montrer leurs insuffisances pour la modélisation sémantique des informations de changements de LULC. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons présenté les ontologies en tant que moyen de représentation des connaissances d'un domaine. Dans une première étape, nous avons présenté les concepts de bases des ontologies ainsi que leurs avantages. Nous avons montré aussi qu'il existe plusieurs types d'ontologies et qui peuvent être combinés et réutilisés à travers un processus d'alignement. Par la suite, nous avons montré le rôle qui joue une ontologie pour la définition des bases de connaissances. Nous avons également illustré l'importance des logiques de description et les langages de représentation standardisés RDF, Schéma de modèle de description de ressources –ou *Resource Description Framework Schema*– (RDFS) et OWL pour la formalisation de ces connaissances. Dans une deuxième étape, nous avons montré l'apport des ontologies pour la modélisation des objets spatio-temporels en présentant les travaux de recherche portant à la fois sur l'utilisation des ontologies pour la représentation des objets spatio-temporels et la modélisation de leur dynamique. Finalement, une synthèse permettant d'expliquer les moyens utilisés par les différentes approches parcourues, les apports, les limites et leurs objectifs ont été discutés. À travers cette synthèse, les objectifs de nos travaux sont orientés.

Deuxième partie

CONTRIBUTIONS

Chapitre 3

Modélisation de la dynamique spatio-temporelle à base des ontologies en imagerie satellitaire

Sommaire

3.1	Introduction	68
3.2	Cadre ontologique pour la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels	68
3.3	Formalisation du changement	69
3.3.1	Ontologie de domaine de télédétection	69
3.3.1.1	Enrichissements intensionnels de concepts	70
3.3.1.2	Enrichissements relationnels	70
3.3.1.3	Enrichissement axiomatique	71
3.3.2	Ontologie des processus	73
3.3.3	Exploitation de l'ontologie de haut niveau BFO	74
3.3.3.1	Classification des entités géographiques	74
3.3.3.2	Alignement des trois couches ontologiques	76
3.3.4	Formalisation de l'ontologie proposée	80
3.4	Conclusion	81

3.1 Introduction

Les objets spatio-temporels sont de nature complexe vu les différentes dimensions associées à ces types d'objets. La dynamique de ces objets est exprimée en fonction de ses dimensions. Un objet peut changer sa dimension spatiale et sémantique (thématique) dans le temps. Si la géométrie d'un objet change dans le temps, il s'agit d'un changement spatial et si un objet change sa classification, alors il s'agit d'un changement sémantique. L'étude de la nature du changement nécessite ainsi la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels. En conséquence, un cadre conceptuel modélisant la dynamique des objets spatio-temporels doit nécessairement tenir compte des trois dimensions, à savoir la dimension spatiale, la dimension temporelle et la dimension sémantique associées à ces types d'objets. Généralement, l'état d'un objet change sous l'impulsion d'un phénomène géographique provoquant, par exemple, sa disparition, sa fusion avec d'autres objets, sa croissance et ainsi de suite. Ces événements et ces processus doivent être représentés afin d'étudier la dynamique des objets spatio-temporels. Partant des faits que les états, les objets, les événements et les processus sont des concepts clés pour la modélisation de la dynamique, nous présentons dans ce chapitre une approche basée sur les ontologies, qui tient compte de ces concepts, pour la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels dans le domaine de l'imagerie satellitaire.

3.2 Cadre ontologique pour la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels

Des unités de la couverture de sols tels que les forêts, les terres cultivées, les terres stériles, la glace et la neige, les zones urbaines et les masses d'eau sont souvent dynamiques. Les séries temporelles d'images satellitaires offrent un meilleur moyen pour analyser et étudier la dynamique de ces objets. L'objectif principal de cette étude est la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels et des phénomènes géographiques à partir des images de télédétection. Ce qui est actuellement manquant est une spécification formelle qui éclaircit les concepts associés à des phénomènes géographiques qui sont particulièrement importants du point de vue de la détection. En se basant sur les ontologies, nous avons proposé un cadre conceptuel ontologique ([Ghazouani et al., 2015], [Ghazouani et al., 2016a], [Ghazouani et al., 2016b]) pour représenter la dynamique des objets spatio-temporels et inférer des descriptions magnifiques des processus géographiques à partir des données fournies à partir des images satellitaires. La figure 3.1 montre que l'architecture adoptée de notre modèle est basée sur différents niveaux d'ontologies. Le modèle ontologique proposé est capable de représenter les processus géographiques, les objets spatio-temporels et les relations entre eux.

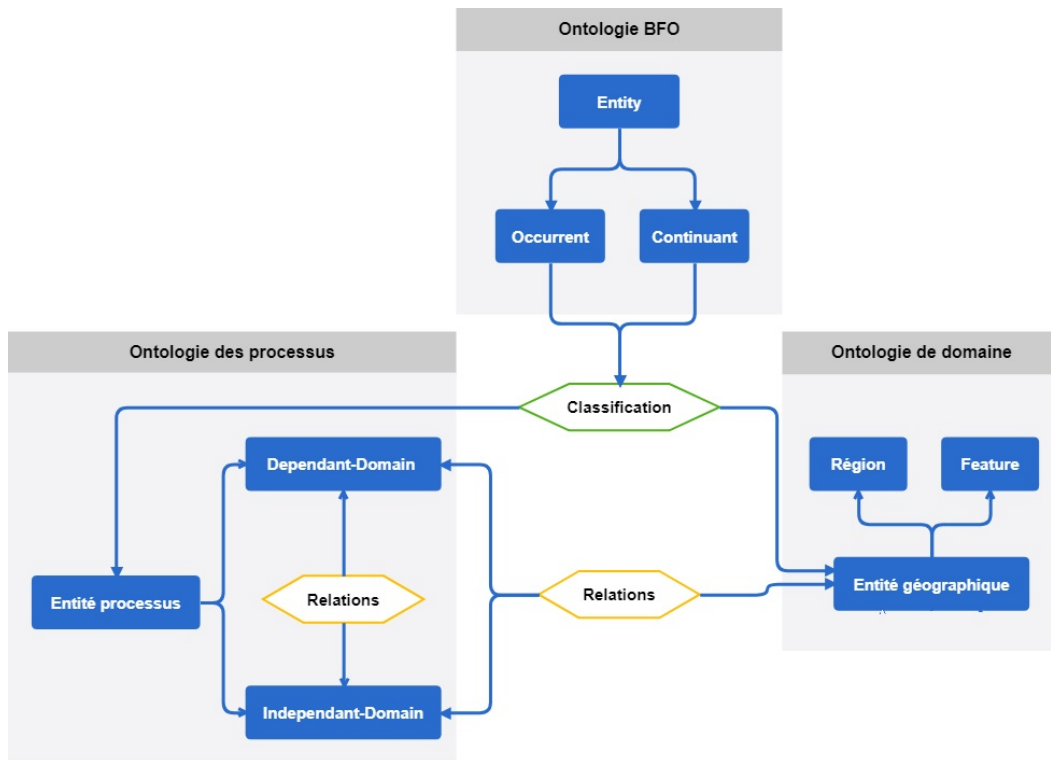


FIGURE 3.1 – Architecture ontologique multi-niveau adaptée.

3.3 Formalisation du changement

Le raisonnement sur le changement à travers l'architecture présentée est exécuté en suivant une sémantique multi-perspectives. Selon un point de vue de l'ontologie de haut-niveau, un point de vue de l'ontologie des processus et selon un point de vue de l'ontologie de domaine.

3.3.1 Ontologie de domaine de télédétection

L'identification des objets et de leurs propriétés permet de connaître qui est le responsable de la dynamique des processus. Les continnants sont porteurs d'occurents. Le changement de l'état d'un objet donc est une conséquence de déroulement des processus. Le rôle de l'ontologie de domaine est d'identifier les objets géographiques et leurs relations à partir d'images satellitaires. Dans notre proposition nous réutilisons une ontologie de domaine développée pour représenter les connaissances sémantiques relatives au contenu d'une scène d'images satellitaires. Cette ontologie a été conceptualisée par notre équipe pour l'annotation d'image de télédétection ([Messaoudi et al., 2014], [Nefzi et al., 2014]). En effet, cette ontologie représente une extension de l'ontologie proposée par [Durand et al., 2007] qui a été conçue seulement pour les objets urbains dans une image satellite. Ainsi, cette ontologie a été enrichie par un ensemble de concepts, de relations spatiales et d'axiomes à partir des différentes ressources du domaine de télédétection. Le processus de construction de cette ontologie est réalisé en suivant trois étapes [Messaoudi et al., 2014]. La première étape consiste à choisir une ontologie noyau candidate, qui est l'ontologie de Durand. Par la suite, cette ontologie a été étendue pour tenir compte de l'imperfection des données et pour représenter les dimensions spectrales et spatiales associées aux objets. Dans une troisième

étape, un mécanisme d'enrichissement intensionnel conceptuel et axiomatique est effectué pour enrichir l'ontologie par des informations à partir de l'image de télédétection. L'enrichissement intensionnel de concept consiste à alimenter les intensions des concepts par des connaissances *a priori* extraites à partir des informations de l'image de télédétection. Ces connaissances incluent des informations radiométriques et spectrales (comme l'indice de végétation et de l'eau), et d'autres visuelles telles que la texture et la forme. L'enrichissement axiomatique consiste à doter l'ontologie d'un ensemble de règles (axiomes) pour permettre le raisonnement inférentiel dans cette ontologie. Le résultat ainsi obtenu est une ontologie spatio-temporelle, floue, lourde et évolutive, enrichi par des informations issues des images de télédétection et des axiomes modélisant les connaissances de domaine.

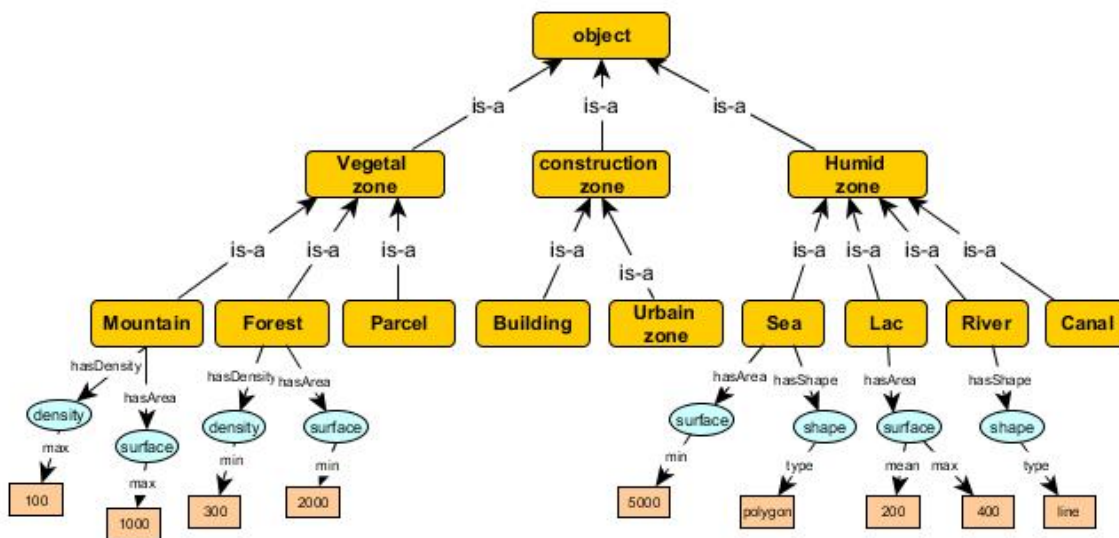


FIGURE 3.2 – Structure de l'ontologie de domaine.

Bien que cette ontologie soit la mieux adaptée à l'annotation des images de télédétection, elle n'est pas dédiée à la représentation et au raisonnement sur la dynamique des objets spatio-temporels et des phénomènes géographiques et par conséquent elle ne permet pas l'interprétation sémantique du changement dans les images satellitaires. De ce fait, certains raffinements, y compris respectivement des enrichissements intensionnels, relationnels et axiomatiques, sont appliqués à cette ontologie dans notre travail pour répondre à notre objectif.

3.3.1.1 Enrichissements intensionnels de concepts

Les images de télédétection fournissent des mesures et des observations sur les objets acquis, qui peuvent être utilisées pour raisonner sur la dynamique des processus de changements. C'est en fonction de ces concepts que nous pouvons identifier les objets qui participent à un tel processus ou bien quel processus a changé l'état d'un objet. Des indices comme les ceux de végétation et ceux de variation d'eau sont souvent utilisés pour étudier et interpréter la dynamique des phénomènes spatio-temporels. L'indice de végétation **NDVI** utilisé pour étudier la structure de végétation, l'indice **NDWI** pour étudier les structures d'eau et l'indice **indice de sol par différence normalisé** –ou *Normalized Difference Soil Index*– (**NDSI**) pour étudier la structure de sol, sont des

exemples des indices spectraux que nous avons ajoutés à cette ontologie. En plus de leurs exploitations pour la classification des unités de sols, ces indices seront aussi utilisés pour étudier et interpréter la dynamique des phénomènes spatio-temporels. Par exemple, les valeurs de l'indice NDVI sont fortement corrélées à la végétation verte. Des modifications sur ces valeurs indiquent des changements dans les activités biologiques. En effet, la valeur de l'NDVI diminue de façon significative après que la biomasse verte est enlevée, donc il est largement utilisé pour le suivi de la distribution des feux, la dégradation des forêts, l'urbanisation et d'autres processus [Verbesselt et al., 2010].

Un exemple de telle situation est présenté dans la figure 3.3. Cette figure montre comment avec une valeur obtenue de l'indice NDVI, nous pouvons détecter le type de processus qui se produit sur l'objet forêt. Pour une valeur V_1 de l'indice NDVI, la forêt a subi un processus de déforestation, pour une valeur de NDVI égale à V_2 la forêt a été soumise à un processus de dégradation et que ce dernier est suivi par un processus de déforestation qui est indiqué par une valeur V_3 de l'indice NDVI.

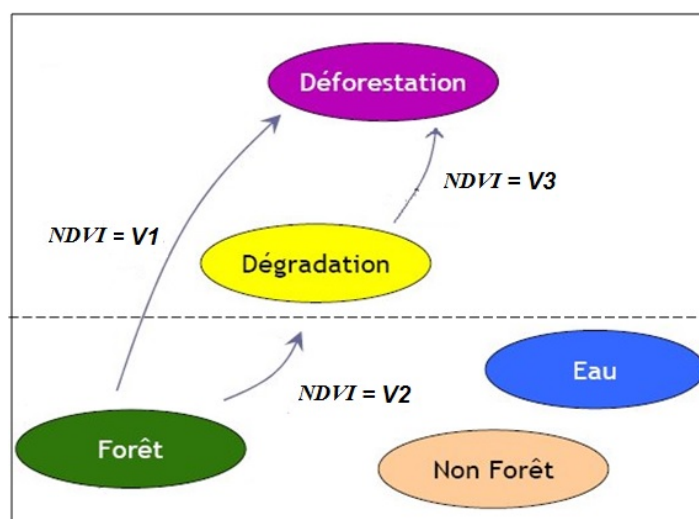


FIGURE 3.3 – Structure de l'ontologie de domaine.

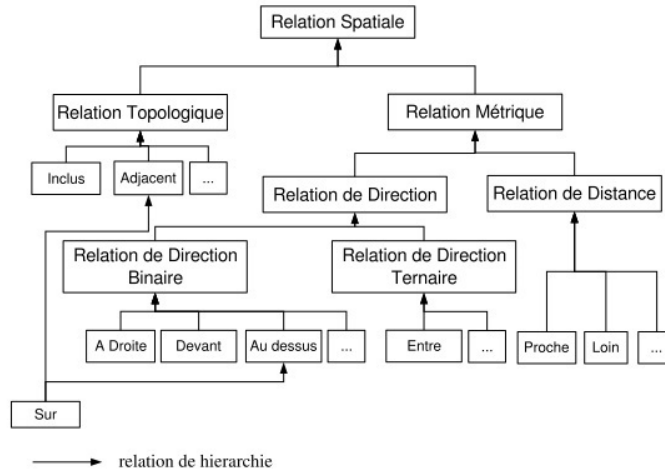
3.3.1.2 Enrichissements relationnels

La relation typique entre les objets est la relation taxonomique « *is-a* » qui décrit la hiérarchie sémantique entre les concepts de l'ontologie de domaine [Messaoudi et al., 2014]. À cette étape nous cherchons à raffiner l'ontologie de domaine par des relations spatiales et temporelles.

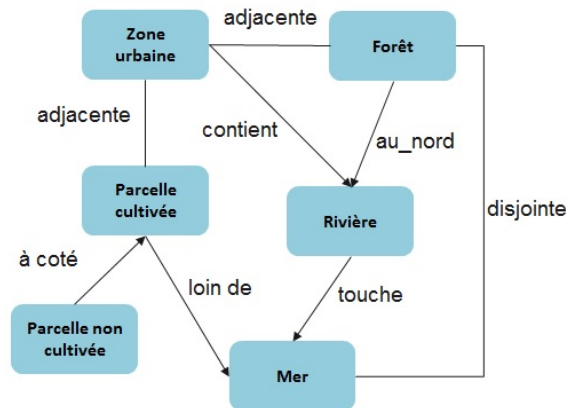
1. Enrichissement par des relations spatiales

Les relations spatiales permettent de décrire les relations entre les objets dans l'espace de l'image et elles seront utilisées pour extraire la dynamique de ces objets. Ce dernier point sera discuté ultérieurement. Comme nous avons signalé dans le chapitre précédent, il existe trois types de relations spatiales : les relations topologiques à savoir les relations RCC8 de [Randell et al., 1992b], comme les relations : à l'intérieur de, à l'extérieur de, touche, recouvre, etc., les relations de direction à savoir les relations : à gauche, à droite, nord, nord-

ouest, etc., et finalement les relations de distances comme les relations : loin de, près de, etc. [Hudelot et al., 2005] ont proposé une ontologie des relations spatiales permettant de représenter les différents types de relations spatiales. Un extrait de cette ontologie est illustré dans la figure 3.4a. Cette ontologie a été importée et intégrée dans notre ontologie pour exprimer les relations spatiales qui peuvent exister entre les objets d'une scène d'image de télédétection. Le résultat d'une telle modélisation est montré dans la figure 3.5.



(a) Extrait de l'ontologie de relations spatiales



(b) Exemple de représentation des relations spatiales entre les concepts

FIGURE 3.4 – Intégration des relations spatiales dans l'ontologie de domaine

2. Enrichissement par des relations temporelles

L'information temporelle est nécessaire pour la modélisation de la dynamique des objets qui évoluent dans le temps. Les entités dynamiques sont généralement comparées par leurs instants et leurs intervalles de temps qui définissent respectivement le temps de leurs évolutions. Les relations temporelles définissent les relations possibles qui peuvent exister entre les différents moments de temps (instants ou intervalles). En général, l'algèbre d'intervalle d'Allen [Allen, 1983] est le modèle le plus connu et plus utilisé pour représenter les relations temporelles topologiques entre objets dans le temps. L'ensemble des 13 relations d'Allen comprend des relations temporelles telles que : < (avant), > (après), M (rencontre), M_i (rencontré-par), O (se chevauche), O_i (chevauché-par), S (débute), S_i (débuté-par), F (fi-

nit), F_i (finit-par), D (pendant), D_i (contient) et $=$ (égal). L'importation de l'ontologie temporelle *SWRLTO*, nous permet d'implémenter ces relations dans notre ontologie de domaine. Comme nous l'avons montré dans le deuxième chapitre, cette ontologie permet d'encoder la dimension temporelle au format *OWL*.

De plus, les relations de filiations sont aussi considérées comme des relations temporelles ([Arenas et al., 2015], [Del Mondo et al., 2013a]) et elles sont intégrées dans l'ontologie pour suivre l'évolution de l'identité d'un objet dans le temps. Les relations de filiation sont introduites par Del Mondo et ont été définies par des relations de filiation concernant les concepts d'ascendance et de descendance. En effet, [Del Mondo et al., 2013a] distinguent deux types de filiations : la continuation et la dérivation. Une relation de *continuation* se produit lorsqu'une entité continue d'exister d'un temps à un autre avec la même identité (par exemple, une zone urbaine reste une zone urbaine après une expansion). Dans l'autre sens, une relation de *dérivation* se tient lorsqu'une entité en crée d'autres entités avec de nouvelles identités (par exemple, la dérivation de deux zones de parcelle différentes à partir d'une seule). En cas de continuation, l'identité d'une entité ne change pas, mais pour la dérivation, l'identité change, il s'agit d'un changement sémantique. Par conséquent, nous pouvons clairement remarquer que les relations de filiation représentent une partie importante de l'interprétation sémantique de l'évolution d'une entité dans le temps. C'est pour cette raison que nous devons intégrer ces relations dans l'ontologie.

3.3.1.3 Enrichissement axiomatique

L'enrichissement axiomatique permet de doter l'ontologie d'un ensemble de règles dont le but est d'inférer des nouvelles connaissances à partir d'autres. Cela, nous permet, par exemple de définir des concepts ou des relations à partir de ceux qui sont existants. Nous présentons ci-dessous des exemples d'axiomes ajoutés dans l'ontologie :

A1 : le concept de végétation peut être rapproché d'un indice de végétation *NDVI* compris entre 0,3 et 0,8 [Derivaux et al., 2008].

$$\begin{aligned}
 \text{Objet_vegetation} &\equiv \text{Objet} && (3.1) \\
 &\sqcap \exists \text{hasValue}(\text{Feature} \\
 &\quad \text{ofCharacteristic.ndvi} \\
 &\quad \sqcap \exists \text{Mean}\{\geq 0,3\} \sqcap \exists \text{Mean}\{\leq 0,8\})
 \end{aligned}$$

A2 : le concept d'eau est caractérisé par un indice d'eau *NDWI* supérieur ou égal à 0,0 (Derivaux et al., 2008).

$$\begin{aligned} \text{Objet_eau} &\equiv \text{Objet} & (3.2) \\ &\sqcap \exists \text{hasValue}(\text{Feature} \\ &\sqcap \text{ofCharacteristic.ndwi} \sqcap \exists \text{Mean}\{\geq 0, 0\}) \end{aligned}$$

A3 : le concept plage pourrait être défini par l'axiome :

$$\text{Objet_plage} \equiv \text{Objet_minéral} \sqcup \exists \text{ExternallyConnected.Objet_eau} \quad (3.3)$$

A4 : des relations comme la relation d'égalité (EQ) ou partie propre tangentielle (TPP) ou partie propre non tangentielle (NTPP) peuvent être vues comme une relation d'inclusion, cela est exprimé comme suit :

$$\text{inclusion} \equiv \text{EQ} \sqcup \text{TPP} \sqcup \text{NTPP} \quad (3.4)$$

A5 : la relation chevauche est équivalente respectivement à la relation d'égalité (EQ) ou à la relation partie propre tangentielle (TPP) ou à la relation partie propre non tangentielle (NTPP) à la relation partie propre tangentielle inverse (TPPi) ou à la relation partie propre non tangentielle (NTPPi) ou à la relation recouvre partiellement (PO), cela est exprimé comme suit :

$$\text{chevauche} \equiv \text{EQ} \sqcup \text{TPP} \sqcup \text{NTPP} \sqcup \text{TPPi} \sqcup \text{NTPPi} \sqcup \text{PO} \quad (3.5)$$

3.3.2 Ontologie des processus

Nous avons introduit que l'état d'un objet peut changer sous l'impulsion d'un phénomène spatial. Selon [Bhatt and Wallgrün, 2014], il est possible d'expliquer des phénomènes spatiaux à un niveau élevé soit dans les termes d'occurrences spécifiques du domaine qui provoquent les changements observés, soit de manière indépendante du domaine. Les auteurs ont souligné la nécessité des mécanismes de raisonnements génériques de haut niveau qui influencent la sémantique des propriétés modélisées en fonction des aspects indépendants et dépendants du domaine. Partant de cette idée, nous visons qu'une ontologie, impliquant des concepts indépendants du domaine et indépendants du domaine ainsi que les relations qui existent entre eux, pourrait être utile pour raisonner sur les événements et les processus géographiques.

Dans notre travail, nous utilisons le terme événement pour englober les occurrences indépendantes du domaine. Exemple des événements sont l'apparition et la disparition, la croissance et la réduction, la fusion et la division, etc. Ces concepts sont fondamentaux pour la modélisation des processus géo-spatiaux dynamiques ([Claramunt and Thériault, 1995], [Galton and Worboys, 2005] et [Bhatt and Wallgrün, 2014]). D'un côté, nous utilisons le terme processus pour définir les occurrences dépendantes du domaine à savoir les processus géographiques comme la défore-

tation, l'urbanisation, la dégradation et d'autres transformations de l'occupation et de l'utilisation du sol. La figure 3.5 illustre deux exemples permettant de montrer cette distinction. Dans la figure 3.5a, deux types de changements sont remarqués sur la zone urbaine : la croissance de la zone urbaine au temps T_2 , la division de la zone et l'apparition d'une zone verte au temps T_3 . La figure 3.5b montre que l'objet forêt commence à subir une décroissance dans l'intervalle $[1980, 1990]$ et se finit par disparaître en 2000. À un niveau spécifique du domaine, le premier exemple (figure 3.5a) indique qu'un phénomène d'urbanisation a été produit et le deuxième exemple (3.5b) pourrait indiquer l'existence d'un processus géographique comme la dégradation, la déforestation ou un feu de forêt, qui a causé les événements observés.

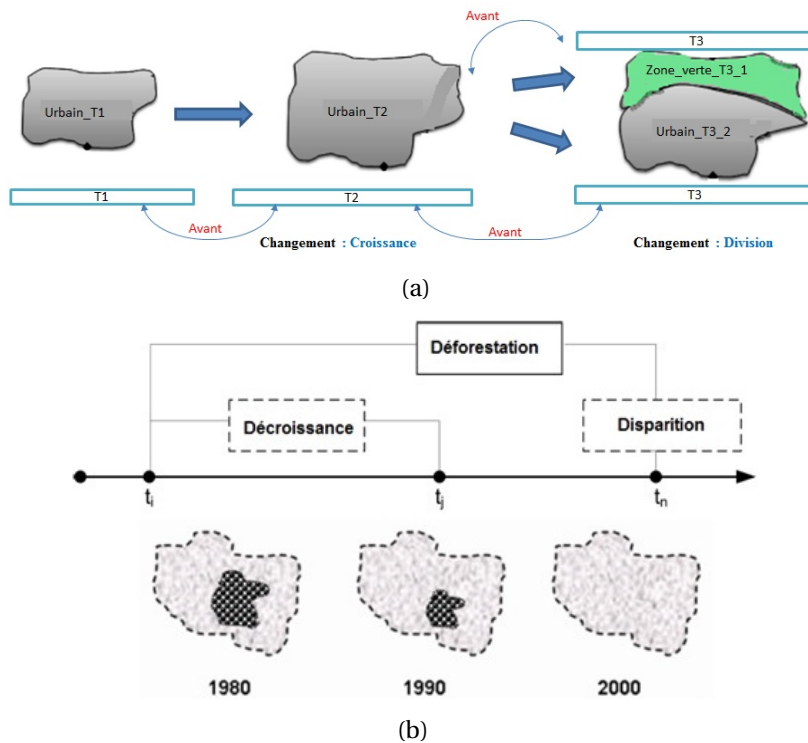


FIGURE 3.5 – Exemples de changements

En plus l'identification des concepts d'évènements et des processus pour le raisonnement sur la dynamique, cette dernière s'exprime également en matière de corrélation entre ces concepts. Comme nous avons mentionné dans le chapitre, plusieurs relations incluent la composition, la constitution, la causalité et d'autres peuvent exister entre les processus et les évènements. Ainsi, un phénomène géographique (généralement un processus) observé pourrait être décrit en fonction des relations de composition ou de constitution. Par exemple, si nous considérons qu'un processus a été produit dans l'exemple de la figure 3.5b, ce processus peut être spécifié comme le rétrécissement ou la disparition d'une forêt. Ainsi, les évènements de rétrécissement et de disparition sont liés au processus de déforestation par des relations causales comme : cause et initié. Cette situation peut être formulée comme suit :

$$\text{déforestation initié rétrécissement.forêt} \quad (3.6)$$

$$\text{déforestation cause disparition.forêt} \quad (3.7)$$

De même, des interactions peuvent aussi se produire entre les processus eux-mêmes. Un exemple d'une telle situation, montrant les relations entre certains processus géographiques, est décrit comme suit : la déforestation est supposée être indiquée par la réduction du couvert forestier. Ce processus peut être suivi d'une érosion continue du sol qui est causée par le ruissellement des rivières. D'un autre côté, la déforestation est généralement suivie par un processus d'urbanisation ou de désertification. Cette dernière est causée par un processus de dégradation continue qui entraîne une détérioration temporaire ou permanente de la densité ou de la structure de la canopée. Ainsi, des relations comme cause, initiée, suivie et certaine d'autres peuvent être détectées entre les processus comme la déforestation, l'urbanisation, l'érosion, etc. Une formalisation de ces situations est décrite en logique de description comme suit :

$$urbanisation \sqsubseteq cause.déforestation \quad (3.8)$$

$$dégradation \sqsubseteq précède.déforestation \quad (3.9)$$

$$désertification \sqsubseteq causée_par.déforestation \quad (3.10)$$

$$déforestation \sqsubseteq suivie_par.érosion \quad (3.11)$$

À cette étape, une ontologie de processus a été implémentée ([Ghazouani et al., 2016a], [Ghazouani et al., 2016b]) dont le rôle est de représenter l'ensemble de concepts d'événements et processus (à savoir l'apparition, la croissance, l'urbanisation, la déforestation, etc.) et l'ensemble des relations (comme celles de compositions, de causalités, de constitution, etc.) qui les relient. La figure 3.6 illustre un extrait d'une représentation ontologique des concepts événements et processus ainsi que de leurs relations. Dans cette figure, le rectangle jaune représente un événement et le rectangle vert représente un processus géographique.

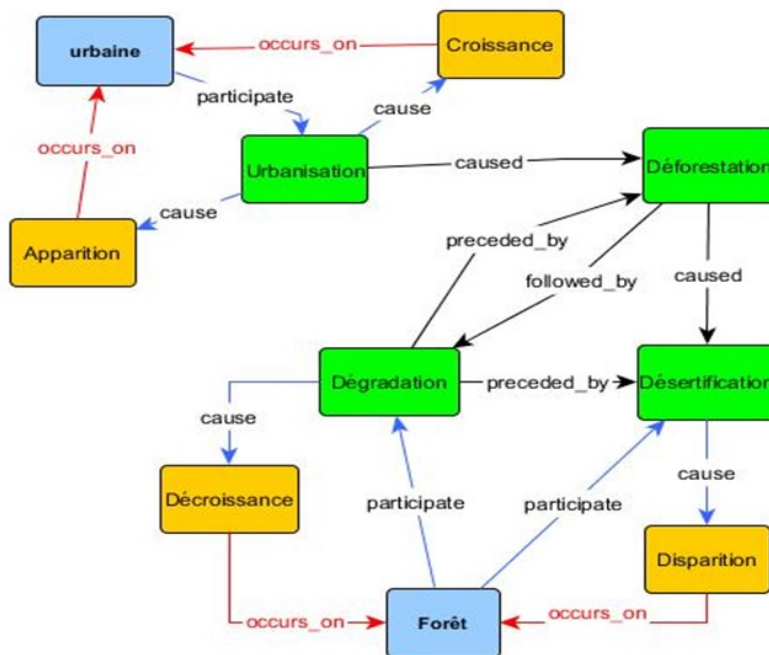


FIGURE 3.6 – Extrait de la structure de l'ontologie des processus

3.3.3 Exploitation de l'ontologie de haut niveau BFO

3.3.3.1 Classification des entités géographiques

La plupart des systèmes de classification des sols actuels adoptent une vision statique du monde. Comme la couverture du sol de la Terre est en constante évolution, telles représentations statiques sont limitées. Nous avons besoin d'un système pour classifier des entités géographiques tant que continnants et occurrents. Nous partageons l'idée avec [Ferrario and Kuhn, 2016], qu'un tel système devrait offrir la possibilité « de distinguer des termes tels que « forêt » et « savane », associés aux continnants, des termes tels que « déforestation » et « dégradation », liés aux occurrents ». [Ferrario and Kuhn, 2016] suggèrent qu'une ontologie spatio-temporelle est mieux appropriée pour décrire la dynamique du sol de notre planète en constante évolution. Selon [Iwaniak et al., 2013], l'ontologie de fondement BFO, proposée par [Grenon and Smith, 2004], semble la plus capable de fournir des réponses aux questions de la modélisation spatio-temporelle, vue sa grande distinction des objets de la réalité. Un autre bénéfice de cette ontologie est qu'elle permet d'étendre la liste des processus et des événements tout en ajoutant les régions temporelles et spatio-temporelles par rapport aux autres ontologies de haut-niveau. BFO est une ontologie modulaire qui comprend deux sous-ontologies (figure) : l'ontologie SNAP pour les continnants tels que les individus et les objets, et l'ontologie SPAN qui contient les occurrents comme les changements, les événements et les processus. Des interrelations sont définies entre les deux types d'ontologies d'une manière qui permet à BFO de traiter à la fois les caractéristiques statiques/spatiales et dynamiques/temporelles de la réalité.

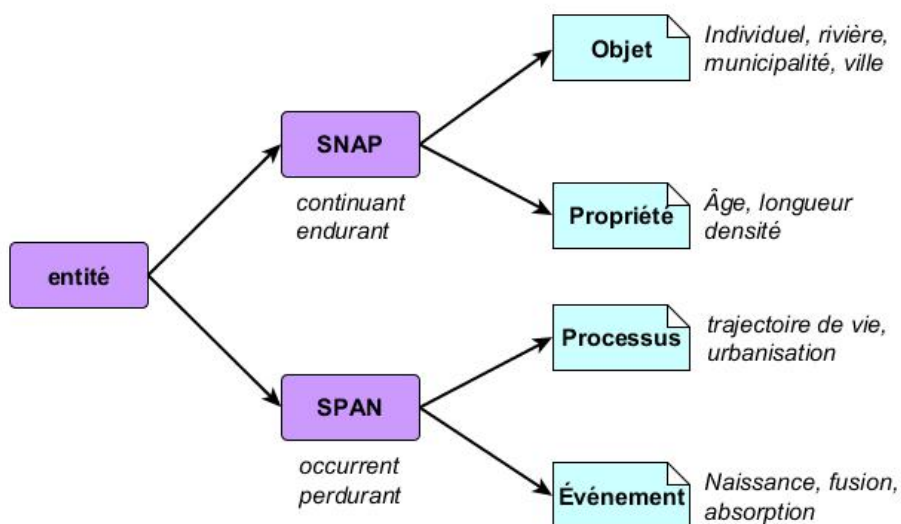


FIGURE 3.7 – Architecture ontologique multi-niveau adaptée.

L'ontologie SNAP est conçue comme un modèle pour représenter la nature ontologique des *continnants*. Les *continnants* sont des entités qui perdurent (endurent) au fil du temps, c'est-à-dire les entités qui persistent de façon identique, même en subissant des changements de manières diverses et que nous pouvons observer à tout moment de leur existence [Grenon and Smith, 2004]. Ils ont une étendue dans l'espace (c'est-à-dire qu'ils ont des parties spatiales) et constituent un ensemble observable à chaque instant [Mathian and Sanders, 2015]. Les entités géographiques

sont des individus discrets avec des extensions spatiales définies et sont totalement présentes à tout moment de leur existence. Dans ce cas, les entités géographiques telles que la forêt, zone urbaine, zone d'eau et les terres cultivées sont associées à la catégorie des *continuants* (des *endurants*). Les propriétés ou les qualités des entités (telles que la surface, l'aire et la densité) sont également considérées comme des entités *continuants*. Selon [Mathian and Sanders, 2015], ces entités dépendent des objets auxquels elles sont associées (par exemple, la longueur d'une rivière, le nombre d'habitants d'une unité administrative et la densité d'une ville). Elles sont donc des *dependant-continuant*. Exemple des définitions des entités géographiques (respectivement d'une propriété) sont exprimées par les axiomes en logique de descriptions suivants :

$$forêt \sqsubseteq SNAP : IndependentContinuant \sqsubseteq SNAP : Continuant \quad (3.12)$$

$$surface \sqsubseteq SNAP : SpatialRegion \sqsubseteq SNAP : Continuant \quad (3.13)$$

$$NDVI \sqsubseteq SNAP : DependentContinuant \sqsubseteq SNAP : Continuant \quad (3.14)$$

L'ontologie SPAN inclut les régions spatio-temporelles étendues et les occurrents situés dans ces régions. Les occurrents selon [Grenon and Smith, 2004] sont les entités qui se produisent dans le temps, ils incluent des processus et des événements. Cela concerne les entités qui ont une certaine extension dans le temps. Les processus se caractérisent par un début et une fin, et une succession d'intervalles de temps, chacun correspondant à un changement [Mathian and Sanders, 2015]. Les événements correspondent à un phénomène que l'on peut considérer comme ponctuel [Mathian and Sanders, 2015], c'est-à-dire qu'ils correspondent à toutes les entités qui s'épuisent dans des instants uniques [Grenon and Smith, 2004]. Dans ce cas, les processus géographiques comme la déforestation, l'urbanisation et la désertification et les événements comme la fusion (fusion de deux parcelles de terre), la disparition (disparition d'une partie de la forêt) sont considérés comme des entités de l'ontologie SPAN. Ces concepts seront catégorisés par la classe *Processual Entity* de cette ontologie. La formalisation de chaque concept est définie comme suit :

$$fusion \sqsubseteq SPAN : Process \sqsubseteq SPAN : Occurrent \quad (3.15)$$

$$urbanisation \sqsubseteq SPAN : Process \sqsubseteq SPAN : Occurrent \quad (3.16)$$

$$zone_inondée \sqsubseteq SPAN : SpatioTemporalRegion \sqsubseteq SPAN : Occurrent \quad (3.17)$$

Ainsi, la structure obtenue pour la modélisation de la dynamique en imagerie satellitaire inclut trois niveaux d'ontologies. L'ontologie de fondement BFO qui offre une classification et une représentation spatio-temporelle abstraites des entités du domaine. L'ontologie des événements-processus, à un autre niveau, permet une représentation des événements et les processus géographiques ainsi que les relations qui tiennent entre eux. Enfin, l'ontologie du domaine permet une représentation des concepts de domaine ainsi que leurs relations (spatiales, temporelles et sémantiques) et elle est utilisée pour le raisonnement sur la dynamique à partir des informations de télédétection. En conséquence, la représentation et l'interprétation d'un changement qui se

produit consistant à connaître l'état des choses, les causes et les conséquences et ne pourront être réalisées que par combinaison de ces trois niveaux d'ontologies. Nous avons besoin de savoir la ou les occurrence(s) qui a été (ont été) produite(s), le ou les participant(s) intégré(s) ainsi que la ou les relation(s) entre eux. Nous sommes donc en face d'un autre challenge qui est l'alignement des trois niveaux des ontologies pour pouvoir représenter et raisonner sur un changement qui se produit. Dans ce qui suit, nous présentons notre méthode utilisée pour aligner les différentes ontologies de l'architecture présentée. Cette méthode est aussi basée sur l'utilisation de l'ontologie BFO pour maintenir l'alignement.

3.3.3.2 Alignement des trois couches ontologiques

L'alignement de l'ontologie est un moyen qui vise à trouver des correspondances et à établir un lien entre les ontologies. Autrement dit, il est composé d'un ensemble de correspondances qui précisent quels éléments ou axiomes dans les différentes ontologies d'entrée sont liés, et quel type de relation est entre eux [Euzenat and Shvaiko, 2013]. L'alignement peut être réalisé d'une manière manuelle, semi ou entièrement automatique. Dans ce contexte, plusieurs techniques d'alignement d'ontologies ont été proposées pour trouver des correspondances équivalentes entre deux éléments dans les ontologies. Les techniques d'alignement sont généralement classées en deux grandes familles : les techniques au niveau de l'élément et les techniques au niveau de la structure [Euzenat and Shvaiko, 2013]. Les techniques (au niveau de l'élément) considèrent les entités ontologiques ou leurs instances isolément de leurs relations avec d'autres entités ou leurs instances. Les techniques (au niveau de la structure) considèrent les entités d'ontologie ou leurs instances pour comparer leurs relations avec d'autres entités ou leurs instances. Les deux familles d'alignements ont été présentées dans le chapitre précédent. Le processus d'alignement peut être exécuté selon une stratégie ou une combinaison de techniques d'alignement. Généralement, il a pour objectif de mettre en correspondance les concepts de l'une des ontologies, dite ontologie source (O_{Src}), avec les concepts d'une autre ontologie, dite ontologie cible (O_{Tar}).

Récemment, [Aleksovski et al., 2006] ont introduit une nouvelle technique pour aligner deux ontologies (ontologie source : O_{Src} et l'ontologie cible : O_{Tar}). Cette technique porte sur l'utilisation d'une connaissance complémentaire dite « support » ou « background », représentée généralement sous la forme d'une troisième ontologie (O_{BK}) [Aleksovski et al., 2006]. Le principe général de cette technique se décompose en deux phases, l'ancrage et la dérivation, pour identifier l'existence d'un mapping de la forme (C_{Src} relation C_{Tar}) où C_{Src} est un concept de l'ontologie source et C_{Tar} de l'ontologie cible. La *phase d'ancrage* permet tout d'abord d'apparier les deux concepts C_{Src} et C_{Tar} , pris séparément, avec un ou des concepts de l'ontologie (O_{BK}). Le résultat de cette étape sont un ensemble de mappings de la forme (C_{Src} relation X_{BK}) et (C_{Tar} relation Y_{BK}), où X_{BK} et Y_{BK} sont des concepts de l'ontologie O_{BK} appelés points d'ancrage. Par la suite, la *phase de dérivation* qui s'appuie sur la structuration de l'ontologie intermédiaire (O_{BK}) permet de rechercher l'existence des relations entre les différents points d'ancrage X_{BK} , Y_{BK} identifiés dans la phase d'ancrage, afin d'essayer d'en dériver des relations entre les éléments des ontologies à aligner.

Pour notre travail, nous allons exploiter cette technique pour aligner les trois ontologies : de domaine, de processus et l'ontologie de fondement BFO formant l'architecture ontologique pro-

posée pour la représentation et le raisonnement sur la dynamique dans le domaine de télédétection. Pour suivre le principe de cette technique d'alignement, nous avons considéré l'ontologie des processus comme ontologie source, l'ontologie de domaine comme cible et l'ontologie BFO de haut-niveau comme une ontologie intermédiaire. Le choix de BFO comme une ontologie intermédiaire vient du fait que cette ontologie permet la classification des entités du monde réel en deux catégories à savoir les *continnants* et les *occurents*, comme nous avons évoqué auparavant. Cela facilite l'alignement des concepts de l'ontologie de domaines (c.-à-d., les objets statiques) et les concepts de l'ontologie de processus (c.-à-d., les objets dynamiques) à leurs classes dans BFO. Cette phase est appelée la *phase d'ancrage*. Dans une deuxième étape, nous cherchons un alignement entre l'ontologie de domaine que nous la considérons comme ontologie source (O_{Src}) et l'ontologie de processus considérée comme ontologie cible (O_{Tar}). La figure montre le principe général suivi pour maintenir l'ancrage des trois ontologies. Nous allons utiliser dans la suite le terme *ancrage* au lieu du terme d'alignement pour décrire le processus d'alignement.

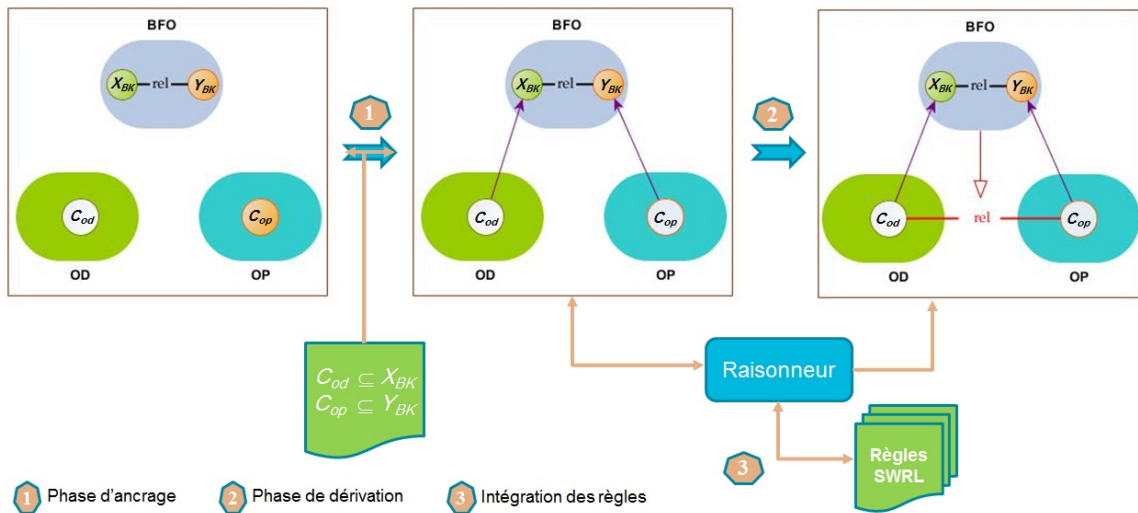


FIGURE 3.8 – Processus d'ancrage adoptée.

Comme il est montré dans la figure, le mécanisme d'ancrage est composé de deux phases : la phase d'ancrage et la phase de dérivation.

♦ La phase d'ancrage

Appelée encore *ancrage direct* (1), cette phase consiste à ancrer les concepts de l'ontologie de domaine (respectivement les concepts de l'ontologie de processus) à leurs correspondants dans l'ontologie BFO. D'après la classification BFO, les continuants représentent les entités statiques à savoir les objets géographiques et leurs propriétés. Ainsi, les objets géographiques comme la *forêt*, zone urbaine, rivière, etc. seront ancrés avec leurs super-concepts (c.-à-d., les continuants) dans l'ontologie BFO. D'un autre côté, les événements et les processus géographiques sont classés en tant que sous-catégorie des concepts *occurents* de l'ontologie BFO.

L'appariement des concepts de l'ontologie source (O_{Src}) et de l'ontologie cible (O_{Tar}) se fait à travers un ensemble d'axiomes de la forme $(C_{od} \sqsubseteq X_{BK})$ et $(C_{op} \sqsubseteq Y_{BK})$ qui associent chaque concept à son super-concept. Où, C_{od} , C_{op} , X_{BK} et Y_{BK} sont des concepts de l'ontologie de domaine (OD), de processus (PO) et de l'ontologie BFO (BK), X_{BK} et Y_{BK} sont appelés points

d’ancrage. La première colonne du tableau C.2 montre un extrait de l’ensemble de règles injectées pour effectuer la phase d’ancrage. Formellement, de la phase d’ancrage est décrite par la fonction f_{ancrage} dans.

Extrait de règles d’ancrage	Extrait de résultat de la phase de dérivation
OD :foret \sqsubseteq BFO :IndependentContinuant	
OD :zone_urbaine \sqsubseteq BFO :IndependentContinuant	OP :déforestation <i>has_participant</i> OD :foret
OD :lac \sqsubseteq BFO :IndependentContinuant	OP :déforestation <i>has_agent</i> OD :foret
OD :rivière \sqsubseteq BFO :IndependentContinuant	OD :foret <i>participates_in</i> OP :déforestation
OD :parcelle \sqsubseteq BFO :IndependentContinuant	OD :foret <i>agent_in</i> OP :déforestation
OP :déforestation \sqsubseteq BFO :processual_entity	OP :urbanisation <i>has_participant</i> OD :foret
OP :urbanisation \sqsubseteq BFO :processual_entity	OP :urbanisation <i>has_agent</i> OD :foret
OP :désertification \sqsubseteq BFO :processual_entity	OD :foret <i>participates_in</i> OP :urbanisation
OP :croissance \sqsubseteq BFO :processual_entity	OD :foret <i>agent_in</i> OP :urbanisation

Note, OD : Ontologie de Domaine, OP : Ontologie de Processus.

TABEAU 3.1 – Extrait de l’ensemble de règles d’ancrage et de dérivation

$$f_{\text{ancrage}}(O_{Src}, O_{Tar}, O_{BK}) \longrightarrow \begin{cases} A_{Src} \\ A_{Tar} \end{cases} \quad (3.18)$$

Avec,

- O_{Src} , O_{Tar} et O_{BK} représente respectivement l’ontologie de domaine, de processus et BFO,
- $A_{Src} = \{C_{od} \sqsubseteq X_{BK}\}$: un ancrage de l’ontologie de domaine avec l’ontologie BFO,
- $A_{Tar} = \{C_{op} \sqsubseteq Y_{BK}\}$: un ancrage de l’ontologie de processus avec l’ontologie BFO.

• La phase de dérivation

La phase de dérivation (2), appelée aussi ancrage indirect, consiste à dériver des relations entre les concepts de l’ontologie O_{Src} et ceux de l’ontologie O_{Tar} . Ces relations sont déduites à partir de la structure de l’ontologie BFO. Ce sont des relations qui existent entre les *continuants* et les *occurents*, c.-à-d., entre les points d’ancrage X_{BK} et Y_{BK} . En fait, initialement, BFO ne contient que des relations hiérarchiques de type « is-a » entre ses différents concepts. Dans cette deuxième version de BFO, un ensemble de relations ont été intégrées pour lier les *continuants* et les *occurents* grâce à l’importation de l’ontologie RO [Smith et al., 2005]. Cette ontologie de relations rend la capacité de représenter des relations fondamentales

telles que les relations de participation, les relations des parités, les relations spatiales et temporelles des relations entre les concepts de l'ontologie BFO. Exemples de telles relations dans RO sont : « *part_of* », « *contained_in* », « *precedes_by* », « *has_participant* », etc. La figure 3.9 illustre l'ensemble des relations défini par l'ontologie RO.

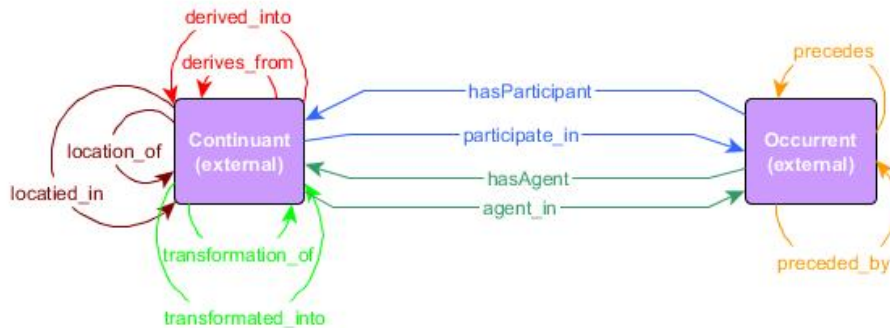


FIGURE 3.9 – L'ontologie des relations (RO)

Cette tentative permet alors de fournir un cadre commun logiquement solide pour les interconnexions entre les termes dans l'ontologie. Par exemple, cela donnera la possibilité de relier un continuant avec un occurrent par une relation de participation à savoir la relation « *has_participant* » comme suit : *occurrent has_participant continuant*. Le principe de la phase de dérivation est formalisé par la fonction suivante :

$$f_{\text{derivation}}(A_{\text{Src}}, A_{\text{Tar}}, X_{\text{BK}}, Y_{\text{BK}}, \text{rel}) \longrightarrow \{(C_{\text{od}} \text{ rel } C_{\text{op}}) / \text{rel} \in \text{RO}_{\text{relations}}\} \quad (3.19)$$

Avec, A_{Src} , A_{Tar} le résultat de la phase d'ancrage et *rel* est une relation entre les points d'ancrage X_{BK} et Y_{BK} et qui appartient à l'ontologie des relations (RO).

La deuxième colonne du tableau C.2 illustre un extrait des résultats de la phase de dérivation. Ce résultat est obtenu par exécution d'un raisonneur, comme Fact++, sur l'ensemble des règles définies dans la première phase de l'ancrage (les règles de la première colonne du tableau C.2). Cependant, le mécanisme d'inférence permet d'inférer plusieurs relations entre les concepts de l'ontologie de domaine et ceux de l'ontologie de processus (comme montré dans la deuxième colonne du tableau C.2). Une telle relation sera considérée candidate entre deux concepts, par exemple entre le concept *forêt* de l'ontologie de domaine et le concept *déforestation*, que par validation par un expert ou bien à travers une base de règles. Nous avons choisi d'utiliser un ensemble de règles pour valider les relations candidates pour déduire l'ancrage final entre les concepts à aligner. Cela représente la troisième phase du processus d'ancrage.

✦ Injection des règles

Comme nous avons mentionné précédemment, cette phase consiste à intégrer un ensemble de règles qui permettent à travers un mécanisme de raisonnement de sélectionner la ou les relations candidates liant les concepts de deux ontologies (O_{Src} et O_{Tar}). Nous avons exprimé ces règles en utilisant un langage de règles sémantiques notamment le langage SWRL. SWRL est un langage qui enrichit la sémantique d'une ontologie définie en OWL. Il permet

contrairement à OWL de manipuler des instances par des variables. Outre que son expressivité ajoutée au langage OWL, SWRL offre la possibilité de réutilisation d'un ensemble de règles existantes et il permet aussi la facilité de lire et d'écrire des règles. Des exemples de règles utilisées sont définis comme suit :

R1 : S'il y a une décroissance de l'aire a d'une forêt f , alors il y' avait un processus de déforestation d et que la forêt est un participant dans ce processus. Cela est exprimé par la règle 3.20 ou la règle 3.21.

$$\begin{aligned} & forêt(?f) \wedge hasArea(?a,?f) \wedge décroissance(?a) \\ & \longrightarrow déforestation(?d) \wedge has_participant(?d,?f) \end{aligned} \quad (3.20)$$

ou bien par :

$$\begin{aligned} & forêt(?f) \wedge hasArea(?a,?f) \wedge décroissance(?a) \\ & \longrightarrow déforestation(?d) \wedge participe_in(?f,?d) \end{aligned} \quad (3.21)$$

R2 : Si une zone urbaine apparait dans une zone a d'une forêt f , alors il y' avait un processus d'urbanisation u et que la forêt est un participant dans ce processus. Cela est exprimé par la règle 3.22.

$$\begin{aligned} & forêt(?f) \wedge hasArea(?a,?f) \wedge apparition(?a, "zone_urbaine") \\ & \longrightarrow urbanisation(?u) \wedge has_participant(?f,?u) \end{aligned} \quad (3.22)$$

La figure 3.10 présente une illustration du processus d'ancrage.

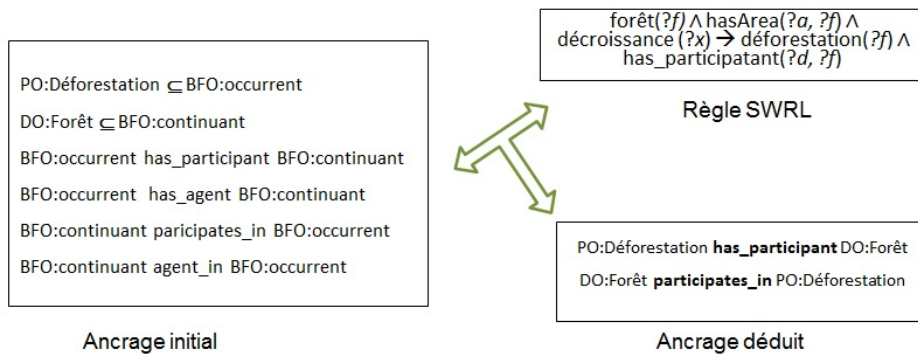


FIGURE 3.10 – Illustration du processus d'ancrage

3.3.4 Formalisation de l'ontologie proposée

L'ontologie ainsi obtenue est une ontologie spatio-temporelle qui fusionne différents types d'ontologies et qui sera utilisée pour la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels. Le formalisme que nous proposons pour cette ontologie est défini comme suit :

$$O^{ST} = \{C^{ST}, R^{ST}, A\} \quad (3.23)$$

Avec,

- $C^{ST} = \{C^d, C^p, C^f\}$ est l'ensemble des concepts définis dans l'ontologie, où, C^d est un concept de domaine, C^p est un concept de processus et C^f est un concept de fondement,
- $R^{ST} = \{\Sigma_{sem}, \Sigma_{st}, \Sigma_{cc}, \Sigma_{causalité}\}$ est l'ensemble des relations existantes entre les concepts de l'ontologie, avec, Σ_{sem} , Σ_{st} , Σ^{cc} , $\Sigma_{causalité}$, représente respectivement l'ensemble des relations sémantiques, spatio-temporelles, de compositions et de causalités.
- A est l'ensemble d'axiomes intégrés dans l'ontologie.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis l'accent sur le développement d'une ontologie spatio-temporelle pour la modélisation de la dynamique en imagerie satellitaire. Cela a été réalisé par la construction du cadre ontologique en se basant sur la combinaison d'un ensemble d'ontologies à savoir l'ontologie de domaine, l'ontologie de processus et l'ontologie de fondement. L'ontologie de processus a été conceptualisée pour représenter et raisonner sur les phénomènes géographiques. Le cadre ontologique a été enrichi par un ensemble de concepts, de relations et d'axiomes permettant ainsi de doter le modèle d'un mécanisme de raisonnement et d'inférence. Cela augmente la capacité de notre ontologie pour représenter la dynamique des objets spatio-temporels et d'inférer de nouvelles connaissances à partir de celles qui sont existantes.

Chapitre 4

Une nouvelle stratégie pour l'interprétation Sémantique de changements en imagerie satellitaire

Sommaire

4.1	Introduction	84
4.2	L'interprétation sémantique des images	84
4.2.1	Définition	84
4.2.2	Les points de vue de la sémantique	85
4.3	Interprétation sémantique d'images satellites	86
4.3.1	Classification d'objets basée sur les ontologies	86
4.3.2	Reconnaissance d'objets basée sur l'ontologie	87
4.3.3	Détection de changements basée sur l'ontologie	87
4.4	Nouvelle approche pour l'interprétation sémantique de changements en imagerie satellitaire	88
4.4.1	Approches multi-niveaux pour l'interprétation de changements	90
4.4.1.1	Connaissances explicites : <i>a priori</i> et contextuelles	90
4.4.1.2	Connaissances implicites	95
4.4.1.3	Mécanisme de raisonnement	95
4.4.2	Stratégie de l'interprétation sémantique des scènes (<i>ISS</i>)	96
4.4.2.1	Interprétation sémantique au niveau bas	97
4.4.2.2	Interprétation au niveau sémantique d'objets	99
4.4.2.3	Interprétation au niveau sémantique partielle : Interprétation sémantique de scènes mono-temporelles	100
4.4.2.4	Interprétation au niveau sémantique pleine : Interprétation sémantique de scènes multi-temporelles	102
4.4.2.5	Interprétation au niveau sémantique pleine plus élevée : Interprétation sémantique de changement	104
4.4.3	Méthodologie de raisonnement sur les objets spatio-temporels	105
4.4.3.1	Représentation des objets et relations spatio-temporelles	105

4.4.3.2	Raisonnement sur les évènements	107
4.4.3.3	Raisonnement sur les processus	109
4.5	Conclusion	110

4.1 Introduction

Dans le premier chapitre de l'état de l'art, nous avons montré que les approches de détection de changements en l'imagerie satellitaire peuvent détecter soit des changements binaires simple de type « changement/non-changement » (c.-à-d., répondre à la question « y-à-t-il » des changements?) ou bien identifier la nature des changements « de-à » entre différentes classes (c.-à-d., « quel » changement?). Cependant, dans les deux niveaux de changements, ces approches ne fournissent aucune information sur la cause des changements (c.-à-d., « pourquoi et comment » les changements sont produits?). Un niveau d'interprétation de changements est donc nécessaire pour générer une description du caractère et de la causalité du changement. Ce niveau d'interprétation du changement vise à extraire des informations, à partir des images, sur les changements qui peuvent se produire, c'est-à-dire de répondre à la question « pourquoi et comment » un changement a été produit?.

Ce chapitre présente une nouvelle stratégie pour l'interprétation sémantique de scènes d'images satellites, guidée par une base de connaissances, permettant l'interprétation sémantique des changements en imagerie satellitaire.

4.2 L'interprétation sémantique des images

4.2.1 Définition

L'interprétation sémantique est définie comme étant le processus d'inférence et d'extraction sémantique des connaissances de haut-niveau observées dans une scène d'image. Selon [Pratikakis et al., 2011], l'extraction de la sémantique se réfère à l'interprétation de l'image à partir d'une perspective humaine. Une scène d'image peut être définie comme une section spatio-temporelle du monde réel en fonction de ses objets physiques avec leurs propriétés et leurs relations. En conséquence, le processus d'interprétation de scène permet la construction d'une description sémantique de la scène réelle observée en fonction de ses objets primitifs constitutifs ainsi que l'organisation spatiale de ces objets primitifs en utilisant des connaissances humaines. Cependant, l'extraction de la sémantique des images avec l'objectif de leurs interprétations est une tâche complexe qui ne dépend pas seulement des données elles-mêmes (parce que la sémantique n'est pas explicitement définie dans l'image), mais elle dépend aussi des connaissances *a priori* et contextuelles de domaine d'application. Les connaissances sémantiques *a priori* et contextuelles sont généralement reliées à la scène, aux objets et aux relations entre ces objets respectivement. Le manque de concordance entre le bas niveau des données de l'image (c.-à-d., l'analyse numérique) et le haut niveau des informations (c.-à-d., l'analyse par des experts humains) est un problème connu par le problème de « gap sémantique », appelé encore, le *fossé sémantique* (en anglais, *semantic gap*). Plus précisément [Smeulders et al., 2000] ont défini le gap sémantique comme *le manque de concordance entre les informations perceptuelles que l'on peut extraire des images et l'interprétation qu'ont ces données pour un utilisateur dans une situation déterminée.*

Généralement, les différentes approches pour l'interprétation sémantique se distinguent en

fonction de la granularité de la sémantique à interpréter. Certains d'eux se focalisent sur l'extraction d'une sémantique singulière ou multiple de l'image globale et d'autres approches cherchent une interprétation sémantique des différents objets dans une image. Indépendamment, de l'objectif à atteindre, le processus d'extraction de la sémantique peut être considéré comme des tâches de catégorisation, de classification et de compréhension dont toutes partagent un effort commun pour résoudre le problème du « fossé sémantique », appelé encore, le *gap sémantique* (en anglais, *semantic gap*) ([Pratikakis et al., 2011] et [Hudelot et al., 2005]).

4.2.2 Les points de vue de la sémantique

[Hudelot et al., 2005] ont souligné les différents points de vue sur la notion de sémantique associée aux images. Ces points se résument comme suit :

✦ ***La sémantique dépend de connaissances a priori sur le domaine d'application***

Le fait que la sémantique n'est pas seulement de l'image, le contenu de cette image peut avoir des descriptions multiples. La sémantique dépend non seulement dans l'image, mais elle dépend fortement des connaissances *a priori* sur le domaine d'application. Il est donc important de mettre en considération ces connaissances et de fournir un cadre formel permettant de les représenter tout en intégrant un mécanisme de raisonnement pour amener la sémantique.

✦ ***La sémantique dépend du contexte***

Un objet du monde réel existe dans le contexte de son environnement, cela veut dire qu'un objet n'est pas toujours isolé des autres. La relation entre l'objet et son contexte est primordiale pour l'extraction de la sémantique. La connaissance structurelle sur les différents objets et sur les relations spatiales existantes entre ces objets dans une scène est ainsi importante pour décrire, détecter ou reconnaître des objets. Par exemple, la plage est toujours située *à-côté* de la mer.

✦ ***La sémantique comme un paradigme multi-niveaux***

Cela signifie que la sémantique peut être extraite à partir de plusieurs niveaux de l'image. En effet, plusieurs représentations multi-niveaux ont été proposées dans la littérature pour l'information image [Hudelot et al., 2005]. Toutes les représentations adaptent la représentation proposée par [Marr and Vision, 1982] pour la reconnaissance visuelle des objets. Selon [Hudelot et al., 2005], la majorité des représentations s'accordent sur la séparation de deux catégories de niveaux : les niveaux perceptuels (ce qui est perçu, c.-à-d. description syntaxique du contenu visuel de l'image en fonction de descripteurs et de primitives visuelles) et les niveaux conceptuels ou sémantiques (ce qui est interprété, la signification des éléments présents dans l'image). En se basant sur ce principe, hudelot ont présenté une représentation multi-niveaux de la sémantique de l'image comme illustrée dans la figure. Cette représentation est composée par deux grands niveaux : le niveau conceptuel (représentant le bas niveau) et le niveau sémantique qui est divisé en trois autres niveaux : le niveau de l'objet (*objects*) qui correspond à la description des objets présents dans l'image, le niveau de la sémantique partielle (*Partial Semantics*) qui inclut les relations entre les objets présents dans l'image et le niveau de la sémantique pleine (*Real (Full) Semantics*) qui inclut un

raisonnement, un processus d'inférence pour construire la description de l'image dans sa globalité [Hudelot et al., 2005]. Selon les auteurs, la difficulté du processus d'extraction de la sémantique croît avec le niveau d'abstraction voulu et que très peu de travaux ont attendu le niveau d'abstraction de la sémantique pleine.

• **La sémantique dépend du but**

Le but est important pour l'interprétation sémantique d'une scène. L'interprétation est toujours guidée par le ou les objectifs que nous voulons atteindre. Si par exemple, le but de l'interprétation sémantique d'une scène est la détection de changement, alors il suffit de détecter une modification de la géométrie par exemple (dimension spatiale) d'un objet dans l'image. Si l'objectif est de faire une classification de l'image, il sera nécessaire d'extraire et d'interpréter tous les objets présents dans l'image. Ainsi, le but joue un rôle important dans le processus d'extraction de la sémantique.

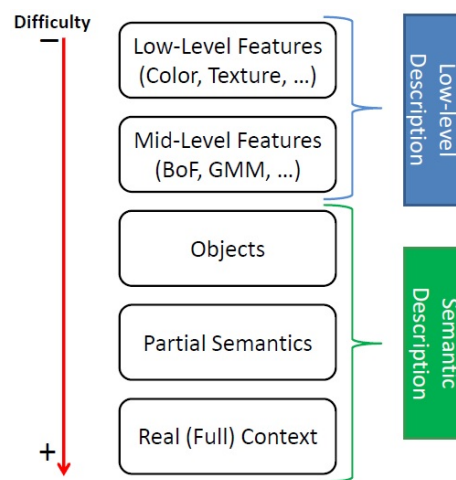


FIGURE 4.1 – Paradigme multi-niveaux pour la sémantique d'une image. Figure extraite de [Hudelot et al., 2005]

4.3 Interprétation sémantique d'images satellites

Dans l'imagerie satellitaire, l'interprétation de l'image consiste à attribuer des types d'objets géographiques à des objets d'une image. La plupart des travaux de l'interprétation sémantique de l'image satellite exploitent les ontologies pour encoder les connaissances *a priori* et contextuelles du domaine afin d'extraire la sémantique. Les approches proposées se distinguent par l'objectif voulu. Dans ce qui suit, nous résumons les différents travaux existants pour l'interprétation sémantique de l'image de télédétection.

4.3.1 Classification d'objets basée sur les ontologies

La classification des objets consiste à attribuer une étiquette de classe sémantique (c'est-à-dire un concept de haut niveau) à une région (c'est-à-dire un objet image) dans l'image. Dans ce contexte, [Arenas et al., 2015] ont présenté un modèle sémantique pour la classification des reliefs extraits à partir d'un modèle numérique d'élévation en utilisant des méthodes OBIA. [Andres

et al., 2012] ont prouvé que l'explication des connaissances des experts à travers les ontologies peut améliorer l'automatisation des images satellites, puis ils ont présenté une approche ontologique permettant de classer les images de télédétection. [Almendros-Jiménez et al., 2013] ont proposé un cadre ontologique pour la classification des images satellitaires des océans, qui décrit comment la construction potentielle d'un modèle d'ontologie permet la classification des entités de bas et de haut niveau. [Belgiu et al., 2014] ont présenté une méthode qui consiste à coupler une représentation de connaissances basée sur une ontologie pour la classification des objets avec le modèle OBIA. Une méthode de classification sémantique très récente basée sur des objets (utilisant une ontologie des images de télédétection à haute résolution) a été présentée par [Gu et al., 2017]. Dans cette approche, les objets de l'image sont classifiés en fonction du modèle ontologique.

4.3.2 Reconnaissance d'objets basée sur l'ontologie

Plusieurs études se concentrent sur le problème de la reconnaissance des objets dans l'imagerie satellitaire. Par exemple, [Durand et al., 2007] ont présenté une ontologie pour la reconnaissance des objets urbains dans les images satellites. Cette ontologie a été enrichie plus tard par [Messaoudi et al., 2014] avec d'autres concepts de domaine et ensuite a été utilisée pour l'annotation et l'interprétation de l'image de télédétection. De même, [Forestier et al., 2012] ont développé une ontologie pour l'identification des caractéristiques urbaines dans les images satellites. La méthode proposée commence par associer un ensemble de caractéristiques de bas niveau à chaque région d'image en utilisant un algorithme de segmentation. Ensuite, une base de connaissances (c'est-à-dire l'ontologie) est utilisée pour attribuer une sémantique à la région considérée. Récemment, [Luo et al., 2016] ont présenté un cadre basé sur une ontologie qui a été utilisé pour modéliser les connaissances sur l'extraction de la couverture terrestre et interpréter les images satellitaires à haute résolution (HRS) au niveau régional. Dans ce travail, la structure de l'ontologie de la couverture terrestre est explicitement définie, représentant les caractéristiques spectrales, texturales et de forme, et permettant l'interprétation automatique des résultats extraits. De même, [Gui et al., 2016] ont présenté une méthode ontologique d'extraction de bâtiments individuels avec différentes orientations et différentes structures à partir d'images satellites tout en se basant sur l'analyse sémantique ontologique.

4.3.3 Détection de changements basée sur l'ontologie

À l'heure actuelle, très peu d'approches basées sur l'ontologie ont été proposées pour la détection des changements dans le domaine de la télédétection. Exemples d'approches incluant celles qui ont été présentées par [Hashimoto et al., 2011], [Arenas et al., 2015] et [Li et al., 2016]. [Hashimoto et al., 2011] ont présenté un cadre basé sur des ontologies et des heuristiques pour l'interprétation automatique des changements. Cette approche permet de détecter le changement qui se produit. [Arenas et al., 2015] ont présenté un support de modélisation spatio-temporelle basée sur les ontologies afin d'étudier différents changements de l'utilisation/couverture des sols telles que la division, la fusion, la séparation et l'annexion. Plus récemment, [Li et al., 2016] ont mis

en place un cadre informatique intégré pour soutenir la modélisation sémantique et le raisonnement sur le changement spatio-temporel des objets géographiques dans les données d'utilisation/couverture des terres (LULC). Dans ce cadre, une ontologie spatiale a été créée pour encoder les connaissances essentielles sur les changements des variations spatio-temporelles telles que la déforestation et l'urbanisation. Les avantages et les limites de ces différentes approches ont été discutés dans le deuxième chapitre.

4.4 Nouvelle approche pour l'interprétation sémantique de changements en imagerie satellitaire

Dans cette section, nous présentons une nouvelle stratégie permettant l'interprétation d'une scène d'images dont l'objectif est la modélisation et l'interprétation sémantique des changements en imagerie satellitaire. La méthodologie proposée sera guidée par une ontologie, que nous appelons ontologie de primitives, utilisée pour l'interprétation de la scène à partir des connaissances de bas niveau (pixel) et par l'ontologie spatio-temporelle proposée et présentée dans le troisième chapitre pour la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels dans la scène d'images. La figure 4.2 montre l'architecture générale proposée pour l'interprétation des scènes d'images satellitaires. Cette architecture est structurée en plusieurs niveaux d'interprétation [Ghazouani et al., 2018b] : le bas niveau, composé par le niveau pixel et le niveau de primitives visuelles, le niveau sémantique qui est composé par trois sous-niveaux à savoir le niveau-objet, le niveau-partiel sémantique (ou encore le niveau d'une scène mono-temporelle) et le niveau-total sémantique (appelé aussi niveau de scènes multi-temporelles). Dans chaque niveau, l'interprétation se fait à travers un raisonnement à la fois sur l'ensemble de connaissances explicites et implicites (c.-à-d., les connaissances extraites). Nous détaillons dans la suite les différents niveaux de l'architecture ainsi que la stratégie d'interprétation appliquée dans chacun d'eux.

À travers cette méthodologie, nous cherchons à réaliser les objectifs suivants :

- ✓ L'extraction des connaissances d'une scène d'images satellitaires.
- ✓ La classification spectrale (classification bas niveau) d'une scène d'images satellitaires.
- ✓ La modélisation sémantique du contenu des scènes d'images (classification sémantique des objets), en se basant sur les connaissances de domaine. .
- ✓ L'extraction des relations spatiales et temporelles présentes entre les différents objets des scènes.
- ✓ L'interprétation sémantique de changement à travers la modélisation de la dynamique des objets et des phénomènes spatio-temporels.

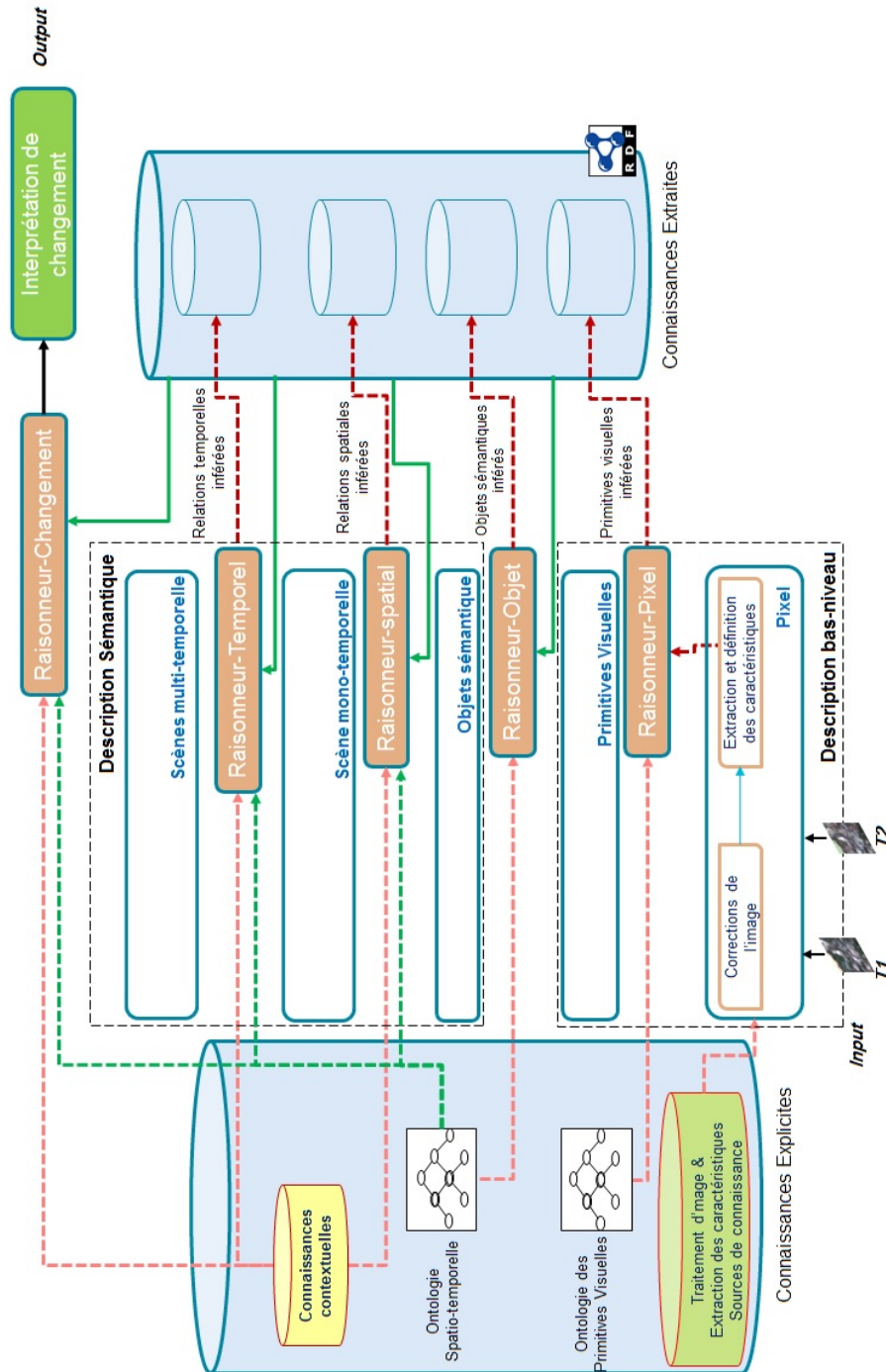


FIGURE 4.2 – Architecture générale multi-niveau pour l'interprétation de scènes d'images satellitaires

4.4.1 Approches multi-niveaux pour l'interprétation de changements

L'architecture illustrée dans la figure 4.2 est réalisée à la base de différents points de vue soulignés dans la littérature ([Hudelot et al., 2005], [Marr and Vision, 1982]), sur la notion de sémantique associée aux images, pour l'extraction de la sémantique des images satellites.

Dans cette architecture, une scène d'image peut être décrite sur deux niveaux principaux : le niveau bas et le niveau sémantique. Le niveau bas est composé de deux sous-niveaux : le niveau pixel et le niveau des primitives visuelles; tandis que le niveau sémantique est divisé en trois niveaux différents : le niveau de la sémantique d'objet, le niveau de la sémantique partielle (scène mono-temporelle) et le niveau de la sémantique pleine (scène multi-temporelles). Étant donné ces différents niveaux de description de la scène, cela n'implique pas la résolution du problème de fossé sémantique discuté précédemment. Un lien entre les différents niveaux est donc nécessaire pour tenir compte de ce problème. Nous avons aussi souligné l'importance des connaissances *a priori* et textuelles du domaine pour résoudre le problème de fossé sémantique tout en maintenant un lien entre les descriptions d'un niveau plus bas et les descriptions d'un niveau plus haut de l'image. En conséquence, nous avons intégré des connaissances *a priori* et contextuelles comme étant une intermédiaire entre les différents niveaux dans l'architecture. Ces connaissances ont été formalisées dans une base de connaissances et ensuite ont été utilisées pour maintenir des liens explicites entre les différents niveaux. Par conséquent, des connaissances implicites ont été déduites de ces connaissances explicites à travers un moteur de raisonnement. Dans les sections suivantes, nous présentons en détail une description de chaque partie de l'architecture proposée ainsi que la stratégie suivie par cette architecture pour l'interprétation sémantique de scènes d'images de télédétection.

4.4.1.1 Connaissances explicites : *a priori* et contextuelles

Dans processus d'interprétation sémantique, la stratégie d'interprétation dépend de l'objectif visé et cela peut être réalisé à travers un ensemble d'hypothèses. Ces hypothèses peuvent être des connaissances *a priori* ou des connaissances contextuelles. Sans ces connaissances, l'interprétation pourrait être faite de plusieurs manières [Hudelot et al., 2005]. Il est donc très important de fournir un cadre conceptuel représentant des connaissances *a priori* et/ou contextuelles sur le contenu de la scène afin de produire un sens compréhensible. C'est dans ce cadre que nous utilisons une base de connaissances explicite pour la conceptualisation des connaissances *a priori* et contextuelles du domaine de télédétection. Comme montré dans la figure, notre base de connaissances est composée de trois parties principales : Traitement d'image et sources de connaissances d'extraction de caractéristiques (Features Extraction Knowledge Sources), une base de connaissances de domaine (ontologie de primitives visuelles et ontologie spatio-temporelle) et les connaissances contextuelles. La description de ces composants et la mise en œuvre de la base de connaissances proposée sont présentées comme suit :

➤ *Traitement d'image et sources de connaissances d'extraction de caractéristiques*

Ce composant inclut les connaissances relatives au traitement de bas niveau. Généralement,

ces connaissances concernent les données d'entrée à savoir la physique des capteurs et le processus d'acquisition des données. Ces connaissances sont nécessaires pour appliquer des opérations de pré-traitement comme la correction d'images dans le but de faciliter et d'accélérer les tâches de traitement telles que la segmentation d'images, l'extraction de caractéristiques, etc. La correction géométrique, la calibration radiométrique et atmosphérique sont des exemples d'opérations de pré-traitement généralement appliquées sur des images satellites. Le processus de correction géométrique consiste souvent à identifier des points de l'image pour déterminer leurs positions réelles sur le terrain. Le résultat d'une telle transformation est effectué à partir des coordonnées réelles de l'image. Ces coordonnées réelles sont généralement stockées dans le fichier de métadonnées associé à chaque image satellite. Les métadonnées d'images satellitaires fournissent également d'autres informations qui peuvent être liées au format de données (tel que le nombre de bandes), aux paramètres de prétraitement (tels que le rayonnement solaire qui est essentiel pour la calibration de l'image) ainsi que des informations sur les satellites et les capteurs (par exemple, la localisation du satellite). L'information spectrale constitue une autre connaissance incluse dans le fichier de métadonnées et qui peut être utilisée pour guider la tâche d'interprétation d'image à un autre niveau. Les métadonnées de l'image seront donc intégrées dans notre base de connaissances pour qu'elles soient réutilisées dans le processus d'interprétation sémantique. Un exemple de la structure des métadonnées de l'image est présenté dans la figure 4.3.

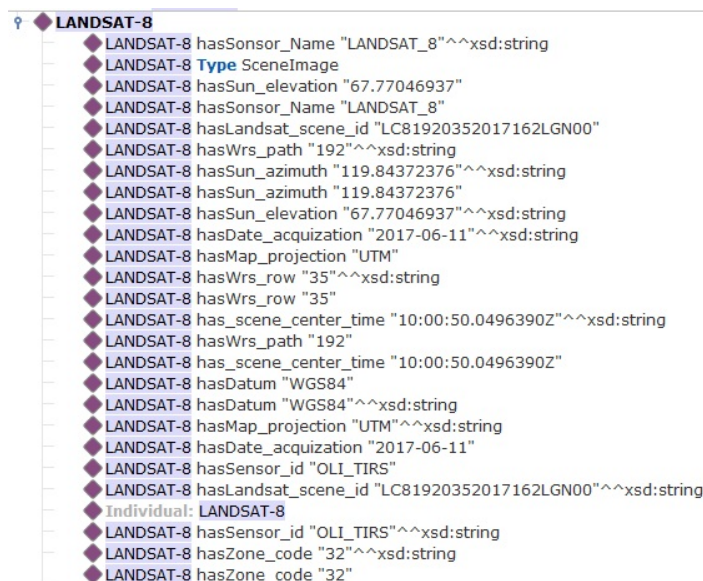


FIGURE 4.3 – Exemple de métadonnées

➔ *Ontologie de primitives visuelles*

L'ontologie de primitives visuelles est le deuxième composant de la base de connaissances proposée. Cette ontologie est considérée comme un modèle général pour décrire les objets dans des images de télédétection. L'objectif principal de cette structure est la classification de l'image corrigée en fonction des primitives extraites et définies dans le bas niveau de l'architecture (niveau pixel). La construction de cette ontologie suit le même prototype d'ontologie proposé par [Andrés et al., 2017] pour la construction d'une ontologie dite concep-

tualisation de référence utilisée pour représenter la structure de l'image de télédétection. En effet, dans [Andrés et al., 2017], le prototype d'ontologie a été construit à partir des connaissances des experts de télédétection exprimées dans [Baraldi et al., 2006], qui consiste en des ensembles de règles utilisées pour classer des images Landsat. Dans ce travail ces règles sont formalisées dans une ontologie. Les auteurs ont commencé par définir les concepts et des relations à partir des connaissances des experts, puis ils ont utilisé ces concepts pour implémenter les règles de classification dans l'ontologie. Comme cette conceptualisation de référence, l'ontologie des primitives visuelle contient quatre concepts fondamentaux : *ImageObject*, *ImageObjectFeature*, *PseudoSpectralIndex* et *PseudoSpectralIndex*. Le concept *ImageObject* permet de décrire des objets de l'image en fonction de leurs caractéristiques qui font référence au concept *ImageObjectFeature*. Le concept *ImageObject* est relié au concept *ImageObjectFeature* par la relation *hasFeature*.

[Baraldi et al., 2006] ont proposé une méthode, appelée SIAM (Satellite Image Automatic Mapper) qui permet d'affecter des pixels d'images satellites à des catégories sémantiques spectrales. Ces catégories spectrales sont considérées comme des descriptions sémantiques des signatures spectrales. L'affectation d'une classe à un pixel est basée sur l'utilisation d'un ensemble de règles spectrales définies explicitement par des experts de domaine. Les différentes règles seront utilisées comme des connaissances contextuelles dans notre base de connaissances. Trois ensembles de règles spectrales nommées respectivement par [Baraldi et al., 2006] : *Feature Space Partition*, *Spectral Rules* et *Spectral Categories* ont été appliquées sur des bandes Landsat (TM1, TM2, ..., TM7) et onze indices spectraux dérivés (appelés encore indices de SIAM (pour *SIAMindex*) à savoir (Bright, Vis, NIR, MIR1, MIR2, TIR, MIRTIR, NDSI, NDBBBI, NDVI, NDBSI) qui ont été pré-traités et calibrés en réflectance sommet-de-l'atmosphère. Ainsi, nous avons adopté la démarche suivie par [Andrés et al., 2017] pour définir les bandes spectrales et les indices spectraux dans l'ontologie des primitives visuelles. En effet, les sept bandes spectrales ont été nommées par (*blue*, *green*, *red*, *nir*, *mir1*, *tir* et *mir2*) représentant respectivement les bandes (TM1, TM2, TM3, TM4, TM5, TM6, TM7) et ont été définies comme des sous-concepts du concept *SpectralBand*. Les *SIAMindex* sont définis comme des sous-concepts du concept *PseudoSpectralIndex*. Il faut noter que les concepts *SpectralBand* et *PseudoSpectralIndex* sont reliés au concept *ImageObjectFeature* dans l'ontologie. À la différence de [Andrés et al., 2017], nous n'avons pas créé les concepts de *Ratio* comme ($TM1/TM2 > 1$) qui sont utilisés pour gérer des règles spectrales parce que ces concepts seront directement définis dans les règles.

De plus, l'ontologie des primitives visuelles a été peuplée par de nouveaux concepts qui sont utilisés pour définir les trois ensembles de règles présentés par [Baraldi et al., 2006]. Comme décrit par ce dernier, le premier ensemble de règles est appliqué sur les onze indices spectraux et qui vise à partitionner l'espace de caractéristiques en attribuant une valeur catégorique (faible (low), moyen (medium) ou élevé (high)) pour chaque pixel en fonction de sa valeur d'indice correspondant. Par exemple, une étiquette NDVI élevée (c'est-à-dire « *HighNDVI* ») est attribuée à un pixel dont la valeur de son indice (NDVI) est supérieure à 0,70. En conséquence, de nouveaux concepts faisant référence aux différentes partitions de l'espace des caractéristiques possibles (comme *HighNDVI*, *MediumNDVI*, *LowNDVI*, *HighBright*, *MediumBright*, *LowBright*, etc.) sont introduits dans l'ontologie comme des sous-

concepts du concept *ImageObjectFeature*. De même, le concept *ImageObject* a été étendu pour inclure des concepts relatifs au deuxième et au troisième ensemble de règles respectivement. Le deuxième ensemble de règles implique des expressions logiques appliquées pour distinguer quatorze règles spectrales telles que les règles spectrales des nuages épais, de végétation, d'eau ou d'ombre, etc. ([Baraldi et al., 2006], [Andrés et al., 2017]). Par exemple la règle (4.1) définit une étiquette de règle spectrale de végétation (*Vegetation Spectral Rule*) (V_{SR}).

$$V_{SR} = (TM_2 \geq 0.5 \times TM_1) \text{ et } (TM_2 \geq 0.7 \times TM_3) \text{ et} \\ (TM_3 < 0.7 \times TM_4) \text{ et } (TM_4 > \max\{TM_1, TM_2, TM_3\}) \text{ et} \\ (TM_5 < 0.7 \times TM_4) \text{ et } (TM_5 \geq 0.7 \times TM_3) \text{ et } (TM_7 < 0.7 \times TM_5) \quad (4.1)$$

Le troisième ensemble de règles identifie les catégories spectrales finales en fonction de la combinaison d'étiquettes linguistiques résultant des ensembles de règles Partition de l'espace des caractéristiques (*Feature Space Partition*) et règles spectrales (*Spectral Rules*). La végétation forte avec un proche infrarouge élevé est un exemple de catégorie spectrale finale notée SV_{HNIR_SC} pour (*Strong Vegetation with High Near-Infrared Spectral Category*). La définition de cette catégorie est exprimée par la règle ((4.2).

$$SV_{HNIR_SC} = V_{SR} \text{ et } HighNDVI \text{ et } HighNIR \text{ et} \\ \text{not } (HighMIR1 \text{ ou } HighMIR2 \text{ ou } HighNDBSI) \quad (4.2)$$

Où, V_{SR} est défini par la règle et *HighNDVI*, *HighMIR1*, *HighMIR2*, *HighNDBSI* et *HighNIR* qui désignent des valeurs de pixels élevées (avec différents seuils introduits dans [Baraldi et al., 2006]) mesurées pour différents indices spectraux, à savoir respectivement *NDVI*, *MIR1*, *MIR2*, *NDBSI* et *NIR*.

De même, le concept *ImageObject* de l'ontologie est étendu pour inclure 46 sous-concepts correspondant aux descriptions des 46 catégories spectrales comme dans la catégorie SV_{HNIR_SC} . Ainsi, la structure de notre ontologie des primitives visuelles contenant les concepts et les relations décrites précédemment est présentée dans la figure 5.4 et elle sera utilisée comme une référence de base pour une première classification des éléments de la scène en fonction des primitives visuelles de chaque élément (ici, pixel).

➔ **Ontologie spatio-temporelle**

L'ontologie spatio-temporelle est celle construite pour la modélisation de la dynamique en imagerie satellitaire et dont nous avons présenté la démarche de sa construction dans le chapitre précédent. Cette ontologie constitue le troisième composant de la base de connaissances et que nous appelons ontologie de domaine dans la suite de ce document. L'ontologie spatio-temporelle conceptualise les connaissances de haut niveau à savoir les objets, les événements, les processus et les relations spatiales, temporelles et de causalités du domaine de télédétection. C'est pour cette raison que nous utilisons cette ontologie pour l'extraction de la sémantique de scène dans les autres niveaux de l'architecture.

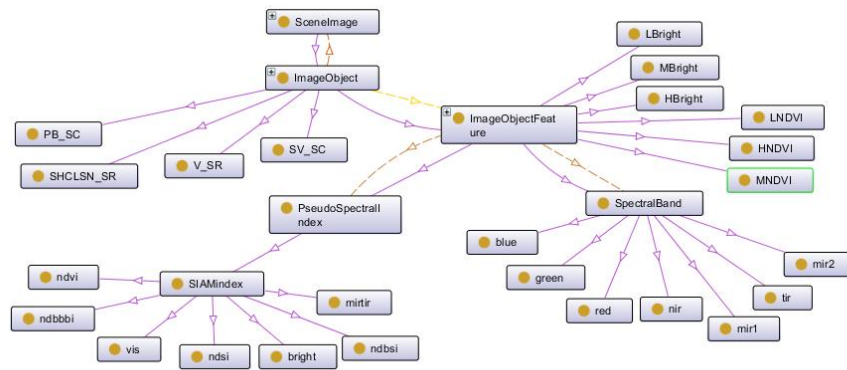


FIGURE 4.4 – Extrait de l'ontologie des primitives visuelles (OPV)

Dans le niveau sémantique d'objet, l'ontologie de domaine est utilisée comme référence pour la description du contenu des images d'un point de vue de monde réel à la différence de l'ontologie *OPV* qui décrit une image à partir de son contenu. Cette ontologie permet donc d'attribuer une sémantique au résultat d'interprétation fournit par *OPV*, c.-à-d., donner pour chaque région de l'image une signification réelle (sémantique). En fait [Iakovidis et al., 2009] et [Andres et al., 2012] ont souligné qu'il existe des différences entre les concepts du monde réel (comme « l'eau réel ») et un segment de l'image (qui est un groupement de pixels). Cela signifie que l'eau et un segment d'eau sont ontologiquement différents [Andres et al., 2012]. Ainsi, l'attribution du concept sémantique *eau* au concept *segment d'eau* est allouée à l'ontologie du domaine.

Au niveau sémantique partiel, l'ontologie de domaine est utilisée comme guide pour inférer des relations spatiales entre les objets géographiques dans une scène d'images satellites. Cela pourra être réalisé à partir du fait que cette ontologie permet la modélisation des relations spatiales. De même, comme l'ontologie de domaine modélise des relations temporelles, elle est utilisée aussi comme une référence dans le niveau de sémantique pleine pour extraire des relations temporelles existantes entre les objets des scènes d'images satellites datées.

Aussi, comme nous l'avons introduit, cette ontologie permet de représenter les occurrences de domaine à savoir les évènements et les processus géographiques ainsi que les relations qui peuvent exister entre ces concepts. Par conséquent, nous utilisons cette ontologie au niveau d'interprétation (c.-à-d., le niveau sémantique le plus élevé dans notre architecture).

➔ **Connaissances Contextuelles**

Plusieurs auteurs ont souligné l'importance de la connaissance contextuelle dans le processus d'extraction de la sémantique. L'information contextuelle est définie par [Galleguillos and Belongie, 2010] comme toute information qui ne provient pas directement de l'apparence de l'objet. Selon [Hudelot et al., 2005], l'information contextuelle se réfère à toutes les informations supplémentaires non visuelles, qui peuvent influencer sur la façon dont une scène est perçue. En imagerie satellitaire, la connaissance contextuelle sert à représenter les connaissances des experts en télédétection [Andrés et al., 2017]. Elle est appelée « connaissance contextuelle » parce que cette connaissance dépend des objectifs et de l'expérience de l'expert (ou de la communauté d'experts) et doit être cohérente avec les données à interpré-

ter. Elle diffère de l'ontologie de référence par la sémantique : il ne s'agit pas d'une représentation "objective" de la structure de l'image, mais d'une description "subjective" des règles d'interprétation de l'image. [Andrés et al., 2017] considèrent la connaissance contextuelle comme une extension de la conceptualisation (l'ontologie) de référence qui contient toutes les règles définies par un expert pour interpréter une image de télédétection.

Généralement, il existe deux types d'information contextuelle dans le domaine de télédétection. Le premier type appelé *contexte interne* de la scène qui intègre des connaissances contextuelles en se basant sur la structure conceptuelle de la scène (c.-à-d., les concepts de l'ontologie référence). Par exemple, les règles spectrales (4.1) et (4.2) présentées ci-dessus appartiennent à ce type de contexte parce qu'elles ont été définies en se basant sur le contenu de l'image de télédétection. *une zone verte à l'intérieur d'une zone urbaine est très probablement un parc*, est un autre exemple d'information contextuelle utilisée pour définir le concept *parc*. Dans cet exemple, nous remarquons l'utilisation d'une relation spatiale « intérieur-de » en plus des concepts définis dans l'ontologie. Cela implique que les relations spatiales sont incluses dans le contexte interne de la scène. De même, les relations temporelles sont considérées des informations contextuelles internes de l'image puisqu'elles peuvent aussi être utilisées, à travers la conceptualisation de référence, pour définir de nouvelles règles. Par exemple, l'observation du sol nu après qu'une forêt a été observée signifie que l'objet fait référence à une zone déboisée. Dans cet exemple une relation temporelle « après » a été utilisée. Le deuxième type de contexte est appelé *contexte externe* de la scène puisqu'il inclut des informations contextuelles en dehors du contenu de la scène (par exemple des conditions de détection). Par exemple, un paysage en Amazonie brésilienne est observé sur une image SPOT-5 dans un certain contexte : date d'acquisition, angle d'élévation du soleil, conditions atmosphériques, niveau de traitement [Arvor et al., 2013].

Nous avons donc souligné l'importance et la nécessité de la connaissance contextuelle dans le processus d'interprétation sémantique de scènes d'images satellitaires et nous l'avons explicitement intégrée dans la base de connaissances proposée pour améliorer le processus d'extraction de la sémantique. Nous rappelons que notre méthodologie proposée inclut plusieurs niveaux d'interprétation et puisque les connaissances contextuelles dépendent des objectifs (buts) de l'interprétation, elles seront intégrées dans tous les niveaux de l'architecture présentée. Les connaissances contextuelles intégrées seront présentées dans le processus d'interprétation à chaque niveau.

4.4.1.2 Connaissances implicites

La base de connaissances extraite inclut les connaissances implicites qui sont extraites en se basant sur les connaissances explicites (c.-à-d., les ontologies et les connaissances contextuelles). Bien que ces derniers constituent à la fois la partie **TBox** de l'ontologie, les connaissances implicites se réfèrent à des connaissances représentatives stockées dans la partie **ABox**. Initialement, la base de connaissances contient les faits des images, c'est-à-dire des instances qui sont calculées automatiquement pour fournir des descriptions sémantiques d'objets d'images basées sur des concepts issus de la conceptualisation de référence (ici, l'ontologie des primitives visuelles), mais indépendamment de toute interprétation liée à la connaissance contextuelle. Par exemple,

un objet d'image dans l'image satellite est décrit sur la base de ses caractéristiques, à savoir les valeurs de la bande spectrale et de l'indice spectral. Par la suite, en montant dans les niveaux d'interprétation, cette base sera enrichie par d'autres connaissances implicitement extraites à travers des raisonneurs automatiques en fonction des connaissances explicites (*a priori* et contextuelles) et les connaissances implicites existantes dans le ou les niveaux inférieur(s).

4.4.1.3 Mécanisme de raisonnement

L'architecture proposée est équipée d'un mécanisme de raisonnement pour inférer de nouvelles connaissances à partir de celles existantes. Il est possible d'exécuter des moteurs d'inférence en se basant sur les deux parties **Tbox** (connaissances explicites) et **Abox** (connaissances implicites) définissant la base de connaissances [Arvor et al., 2013]. Cette base de connaissances est gérée par un raisonneur généralement basé sur des logiques de description permettant d'extraire les connaissances implicites à partir des axiomes (*Tbox*) ou des ensembles de faits affirmés (*Abox*). Des raisonneurs existants comme *Hermit*, *Pellet*, *FaCT++* [Tsarkov and Horrocks, 2006], *Racer*, etc. permettent d'effectuer des mécanismes d'inférence. Dans notre approche, différents raisonneurs sont utilisés pour extraire de nouvelles connaissances à partir de la base de connaissances. Comme illustré dans la figure 4.2, l'ensemble de ces raisonneurs inclut :

- ⇒ Le **Raisonneur-Pixel** utilisé pour extraire des primitives visuelles en se basant sur l'ontologie *OPV*, la connaissance contextuelle et les faits de l'image;
- ⇒ Le **Raisonneur-Objet** pour l'extraction des objets sémantiques en se basant sur l'ontologie de domaine, les connaissances contextuelles et les connaissances implicites du niveau bas;
- ⇒ Le **Raisonneur-Spatial** qui permet l'extraction des relations spatiales entre les objets d'une scène en se basant sur l'ontologie de domaine, les connaissances contextuelles et les connaissances implicites du niveau sémantique d'objet;
- ⇒ Le **Raisonneur-Temporel** qui permet l'extraction des relations temporelles entre les objets de scènes en se basant sur l'ontologie de domaine, les connaissances contextuelles et les connaissances implicites du niveau sémantique partiel;
- ⇒ Le **Raisonneur-Changement** utilisé pour inférer des occurrences de changements (événements et processus) ainsi que leurs relations et en conséquence pour interpréter les changements qui sont produits.

4.4.2 Stratégie de l'interprétation sémantique des scènes (ISS)

L'approche que nous proposons vise à utiliser une base de connaissances formée par des connaissances *a priori* et contextuelles et des assertions représentant respectivement la partie *TBox* et *ABox* de cette base de connaissances pour générer une description symbolique de la scène observée dans des images satellites multi-temporelles, puis à interpréter les changements qui se produisent. Nous présentons dans cette section la stratégie d'interprétation sémantique suivie pour extraire la sémantique dans chaque niveau de l'architecture présentée. Comme nous l'avons

mentionné, la présente architecture comporte différents niveaux d'interprétation et chaque niveau inclut ses propres composants guidant à atteindre un objectif. Ainsi, la stratégie d'interprétation que nous proposons sera effectuée en fonction de l'ensemble de composants dans chaque niveau. L'ensemble des composants inclut : les données d'entrées (par exemple, une scène), l'objectif de haut niveau (par exemple, la classification des objets sémantiques), les informations contenues dans la base de connaissances, c'est-à-dire la taxonomie de domaine (ou encore l'ontologie), les connaissances contextuelles du domaine (c'est-à-dire les connaissances définies par l'expert de domaine). Étant donné ces informations, notre stratégie d'interprétation sémantique de scènes (*ISS*) est formalisée comme suit :

$$ISS = \{ ID, DT, DC, OG \} \quad (4.3)$$

Avec,

- ✓ *ID (Input Data)* : la donnée d'entrée,
- ✓ *DT (Domain Taxonomy)* : la taxonomie de domaine,
- ✓ *DC (Domain Context)* : le contexte de domaine (connaissance contextuelle),
- ✓ *OG (Output Goal)* : l'objectif de l'interprétation.

Ce formalisme sera appliqué aux différents niveaux de l'architecture présentée, où l'interprétation sera effectuée par le biais d'un raisonneur. Nous notons ici qu'un raisonneur joue le rôle d'un algorithme de classification (c.-à-d., un classifieur) dans le cas d'une méthode de classification classique.

4.4.2.1 Interprétation sémantique au niveau bas

L'objectif de l'interprétation sémantique dans ce niveau est la classification d'une scène d'image de télédétection à partir de la description du contenu de l'image. Elle consiste à attribuer des catégories spectrales sémantiques aux pixels de l'image d'entrée. L'affectation de ces catégories est réalisée à travers l'utilisation de l'ontologie *OPV*, comme taxonomie de domaine (*DT*) et les connaissances contextuelles (c.-à-d., le contexte de domaine (*DC*) qui sont définies par un expert de domaine. L'interprétation dans ce niveau est basée sur les travaux de ([Baraldi et al., 2006] et [Andrés et al., 2017]) pour étiqueter les pixels de la scène avec des catégories spectrales sémantiques.

En effet, nous avons commencé par réaliser les tâches de traitements d'images pour calculer les faits de chaque image d'entrée. En premier lieu, des étapes de corrections géométriques et radiométriques ont été appliquées sur les images satellites. La correction géométrique est faite pour aligner différentes images multi-temporelles. Ensuite, les images sont calibrées radiométriquement en réflectance sommet-de-l'atmosphère-ou *top-of-atmospheric reflectance* (*TOA*) et sont employées pour extraire les caractéristiques spectrales nécessaires pour appliquer les règles spectrales. L'ensemble des caractéristiques extraites inclut onze indices spectraux capables de capturer

les propriétés indépendantes de l'image des signatures spectrales des classes de couverture terrestre cibles [Baraldi et al., 2006]. Les caractéristiques spectrales extraites et les indices spectraux calculés sont listés ci-après.

- 1) **Brightness (Bright)** : Luminance perçue, il est calculé comme une combinaison pondérée des bandes calibrées 1-5 (TM1 – TM5) et 7 (TM7), avec la formule (4.4).

$$Bright = (1/8) \times (TM1 + TM2 + 2 \times TM3 + 2 \times TM4 + TM5 + TM7), \quad Bright \in [0, 1]. \quad (4.4)$$

- 2) **La réflectance visible (Vis)** : est la réflectance estimée dans la partie visible du spectre électromagnétique. Elle combine les bandes de données TM calibrées 1–3 (TM1 – TM3) comme la moyenne des canaux R, G et B, calculée par la formule (4.5).

$$Vis = (1/3) \times (TM1 + TM2 + TM3), \quad Vis \in [0, 1]. \quad (4.5)$$

- 3) **La réflectance dans le proche infrarouge (Near-infrared : NIR)** : est la réflectance estimée dans la partie NIR du spectre électromagnétique.
- 4) **La réflectance infrarouge moyen (Middle infrared : MIR)** : est la réflectance estimée dans la partie MIR du spectre électromagnétique. Elle comprend les bandes MIR1 (TM5) et MIR2 (TM7) pour le capteur
- 5) **La réflectance thermique infrarouge (Thermal infrared : IR)** : est la réflectance estimée dans la partie TIR du spectre électromagnétique, (par exemple la bande TM6 pour
- 6) **L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI)** : qui vise à réduire les mesures MS à une valeur unique pour prédire et évaluer les caractéristiques de la végétation comme les espèces, la surface foliaire, le stress et la biomasse [Baraldi et al., 2006], calculée par la formule (4.6).

$$NDVI = (TM4 - TM3)/(TM4 + TM3), \quad NDVI \in [-1, 1]. \quad (4.6)$$

- 7) **L'indice de sol nu par différence normalisée (NDBSI)** : qui vise à renforcer les zones de sol nu, les terres en friche, et de la végétation avec une réponse de fond marquée [Baraldi et al., 2006], calculée par la formule (4.7).

$$NDBSI = (TM5 - TM4)/(TM5 + TM4), \quad NDBSI \in [-1, 1]. \quad (4.7)$$

- 8) **L'indice de neige par différence normalisée (NDSI)** : qui vise à distinguer la neige et la glace de toutes les classes de surface restantes, y compris les nuages et les terres stériles froides et hautement réfléchissantes [Baraldi et al., 2006], calculée par la formule (4.8).

$$NDSI = (TM2 - TM5)/(TM2 + TM5), \quad NDSI \in [-1, 1]. \quad (4.8)$$

Selon [Baraldi et al., 2006], l'indice NDSI est fortement corrélé avec l'indice NDBBBI, un indice de différence normalisé prenant en compte la composante de bande bleue dans les zones bâties et les terres stériles (arides). Cet indice convient à la détection des zones bâties et il est calculé en utilisant la formule (4.9).

$$NDBBBI = (TM1 - TM5)/(TM1 + TM5), \quad NDBBBI \in [-1, 1]. \quad (4.9)$$

- 9) **Bande MIR/TIR composite (MIRTIR)** : qui vise à atténuer des difficultés bien connues liées à la séparation des nuages minces et chauds des zones de glace et de froid et des terres stériles hautement réfléchissantes, calculée en utilisant la formule (4.10). La caractéristique TIR est actuellement calculée en tant que canal TM à faible gain calibré 6-2 (TM62) en degrés Kelvin (c.-à-d., $TIR = TM62$, avec $TIR \geq 0$) [Baraldi et al., 2006].

$$MIRTIR = (1 - MIR1) \times TIR, \quad MIRTIR \geq 0. \quad (4.10)$$

Après l'extraction de ces caractéristiques spectrales d'une scène d'images, elles seront dans la suite structurées dans un fichier de format RDF/XML. Ce fichier, représentant l'ensemble des faits d'une scène, sera utilisé comme une donnée d'entrée (**ID**) dans la stratégie ISS proposée. Dans une deuxième étape nous avons défini les différentes règles, présentées dans [Baraldi et al., 2006], pour attribuer une sémantique à chaque objet de l'image. Ces règles représentent le contexte du domaine (**CD**) dans la stratégie ISS. Ainsi, le *Raisonneur-Pixel* utilise ces règles, avec la taxonomie de domaine (**DT**) et l'ensemble des faits (**ID**) pour attribuer une classe (étiquette) spectrale à chaque objet de la scène. Les règles (4.1) et (4.2) sont des exemples de ces règles spectrales. Pour intégrer ces règles dans l'ontologie, nous les avons formulées en langage SWRL comme suit.

La règle 4.1 donne une définition du concept *HighNDVI* qui sera utilisé comme un seuil (élevé) de l'indice NDVI par une règle de partitionner de l'espace de caractéristique, comme a été indiqué dans Braadli. En fait, [Baraldi et al., 2006] a proposé des étiquettes linguistiques (*low*, *medium*, *high*) affectées à des ensembles flous fournissant une partition complète d'un espace de caractéristiques constitué de variables scalaires comme Bright, Vis, NIR, MIR1, MIR2, TIR, MIRTIR, NDSI, NDBBBI, NDVI et NDBSI. Cela rend la possibilité d'étiqueter les pixels de l'image en utilisant des règles floues.

```
VPO:ImageObject(?O), VPO:hasNDVI(?O, ?NDVI),
swrlb:greaterThan(?NDVI, 0.7) ==> VPO:hasFeature(?O,HighNDVI)
```

Règle 4.1 – Règle SWRL pour le concept HighNDVI

```
VPO:ImageObject(?O), VPO:hasblue(?O, ?TM1), VPO:hasgreen(?O, ?TM2), VPO:hasred(?O, ?TM3), VPO:hasnir(?O, ?TM4), VPO:hasmir1(?O, ?TM5), VPO:hasmir2(?O, ?TM7), VPO:hasMaxTM123(?O, MaxTM123), swrlb:greaterThan(?TM2/?TM1, 0.5), swrlb:greaterThan(?TM2/?TM3, 0.7), swrlb:lessThan(?TM3/?TM4, 0.7), swrlb:greaterThan(TM4/?MaxTM123, 1), swrlb:greaterThan(?TM5/?TM3, 0.7), swrlb:lessThan(?TM5/?TM4, 0.7), swrlb:lessThan(?TM7/?TM5, 0.7)  $\implies$  VPO:V_SR(?O)
```

Règle 4.2 – Règle SWRL pour le concept V_SR

```
VPO:ImageObject(?O), VPO:V_SR(?O), VPO:hasFeature(?O, ?HighNDVI), VPO:hasFeature(?O, ?HighNIR), not(VPO:hasFeature(?O, ?HighMIR1)), not(VPO:hasFeature(?O, ?HighMIR2)), not(VPO:hasFeature(?O, ?HighNDBSI))  $\implies$  VPO:SVHNIR_SC(?O)
```

Règle 4.3 – Règle SWRL pour le concept SVHNIR_SC

4.4.2.2 Interprétation au niveau sémantique d'objets

Les catégories spectrales attribuées aux différents pixels de l'image au niveau bas ne correspondent pas aux classes de la couverture de sols, mais elles sont considérées comme des descriptions sémantiques des signatures spectrales. Par exemple, une catégorie spectrale appelée Végétation forte avec un proche infrarouge élevé (SVHNIR_SC) pourrait correspondre à différentes classes de couverture de sols, à savoir les forêts, les terres cultivées ou les pâturages végétaux. Au niveau sémantique d'objets, nous cherchons à attribuer des classes sémantiques réelles aux objets des différentes scènes. Les classes comme les forêts, les lacs, les zones urbaines, les parcelles cultivées et autres représentent des concepts réels. Par conséquent, l'interprétation sémantique des objets consiste à attribuer ces classes réelles aux objets étiquetés dans le niveau bas (obtenues dans l'étape d'extraction des primitives visuelles). Par exemple, dans le niveau bas, un objet végétal représente un groupe de pixels et ne définit pas une véritable classe végétale telle qu'une surface forestière ou d'herbe. D'un autre côté, un concept sémantique (comme une zone urbaine) peut être composé par d'autres concepts réels (incluant, une rivière, une zone végétale ou une construction) qui sont représentés par des catégories spectrales dans le niveau précédent. Ainsi, dans le niveau sémantique d'objets, l'interprétation sémantique consiste à identifier et à classifier les catégories spectrales appartenant à leurs classes réelles. Pour atteindre cet objectif, la stratégie d'ISS à ce niveau suit la démarche suivante :

- 1– Le **raisonneur-Objet** prend comme donnée d'entrée (**ID**) les résultats du niveau bas stocké dans le *triple store RDF* qui contient les assertions inférées des objets étiquetés de chaque image,
- 2– Le raisonneur utilise l'ontologie de domaine comme (**DT**) et un ensemble d'informations contextuelles définissant le contexte du domaine (**DC**) pour raisonner sur les assertions,
- 3– Enfin, sur la base de ces ressources, le raisonneur-Objet identifie les différents objets et leur attribue des classes sémantiques qui sont l'objectif de cette étape d'interprétation (**OG**).

Les règles 4.4 et 4.5 montrent deux exemples de connaissances contextuelles, représentées en logiques de description, utilisées à ce niveau pour attribuer des classes sémantiques aux objets

d'une scène. La règle 4.4 donne une définition possible du concept « forêt » et la règle 4.5 permet d'identifier le concept « zone_urbaine », en fonction de leurs catégories spectrales possibles.

```
forest ≡ SVHNIR_SC ⊔ SVLNIR_SC ⊔ AVLNIR_SC ⊔ WVLNIR_SC ⊔ SHV_SC
```

Règle 4.4 – Règle SWRL pour le concept forêt

```
urban_zone ≡ BBBHTIRF_SC ⊔ BBBLTIRF_SC ⊔ SBBHTIRF_SC ⊔ SBBLTIRF_SC ⊔ ABBHTIRF ⊔  
ABBLTIRF_SC ⊔ DBBHTIRF_SC ⊔ DBBLTIRF_SC ⊔ DBBLTIR_SC
```

Règle 4.5 – Règle SWRL pour le concept zone urbaine

4.4.2.3 Interprétation au niveau sémantique partielle : Interprétation sémantique de scènes mono-temporelles

Nous voulons dire par interprétation sémantique de scènes *mono-temporelle*, l'interprétation de chaque scène d'image de manière indépendante. Ceci présente une interprétation sémantique partielle de la scène. Inversement à la stratégie de classification sémantique des objets qui consiste à modéliser les classes d'objets trouvées dans l'image comme une hiérarchie de classes, l'interprétation de la scène sémantique partielle permet de donner une description visuelle de tout le contenu de l'image (**OG**). La description visuelle du contenu de l'image nécessite la représentation des objets et leurs relations spatiales existantes. Par conséquent, les relations spatiales permettent d'interpréter et de raisonner sur les objets, conduisant ainsi à des interprétations sémantiques de haut niveau. Alors, dans le niveau d'interprétation sémantique de la scène mono-temporelle, nous cherchons à donner une représentation conceptuelle des objets sémantiques et de leurs relations spatiales permettant ainsi de décrire chaque scène.

À ce niveau, le *raisonneur-Spatial* utilise les résultats de la classification sémantique des objets de l'étape précédente comme données d'entrée (**ID**) qui sont aussi des assertions des classes d'objets stockées dans le *triple store RDF*. En se basant sur la conceptualisation de référence (c.-à-d., l'ontologie de domaine) (**DT**) et les connaissances contextuelles (**DC**), le raisonneur déduit les différentes relations spatiales qui se tiennent entre les objets de la scène à travers leurs assertions. Les connaissances contextuelles, ici, incluent un ensemble de règles permettant de définir des relations spatiales telles que les relations topologiques et de directions. Nous rappelons que les relations spatiales topologiques décrivent des voisinages, comme la connexion externe (CE), déconnexion (DC), et partie propre non tangentielle (NTPP), etc., alors que les relations spatiales directionnelles décrivent les orientations relatives des objets (par exemple, Nord, Sud, etc.). Ces relations sont définies comme propriétés d'objets (*Objects properties*) dans la base de connaissances.

Pour définir l'ensemble de règles des relations spatiales, nous avons suivi le principe de la méthode de *Rectangle à limite minimum* (en anglais, *minimum bounding rectangle (MBR)*) qui permet d'identifier des relations spatiales entre deux régions en se basant sur l'approche par projection [Papadias and Theodoridis, 1997]. En effet, selon [Papadias and Theodoridis, 1997], l'approche par projection permet de définir des relations de direction à l'aide de lignes de projection

verticales par rapport aux axes de coordonnées. Le principe de cette approche consiste à diviser le plan en neuf partitions à partir d'un point de référence de l'objet (désigné ici par q). Ainsi, selon les auteurs, il existe neuf relations disjointes possibles entre un objet principal p et l'objet de référence q pouvant être défini comme suit :

$$\begin{aligned}
 north_west(p_i, q_j) &\equiv X(p_i) < X(q_j) \wedge Y(p_i) > Y(q_j) \\
 restricted_north(p_i, q_j) &\equiv X(p_i) = X(q_j) \wedge Y(p_i) > Y(q_j) \\
 north_east(p_i, q_j) &\equiv X(p_i) > X(q_j) \wedge Y(p_i) > Y(q_j) \\
 restricted_west(p_i, q_j) &\equiv X(p_i) < X(q_j) \wedge Y(p_i) = Y(q_j) \\
 same_position(p_i, q_j) &\equiv X(p_i) = X(q_j) \wedge Y(p_i) = Y(q_j) \\
 restricted_east(p_i, q_j) &\equiv X(p_i) > X(q_j) \wedge Y(p_i) = Y(q_j) \\
 south_west(p_i, q_j) &\equiv X(p_i) < X(q_j) \wedge Y(p_i) < Y(q_j) \\
 restricted_south(p_i, q_j) &\equiv X(p_i) = X(q_j) \wedge Y(p_i) < Y(q_j) \\
 south_east(p_i, q_j) &\equiv X(p_i) > X(q_j) \wedge Y(p_i) > Y(q_j)
 \end{aligned}$$

Où, p_i désigne un point de l'objet p et q_j un point de l'objet q et X et Y sont des fonctions renvoyant respectivement les coordonnées x et y d'un point.

Pour implémenter ces règles dans l'ontologie, nous avons stocké les coordonnées de chaque (MBR) de chaque objet dans le triple store comme des propriétés associées. Ces dernières incluent les propriétés d'objets comme *hasMin_XBBox*, *hasMax_XBBox*, *hasMin_YBBox* et *hasMax_YBBox*, représentant respectivement la longitude inférieure gauche (Lower Left Longitude : *LLLong*), la longitude supérieure droite (Upper Right Longitude : *URLong*), la latitude inférieure gauche (Lower Left Latitude : *LLLat*) et la latitude supérieure droite (Upper Right Latitude : *URLat*) sont utilisées pour représenter les coordonnées du MBR d'un objet S (figure). Ainsi, nous utilisons ces propriétés pour définir l'ensemble de relations de directions entre les objets. Par exemple, la relation *south_west* entre deux MBRs des deux objets $S1$ et $S2$ de la figure 4.5 peut être formulée par la règle 4.6.

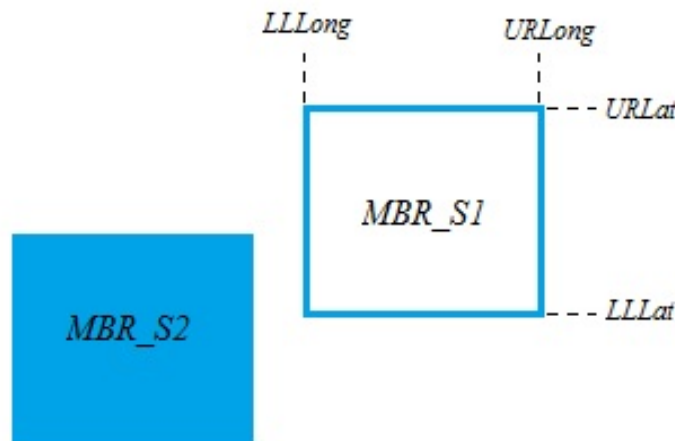


FIGURE 4.5 – Partitions de plan utilisant un point par objet [Papadias and Theodoridis, 1997]

De manière similaire aux relations de directions, les relations topologiques entre objets ont été définies à travers les MBRs de ces objets. Il existe 169 relations possibles entre les MBR, comme illustré dans la figure 4.6.

```

ImageObject(?s1), ImageObject(?s2), hasMin_XBBox(?s1, ?Min_XBBox1),
hasMax_XBBox(?s1, ?Max_XBBox1), hasMin_YBBox(?s1, ?Min_YBBox1), hasMax_YBBox(?s1,
?Max_YBBox1), hasMin_XBBox(?s2, ?Min_XBBox2), hasMax_XBBox(?s2, ?Max_XBBox2),
hasMin_YBBox(?s2, ?Min_YBBox2), hasMax_YBBox(?s2, ?Max_YBBox2), swrlb:greater(?
Min_XBBox1, ?Min_XBBox2), swrlb:greater(?Max_YBBox1, ?Max_YBBox2), swrlb:lessThan
(?Min_YBBox1, ?Min_YBBox2) ==> south_west(?s2, ?s1)

```

Règle 4.6 – Règle SWRL pour la relation de direction south_west

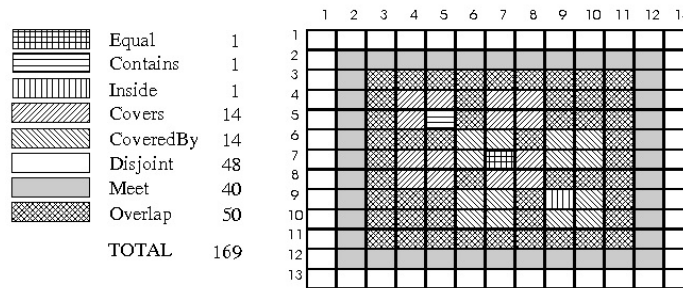


FIGURE 4.6 – Partitions de plan utilisant un point par objet (63)

Toutes les règles définissant les relations topologiques spatiales sont développées puis encodées en utilisant le langage des règles SWRL et intégrées par la suite dans la base de connaissances. La règle 5.7 est un exemple de règle écrite en langage SWRL qui est utilisé pour définir la relation spatiale topologique *inside*.

```

SceneImage(?s1), SceneImage(?s2), hasMin_XBBox(?s1, ?Min_XBBox1), hasMax_XBBox
(?s1, ?Max_XBBox1), hasMin_YBBox(?s1, ?Min_YBBox1), hasMax_YBBox(?s1, ?Max_YBBox1)
, hasMin_XBBox(?s2, ?Min_XBBox2), hasMax_XBBox(?s2, ?Max_XBBox2), hasMin_YBBox(?s2
, ?Min_YBBox2), hasMax_YBBox(?s2, ?Max_YBBox2), swrlb:greaterThan(?Min_XBBox1, ?
Min_XBBox2), swrlb:lessThan(?Max_XBBox1, ?Max_XBBox2), swrlb:greaterThan(?
Min_YBBox1, ?Min_YBBox2), swrlb:lessThan(?Max_YBBox1, ?Max_YBBox2)
==> inside(?s1, ?s2)

```

Règle 4.7 – Règle SWRL pour la relation topologique inside

4.4.2.4 Interprétation au niveau sémantique pleine : Interprétation sémantique de scènes multi-temporelles

Le niveau sémantique de scènes multi-temporelles constitue le noyau sémantique principal de l'étape d'interprétation sémantique pleine des scènes. Dans cette étape, nous nous concentrons sur la description de la scène d'images dans le temps (c.-à-d., à travers les différentes instances de la même scène). L'objectif de la stratégie d'ISS, ici, est d'extraire les relations temporelles qui peuvent exister entre les objets sémantiques des différentes scènes d'images (**OG**). Nous avons montré que les relations temporelles sont généralement définies par les algèbres d'intervalles d'Allen. L'ensemble de ces relations inclut des relations comme « *before* », qui signifie qu'un intervalle (ou un instant) de temps est avant un autre, « *equal* » qui indique que deux intervalles de temps sont égaux et ainsi de suite. Ces relations temporelles sont définies en fonction des dates d'acqui-

sition de différentes scènes (à partir du fichier de métadonnées). Cependant, ces dates ne sont pas classées comme instants ou par intervalles. C'est pour cette raison que nous avons importé l'ontologie (**SWRLTO**), qui offre une taxonomie de classes de temps, dans l'étape de conceptualisation de l'ontologie de domaine dans le but de classifier les instants et les intervalles de temps. Ainsi, en nous basant sur ces classes, nous avons créé des règles SWRL pour définir les relations temporelles d'Allen. Les règles suivantes permettent de définir respectivement la relation *before* (4.11) et *equal* (4.12) entre deux intervalles de temps.

$$\text{SWRLTO} : \text{hasTime}(?i1, ?t1) \wedge \text{SWRLTO} : \text{hasTime}(?i2, ?t1) \wedge \text{SWRL} : \text{lessThan}(?t1, ?t2) \\ \rightarrow \text{before}(?i1, ?i2) \quad (4.11)$$

$$\text{SWRLTO} : \text{hasTime}(?i1, ?t1) \wedge \text{SWRLTO} : \text{hasTime}(?i2, ?t1) \wedge \text{SWRL} : \text{equal}(?t1, ?t2) \\ \rightarrow \text{equal}(?i1, ?i2) \quad (4.12)$$

Par la suite, les différentes relations temporelles seront utilisées pour définir les connaissances contextuelles au niveau d'interprétation sémantique pleine. À ce niveau, les connaissances contextuelles incluent un ensemble de règles permettant de définir les relations spatio-temporelles entre les objets spatiaux des différentes scènes d'images. Par exemple, la règle 4.8 montre comment la relation spatio-temporelle « *t_inside* » est définie dans notre base de connaissances. L'ensemble des règles spatio-temporelles sont considérées comme des connaissances contextuelles (**DC**) à ce niveau d'interprétation. Le **raisonneur-Temporel** utilise ainsi ces connaissances avec l'ontologie de domaine (**DT**), contenant une description des relations temporelles, et l'ensemble des faits inférés dans le niveau précédent (niveau sémantique partielle) comme des données d'entrée (**ID**) pour extraire les relations spatio-temporelles qui peuvent exister entre les objets de différentes scènes multi-datées.

```
SceneImage(?s1), SceneImage(?s2), hasIdentity(?s2, ?id2), hasTime(?s1, ?t1),
  hasIdentity(?s1, ?id1), hasTime(?s2, ?t2), hasMin_XBBox(?s1, ?Min_XBBox1),
  hasMax_XBBox(?s1, ?Max_XBBox1), hasMin_YBBox(?s1, ?Min_YBBox1), hasMax_YBBox(?s1,
  ?Max_YBBox1), hasMin_XBBox(?s2, ?Min_XBBox2), hasMax_XBBox(?s2, ?Max_XBBox2),
  hasMin_YBBox(?s2, ?Min_YBBox2), hasMax_YBBox(?s2, ?Max_YBBox2), swrlb:greaterThan
  (?Min_XBBox1, ?Min_XBBox2), swrlb:lessThan(?Max_XBBox1, ?Max_XBBox2), swrlb:
  greaterThan(?Min_YBBox1, ?Min_YBBox2), swrlb:lessThan(?Max_YBBox1, ?Max_YBBox2),
  before(?t1, ?t2), swrlb:equal(?id1, ?id2)
====> t_inside(?s1, ?s2)
```

Règle 4.8 – Règle SWRL Rule pour la relation spatio-temporelle "inside"

4.4.2.5 Interprétation au niveau sémantique pleine plus élevée : Interprétation sémantique de changement

La description de changements est la phase finale du processus d'interprétation sémantique dans l'approche proposée. Dans ce plus haut niveau, nous nous concentrons sur la détection de différents changements qui se sont produits. Cela revient à répondre aux questions : *quels* sont ces changements? Et, *comment* sont-ils produits? La détection de changement se réfère à la détection de différents évènements tels que l'*expansion* et la *disparition*. En ce qui concerne la question *quels sont les changements*, il s'agit de connaître la nature des changements. Par exemple, connaître s'il y avait une expansion urbaine (urbanisation), la disparition des forêts (déforestation), etc., cela signifie la détection des processus géographiques qui sont produits. Aussi, connaître les différentes relations entre ces occurrences permet d'interpréter les changements, c'est-à-dire répondre à la question : *comment ils se sont produits*? Cela permet de connaître les choses qui ont causé les changements. Par exemple, nous pouvons savoir quel processus qui a causé la production d'un évènement ou d'un autre processus ou quels processus ou évènement ont été produits sur un objet.

Le processus d'interprétation sémantique, à ce niveau, utilise toutes les connaissances inférées dans les niveaux précédents, c.-à-d., tous le *triple store RDF*, comme données d'entrée (*ID*) dans la stratégie d'interprétation. Le raisonnement sur ces assertions se fait à travers le *raisonneur-Changement* qui, en fonction de l'ontologie spatio-temporelle, comme (*DT*) et les connaissances contextuelles (*DC*) définies à ce niveau, permet d'extraire des connaissances sur les changements qui peuvent se produire comme objectif final de cette étape (*OG*).

Dans le plus haut niveau d'interprétation sémantique, deux ensembles de connaissances contextuelles ont été présentés. Le premier ensemble contient les règles permettant de définir les relations entre les occurrents (évènements et processus) et leurs objets, pour pouvoir connaître quel(s) objet(s) en relation avec quel(s) occurrent(s). Par exemple la règle (4.13) permet de définir une relation de participation (*participates_in*, entre l'objet *forêt* et le processus *déforestation*).

$$\text{forêt}(?f) \wedge \text{hasArea}(?a, ?f) \wedge \text{décroissance}(?a) \rightarrow \text{déforestation}(?d) \wedge \text{participates_in}(?f, ?d) \quad (4.13)$$

Le deuxième ensemble consiste en un ensemble de règles permettant de définir les occurrences (c.-à-d., les évènements et les processus) en se basant sur les concepts de la conceptualisation de référence (l'ontologie de domaine). En effet, dans [Ghazouani et al., 2018a], nous avons présenté une nouvelle méthodologie, basée sur les logiques de description, permettant de définir des évènements tels que l'expansion, la fusion, etc., et des processus géographiques comme l'urbanisation et la déforestation. Cette méthodologie sera présentée dans la section suivante.

4.4.3 Méthodologie de raisonnement sur les objets spatio-temporels

Nous présentons dans cette section notre méthodologie proposée [Ghazouani et al., 2018a] pour représenter et raisonner sur les objets spatio-temporels en imagerie satellitaire. Cette méthodologie est basée sur l'exploitation de la logique de description (LD) $\mathcal{ALCRP}(\mathcal{D})$ du domaine concret \mathcal{D} . La logique de descriptions $\mathcal{ALCRP}(\mathcal{D})$ est une extension de la LD $\mathcal{ALC}(\mathcal{D})$. Nous avons montré dans le deuxième chapitre, que la LD $\mathcal{ALC}(\mathcal{D})$ étend la LD standard \mathcal{ALC} par de nouveaux types de données (ou primitives), tels que des nombres entiers ou rationnels, pour traiter des dimensions spécifiques d'objets tels que des primitives spatiales ou temporelles et des prédicats de restrictions existentielles. Selon [Haarslev et al., 1999], l' $\mathcal{ALCRP}(\mathcal{D})$ fournit des termes de rôles se référant à des prédicats sur un domaine concret, \mathcal{RP} signifie rôles définis comme prédicats. Le tableau 4.1 présente les différentes extensions au LD \mathcal{ALC} standard.

LD	Syntaxe	Sémantique
$\mathcal{ALC}(\mathcal{D})$	$\exists u_1, \dots, u_n. P$	$\{a \in \Delta^{\mathcal{I}} \mid x_1, \dots, x_n \in \Delta^{\mathcal{D}} : (a, x_1) \in u_1^{\mathcal{I}}, \dots, (a, x_n) \in u_n^{\mathcal{I}}, (x_1, \dots, x_n) \in P^{\mathcal{D}}\}$
$\mathcal{ALCRP}(\mathcal{D})$	$\exists (u_1, \dots, u_n)(v_1, \dots, v_n). Q$	$\{(a, b) \in \Delta^{\mathcal{I}} \times \Delta^{\mathcal{I}} \mid x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m \in \Delta^{\mathcal{D}} : (a, x_1) \in u_1^{\mathcal{I}}, \dots, (a, x_n) \in u_n^{\mathcal{I}}, (b, y_1) \in v_1^{\mathcal{I}}, \dots, (b, y_m) \in v_m^{\mathcal{I}}, (x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m) \in Q^{\mathcal{D}}\}$

Note, P, Q : des prédicats, u_i, v_i : chaînes de fonctionnalités, a, b : individus abstraits, x, y : individus concrets.

TABLEAU 4.1 – Différentes extension de la LD \mathcal{ALC} standard

4.4.3.1 Représentation des objets et relations spatio-temporelles

$\mathcal{ALCRP}(\mathcal{D})$ fournit un domaine *concret* avec l'espace et le temps, qui à son tour, augmente le pouvoir expressif d'une logique de description étendue et permet de raisonner sur ces dimensions. Le domaine spatial concret \mathcal{S}_2 fournit un ensemble de relations spatiales qualitatives entre les objets tels que les relations RCC8 [Randell et al., 1992a] qui sont utilisées comme prédicats de base du domaine concret. Par exemple, nous pouvons utiliser le rôle spatial concret spécifique « *hasArea* » pour définir un concept ayant une géométrie et spécifier des relations topologiques entre des concepts spatiaux. Le domaine concret temporel \mathcal{T} est un ensemble d'intervalles de temps, où les 13 relations d'Allen (*before, after, meets, met-by, overlaps, overlapped-by, during, contains, starts, started-by, finishes, finished-by, equal*) [Allen, 1984] sont utilisées comme des prédicats de base décrivant les relations entre les intervalles de temps. Ici, nous pouvons utiliser le rôle temporel concret spécifique « *hasDuration* » pour définir un concept temporel et spécifier les relations temporelles entres différents concepts. D'autre part, un objet spatio-temporel a une identité qui décrit sa sémantique. Cette identité nous permet d'affecter un objet à sa classe géographique à savoir une zone urbaine, une forêt, un lac, etc.

Un objet géographique peut changer dans le temps. Si une classe de couverture de sol change à une autre classe, par exemple, une zone de végétation est convertie en une zone urbaine, alors il s'agit d'une *conversion* de l'identité de l'objet. D'un autre côté, si le changement affecte les caractéristiques d'une couverture de sol sans changer sa classification globale (c.-à-d., l'identité de l'objet n'a pas changé), alors nous considérons ce changement comme une *continuation* de l'identité d'objet. L'expansion urbaine est un exemple de ce type de changement. Ainsi, un domaine concret

sémantique \mathcal{ID} est nécessaire pour raisonner sur un objet spatio-temporel. Ce domaine concret fournit un ensemble de relations sémantiques telles que la relation de conversion et de continuation entre les objets. Par conséquent, nous utilisons un rôle sémantique concret spécifique « *hasIdentity* » pour définir l'identité d'un concept et les relations sémantiques entre les concepts.

Les domaines concrets \mathcal{S}_2 , \mathcal{T} et \mathcal{ID} peuvent être combinés pour former le domaine spatio-temporel sémantique ($\mathcal{S}_2 \oplus \mathcal{T} \oplus \mathcal{ID}$). Ainsi, notre logique de description utilisée pour représenter et raisonner sur les objets et les phénomènes géographiques est représenté par : $\mathcal{ALCRP}(\mathcal{S}_2 \oplus \mathcal{T} \oplus \mathcal{ID})$. D'un point de vue ontologique, nous supposons que chaque objet spatio-temporel est associé respectivement à sa représentation spatiale via la caractéristique spatiale concrète *hasArea*, sa représentation temporelle via *hasDuration* et son identité sémantique via *hasIdentity*. Alors, un objet spatio-temporel (STO) est un objet géographique, ayant une géométrie, une temporalité et une identité et qui sont respectivement spécifiées par le rôle concret *hasArea* de domaine géométrie, le rôle concret *hasDuration* du domaine Intervalle et le rôle concret *hasIdentity* du domaine identité, peut être représentée avec l'axiome suivant.

```

STO ≡ GeographicObjet
    ⊑ ∃hasArea.Geometry
    ⊑ ∃hasDuration.Interval
    ⊑ ∃hasIdentity.Identity
    
```

Règle 4.9 – Définition d'un objet spatio-temporel dans le domaine ($\mathcal{S}_2 \oplus \mathcal{T} \oplus \mathcal{ID}$)

Pour définir des relations entre objets spatio-temporels, par exemple pour vérifier si deux régions sont spatialement connectées et se chevauchent dans le temps, on peut définir un rôle spatial « *spatial_connected* » (règle (4.14)) et un rôle temporel « *duration_overlaps* » (règle (4.15)), avec le rôle *spatial_connected* est défini par la disjonction des prédicats élémentaires [Sotnykova et al., 2005]. Cela peut être exprimé en logique de description par la règle 4.10.

$$\begin{aligned}
 \textit{connected} &\equiv \textit{touching} \sqcup \textit{s_overlapping} \sqcup \textit{t_contains} \\
 &\sqcup \textit{t_inside} \sqcup \textit{s_contains} \sqcup \textit{s_inside} \sqcup \textit{equal} \\
 \textit{spatial_connected} &\equiv \exists(\textit{hasArea})(\textit{hasArea}).\textit{connected} \quad (4.14)
 \end{aligned}$$

$$\textit{duration_overlaps} \equiv \exists(\textit{hasDuration})(\textit{hasDuration}).\textit{overlaps} \quad (4.15)$$

$$\textit{transformation} \equiv \exists(\textit{hasIdentity})(\textit{hasIdentity}).\textit{continuation}$$

```

STO ≡ STO
    ⊑ ∃spatial_connected:STO
    ⊑ ∃duration_overlaps:STO
    ⊑ ∃transformation:STO
    
```

Règle 4.10 – Définition des relations spatio-temporelles sémantiques entre deux objets.

4.4.3.2 Raisonnement sur les évènements

Dans cette section, nous montrons la capacité de la LD $\mathcal{ALCRP}(\mathcal{D})$, pour représenter et raisonner sur des évènements comme l'expansion, l'apparition, la disparition, la croissance, la fusion, etc. tout en se basant sur la combinaison des domaines concrets spatial, temporel et sémantique.

○ *L'expansion*

L'expansion peut être définie comme un évènement où l'identité d'une entité continue à exister, mais sa géométrie croît. Par exemple, l'expansion d'une zone urbaine. Formellement, cela signifie que la région R occupée par l'entité à un instant t_1 est incluse dans la région R occupée par l'entité à l'instant t_2 , (c.-à-d., $R(t_1) \subset R(t_2)$) où $t_1 < t_2$. La figure montre une illustration de ce phénomène. Spatialement, la région R de t_1 est à l'intérieur (« *inside* ») de la région R à t_2 . La définition de l'évènement d'expansion pourra être donc exprimé en logique de description comme illustrée par les axiomes définis dans 5.11.

```

inside ≡ ∃(hasArea)(hasArea).tpp-ntpp
within ≡ ∃(hasArea)(hasArea).inside
before ≡ ∃(hasTime)(hasTime).before
equal_identity ≡ ∃(hasIdentity)(hasIdentity).equal
event ⊆ ⊤

expansion ≡ event ⊓ ∃(hasArea,hasTime,hasIdentity)(hasArea,hasTime,hasIdentity).
  within_before_equal_identity
    
```

Règle 4.11 – Définition de l'évènement d'expansion.

○ *La décroissance*

La décroissance (réduction) est définie comme un évènement qui résulte de la réduction de la géométrie d'une entité dans le temps tandis que son identité continue à exister. Par exemple, la réduction de la superficie d'une zone forestière. Comme nous montrons dans la figure, la région R de t_1 est à l'extérieur (« *outside* ») de la région R à t_2 ou bien la région R de t_2 est à l'intérieur (« *inside* ») de la région R de t_1 au temps t_2 , (c.-à-d., $R(t_2) \subset R(t_1)$) où $t_1 < t_2$. Ainsi, nous utilisons l'ensemble des axiomes présentés dans la règle 4.12 pour définir l'évènement de *décroissance*.

```

outside ≡ ∃(hasArea)(hasArea).tppi-ntppi
within ≡ ∃(hasArea)(hasArea).outside
before ≡ ∃(hasTime)(hasTime).before
equal_identity ≡ ∃(hasIdentity)(hasIdentity).equal
event ⊆ ⊤

décroissance ≡ event ⊓ ∃(hasArea,hasTime,hasIdentity)(hasArea,hasTime,
  hasIdentity).within_before_equal_identity
    
```

Règle 4.12 – Définition de l'évènement de décroissance.

○ *L'apparition*

L'apparition est un événement qui se traduit par l'apparition d'un nouvel objet, par exemple la construction d'une nouvelle zone industrielle. Dans ce cas, la géométrie et l'identité d'une entité existent à t_2 et n'existent pas à l'instant t_1 (figure) (c'est-à-dire, $R(t_1) = \emptyset$), où l'instant t_1 rencontre t_2 . Cela peut être formulé par les axiomes illustrés dans la règle 4.13.

```

empty ≡ ∃(hasArea).⊥ ⊓ ∃(hasIdentity).⊥
appear ≡ ∃(hasArea).area ⊓ ∃(hasIdentity).identity
Meets ≡ ∃(hasTime)(hasTime).meets
Before ≡ ∃(hasTime)(hasTime).before
event ⊆ T

apparition ≡ event
⊓ ∃(hasTime)(hasTime).empty-Before
⊓ ∃(hasTime)(hasTime).appear-Meets
    
```

Règle 4.13 – Définition de l'évènement de décroissance d'apparition.

○ La disparition

La disparition est un événement qui résulte de la destruction d'un objet, par exemple la disparition d'un nouveau lac. Pour cet événement, comme montré dans la figure, la géométrie et l'identité d'une entité continuent à exister dans un temps t_1 avant un temps t_2 et elles vont disparaître après le temps t_2 (c'est-à-dire, $R(t_2) = \emptyset$), où l'instant t_1 rencontre t_2 . Cela peut être formulé par les axiomes illustrés dans la règle 4.14.

```

disappear ≡ ∃(hasArea).area ⊓ ∃(hasIdentity).identity
Meets ≡ ∃(hasTime)(hasTime).meets
Before ≡ ∃(hasTime)(hasTime).before
event ⊆ T

disparition ≡ event
⊓ ∃(hasTime)(hasTime).¬empty-Before
⊓ ∃(hasTime)(hasTime).disappear-Meets
    
```

Règle 4.14 – Définition de l'évènement de disparition.

○ La fusion

L'évènement de fusion (*merging*) est défini comme le résultat de la fusion de deux ou plus petites entités pour former une seule. Par exemple, le cas d'une parcelle de terrain pouvant résulter d'une séquence de regroupements partiels de parcelles antérieures. Comme illustré dans la figure 4.8, les deux régions **R1** et **R2** sont regroupées dans une région **R** avec une nouvelle identité différente de l'identité de **R1** et **R2** respectivement. La géométrie occupée par la région **R** à l'instant t_2 contient la géométrie occupée par **R1** et **R2** de l'instant t_1 . Cette figure montre comment nous pouvons associer chaque objet de domaine abstrait Δ_1 (représenté ici par, **R**, **R1** et **R2** avec sa représentation respective dans le domaine concret spatial (\mathcal{S}_2), temporel (\mathcal{T}) et sémantique (\mathcal{I}_d) via une fonctionnalité *hasArea* (figure 4.8a), *hasTime* (figure 4.8b) et *hasIdentity* (figure 4.8c) respectivement. Cela pourra être représenté en logique de description par l'axiome 4.15.

○ La division

L'évènement de division (*splitting*) est défini comme le résultat de la division d'une entité

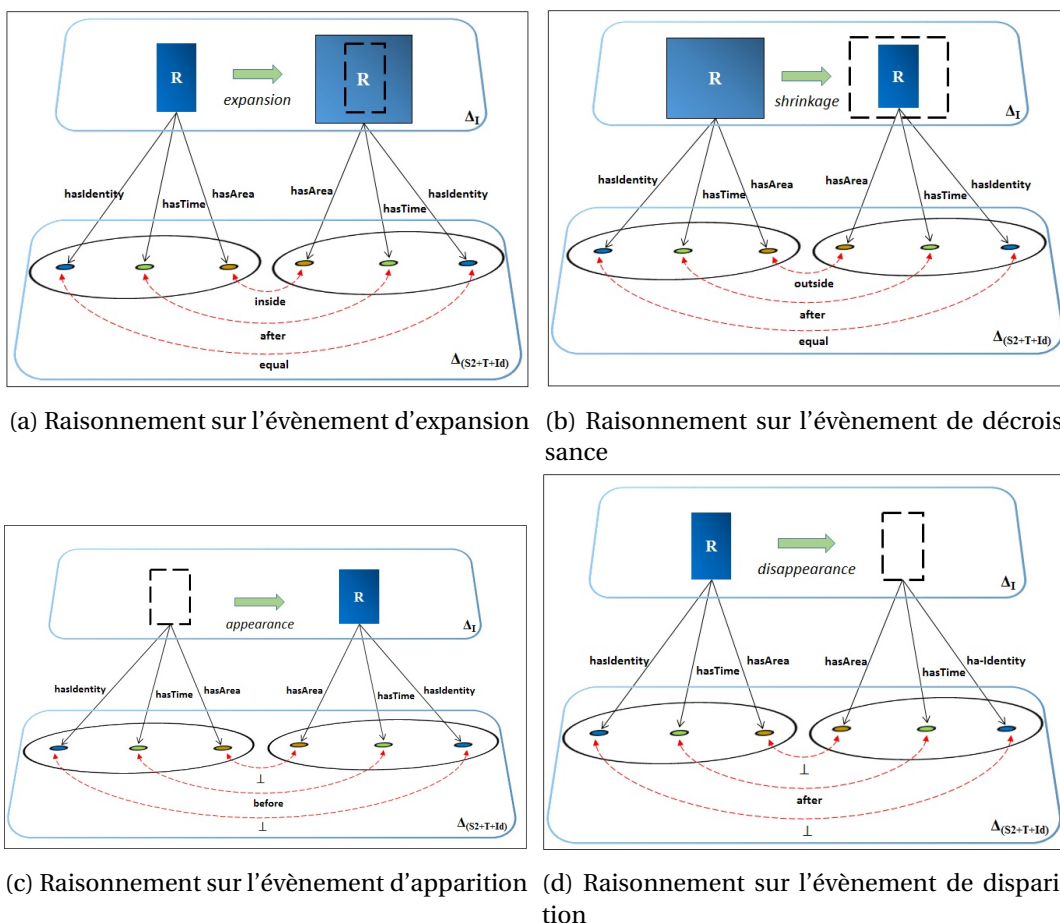


FIGURE 4.7 – Illustration graphique des différents évènements

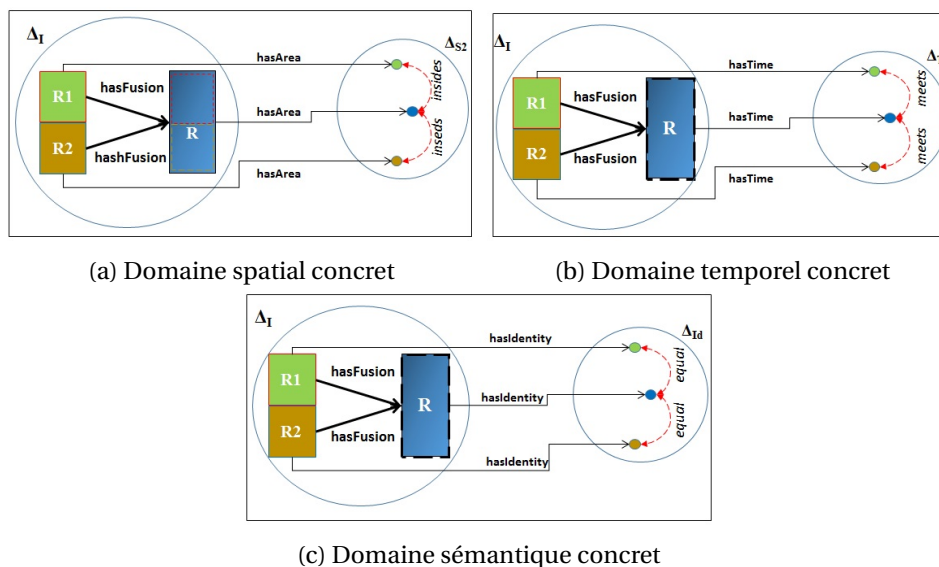


FIGURE 4.8 – Représentation de l'évènement de fusion

```

event ⊆ T
merging ≡ event
    □ R1:STO □ R2:STO □ R:STO
    □ ∃ (R1 ◦ hasArea, R ◦ hasArea).insides
    □ ∃ (R2 ◦ hasArea, R ◦ hasArea).insides
    □ ∃ (R1 ◦ hasTime, R ◦ hasTime).meets
    □ ∃ (R2 ◦ hasTime, R ◦ hasTime).meets
    □ ∃ (R1 ◦ hasIdentity, R ◦ hasIdentity).equal
    □ ∃ (R2 ◦ hasIdentity, R ◦ hasIdentity).equal
    
```

Règle 4.15 – Définition de l'évènement de fusion.

mère en deux entités plus petites ou plus. Par exemple, une parcelle de terrain est divisée en un ensemble de sous-parcelles. Dans ce cas, chaque nouvelle géométrie est spatialement à l'intérieur de la géométrie de l'entité parente et les nouvelles identités sont différentes de l'identité parente (c.-à-d., $R(t_1) = R1(t_2) \cup R2(t_2)$ où t_1 rencontre t_2). La figure 4.9 montre une illustration de cet évènement. La formulation de l'évènement de division est exprimée en logique de description dans 4.16.

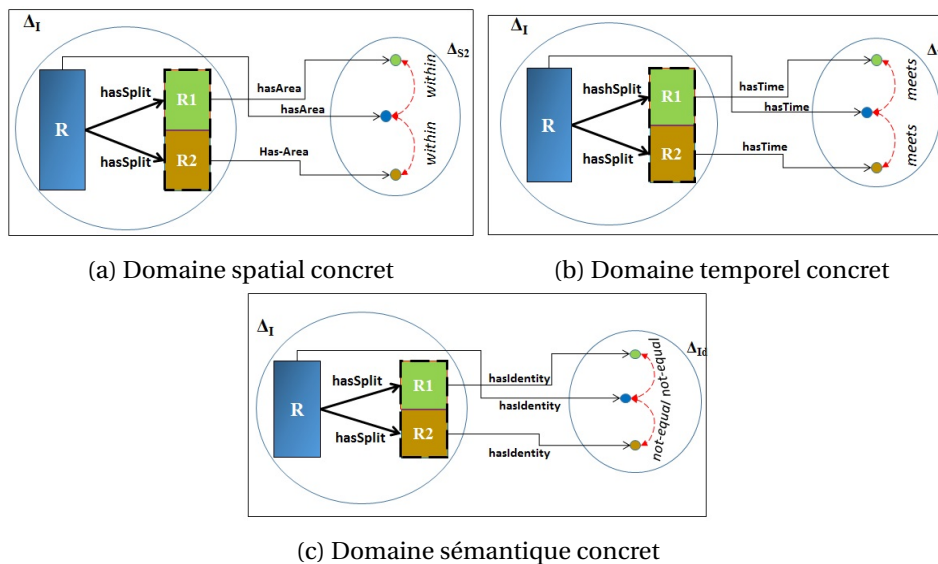


FIGURE 4.9 – Représentation de l'évènement de division

4.4.3.3 Raisonnement sur les processus

Nous utilisons le terme processus pour définir les occurrences spécifiques aux domaines (*dependent-domain*) comme la déforestation, l'urbanisation, la dégradation et d'autres transformations d'utilisation/de couverture des sols. D'un point de vue ontologique, un processus spatio-temporel est processus qui se produit dans une région spécifique pendant un intervalle de temps. Ainsi, en considérant la combinaison du domaine spatial concret avec le domaine temporel concret, nous pouvons utiliser le rôle spatial concret **hasArea** et le rôle temporel concret **hasDuration** pour associer respectivement un individu à sa région spatiale et son intervalle de temps. Cela pourra être exprimé par la règle 4.17.

```

event    ⊆ T

splitting ≡ event
    □ R1:STO    □ R2:STO    □ R:STO
    □ ∃ (R1 ◦ hasArea, R ◦ hasArea).insides
    □ ∃ (R2 ◦ hasArea, R ◦ hasArea).insides
    □ ∃ (R1 ◦ hasTime, R ◦ hasTime).meets
    □ ∃ (R2 ◦ hasTime, R ◦ hasTime).meets
    □ ∃ (R1 ◦ hasIdentity, R ◦ hasIdentity).¬equal
    □ ∃ (R2 ◦ hasIdentity, R ◦ hasIdentity).¬equal
    
```

Règle 4.16 – Définition de l'évènement de division.

```

process    ⊆ T

spatio_temporal_process ≡ process
    □ ∃ hasDuration.Interval
    □ ∃ hasArea.region
    
```

Règle 4.17 – Définition d'un processus spatio-temporel.

Un processus peut être aussi défini en fonction d'un ou plusieurs évènements. Cela permet d'exprimer les relations entre des processus et des évènements. Par exemple, nous utilisons la règle SWRL (4.16) pour raisonner sur le processus de déforestation en fonction d'évènement de décroissance (*Shrinkage*) sur un objet de type *forest*. La règle (4.17) définit le processus d'urbanisation en fonction de l'évènement d'expansion produit sur une zone urbaine.

$$\text{SHRINKAGE}(?ob), \text{hasIdentity}(?ob, \text{"Forest"}) \rightarrow \text{Deforestation}(?ob) \quad (4.16)$$

$$\text{EXPANSION}(?ob), \text{hasIdentity}(?ob, \text{"Urban_zone"}) \rightarrow \text{Urbanization}(?ob) \quad (4.17)$$

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthodologie d'interprétation de scènes d'images de télédétection pour l'interprétation sémantique des changements en imagerie satellitaire. La méthodologie proposée est structurée en différents niveaux d'interprétation, du niveau bas jusqu'au niveau sémantique plein plus élevé. À chaque niveau, la stratégie d'interprétation est basée sur l'utilisation d'un ensemble de connaissances *a priori* et contextuelles stockées sous forme d'une base de connaissances pour extraire des connaissances implicites à travers un raisonneur automatique. Pour chaque niveau, le raisonneur utilise les connaissances explicites et implicites pour inférer d'autres connaissances qui seront utilisées dans un niveau d'interprétation supérieur.

Chapitre 5

Expérimentation et évaluation de la méthodologie proposée

Sommaire

5.1	Introduction	112
5.2	Présentation de la zone d'étude	112
5.2.1	Zone d'étude	112
5.2.2	Ensemble de données utilisé	113
5.3	Application de la stratégie d'interprétation sémantique	113
5.3.1	Prétraitement et extraction des caractéristiques	113
5.3.2	Interprétation sémantique niveau bas : étiquetage sémantique des pixels	115
5.3.3	Interprétation au niveau sémantique d'objets : classification sémantique d'objets	117
5.3.4	Interprétation au niveau sémantique partiel : extraction des relations spatiales	118
5.3.5	Interprétation au niveau sémantique plein : extraction des relations spatio- temporelles	119
5.3.6	Interprétation au niveau sémantique plus élevé : interprétation sémantique des changements	120
5.4	Évaluation des résultats	128
5.4.1	Évaluation des résultats du niveau bas	129
5.4.1.1	Évaluation qualitative	129
5.4.1.2	Évaluation quantitative	129
5.4.2	Évaluation des résultats du niveau sémantique d'objets	130
5.4.2.1	Évaluation qualitative	130
5.4.2.2	Évaluation quantitative	131
5.4.3	Évaluation des résultats au deux niveaux sémantique partielle et pleine .	131
5.4.3.1	Évaluation qualitative	132
5.4.3.2	Évaluation quantitative	132
5.4.4	Évaluation des résultats au niveau changement	133
5.5	Conclusion	135

5.1 Introduction

L'un des objectifs fondamentaux de l'imagerie satellitaire est de diffuser les connaissances sur notre environnement et de faciliter l'interprétation de différents phénomènes affectant la surface de la Terre. La compréhension et l'interprétation des différents phénomènes, à partir des données de télédétection, sont des étapes importantes qui nous aident à définir ultérieurement les stratégies et les décisions adéquates pour une meilleure gestion et protection des sols contre différents risques comme l'érosion, la sécheresse, etc. Par exemple, la production des certains risques, est peut être due à la production de l'un des phénomènes géographiques tels que la déforestation et l'urbanisation, etc. Dans ce chapitre, nous proposons d'appliquer notre méthodologie sur une zone d'étude pour interpréter les phénomènes géographiques qui sont produits dans cette zone. Le résultat de cette interprétation sera présenté sous forme d'une carte de changement thématique qui pourra aider les experts ultérieurement à évaluer la susceptibilité de la zone aux risques.

5.2 Présentation de la zone d'étude

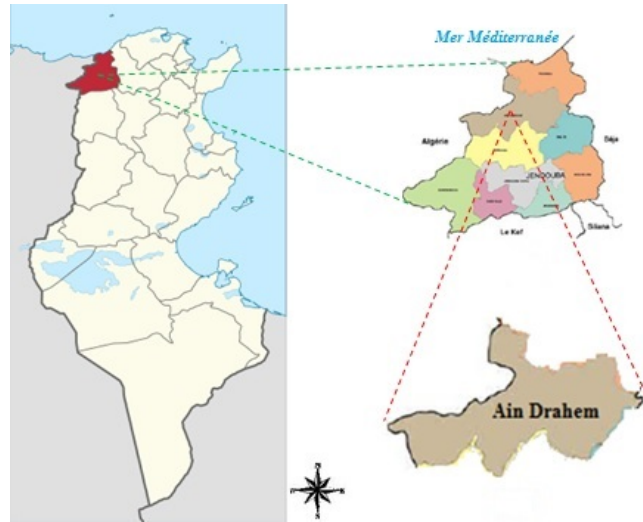
Nous présentons dans cette section la région *Ain-Drahem*, la zone d'étude, sur laquelle nous avons appliqué notre méthodologie pour interpréter les changements qui peuvent se produire dans cette région, ainsi que l'ensemble des données utilisées.

5.2.1 Zone d'étude

Aïn Drahem est une ville située au nord-ouest de la Tunisie dans le gouvernorat de Jendouba, à 25 kilomètres au sud de la mer Méditerranée (figure 5.1a), avec une superficie de 50000 hc, soit 16% de la superficie totale du gouvernorat de Jendouba. Sa population est d'environ 42000 habitants (26% sont situés dans une zone urbaine et 74% en zone rurale). La ville d'Aïn Drahem se caractérise par une forte densité de forêts de 38000 hc (la superficie de la forêt représente 80% de la superficie d'Aïn Drahem et 31% de la superficie du gouvernorat de Jendouba). Les précipitations à Aïn Drahem sont les plus élevées en Tunisie avec un taux de 1534 mm/an. La ville est caractérisée par un hiver très froid avec une température moyenne de 5°C à 10°C et elle est exposée à des tempêtes de neige. En plus de ces facteurs climatiques, la localisation de la ville dans une région montagneuse avec un terrain naturel difficile, rend cette ville une zone entourée de nombreuses catastrophes.

En effet, Aïn Drahem est au cœur des montagnes de Kroumirie couvertes de forêts. Le feu des forêts est l'une des grandes catastrophes dont souffre la ville. La saison des incendies commence généralement du 15 avril jusqu'à la fin du mois de septembre. Ce phénomène provoque des dommages aux infrastructures forestières. La croissance démographique et la présence d'activités agricoles ont également entraîné une réduction de la superficie forestière. Par conséquent, l'infrastructure de la ville est devenue très vulnérable aux glissements de terrain (figure 5.1a). Ce phénomène a provoqué de nombreux problèmes comme des routes, des installations et des bâtiments endommagés, l'évacuation de la population, l'érosion des sols, etc. Ainsi, l'existence de

phénomènes géographiques tels que la déforestation liée à la réduction de la couverture forestière et à l'urbanisation liée à la croissance de la population nous a conduits à choisir cette zone d'étude pour évaluer l'approche proposée pour l'interprétation des changements produits dans cette zone.



(a) localisation de la zone d'étude sélectionnée



(b) Glissement de terrain (Aïn Drahem, Février 2012)

FIGURE 5.1 – Illustration de la zone d'étude (5.1a avec un exemple de risque (5.1b)

5.2.2 Ensemble de données utilisé

La méthodologie présentée pour l'interprétation sémantique de scènes d'images satellitaires a été appliquée sur deux sous-ensembles de données à partir de deux images multi-spectrales représentant une même scène de la zone d'étude sélectionnée en deux dates différentes. Nous avons utilisé une scène Landsat 8 acquise le 11 juin 2017 et une scène Landsat ETM+ acquise le 5 mai 2000. Les deux images multi-spectrales sont obtenues avec une résolution spatiale de 30 m (pour les bandes visibles, proche infrarouge (NIR) et infrarouge moyen (MIR)) et de 15 m (pour les bandes panchromatiques). Nous présentons dans la figure 5.14 une illustration des deux images originales en couleurs naturelles (vraies couleurs) (figures 5.2a et 5.2c) et en infrarouge fausses couleurs standards (*False Color Composite : FCC*) (figures 5.2b et 5.2d) respectivement.

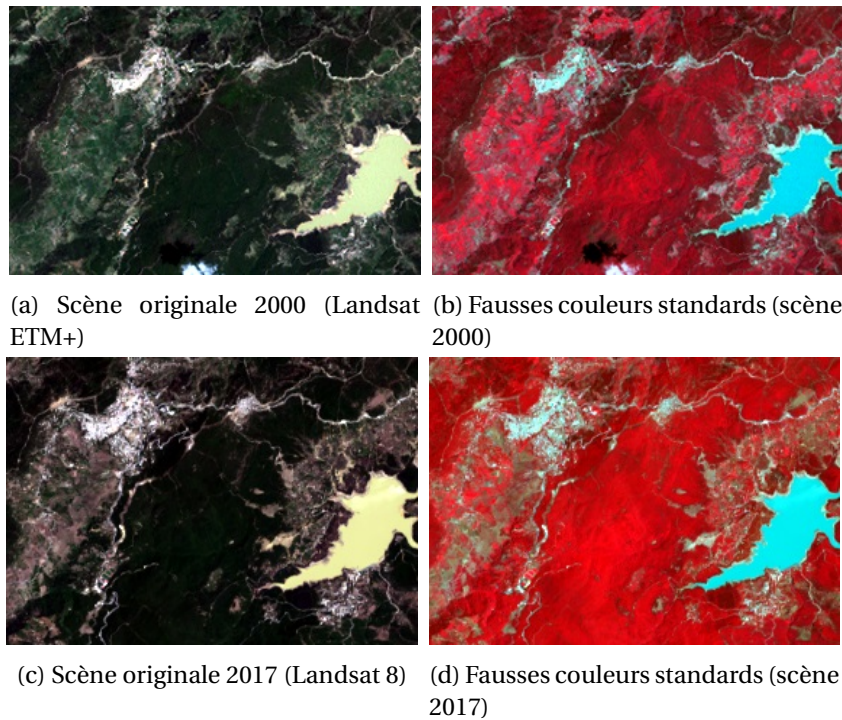


FIGURE 5.2 – Illustration des deux zones sélectionnées

5.3 Application de la stratégie d'interprétation sémantique

5.3.1 Prétraitement et extraction des caractéristiques

C'est la première étape avant d'appliquer le processus d'interprétation sémantique. Elle consiste à appliquer des opérations de prétraitement sur les images d'entrée pour extraire les caractéristiques de chaque image. Dans cette étape, nous avons importé les images de la scène dans l'outil de traitement d'image satellitaire ENVI 5.2 et nous avons effectué une opération recalage automatique pour aligner les deux images de la scène. Ensuite, une opération de correction radiométrique a été réalisée sur chaque image. Dans cette phase, les bandes MS (1-5, et 7) du satellite Landsat ETM+ (respectivement 1-7 pour le satellite Landsat 8) sont calibrées en réflectance top-de-l'atmosphère (TOA). Les bandes thermiques (6 pour Landsat ETM+) et (10 et 11 pour Landsat 8) ont été calibrées à la température satellite du système d'observation Terre-Atmosphère. Toutes les opérations de calcul radiométrique sont basées sur les équations rapportées dans le manuel LANDSAT-7 [Landsat, 2011] pour les images landsat ETM+ (respectivement dans le manuel LANDSAT-8 [Zanter, 2016]), où les paramètres de calibrations sont extraites du fichier des métadonnées de chaque scène.

Une fois les images sont calibrées, elles sont utilisées pour extraire les valeurs des bandes et pour calculer les indices spectraux nécessaires pour la définition de l'ensemble des règles spectrales à utiliser dans l'étape d'interprétation sémantique. Le tableau 5.1 résume l'ensemble de caractéristiques à extraire pour chaque pixel dans l'image.

Par la suite, l'ensemble des caractéristiques sont extraites et sont stockées dans un fichier de type *shapefile* qui sera dans la suite convertie en un fichier *RDF* à fin d'être intégré dans le triple store

Feature	Description	Formule
TM1	Bande bleu	
TM2	Bande verte	
TM3	Bande rouge	
BRIGHT	L'indice de la luminance perçue	$(1/8) \times (TM1 + TM2 + 2 \times TM3 + 2 \times TM4 + TM5 + TM7)$
VIS	La réflectance du visible	$(1/3) \times (TM1 + TM2 + TM3)$
NIR	La réflectance dans le proche infrarouge	
MIR1	La réflectance dans l'infrarouge moyen 1	
MIR2	La réflectance dans l'infrarouge moyen 2	
TIR	La réflectance thermique infrarouge	
MIRTIR	Indice utilisé pour atténuer des difficultés bien connues liées à la séparation des nuages minces et chaudes des zones de glace et de froid et des terres stériles hautement réfléchissant	
NDSI	L'indice de neige par différence normalisée	$(TM2 - TM5)/(TM2 + TM5)$
NDBBBI	L'indice de différence normalisé prenant en compte la composante de la bande bleue	$(TM1 - TM5)/(TM1 + TM5)$
NDVI	L'indice de végétation par différence normalisée	$(TM4 - TM3)/(TM4 + TM3)$
NDBSI	L'indice de sol nu par différence normalisée	$(TM5 - TM4)/(TM5 + TM4)$
NDWI	L'indice d'eau par différence normalisée	$(TM2 - TM4)/(TM2 + TM4)$
MinTM123	Le minimum entre les bandes TM1, TM2 et TM3	$\min\{TM1, TM2, TM3\}$
MaxTM123	Le maximum entre les bandes TM1, TM2 et TM3	$\max\{TM1, TM2, TM3\}$
MaxTM234	Le maximum entre les bandes TM2, TM3 et TM4	$\max\{TM2, TM3, TM4\}$
MaxTM45	Le maximum entre les bandes TM4 et TM5	$\max\{TM4, TM5\}$
MaxTM12347	Le minimum entre les bandes TM1, TM2, TM3, TM4 et TM7	$\min\{TM1, TM2, TM3, TM4, TM7\}$
MaxTM12347	Le maximum entre les bandes TM1, TM2, TM3, TM4 et TM7	$\max\{TM1, TM2, TM3, TM4, TM7\}$
MaxTM23457	Le maximum entre les bandes TM2, TM3, TM4, TM5 et TM7	$\max\{TM2, TM3, TM4, TM5, TM7\}$

TABLEAU 5.1 – Caractéristiques des satellites LANDSAT

RDF. Nous utilisons, ici, un triple store appelé *Stardog* [Clark, 2017], qui est une base de données RDF qui prend en charge le raisonnement OWL. Stardog utilise un raisonneur basé sur des techniques de réécriture de requête pour effectuer des inférences. Notre choix est principalement motivé par les trois raisons suivantes : Stardog prend en charge les règles SWRL, il permet d'effectuer un raisonnement à l'exécution des requêtes et c'est un triple stockage à grande échelle. En fait, nous avons besoin d'un raisonneur associé à un triple store à grande échelle pour gérer de grandes bases de connaissances en considérant (de nombreuses) ontologies alignées. Ainsi, un fichier RDF contenant les faits d'une image (ici, l'ensemble des caractéristiques par pixel) est créé pour chaque image d'entrée. L'ensemble des faits sont intégrés dans le triple store comme des instances (des individus) de l'ontologie des primitives visuelles. Un exemple d'instance est illustré dans la figure 5.3.

```
<rdf:Description rdf:about="http://ssi.org/visual_primitive_ontology/resource/ImageObjectClass/ImageObject_30931.78d3">
  <VPO:hasNir rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.30415</VPO:hasNir>
  <VPO:hasNDWI rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">-0.5987</VPO:hasNDWI>
  <VPO:hasMir2 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.04301</VPO:hasMir2>
  <VPO:hasMinTM123 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.04835</VPO:hasMinTM123>
  <VPO:hasNDBSI rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">-0.43799</VPO:hasNDBSI>
  <VPO:hasExactGeometry rdf:resource="http://ssi.org/visual_primitive_ontology/resource/ImageObjectClass/78d3"/>
  <rdf:type rdf:resource="http://ssi.org/visual_primitive_ontology#ImageObjectClass"/>
  <VPO:hasNDSI rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">-0.25409</VPO:hasNDSI>
  <VPO:hasBright rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.11915</VPO:hasBright>
  <VPO:hasVis rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.07032</VPO:hasVis>
  <VPO:hasNDVI rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.72364</VPO:hasNDVI>
  <VPO:hasred rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.04835</VPO:hasred>
  <VPO:hasMaxTM123 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.08664</VPO:hasMaxTM123>
  <VPO:hasGeometry rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">POINT (474000 4067970)</VPO:hasGeometry>
  <VPO:hasblue rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.08664</VPO:hasblue>
  <VPO:hasMaxTM234 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.30415</VPO:hasMaxTM234>
  <VPO:hasMaxTM45 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.30415</VPO:hasMaxTM45>
  <VPO:hasMinTM12347 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.043</VPO:hasMinTM12347>
  <VPO:hasGreen rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.07597</VPO:hasGreen>
  <VPO:hasMaxTM12347 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.30415</VPO:hasMaxTM12347>
  <rdfs:label xml:lang="en">ImageObject_30931</rdfs:label>
  <VPO:hasTIR rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">293.99042</VPO:hasTIR>
  <VPO:hasMir1 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.11857</VPO:hasMir1>
  <VPO:hasDate rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">03052000</VPO:hasDate>
  <VPO:hasNDBBBI rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">-0.15483</VPO:hasNDBBBI>
  <VPO:hasMaxTM23457 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">0.30415</VPO:hasMaxTM23457>
  <VPO:hasMIRTIR rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#double">259.1333</VPO:hasMIRTIR>
  <VPO:hasImageObject rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">ImageObject_30931</VPO:hasImageObject>
</rdf:Description>
```

FIGURE 5.3 – Exemple d'individu : ce code représente un objet d'image (pixel) et ses caractéristiques associées

5.3.2 Interprétation sémantique niveau bas : étiquetage sémantique des pixels

L'objectif principal de l'interprétation sémantique au niveau bas est d'attribuer des classes spectrales à chaque pixel d'une scène d'image. Pour atteindre cet objectif, nous avons tout d'abord commencé par la construction de l'ontologie des primitives visuelles. La création de cette ontologie est faite en utilisant l'éditeur des ontologies Protogé. Cette ontologie, comme nous l'avons présentée dans le chapitre 3, contient l'ensemble de concepts et des relations définies à partir des connaissances des experts. Nous avons aussi enrichi cette ontologie par d'autres concepts et relations qui sont utilisés pour définir respectivement la caractéristique spatiale (ici, la géométrie) et temporelle (la date d'acquisition). La figure 5.4a montre un extrait des concepts (figure 5.4a) et les différentes propriétés entre les concepts (figures 5.4b et 5.4c) de l'ontologie des primitives visuelles.

Par la suite, nous avons importé l'ontologie des primitives visuelles dans le triple store à fin d'être utilisée dans le processus de raisonnement. D'autre part, nous avons créé et intégré les

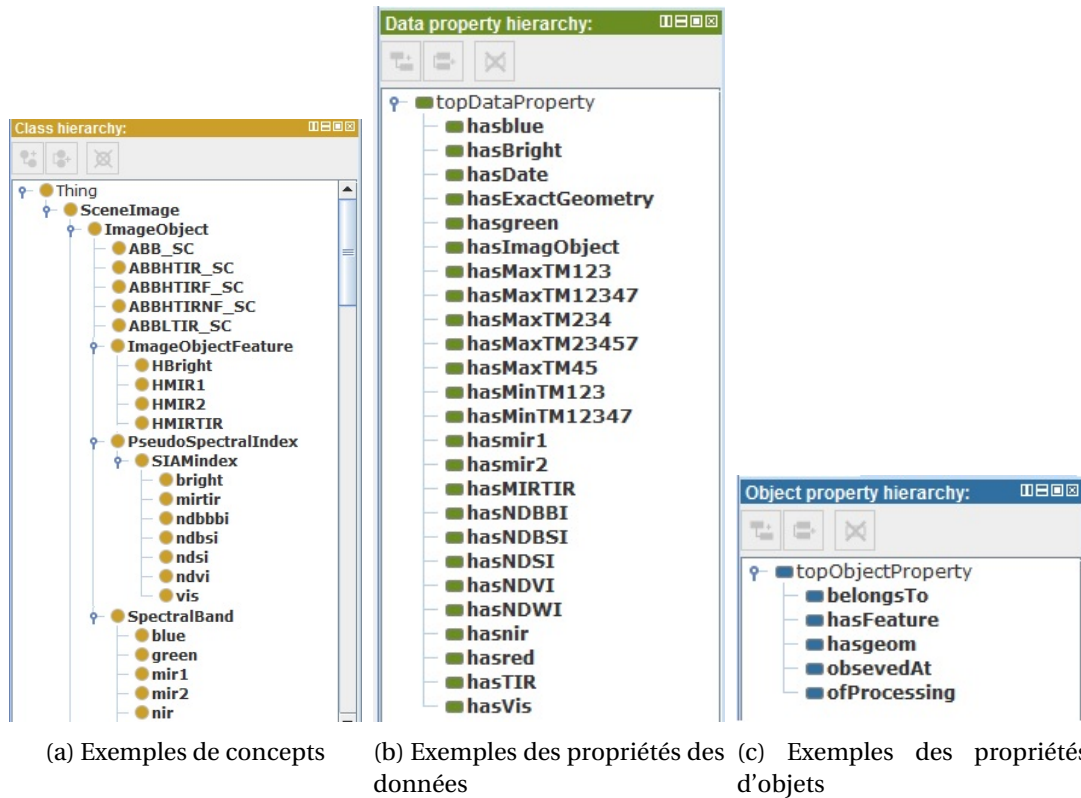


FIGURE 5.4 – Extrait des concepts et relations de l'ontologie des primitives visuelles

connaissances contextuelles comportant l'ensemble des règles spectrales (présentées dans [Baraldi et al., 2006]) nécessaires pour la classification. L'ensemble de ces règles seront utilisées par le raisonneur Stardog pour assigner les instances des objets images (pixels) à tout concept de l'ontologie dont la définition correspond à la description des objets. Ainsi, nous avons défini toutes les règles avec le langage SWRL et qui seront ensuite représentées avec le format supporté par Stardog pour être intégrées dans le triple store. Les règles 5.1, 5.3, 5.2 et 5.4 sont des exemples de règles SWRL écrites avec la syntaxe supportée par Stardog. Avec,

- ✓ La **Règle 5.1** : est une règle utilisée pour définir la classe de végétation spectrale.
- ✓ La **Règle 5.2** : est une règle qui attribue la valeur catégorique *High* pour chaque individu (pixel) dont la valeur de son NDVI est strictement supérieure à 0.7.
- ✓ La **Règle 5.3** : est une règle utilisée pour définir la classe de végétation spectrale forte (SV_SC).
- ✓ La **Règle 5.4** : est utilisée pour définir la catégorie spectrale de végétation forte avec un proche infrarouge élevé (SVHNIR_SC).

Le mécanisme de raisonnement à travers les différentes règles spectrales affecte chaque pixel de la scène d'image à sa classe spectrale correspondante. Le résultat d'une telle classification est montré respectivement dans la figure 5.5 sous forme d'une carte générée à partir de la scène Landsat ETM+ représentée dans la figure 5.2a et dans la figure 5.5 générée à partir de la scène Landsat 8 de la figure 5.2c. Dans les deux figures, les classes spectrales sont représentées en pseudo-couleurs selon la légende suivante : les zones végétales candidates (à savoir SV_SC, AV_SC, WV_SC, SSR_SC, ASR_SC, SHR_LSC, AHR_LSC, DR_LSC, SHV_LSC, WE_LSC et WR_LSC) sont de différentes nuances

```

@prefix VPO_indv:<http://ssi.org/visual_primitive_ontology#> .
@prefix VPO:<http://ssi.org/visual_primitive_ontologyDB#>.
@prefix rule: <tag:stardog:api:rule:> .

[] a rule:V_SR_rule;
rule:content      ""

IF {
  ?x a VPO_indv:ImageObjectClass .

  ?x VPO_indv:hasblue ?TM1 .
  ?x VPO_indv:hasgreen ?TM2 .
  ?x VPO_indv:hasred ?TM3 .
  ?x VPO_indv:hasnir ?TM4 .
  ?x VPO_indv:hasmir1 ?TM5 .
  ?x VPO_indv:hasmir2 ?TM7 .
  ?x VPO_indv:hasMaxTM123 ?MaxTM123 .

  FILTER(?TM2/?TM1 >= "0.5"^^xsd:double && ?TM2/?TM3 >= "0.7"^^xsd:double
    && ?TM3/?TM4 < "0.7"^^xsd:double && ?TM4/?MaxTM123 > "1"^^xsd:double
    && ?TM5/?TM3 >= "0.7"^^xsd:double && ?TM5/?TM4 < "0.7"^^xsd:double
    && ?TM7/?TM5 < "0.7"^^xsd:double )

}
THEN {
  ?x a VPO:V_SR .
}"" .

```

Règle 5.1 – Règle SWRL pour le concept V_SR

de vert (du clair au sombre), les masses d'eau sont bleu foncé (*WASHSN_SC*) et clair (*SLWASH_SC*), tandis que les terres arides et les zones de constructions (à savoir *BBB_SC*, *SBB_SC*, *ABB_SC*, *DBB_SC* et *SHB_SC*) sont de couleur de teintes marron et grises.


```

@prefix VPO_indv:<http://ssi.org/visual_primitive_ontology#> .
@prefix VPO:<http://ssi.org/visual_primitive_ontologyDB#>.
@prefix rule: <tag:stardog:api:rule:> .

[] a rule:Hight_NDVI_rule;
rule:content      """

IF {
  ?x a VPO_indv:ImageObjectClass .

  ?x VPO_indv:hasNDVI ?NDVI .

  FILTER(?NDVI > "0.7"^^xsd:double)
}
THEN {
  ?x VPO:hasFeature VPO:HNDVI .
}""" .
    
```

Règle 5.2 – Règle SWRL pour le concept HighNDVI

5.3.3 Interprétation au niveau sémantique d'objets : classification sémantique d'objets

La classification sémantique d'objets permet d'attribuer une classe réelle à chaque objet de l'image. Des objets réels comme une forêt, une zone urbaine, un sol nu, l'agriculture, un lac, etc. sont des exemples de classe sémantiques. Dans le niveau, bas ces objets sont représentés par des groupes de pixels dont chaque pixel est représenté par une catégorie spectrale. Dans, le niveau sémantique, nous cherchons à attribuer chaque catégorie à sa classe d'objet sémantique. Par exemple, l'ensemble des pixels de catégorie spectrale SVHNIR_SC, SVLNIR_SC, WVLNIR_SC ou SHV_SC appartient à une classe d'objet forêt. La catégorie spectrale BBBHTIRF_SC, BBBLTIRF_SC, SBBHTIRF_SC, SBBLTIRF_SC, ABBHTIRF_SC, ABBLTIRF_SC, DBBHTIRF_SC, DBBLTIRF_SC ou DBBLTIR_SC représente une catégorie appartenant à une classe urbaine. La règle 5.5 (respectivement la règle 5.6) a été définie pour indiquer l'appartenance d'une catégorie à la classe d'objet sémantique forêt (respectivement zone urbaine)

Ainsi, nous avons intégré dans le triple store l'ensemble de règles permettant d'assigner une catégorie spectrale à sa classe d'objet sémantique. Par exemple, la règle (5.5) indique quelle(s) est (sont) la (les) catégorie(s) spectrale(s) qui permet(tent) de définir un objet forêt. Aussi, la règle (5.6) définit l'ensemble des catégories qui peuvent décrire une zone urbaine. Les figures 5.7 et 5.8 montrent le résultat de la classification obtenue dans le niveau d'interprétation sémantique d'objet pour la scène de la figure 5.2a et la scène de la figure 5.2c respectivement.

```

@prefix VPO_indv:<http://ssi.org/visual_primitive_ontology#> .
@prefix VPO:<http://ssi.org/visual_primitive_ontologyDB#>.
@prefix rule: <tag:stardog:api:rule:> .

[] a rule:SV_SC_rule;
rule:content      """

IF {

    ?x rdf:type VPO:V_SR.

    ?x VPO:hasFeature ?HNDVI.
    ?x VPO:hasFeature ?HMIR1.
    ?x VPO:hasFeature ?HMIR2.
    ?x VPO:hasFeature ?HNDBSI.

    FILTER((?HNDVI=VPO:HNDVI)=true && (?HMIR1=VPO:HMIR1 ||
        ?HMIR2=VPO:HMIR2 || ?HNDBSI=VPO:HNDBSI)=false)
    }
THEN {
    ?x a VPO:SV_SC .
}""" .

```

Règle 5.3 – Règle SWRL pour le concept SV_SC

5.3.4 Interprétation au niveau sémantique partiel : extraction des relations spatiales

L'objectif de l'interprétation sémantique à ce niveau est de donner une description du contenu de la scène, c.-à-d., décrire les objets présents dans la scène et leurs relations spatiales. En fonction des l'ontologie de domaine et l'ensemble de règles des relations spatiales que nous avons définis et à travers les connaissances extraites dans le niveau précédent, le raisonneur permet d'extraire toutes les relations spatiales possibles qui peuvent exister entre les objets d'une scène. L'ensemble des règles définies dans cette étape inclut les relations spatiales topologiques et directionnelles. La règle 5.8 est un exemple de règle de relation spatiale topologique écrite avec la syntaxe supportée par Stardog. La règle 5.7 montre un exemple de règle de relation spatiale de direction.

La figure 5.9 illustre un exemple des relations spatiales entre un ensemble d'objets de la scène présentée dans la figure 5.7.

```

@prefix VPO_indv:<http://ssi.org/visual_primitive_ontology#> .
@prefix VPO:<http://ssi.org/visual_primitive_ontologyDB#>.
@prefix rule: <tag:stardog:api:rule:> .

[] a rule:SVHNIR_SC_rule;
rule:content      ""

IF {

  ?x rdf:type VPO:V_SR.

  ?x VPO:hasFeature ?HNDVI.
  ?x VPO:hasFeature ?HNIR.
  ?x VPO:hasFeature ?HMIR1.
  ?x VPO:hasFeature ?HMIR2.
  ?x VPO:hasFeature ?HNDBSI.

  FILTER((?HNDVI=VPO:HNDVI)=true && (?HMIR1=VPO:HMIR1
    || ?HMIR2=VPO:HMIR2 || ?HNDBSI=VPO:HNDBSI)=false
    && (?HNIR=VPO:HNIR)=true)
}
THEN {
  ?x a VPO:SVHNIR_SC .
}"" .

```

Règle 5.4 – Règle SWRL pour le concept SVHNIR_SC

5.3.5 Interprétation au niveau sémantique plein : extraction des relations spatio-temporelles

L'interprétation au niveau sémantique plein a pour but d'extraire l'ensemble des relations spatiales qui peuvent exister entre les objets existants dans des scènes d'images multi-temporelles. Ainsi, nous avons encodé un ensemble de règles pour définir les relations spatiales dans le temps. Par exemple, la règle 5.9 permet de définir la relation spatio-temporelle *inside* entre deux objets de deux scènes. La règle 5.10 présente le code de la relation spatio-temporelle *overlaps*. L'extraction des informations spatio-temporelles facilitera ensuite le mécanisme de raisonnement du changement et par conséquent une meilleure interprétation des changements. La figure 5.10 illustre un extrait des relations spatio-temporelles entre des objets géographiques (ici, des zones urbaines) existants dans les deux scènes présentées dans les figures 5.7 et 5.8. Cette figure montre que la zone urbaine « *Urban_Zone_9_2000* » est intérieure à (*inside*) la zone urbaine « *Urban_Zone_9_2017* » (ou inversement, « *Urban_Zone_9_2017* » *contains* « *Urban_Zone_9_2000* »). D'un autre côté, les zones urbaines « *Urban_Zone_1_2000* » et « *Urban_Zone_10_2000* » se chevauchent (*overlaps*) respectivement avec la zone « *Urban_Zone_9_2017* ».

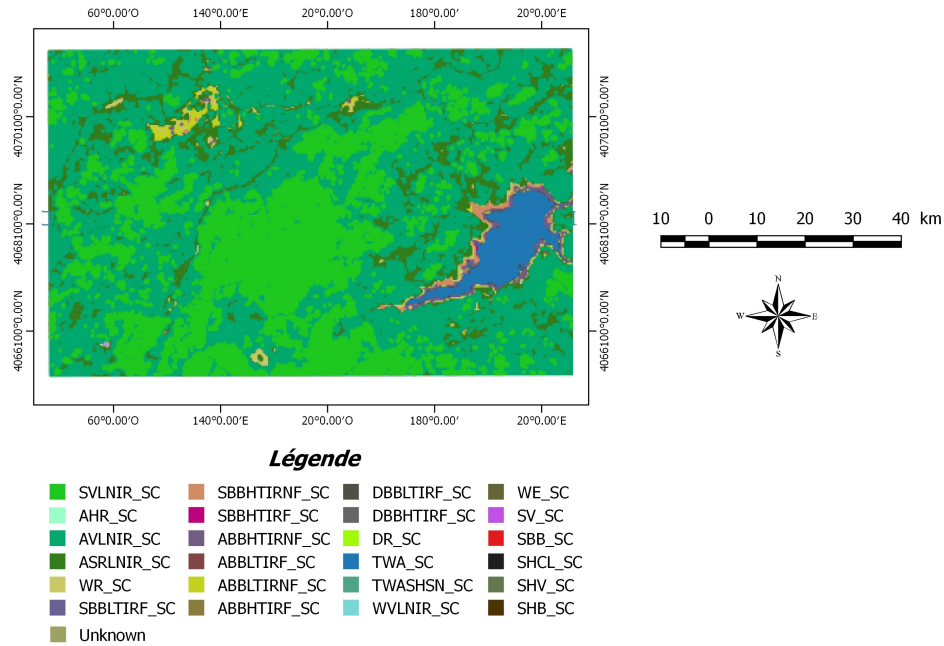


FIGURE 5.5 – Résultat de l'interprétation sémantique au niveau bas pour la scène Landsat ETM+ (figure 5.2a)

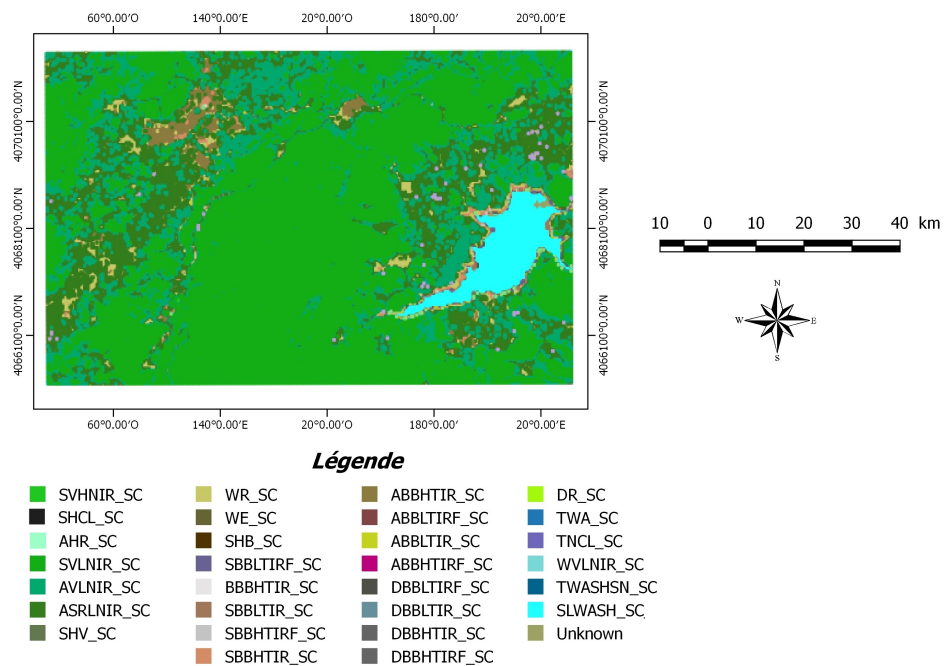


FIGURE 5.6 – Résultat de l'interprétation sémantique au niveau bas pour la scène Landsat 8 (figure 5.2c)

```

@prefix DO:<http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#> .
@prefix VPO:<http://ssi.org/visual_primitive_ontologyDB#>.
@prefix rule: <tag:stardog:api:rule:> .

[] a rule:forest_rule;
rule:content      """

IF {

    ?x a VPO:ObjectImage.

    FILTER((?x=VPO:SVHNIR_SC) || (?x=VPO:SVLNIR_SC) || (?x=VPO:AVLNIR_SC) || (?x=VPO:
:WVLNIR_SC) || (?x=VPO:SHV_SC))
}
THEN {
    ?x a DO:forest .
}""" .
    
```

Règle 5.5 – Règle SWRL pour l’objet forêt

```

@prefix DO:<http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#> .
@prefix VPO:<http://ssi.org/visual_primitive_ontologyDB#>.
@prefix rule: <tag:stardog:api:rule:> .

[] a rule:urban_zone_rule;
rule:content      """

IF {

    ?x a VPO:ObjectImage.

    FILTER((?x=VPO:BBHTIRF_SC) || (?x=VPO:BBLTIRF_SC) || (?x=VPO:SBHTIRF_SC) ||
(?x=VPO:SBBLTIRF_SC) || (?x=VPO:ABBHTIRF) || (?x=VPO:ABBLTIRF_SC) || (?x=VPO:
DBHTIRF_SC)|| (?x=VPO:DBBLTIRF_SC) || (?x=VPO:DBBLTIR_SC))
}
THEN {
    ?x a DO:urban_zone.
}""" .
    
```

Règle 5.6 – Règle SWRL pour l’objet zone urbaine

5.3.6 Interprétation au niveau sémantique plus élevé : interprétation sémantique des changements

L’objectif principal de la méthodologie proposée est l’interprétation sémantique de changements. Ce qui permettra de décrire et de comprendre quel type d’évènements ou de processus géographiques ont été produits. L’extraction de ces occurrences est allouée au raisonneur de changement. Le raisonneur, à travers les connaissances explicites appliquées sur les connaissances implicites (précédemment extraites) stockées dans le triple store, permet l’extraction des processus et/ou des évènements qui peuvent se produire. Ainsi, nous avons formulé l’ensemble des règles prédéfinies pour le raisonnement sur ces occurrences et l’avons intégré dans le triple store comme des connaissances contextuelles de domaine. Les règles 5.11 et 5.12 décrivent respectivement les évènements d’*Expansion (Expansion)* et de *décroissance (Shrinkage)*. Les règles 5.13, 5.14 et 5.15 permettent de définir respectivement les processus géographique d’*urbanisation (Urbanization)*,

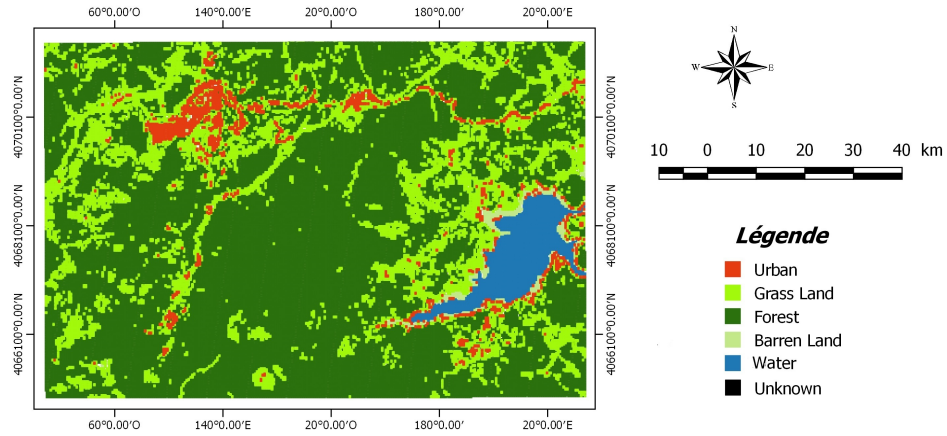


FIGURE 5.7 – Résultat de l’interprétation sémantique d’objet pour la scène Landsat ETM+ (figure 5.2a)

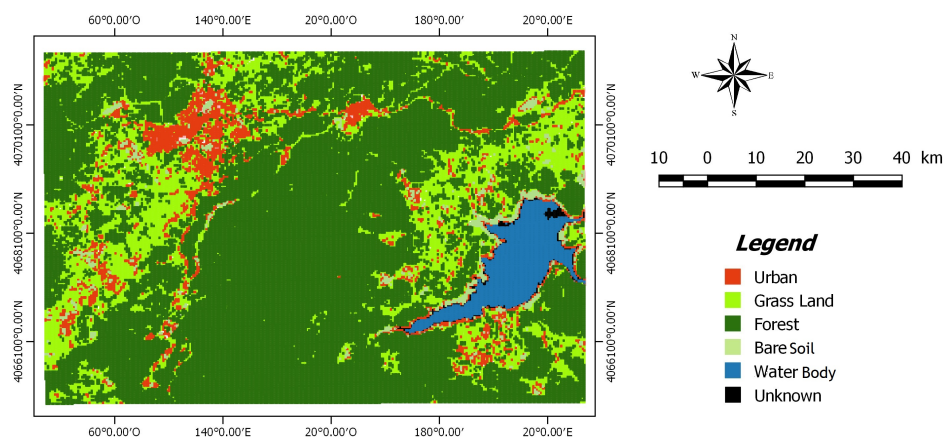


FIGURE 5.8 – Résultat de l’interprétation sémantique d’objet la scène Landsat 8 (figure 5.2c)

```

@prefix DO:<http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#> .
@prefix rule: <tag:stardog:api:rule:> .

[] a rule:inside_relation;
rule:content      """

IF {

  ?O1 a DO:SceneImage.
  ?O2 a DO:SceneImage.

  ?O1 DO:hasMin_XBBox ?Min_XBBox1.
  ?O1 DO:hasMax_XBBox ?Max_XBBox1.
  ?O1 DO:hasMin_YBBox ?Min_YBBox1.
  ?O1 DO:hasMax_YBBox ?Max_YBBox1.

  ?O2 DO:hasMin_XBBox ?Min_XBBox2.
  ?O2 DO:hasMax_XBBox ?Max_XBBox2.
  ?O2 DO:hasMin_YBBox ?Min_YBBox2.
  ?O2 DO:hasMax_YBBox ?Max_YBBox2.

  FILTER((?Min_XBBox1 > ?Min_XBBox2) && (?Max_XBBox1 < ?Max_XBBox2) &&
    (Min_YBBox1 > ?Min_YBBox2) && (?Max_YBBox1 < ?Max_YBBox2))
}
THEN {
  ?O1 DO:inside O2.
}""" .

```

Règle 5.7 – Règle pour la relation topologique *inside*

de *déforestation (Deforestation)* et de *dégradation (Degradation)*.

Nous illustrons, ici, un exemple d'application de l'ensemble de ces règles pour l'identification de l'évènement d'*expansion* et du processus d'*urbanisation*. L'illustration graphique présenté dans figure 5.11, montre que la surface occupée par la zone urbaine « *Urban_Zone_9* » à deux différents instants de temps. Les connaissances spatio-temporelles des objets identiques (c-à-d, *Urban_Zone_9_2000 inside Urban_Zone_9_2017* sont déjà stockés dans le triple store. Par conséquent, un raisonnement automatique respectivement à travers les règles 5.11 et 5.13 permet l'inférence de production de l'évènement d'*expansion* et d'*urbanisation* respectivement. Une interrogation de la base de connaissances par une requête SPARQL a été faite trouver l'ensemble des évènements d'expansions et des processus d'urbanisations. Le résultat de cette requête comme montré dans la figure 5.12 prouve la production d'un évènement d'expansion et d'un processus d'urbanisation sur la zone urbaine illustrée dans la figure 5.11.

L'ensemble des changements qui sont produits peuvent être représenté sous forme de carte de changements tout en superposant les zones, qui en subit des changements, extraites à partir de la base des connaissances. Une telle carte est montrée dans la figure 5.13.

```

@prefix DO:<http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#> .
@prefix rule: <tag:stardog:api:rule:> .

[] a rule:restricted_north_relation;
rule:content      """

IF {

    ?O1 a DO:SceneImage.
    ?O2 a DO:SceneImage.

    ?O1 DO:hasMin_XBBox ?Min_XBBox1.
    ?O1 DO:hasMax_XBBox ?Max_XBBox1.
    ?O1 DO:hasMin_YBBox ?Min_YBBox1.
    ?O1 DO:hasMax_YBBox ?Max_YBBox1.

    ?O2 DO:hasMin_XBBox ?Min_XBBox2.
    ?O2 DO:hasMax_XBBox ?Max_XBBox2.
    ?O2 DO:hasMin_YBBox ?Min_YBBox2.
    ?O2 DO:hasMax_YBBox ?Max_YBBox2.

    FILTER((?Min_XBBox1 = ?Min_XBBox2) && (?Max_YBBox1 = ?Max_YBBox2) &&
            (Min_YBBox1 < ?Min_YBBox2) && (?Max_YBBox1 < ?Max_YBBox2))
}
THEN {
    ?O1 DO:restricted_north ?O2.
}""" .
    
```

Règle 5.8 – Règle pour la relation de direction *restricted_north*

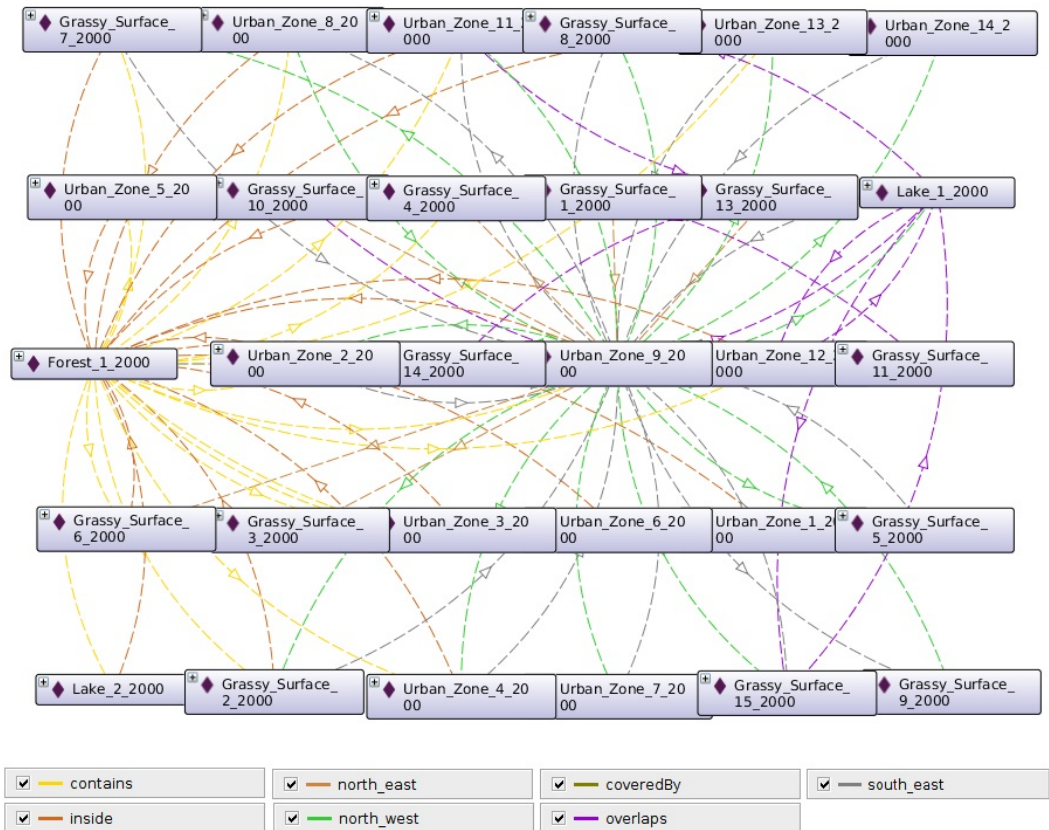


FIGURE 5.9 – Extrait de relations spatiales entre différents objets (5.7)


```

@prefix DO:<http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#> .
@prefix rule: <tag:stardog:api:rule:> .

[] a rule:inside_spatio_temporal_relation;
rule:content      """

IF {

    ?O1 a DO:SceneImage.
    ?O2 a DO:SceneImage.

    ?O1 DO:hasMin_XBBox ?Min_XBBox1.
    ?O1 DO:hasMax_XBBox ?Max_XBBox1.
    ?O1 DO:hasMin_YBBox ?Min_YBBox1.
    ?O1 DO:hasMax_YBBox ?Max_YBBox1.
    ?O1 DO:hasMax_YBBox ?Max_YBBox1.
    ?O1 DO:hasIdentity ?id1.
    ?O1 DO:hasTime ?t1.

    ?O2 DO:hasMin_XBBox ?Min_XBBox2.
    ?O2 DO:hasMax_XBBox ?Max_XBBox2.
    ?O2 DO:hasMin_YBBox ?Min_YBBox2.
    ?O2 DO:hasMax_YBBox ?Max_YBBox2.
    ?O2 DO:hasIdentity ?id2.
    ?O2 DO:hasTime ?t2.

    FILTER((?Min_XBBox1 > ?Min_XBBox2) && (?Max_XBBox1 < ?Max_XBBox2) &&
            (Min_YBBox1 > ?Min_YBBox2) && (?Max_YBBox1 < ?Max_YBBox2) &&
            (?t1 < ?t2) && (?id1 = ?id2))
}
THEN {
    ?O1 DO:inside O2.
}""" .

```

Règle 5.9 – Règle pour la relation spatio-temporelle *inside*

```

@prefix DO:<http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#> .
@prefix rule: <tag:stardog:api:rule:> .

[] a rule:overlaps_spatio_temporal_relation;
rule:content      """

IF {

    ?O1 a DO:SceneImage.
    ?O2 a DO:SceneImage.

    ?O1 DO:hasMin_XBBox ?Min_XBBox1.
    ?O1 DO:hasMax_XBBox ?Max_XBBox1.
    ?O1 DO:hasMin_YBBox ?Min_YBBox1.
    ?O1 DO:hasMax_YBBox ?Max_YBBox1.
    ?O1 DO:hasIdentity ?id1.
    ?O1 DO:hasTime ?t1.

    ?O2 DO:hasMin_XBBox ?Min_XBBox2.
    ?O2 DO:hasMax_XBBox ?Max_XBBox2.
    ?O2 DO:hasMin_YBBox ?Min_YBBox2.
    ?O2 DO:hasMax_YBBox ?Max_YBBox2.
    ?O2 DO:hasIdentity ?id2.
    ?O2 DO:hasTime ?t2.

    FILTER((?Min_XBBox1 > ?Min_XBBox2) && (?Max_XBBox1 < ?Max_XBBox2) &&
           (Min_YBBox1 > ?Min_YBBox2) && (?Max_YBBox1 < ?Max_YBBox2) &&
           (?t1 < ?t2) && (?id1 = ?id2))
}
THEN {
    ?O1 DO:overlaps ?O2.
}""" .
    
```

Règle 5.10 – Règle pour la relation *se chevauche*

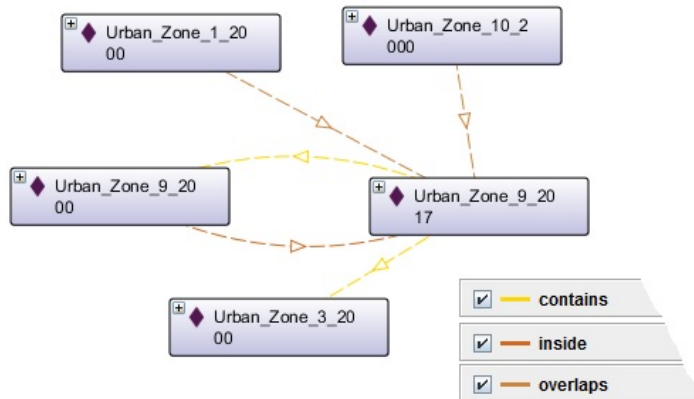


FIGURE 5.10 – Extrait de relations spatio-temporelles entre différentes zones urbaines

```
@prefix DO:<http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#> .
@prefix rule: <tag:stardog:api:rule:> .

[] a rule:Expansion;
rule:content      """

IF {

    ?O1 a DO:SceneImage.
    ?O2 a DO:SceneImage.

    ?O1 DO:hasIdentity ?id1.
    ?O1 DO:hasTime ?t1.

    ?O2 DO:hasIdentity ?id2.
    ?O2 DO:hasTime ?t2.

    ?O1 DO:inside ?O2.

    FILTER(?id1 = ?id2)
}
THEN {
    ?O1 a DO:Expansion.
}""" .
```

Règle 5.11 – Règle décrivant l'évènement d'*Expansion*

```
@prefix DO:<http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#> .
@prefix rule: <tag:stardog:api:rule:> .

[] a rule:Shrinkage;
rule:content      """

IF {

    ?O1 a DO:SceneImage.
    ?O2 a DO:SceneImage.

    ?O1 DO:hasIdentity ?id1.
    ?O1 DO:hasTime ?t1.

    ?O2 DO:hasIdentity ?id2.
    ?O2 DO:hasTime ?t2.

    ?O1 DO:inside ?O2.

    FILTER(?id1 = ?id2)
}
THEN {
    ?O1 a DO:Expansion.
}""" .
```

Règle 5.12 – Règle décrivant l'évènement de *décroissance*

```
@prefix DO:<http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#> .
@prefix rule: <tag:stardog:api:rule:> .

[] a rule:Urbanization;
rule:content      ""

IF {

    ?O1 a DO:SceneImage.
    ?O1 DO:hasIdentity ?id1.

    ?O1 a DO:Expansion.

        FILTER(?id1 = "Urban_Zone")
    }
THEN {
    ?O1 a DO:Urbanization.
}"" .
```

Règle 5.13 – Règle décrivant le processus d'*urbanisation*

```
@prefix DO:<http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#> .
@prefix rule: <tag:stardog:api:rule:> .

[] a rule:Deforestation;
rule:content      ""

IF {

    ?O1 a DO:SceneImage.
    ?O1 DO:hasIdentity ?id1.

    ?O1 a DO:Shrinkage.

        FILTER(?id1 = "Forest")
    }
THEN {
    ?O1 a DO:Deforestation.
}"" .
```

Règle 5.14 – Règle décrivant le processus de *déforestation*

```

@prefix DO:<http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#> .
@prefix rule: <tag:stardog:api:rule:> .

[] a rule:Degradation;
rule:content      ""

IF {

  ?O1 a DO:SceneImage.
  ?O1 DO:hasIdentity ?id1.

  ?O1 a DO:Shrinkage.

  FILTER(?id1 = "Forest")
}
THEN {
  ?O1 a DO:Degradation.
}"" .
    
```

Règle 5.15 – Règle décrivant le processus de *dégradation*

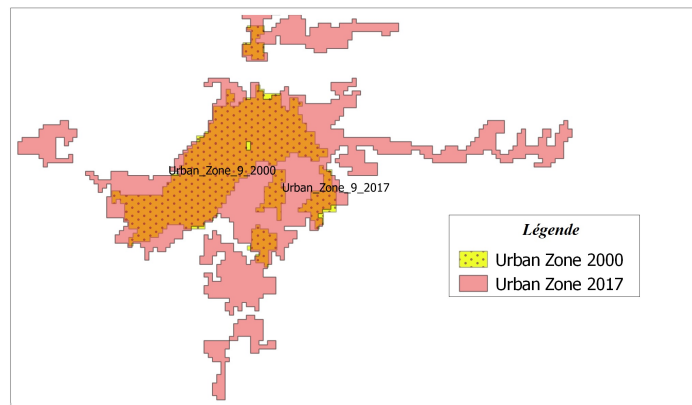


FIGURE 5.11 – Exemple d’extension d’une zone urbaine

SPARQL query:

```

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 DO: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#>
PREFIX po: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/ProcessOntology#>
SELECT distinct ?event ?process (?subject AS ?occur_on)
WHERE {
  ?subject a ?process .
  ?subject a ?event .
  ?subject a DO:SceneImage .
  FILTER(?process = po:Urbanization && ?event = po:Expansion)
}
    
```

event	process	occur_on
Expansion	Urbanization	Urban_Zone_3_2000
Expansion	Urbanization	Urban_Zone_2_2000
Expansion	Urbanization	Urban_Zone_13_2000
Expansion	Urbanization	Urban_Zone_9_2000

FIGURE 5.12 – Requête SPARQL pour l’extraction d’évènement d’expansion et de processus d’urbanisation

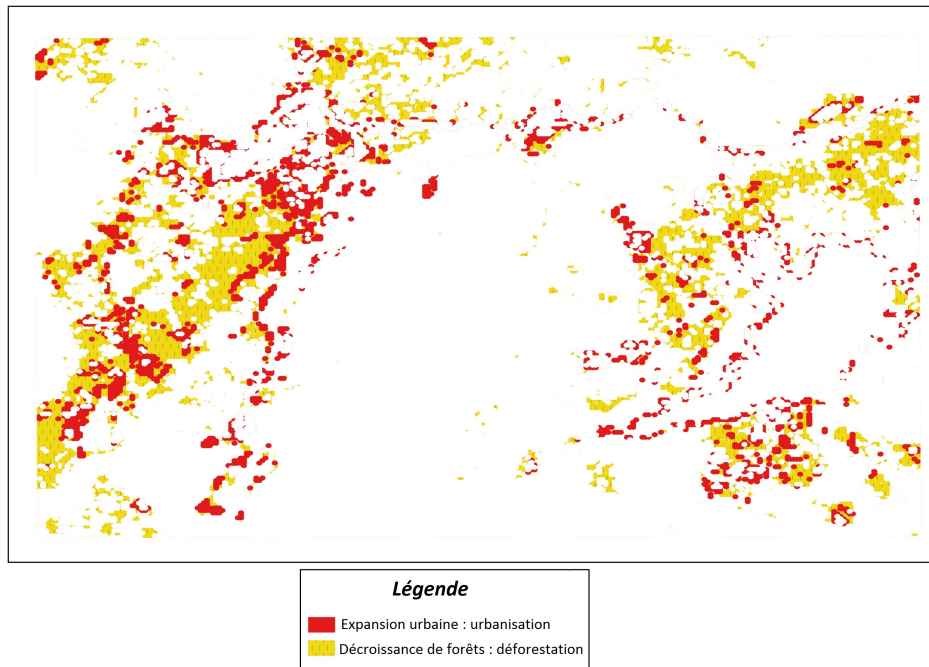


FIGURE 5.13 – Carte de changements générée

5.4 Évaluation des résultats

Afin de bien évaluer les résultats expérimentaux de la méthodologie d'interprétation présentée, une définition des métriques d'évaluation est nécessaire.

Dans le domaine d'imagerie satellitaire, les métriques comme de **précision** (en anglais, *precision*), **rappel** (en anglais, *recall*) et **f-mesure** (en anglais, *f_measure*) sont souvent les plus utilisés pour évaluer la performance des approches (de classifications). L'objectif principal de ces mesures est l'automatisation de processus de comparaison des méthodes de classification ainsi que l'évaluation de la qualité des résultats obtenus.

- La **précision** d'une classe \mathcal{C} est défini comme étant la proportion d'éléments bien classés (pertinentes) t_p par rapport au nombre d'éléments attribués à la classe \mathcal{C} ($t_p + f_p$) par le processus de décision de la classification. La fonction **précision** est définie par la formule (5.1) suivante.

$$\mathbf{precision} = \frac{t_p}{t_p + f_p} \quad (5.1)$$

- Le **rappel** exprime la proportion d'éléments bien classés t_p par rapport au nombre d'éléments ($t_p + f_n$) appartenant à la classe \mathcal{C} dans les données de référence (échantillons de validation). Il spécifie ainsi la part des vraies correspondances trouvées. La fonction **rappel** est donnée par la formule (5.2).

$$\mathbf{rappel} = \frac{t_p}{t_p + f_n} \quad (5.2)$$

- La métrique **F-mesure** est justement une moyenne harmonique qui combine la **précision** et le **rappel**. Elle se définit par la formule (5.3).

$$\mathbf{F-mesure} = \frac{2 \times \mathbf{precision} \times \mathbf{recall}}{\mathbf{precision} + \mathbf{recall}} \quad (5.3)$$

Avec, t_p signifie les **vrais positifs** (c'est-à-dire le nombre d'éléments correctement étiquetés comme appartenant à la classe positive), f_p pour les **faux positifs** (c'est-à-dire le nombre d'éléments incorrectement étiquetés comme appartenant à la classe) et f_n pour les **faux négatifs** (c.-à-d. les éléments qui n'ont pas été étiquetés comme appartenant à la classe positive, mais auraient dû l'être).

La valeur élevée de la **précision** signifie que la classification est pertinente pour le processus d'interprétation et que le **rappel** élevé indique que le système est capable de bien interpréter et classifier l'image en question. Le tableau 5.2 illustre la différence entre les métriques de **rappel** et de **précision**.

	Rappel faible	Rappel élevé
Précision faible		
Précision élevée		

□ Echantillons de validation
 □ Classification
 Bien classés
 Mal classés

TABLEAU 5.2 – Illustration des métriques de rappel (proportion de l’aire des bien-classés par rapport à l’aire des échantillons de validation) et de précision (proportion de l’aire des bien-classés par rapport à l’aire de la classification) [Masse, 2013]

En plus de ces métriques quantitatives, une analyse visuelle est aussi utilisée pour une interprétation qualitative des résultats obtenus à chaque niveau d’interprétation sémantique. Nous présentons dans la suite une évaluation qualitative et quantitative des résultats obtenus pour chaque niveau en utilisant les différentes métriques citées.

5.4.1 Évaluation des résultats du niveau bas

5.4.1.1 Évaluation qualitative

En raison de la simplicité du traitement, notre évaluation visuelle a été réalisée sur un petit sous-ensemble sélectionné aléatoirement des figures 5.2a et 5.5 (5.2c et 5.6) respectivement. Les zones sélectionnées sont montrées respectivement dans les figures 5.14a, 5.14b, 5.14c et 5.14d, qui sont de tailles 30 × 20 pixels et 70 × 40 respectivement. Dans les deux figures 5.14a et 5.14c, les pixels de végétation apparaissent dans différentes nuances de vert. Par contre, les pixels de non-végétation apparaissent avec d’autres couleurs. Dans les figures 5.14b et 5.14d, la plupart des pixels de végétation sont classés par les catégories spectrales *SV_SC* (vert clair), *AV_SC* (vert foncé) et *SHV_LSC* (vert très foncé). Les pixels de non-végétation apparaissent avec les couleurs marron clair (correspondant à la classe *SBB_SC*) et marron foncé (correspondant à la classe *ABB_SC*). Une superposition des cartes de classification sur les zones d’origines sélectionnées montre bien que les résultats obtenus sont performants et bien conformes aux attentes.

5.4.1.2 Évaluation quantitative

Le résultat obtenu dans la niveau bas est une carte binaire « végétation/non-végétation » par agrégation des types spectraux comme montrer dans le tableau 5.3. Les résultats de classification obtenus sont similaires à ceux obtenus dans les travaux de [Baraldi et al., 2006] et [Andrés et al., 2017] et cela est expliqué par le fait que nous utilisons les mêmes règles spectrales pour la classification. Les taux de précisions pour cette classification variaient de 98% à 81%, selon le type spectral à être discriminé comme a été discuté par les deux auteurs. Dans le but prouver les taux de précisions obtenus et d’évaluer nous résultats pour la classification binaire « végétation/non-végétation », nous avons utilisé l’ensemble, décrit précédemment, sélectionné aléatoirement comme

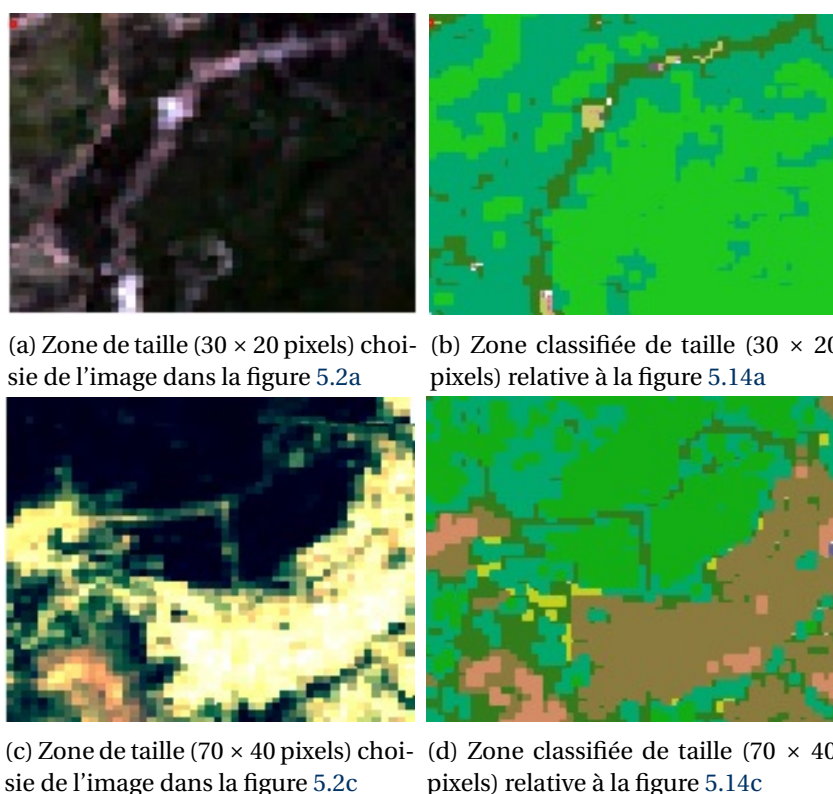


FIGURE 5.14 – Petit sous ensemble utilisé pour l'analyse visuelle

données de référence et comprenant 600 pixels pour l'image dans la figure 5.14a et 2800 pixels pour l'image de la figure 5.14c. Cet ensemble a été étiqueté à travers une analyse visuelle des images couleurs (couleurs naturelles) présentées aux figures 5.2a et 5.2c. Cette analyse visuelle attribue respectivement 543 pixels de végétations et 57 pixels non-végétation à l'image 5.14a et 977 pixels de végétations et 723 pixels non-végétation à l'image 5.14c. Les valeurs des critères d'évaluation utilisés pour la classification binaire « végétation/non-végétation » pour image sont présentés dans le tableau 5.3.

Type spectral	Image 2000 (figure 5.14a)			Image 2017 (figure 5.14c)		
	précision	rappel	f-mesure	précision	rappel	f-mesure
Végétation	0.952	0.994	0.972	0.965	0.995	0.980
Non-végétation	0.944	0.994	0.968	0.990	1.000	0.995

TABLEAU 5.3 – Valeurs des critères d'évaluation pour la classification spectrale

5.4.2 Évaluation des résultats du niveau sémantique d'objets

5.4.2.1 Évaluation qualitative

Le niveau sémantique d'objets permet d'attribuer aux types spectraux classifiés dans le niveau bas des classes sémantiques (réelles). Cela permettra par la suite d'identifier des classes sé-

mantiques appartenant à la catégorie spectrale de végétation à savoir la forêt, l’agriculture, sols d’herbes et des classes de la catégorie spectrale de non-végétation comme les zones urbaines, sols nus, terre stérile. Par exemple, les pixels d’image des types de végétation spectrale à savoir *SV_SC*, *AV_SC* et *SHV_SC* sont fortement des pixels d’une classe sémantique de type forêt ou agriculture. En conséquence, la performance des classifications sémantiques d’objets dépend fortement de la performance des résultats de la classification au niveau bas.

Nous avons aussi évalué qualitativement les résultats d’interprétation sémantique d’objets à travers une analyse visuelle faite sur les images d’origines. En effet, nous avons tout d’abord exécuté des requêtes *SPARQL* pour extraire, à partir du triple store, les classes d’objets sémantiques, c.-à-d., les types spectraux définissant chaque classe. Par la suite, à chaque fois qu’un résultat est récupéré, il sera superposé sur l’image d’origine pour voir si les connaissances extraites correspondent bien ou non aux objets réels présents dans chaque image. Dans le tableau 5.4, nous présentons les résultats des requêtes *SPARQL* pour l’extraction des pixels associés à chaque classe sémantique d’objet. D’après ce tableau, la majorité des classes sémantiques extraites sont bien identiques aux objets réels présents dans les différentes scènes d’images.






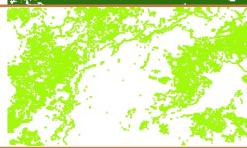


	Scène 2000	Scène 2017
Pixels urbains		
Pixels forêt		
Pixels herbe		
Pixels eau		

TABLEAU 5.4 – Illustration de résultats d’extraction des objets sémantiques par des requêtes *SPARQL* pour les deux scènes 2000 (5.2a) et 2017 (5.2c)

5.4.2.2 Évaluation quantitative

Nous avons aussi utilisé les critères *précision*, *rappel* et *f-mesure* pour évaluer l’étape d’extraction d’objets sémantique. La valeur de chaque métrique pour chacune des classes sémantiques est présentée dans le tableau 5.5. Le tableau montre bien que les valeurs de précision et de rappel des classes sémantiques végétales à savoir la forêt et les zones d’herbe sont importantes par rapport aux valeurs des classes sémantiques non-végétatives comme les zones urbaines et les sols nus (à l’exception des zones d’eau). Les taux moins importants des zones urbaines et des sols nus

sont expliqués par le fait que certaines zones urbaines sont étiquetées en tant que sols nus et vice-versa. Cela revient au fait que les définitions de ces concepts (urbain et sol nu) sont exprimées en fonction de certaines catégories spectrales communes, en particulier les catégories *BBB_SC* et *SBB_SC* extraites dans le niveau bas.

Classe sémantique	Image 2000 (figure 5.2a)			Image 2017 (figure 5.2c)		
	précision	rappel	f-mesure	précision	rappel	f-mesure
Forêt	0.834	1.000	0.910	0.924	1.000	0.961
zone herbeuse	0.895	0.919	0.907	0.731	1.000	0.845
Zone urbaine	0.785	1.000	0.880	0.765	1.000	0.867
Sol nu	0.834	0.909	0.870	0.800	1.000	0.888
Zone d'eau	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

TABLEAU 5.5 – Valeurs des critères d'évaluation pour la classification sémantique d'objets

5.4.3 Évaluation des résultats au deux niveaux sémantique partielle et pleine

Les classes d'objets sémantiques extraites pour chaque scène d'image dans le niveau d'interprétation sémantique d'objets sont utilisées pour extraire les relations spatiales (topologiques et de directions) dans le niveau sémantique partiel. Ainsi, nous utilisons les cartes (figures 5.7 et 5.8) représentant les classes d'objets comme données de références pour l'évaluation des deux niveaux sémantique partielle et sémantique pleine.

5.4.3.1 Évaluation qualitative

L'évaluation qualitative est effectuée à travers une analyse visuelle du graphe des relations spatiales extraites représenté dans la figure 5.9 et de la carte étiquetée par l'ensemble des objets sémantique comme illustrée dans la figure 5.15. Un tel étiquetage a été réalisé en fonction du centroïde de chaque objet. Cette analyse visuelle montre bien que l'ensemble des relations spatiales présentes dans le graphe correspondent bien au contenu de l'image (c.-à-d., les objets et leurs relations spatiales).

De la même manière, l'analyse visuelle sur le graphe de la figure 5.10 et les objets classés dans les deux cartes (comme l'extrait illustré dans la figure 5.16) montre bien la performance de l'approche pour l'extraction des relations spatio-temporelles.

5.4.3.2 Évaluation quantitative

L'évaluation de la méthodologie proposée pour l'extraction des relations spatiales entre les objets a été réalisée à travers l'évaluation des résultats d'un ensemble de requêtes SPARQL utilisées

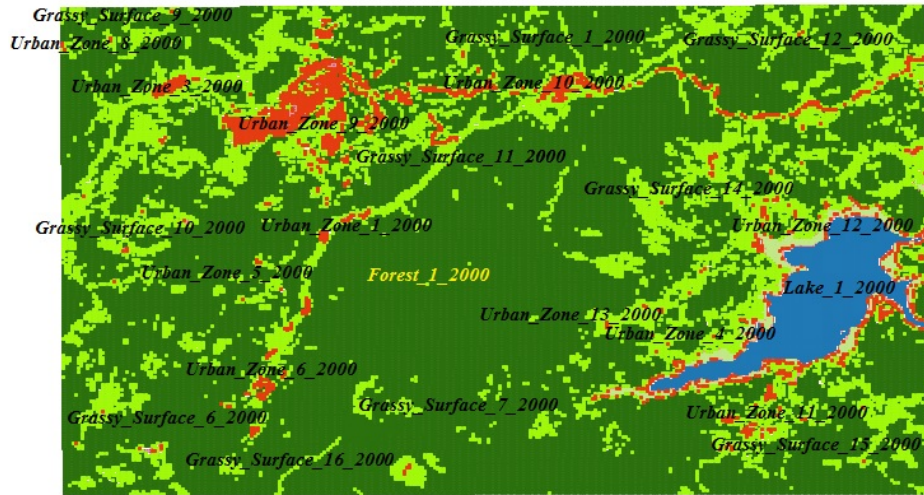


FIGURE 5.15 – Étiquetage des objets de la scène 2000

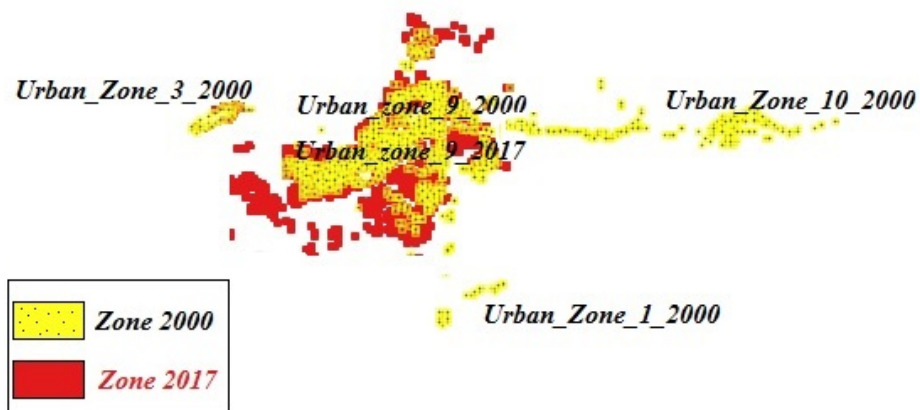


FIGURE 5.16 – Évaluation des résultats d'extraction des relations spatio-temporelles par une analyse visuelle (superposition des objets de deux images différentes)

pour retrouver les différentes relations spatiales. Les requêtes suivantes sont utilisées pour l'évaluation de la méthodologie et les métriques de précision et de rappel associées à chaque requête sont présentées dans le tableau 5.6.

- **Requête 1** : Cette requête permet de retrouver tous les objets contenant « *contains* » d'autres objets. La figure 5.17 présente le code SPARQL et le résultat de cette requête.

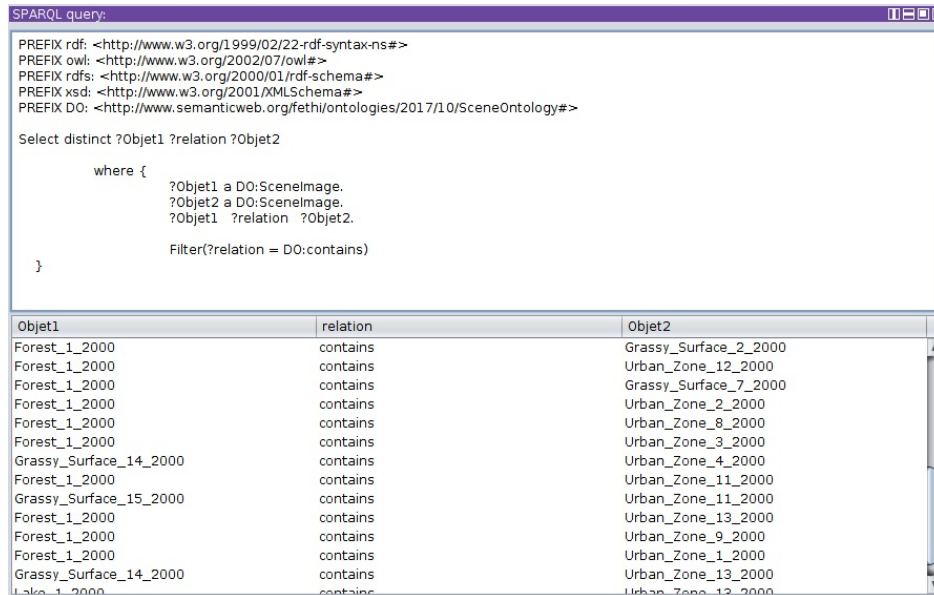


FIGURE 5.17 – Illustration du code et du résultat de la *Requête1*

- **Requête 2** : Cette requête permet de retrouver tous les objets qui se chevauchent « *overlaps* ».
- Le code SPARQL et le résultat de cette requête est illustré dans la figure 5.18.
- **Requête 3** : Cette requête permet de retrouver tous les objets qui sont couverts par « *coveredBy* » d'autres. Le code SPARQL et le résultat de cette requête est illustré dans la figure 5.19.
- **Requête 4** : Cette requête permet de retrouver tous les objets situés dans « *inside* ». La figure 5.20 montre le code SPARQL et le résultat de cette requête.
- **Requête 5** : Cette requête permet de retrouver tous les objets situés au « *nord-est* » d'autres objets. Le code SPARQL et le résultat associé à cette requête est illustré dans la figure 5.21.

Requête SPARQL	précision	rappel	f-mesure
Requête 1	0.806	1.000	0.893
Requête 2	0.667	1.000	0.801
Requête 3	0.693	0.819	0.750
Requête 4	0.800	0.923	0.858
Requête 5	0.929	1.000	0.994

TABEAU 5.6 – Valeurs des critères d'évaluation pour la classification sémantique d'objets

SPARQL query:

```

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 DO: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#>

Select distinct ?Objet1 ?relation ?Objet2

    where {
        ?Objet1 a DO:ScenelImage.
        ?Objet2 a DO:ScenelImage.
        ?Objet1 ?relation ?Objet2.

        Filter(?relation = DO:overlaps)
    }
    
```

Objet1	relation	Objet2
Urban_Zone_7_2000	overlaps	Grassy_Surface_8_2000
Grassy_Surface_11_2000	overlaps	Urban_Zone_10_2000
Urban_Zone_10_2000	overlaps	Grassy_Surface_12_2000
Grassy_Surface_1_2000	overlaps	Grassy_Surface_11_2000
Urban_Zone_11_2000	overlaps	Grassy_Surface_14_2000
Urban_Zone_10_2000	overlaps	Urban_Zone_14_2000
Grassy_Surface_12_2000	overlaps	Urban_Zone_10_2000
Grassy_Surface_12_2000	overlaps	Grassy_Surface_14_2000
Grassy_Surface_11_2000	overlaps	Urban_Zone_1_2000
Grassy_Surface_8_2000	overlaps	Lake_2_2000
Grassy_Surface_14_2000	overlaps	Grassy_Surface_15_2000
Grassy_Surface_8_2000	overlaps	Urban_Zone_7_2000
Lake_1_2000	overlaps	Grassy Surface 15 2000

FIGURE 5.18 – Illustration du code et du résultat de la *Requête2*

SPARQL query:

```

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 DO: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#>

Select distinct ?Objet1 ?relation ?Objet2

    where {
        ?Objet1 a DO:ScenelImage.
        ?Objet2 a DO:ScenelImage.
        ?Objet2 ?relation ?Objet1.

        Filter(?relation = DO:coveredBy)
    }
    
```

Objet1	relation	Objet2
Grassy_Surface_9_2000	coveredBy	Forest_1_2000
Grassy_Surface_8_2000	coveredBy	Forest_1_2000
Grassy_Surface_3_2000	coveredBy	Forest_1_2000
Grassy_Surface_16_2000	coveredBy	Forest_1_2000
Grassy_Surface_12_2000	coveredBy	Forest_1_2000
Grassy_Surface_1_2000	coveredBy	Forest_1_2000
Grassy_Surface_5_2000	coveredBy	Forest_1_2000
Urban_Zone_7_2000	coveredBy	Forest_1_2000
Grassy_Surface_11_2000	coveredBy	Forest_1_2000

FIGURE 5.19 – Illustration du code et du résultat de la *Requête 3*

SPARQL query:

```

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 DO: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#>

Select distinct ?Objet1 ?relation ?Objet2

  where {
    ?Objet1 a DO:ScenelImage.
    ?Objet2 a DO:ScenelImage.
    ?Objet1 ?relation ?Objet2.

    Filter(?relation = DO:inside)
  }
    
```

Objet1	relation	Objet2
Urban_Zone_6_2000	inside	Forest_1_2000
Urban_Zone_1_2000	inside	Forest_1_2000
Urban_Zone_11_2000	inside	Grassy_Surface_15_2000
Urban_Zone_5_2000	inside	Grassy_Surface_16_2000
Grassy_Surface_7_2000	inside	Forest_1_2000
Grassy_Surface_2_2000	inside	Forest_1_2000
Urban_Zone_6_2000	inside	Grassy_Surface_16_2000
Urban_Zone_8_2000	inside	Forest_1_2000
Urban_Zone_5_2000	inside	Forest_1_2000
Urban_Zone_12_2000	inside	Forest_1_2000
Urban_Zone_2_2000	inside	Grassy_Surface_14_2000
Urban_Zone_2_2000	inside	Lake_1_2000
Urban_Zone_4_2000	inside	Grassy_Surface_14_2000

FIGURE 5.20 – Illustration du code et du résultat de la Requête 4

SPARQL query:

```

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 DO: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#>

Select distinct ?Objet1 ?relation ?Objet2

  where {
    ?Objet1 a DO:ScenelImage.
    ?Objet2 a DO:ScenelImage.
    ?Objet1 ?relation ?Objet2.

    Filter(?relation = DO:north_east)
  }
    
```

Objet1	relation	Objet2
Urban_Zone_12_2000	north_east	Urban_Zone_1_2000
Grassy_Surface_14_2000	north_east	Grassy_Surface_16_2000
Urban_Zone_10_2000	north_east	Grassy_Surface_16_2000
Lake_1_2000	north_east	Grassy_Surface_16_2000
Urban_Zone_11_2000	north_east	Grassy_Surface_5_2000
Grassy_Surface_13_2000	north_east	Urban_Zone_13_2000
Grassy_Surface_14_2000	north_east	Grassy_Surface_4_2000
Grassy_Surface_7_2000	north_east	Urban_Zone_7_2000
Urban_Zone_5_2000	north_east	Grassy_Surface_6_2000
Grassy_Surface_1_2000	north_east	Urban_Zone_7_2000
Grassy_Surface_13_2000	north_east	Grassy_Surface_3_2000
Grassy_Surface_13_2000	north_east	Urban_Zone_4_2000
Grassy_Surface_7_2000	north_east	Lake_2_2000

FIGURE 5.21 – Illustration du code et du résultat de la Requête 5

Comme illustré dans le tableau 5.6, les valeurs de précision et de rappel pour les relations spatiales topologiques comme *overlaps*, *contains* et *coveredBy* sont relativement faibles par rapport aux valeurs associées aux relations spatiales de directions comme la relation *north_east*. Cela revient à la méthode utilisée pour la détection des relations spatiales entre les objets géographiques de la scène. En effet, la méthode de *Rectangle à limite minimum* que nous avons utilisé dans la phase d'extraction des relations spatiales est basée sur les limites des rectangles de deux objets mis en question pour dériver l'ensemble de relations entre eux. Cependant, cette méthode peut renvoyer des résultats erronés pour les relations spatiales mentionnées (*overlaps*, *contains* et *coveredBy*). Par exemple, le rectangle minimal de délimitation d'une rivière très allongée ou d'une rue trompe toutes les relations spatiales dérivées. Par conséquent, les relations spatiales topologiques peuvent être mieux représentées avec l'approche du modèle vectoriel réel. Ceci est l'une d'orientations futures de notre travail.

Nous présentons dans la figure 5.22 des exemples de cas où la méthode utilisée retourne de fausses relations spatiales.

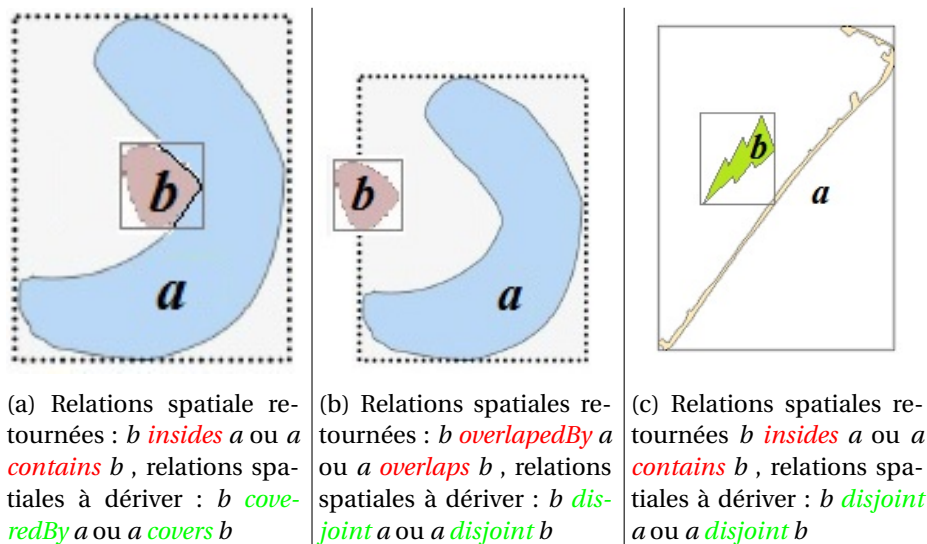


FIGURE 5.22 – Exemples de cas où le résultat de la méthode de dérivation des relations spatiales est erroné

5.4.4 Évaluation des résultats au niveau changement

L'objectif que nous souhaitons atteindre à travers la méthodologie proposée est l'interprétation des changements qui peuvent se produire dans les images de télédétection. Ainsi, l'évaluation des résultats obtenus dans le niveau de changements est nécessaire pour vérifier la performance et la capacité de notre méthodologie pour l'interprétation des changements. En conséquence, notre évaluation dans le niveau d'interprétation de changements consiste en une analyse visuelle des résultats obtenus. Cette analyse a été réalisée à travers une comparaison visuelle des résultats obtenus dans le niveau plus haut de l'architecture présentée, qui sont récupérés par des requêtes SPARQL, avec le contenu des deux cartes de classification d'objets obtenues dans le niveau sémantique d'objets (voir figures, 5.7 et 5.8). L'ensemble des requêtes SPARQL ainsi que leurs résultats sont illustrés dans la figure 5.23. En analysant le résultat de chaque requête, nous pouvons conclure que les résultats obtenus sont beaucoup proches des objectifs attendus. Par exemple, le

résultat de la requête (présentée dans la figure 5.23a) montre qu'un évènement d'*expansion* (respectivement un processus d'*urbanisation*) est produit sur la zone urbaine *Urban_Zone_9_2000*. Une analyse visuelle de la partie de la carte illustrée dans la figure 5.11 montre bien que cette zone a subi une expansion (par analogie a sa zone correspondante *Urban_Zone_9_2017*). D'autre part, le processus d'*urbanisation* a été défini comme un évènement d'*expansion* d'une objet *urbain*. En conséquence, cela valide le résultat renvoyé par la requête SPARQL (figure 5.23d).

```
SPARQL query:
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 DO: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#>
PREFIX PO: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/5/ProcessOntology#>
SELECT distinct ?event ?object
WHERE {
    ?subject a ?process.
    ?object a ?event.
    ?object a DO:Scenelmage.
    FILTER( ( ?event = PO:Expansion ) )
}
```

event	object
Expansion	Urban_Zone_11_2000
Expansion	Urban_Zone_9_2000
Expansion	Grassy_Surface_4_2000
Expansion	Grassy_Surface_6_2000
Expansion	Urban_Zone_13_2000
Expansion	Urban_Zone_2_2000
Expansion	Urban_Zone_9_2000

(a) Extraction d'évènement d'*expansion*

```
SPARQL query:
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 DO: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#>
PREFIX PO: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/5/ProcessOntology#>
SELECT distinct ?event ?object
WHERE {
    ?subject a ?process.
    ?object a ?event.
    ?object a DO:Scenelmage.
    FILTER( ( ?event = PO:Shrinkage ) )
}
```

event	object
Shrinkage	Urban_Zone_14_2000
Shrinkage	Forest_1_2000
Shrinkage	Grassy_Surface_11_2000
Shrinkage	Urban_Zone_6_2000
Shrinkage	Grassy_Surface_14_2000
Shrinkage	Grassy_Surface_16_2000
Shrinkage	Grassy_Surface_7_2000
Shrinkage	Urban_Zone_11_2000
Shrinkage	Urban_Zone_10_2000

(b) Extraction d'évènement de *rétrécissement* (*décroissance*)

```
SPARQL query:
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 DO: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#>
PREFIX PO: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/5/ProcessOntology#>
SELECT distinct ?event ?object
WHERE {
    ?subject a ?process.
    ?object a ?event.
    ?object a DO:Scenelmage.
    FILTER( ( ?event = PO:Appearance ) )
}
```

event	object
Appearance	Urban_Zone_11_2017
Appearance	Urban_Zone_n5_2017
Appearance	Urban_Zone_14_2017
Appearance	Urban_Zone_n2_2017
Appearance	Urban_Zone_n1_2017
Appearance	Grassy_Surface_9_2017
Appearance	Grassy_Surface__2017
Appearance	Urban_Zone_13_2017
Appearance	Urban_Zone_12_2017
Appearance	Grassy_Surface_2_2017
Appearance	Grassy_Surface_14_2017

(c) Extraction d'évènement d'*apparition*

```
SPARQL query:
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 DO: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#>
PREFIX PO: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/5/ProcessOntology#>
SELECT distinct ?process (?object As ?occurs_on)
WHERE {
    ?object a ?process.
    ?object a DO:Scenelmage.
    FILTER( ( ?process = PO:Urbanization ) )
}
```

process	occurs_on
Urbanization	Urban_Zone_2_2000
Urbanization	Urban_Zone_9_2000
Urbanization	Urban_Zone_13_2000
Urbanization	Urban_Zone_3_2000
Urbanization	Urban_Zone_11_2000

(d) Extraction de processus d'*urbanisation*

```
SPARQL query:
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 DO: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#>
PREFIX PO: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/5/ProcessOntology#>
SELECT distinct ?process (?object As ?occurs_on)
WHERE {
    ?object a ?process.
    ?object a DO:Scenelmage.
    FILTER( ( ?process = PO:Degradation ) )
}
```

process	occurs_on
Degradation	Grassy_Surface_7_2000
Degradation	Grassy_Surface_11_2000
Degradation	Forest_1_2000
Degradation	Grassy_Surface_16_2000
Degradation	Grassy_Surface_14_2000

(e) Extraction de processus de *dégradation*

```
SPARQL query:
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 DO: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/10/SceneOntology#>
PREFIX PO: <http://www.semanticweb.org/fethi/ontologies/2017/5/ProcessOntology#>
SELECT distinct ?process (?object As ?occurs_on)
WHERE {
    ?object a ?process.
    ?object a DO:Scenelmage.
    FILTER( ( ?process = PO:Deforestation ) )
}
```

process	occurs_on
Deforestation	Forest_1_2000

(f) Extraction de processus de *déforestation*

FIGURE 5.23 – Illustration des codes et des résultats de requêtes SPARQL pour l'extraction des processus et des évènements

5.5 Conclusion

L'évaluation d'une telle approche se fait généralement à travers la présentation et l'interprétation des résultats obtenus. Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter la zone d'étude sur laquelle notre méthodologie a été appliquée. Par la suite, nous avons illustré les résultats obtenus à chaque niveau d'interprétation dans l'architecture proposée. Finalement, la performance de notre méthodologie a été montrée à travers une évaluation et une discussion des résultats obtenus.

Conclusion Générale et Perspectives

Les travaux menés dans cette thèse se situent à la frontière de plusieurs domaines liés en particulier à l'ingénierie de connaissances et à la science de l'information tels que les ontologies, le raisonnement spatio-temporel et la télédétection. Ainsi, notre objectif a été de tirer profit des travaux, soulignés dans ces différents domaines et menant en particulier à la représentation et à la modélisation des objets spatio-temporels, dans le but de modéliser la dynamique en imagerie satellitaire. Ce chapitre offre une synthèse des travaux réalisés dans cette thèse et ouvre les perspectives à poursuivre afin d'apporter d'autres idées et contributions.

Synthèses

Rappelons que le cadre général de notre thèse est la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels à partir d'une interprétation sémantique des images satellitaires guidée par l'exploitation des ontologies. Les différentes parties de la thèse ont été réalisées en partant des constats suivants : (1) l'objet, l'espace, le temps et le changement sont des concepts clés et nécessaires pour l'analyse de la dynamique des objets spatio-temporels, (2) les changements qui s'opèrent sur ces objets sont à la base des impulsions des évènements et/ou des processus géographiques et finalement (3) les travaux présentés dans l'état de l'art ne permettent pas une interprétation et une modélisation complète de la dynamique de changements des objets spatio-temporels en particulier dans le domaine de télédétection.

Ainsi, dans un premier temps, nous avons étudié le contexte et les travaux liés à la détection de changements en imagerie satellitaires. Généralement, il existe deux types de détection de changement à savoir le changement binaire qui produit des cartes de « changement/non-changement » et le changement détaillé « de-à » qui identifie la nature du changement. Ensuite, nous avons présenté et discuté les travaux menant à la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels. Nous avons ainsi souligné l'apport des ontologies pour la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels dans les images satellitaires, vu la capacité de l'ontologie pour la représentation de connaissances et le raisonnement sur ces connaissances, ainsi que son adaptation à plusieurs domaines et surtout sa capacité d'évolution et de réutilisation.

Dans ce travail, la première contribution était la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels en imagerie satellitaire. La méthodologie proposée est basée sur l'exploitation des différents niveaux des ontologies. Les différentes ontologies sont décrites comme suit :

- Une **ontologie de domaine** de télédétection permettant de représenter les connaissances (objets et relations) contenues dans une scène d'image satellitaire. Elle permet de décrire le contenu d'une scène d'image satellite tout en représentant les objets spatiaux, tels qu'une forêt, une zone humide, une rivière et une zone urbaine existant dans la scène, ainsi que les relations spatiales et sémantiques (hiérarchiques) entre les différents objets.
- Une **ontologie de processus** qui est utilisée pour représenter et décrire les évènements et les processus géographiques ainsi que leurs relations.
- Une **ontologie de haut niveau** appelée encore ontologie de *fondement*, dont l'objectif est la classification des concepts de domaine et l'alignement des deux autres ontologies. Cette

ontologie offre la possibilité de distinguer les concepts statiques comme une « *forêt* » des concepts dynamiques comme la « *déforestation* ».

L'ancrage des trois niveaux d'ontologies à travers un mécanisme d'alignement proposé aboutit à une architecture ontologique modulaire qui sera utilisée comme support pour la modélisation dynamique des objets et de phénomènes spatio-temporels en imagerie satellitaire.

Comme deuxième contribution, nous avons proposé une approche pour l'interprétation sémantique de scènes d'images satellites pour l'interprétation des changements en imagerie satellitaire. L'approche proposée utilise différents niveaux d'interprétation pour décrire le contenu d'une scène d'images. À chaque niveau, la stratégie d'interprétation consiste à utiliser un ensemble de connaissances *a priori* et contextuelles pour déduire une description sémantique de la scène observée dans des images satellites multi-temporelles. La structuration de l'approche en plusieurs niveaux d'interprétation est un avantage qui permet à l'utilisateur d'interpréter l'image au niveau désiré, c.-à-d., selon l'objectif qu'il veut atteindre. En effet, notre méthodologie permet à travers :

- ✓ Le *niveau bas*, la classification spectrale d'une scène d'images satellitaires,
- ✓ Le *niveau sémantique d'objet*, l'extraction des objets sémantiques présents dans une scène d'images,
- ✓ Le *niveau sémantique partiel*, la description complète du contenu de la scène (c.-à-d., les objets et leurs relations spatiales)
- ✓ Le *niveau sémantique plein*, l'extraction des relations spatio-temporelles existantes entre les différents objets des scènes multi-datées.
- ✓ Le *niveau de changement (sémantique plus haut niveau)*, l'interprétation sémantique de changement à travers la modélisation de la dynamique des objets et des phénomènes spatio-temporels.

Nous avons expérimenté la méthodologie proposée pour l'interprétation sémantique de scènes d'images, dont le but est de valider et d'évaluer son efficacité et sa performance. En effet, nous avons choisi d'appliquer et d'expérimenter notre approche sur la zone de Aïn Drahem, qui est une ville située au nord-ouest de la Tunisie tout en utilisant des images satellitaires téléchargées à partir de la base de données en ligne de la USGS. Les résultats obtenus, à chaque niveau d'interprétation, ont été montrés dans une première étape. Ensuite, une évaluation qualitative, à travers une analyse visuelle, et quantitative en fonction des métriques de précision et de rappel, ont été présentées et discutées pour chaque résultat obtenu.

Perspectives

L'ensemble des travaux réalisés dans cette thèse ouvrent quelques perspectives et futures directions possibles liées aux résultats présentés dans cette thèse. Ces perspectives sont soulignées en particulier pour améliorer l'approche proposée pour l'interprétation sémantique de scène d'images satellitaires. Ces perspectives peuvent être décrites comme suit :

Passage à l'échelle

Les résultats expérimentaux présentés jusqu'à présent sont portés sur l'utilisation de deux images de télédétection représentant la même scène à deux dates différentes. Il est important d'évaluer notre approche sur une série d'images satellites comportant plus que deux images. D'autre part, nous visons à tester notre méthodologie pour l'interprétation d'autres phénomènes géographiques à savoir l'inondation, la désertification, etc. Cela nécessite l'intégration d'autres connaissances *a priori* et contextuelles liées à chaque domaine.

Amélioration de l'interprétation au niveau sémantique d'objet

Il est à noter que les objets sémantiques tels que la *forêt*, une *zone urbaine*, un *sol nu* ont été définis à travers un ensemble de règles spectrales qui sont décrites en fonction des catégories spectrales comme présenté dans [Baraldi et al., 2006]. Cependant, certains objets classés comme candidats végétaux (comme les *forêts* et les *terres cultivées*) ou non-végétaux (à savoir, les *zones urbaines* et les *sols nus*) partagent les mêmes catégories spectrales. Ainsi, nous nous concentrons, dans une future direction à extraire les *terres cultivées* des zones candidates de la classe végétation et les sols nus des zones candidates de la classe non-végétation en fonctions d'autres propriétés comme la densité et la texture de l'objet. De plus, certains objets peuvent être décrits en fonction des relations spatiales avec d'autres objets. Par exemple, un objet situé à côté d'une mer ne pourrait être qu'une plage, un objet de végétation situé dans une zone urbaine pourrait être considéré comme un parc, etc. En conséquence, la définition des objets en fonctions de leurs relations spatiales est une autre perspective.

Extraction des relations spatiales

L'extraction des relations spatiales entre les objets d'une scène est une étape très importante dans le processus d'interprétation de changement. Une identification erronée de ces relations engendre des interprétations incorrectes dans les niveaux supérieurs. Nous avons montré dans l'étape d'évaluation que la méthode utilisée pour l'extraction des relations spatiales est limitée pour certains cas. Ainsi, l'utilisation d'une autre méthode pour l'extraction des relations spatiales à savoir l'approche du modèle vectoriel réel représente une autre orientation de nos futurs travaux.

Gestion de l'imprécision des informations

Nous cherchons dans nos travaux futurs à étudier l'aspect de l'imprécision en particulier pour la classification des objets et des processus géographiques. En fait, plusieurs phénomènes sont de nature vague, décrite dans des termes vagues ou leurs limites dans l'espace ne sont pas clairement définies. L'imprécision des processus géographiques est intimement liée à la granularité de l'information spatiale et temporelle, et des interprétations différentes qui peuvent apparaître en fonction du degré de granularité auquel un processus est observé. Par exemple, une imprécision spatiale

conduit à une indétermination de l'extension spatiale de certains types de caractéristiques géographiques. À titre d'exemple, les délimitations possibles des forêts pour une distribution d'arbres données, sont basées sur différents choix pour un seuil sur la densité de l'arbre. En conséquence, la détermination des zones d'afforestation durant une période de temps donnée est un exemple qui montre comment l'imprécision affecte simultanément les deux dimensions spatiale et temporelle.

En outre, l'identification des relations de causalités entre les évènements et les processus ne peut être tirée que par la présence d'un expert ou bien en fonction d'un degré de relation de causalité qui indique qu'un événement/processus produit est causé par la production d'un autre événement/processus et cela par rapport à un seuil de probabilité spécifié. À cette étape, nous visons d'étudier et d'analyser les relations de causalités entre les différentes occurrences tout en se basant sur les fonctions de croyances notamment la théorie de Dempster-Shafer.

Bibliographie

- [Abdelmoty et al., 2005] Abdelmoty, A. I., Smart, P. D., Jones, C. B., Fu, G., and Finch, D. (2005). A critical evaluation of ontology languages for geographic information retrieval on the internet. *Journal of Visual Languages & Computing*, 16(4) :331–358. 48
- [Acharya et al., 2013] Acharya, J., Gadhiya, S., and Raviya, K. (2013). Segmentation techniques for image analysis : A review. *International Journal of computer science and management research*, 2(1) :1218–1221. 18, XXVI
- [Adamo and Crews-Meyer, 2006] Adamo, S. B. and Crews-Meyer, K. A. (2006). Aridity and desertification : exploring environmental hazards in jáchal, argentina. *Applied Geography*, 26(1) :61–85. 25
- [Adepoju et al., 2006] Adepoju, M., Millington, A., and Tansey, K. (2006). Land use/land cover change detection in metropolitan lagos (nigeria) : 1984-2002. In *ASPRS 2006 Annual Conference Reno, Nevada May*, pages 1–5. 25
- [Akyürek et al., 2018a] Akyürek, D., Koç, O., Akbaba, E. M., and Sunar, F. (2018a). Land use/land cover change detection using multi-“temporal satellite dataset : A case study in istanbul new airport. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W4 :17–22. 21
- [Akyürek et al., 2018b] Akyürek, D., Koç, O., Akbaba, E. M., and Sunar, F. (2018b). Land use/land cover change detection using multi-“temporal satellite dataset : A case study in istanbul new airport. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W4 :17–22. 26
- [Al-doski et al., 2013] Al-doski, J., Mansor, S. B., and Shafri, H. Z. M. (2013). Change detection process and techniques. *Civil and Environmental Research*, 3(10). 29
- [Aleksovski et al., 2006] Aleksovski, Z., Klein, M., Ten Kate, W., and Van Harmelen, F. (2006). Matching unstructured vocabularies using a background ontology. In *International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management*, pages 182–197. Springer. 77, VI
- [Allen, 1983] Allen, J. F. (1983). Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communications of the ACM*, 26(11) :832–843. 71
- [Allen, 1984] Allen, J. F. (1984). Towards a general theory of action and time. *AI*, 23(2) :123–154. 34, 36, 47, 55, 105
- [Allen et al., 2013] Allen, T., Wang, Y., and Crawford, T. (2013). Remote sensing of land cover dynamics. *Treatise on geomorphology*, 3 :80–102. 15

- [Almendros-Jiménez et al., 2013] Almendros-Jiménez, J. M., Domene, L., and Piedra-Fernández, J. A. (2013). A framework for ocean satellite image classification based on ontologies. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 6(2) :1048–1063. 86
- [Andrés et al., 2017] Andrés, S., Arvor, D., Mougenot, I., Libourel, T., and Durieux, L. (2017). Ontology-based classification of remote sensing images using spectral rules. *Computers & Geosciences*, 102 :158–166. 91, 92, 94, 97, 129
- [Andres et al., 2012] Andres, S., Arvor, D., and Pierkot, C. (2012). Towards an ontological approach for classifying remote sensing images. In *Signal Image Technology and Internet Based Systems (SITIS), 2012 Eighth International Conference on*, pages 825–832. IEEE. 86, 93
- [Andronikos et al., 2009] Andronikos, T., Stefanidakis, M., and Papadakis, I. (2009). Adding temporal dimension to ontologies via owl reification. In *Informatics, 2009. PCI'09. 13th Panhellenic Conference on*, pages 19–22. IEEE. 51
- [Arenas et al., 2015] Arenas, H., Harbelot, B., and Cruz, C. (2015). Lc3 : A spatiotemporal data model to study qualified land cover changes. *Land Use and Land Cover Semantics : Principles, Best Practices, and Prospects; Ahlqvist, O., Varanka, D., Fritz, S., Janowicz, K., Eds*, pages 211–242. 71, 86, 87
- [ARMSTRONG, 1988] ARMSTRONG, M. (1988). Temporality in spatial databases. In *Proceedings GIS/LIS'88*, volume 2, pages 880–889. 37
- [Arvor et al., 2013] Arvor, D., Durieux, L., Andrés, S., and Laporte, M.-A. (2013). Advances in geographic object-based image analysis with ontologies : A review of main contributions and limitations from a remote sensing perspective. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82 :125–137. 95
- [Awad and Chehdi, 2009] Awad, M. M. and Chehdi, K. (2009). Satellite image segmentation using hybrid variable genetic algorithm. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 19(3) :199–207. XXVI
- [Baader et al.,] Baader, F., Calvanese, D., McGuinness, D., Nardi, D., and Patel-Schneider, P. The description logic handbook (2003). *Basic description logics*, pages 43–95. xi, VII, IX, XV
- [Baader and Hanschke, 1991] Baader, F. and Hanschke, P. (1991). A scheme for integrating concrete domains into concept languages. In *Proceedings of the 12th international joint conference on Artificial intelligence-Volume 1*, pages 452–457. Morgan Kaufmann Publishers Inc. XI, XII
- [Balaban, 2017] Balaban, A. (2017). Testbed-12 aviation semantics engineering report. x, 50
- [Banner et al., 1981] Banner, A., Lynham, T., et al. (1981). Multitemporal analysis of landsat data for forest cutover mapping : a trial of two procedures. 26
- [Baraldi et al., 2006] Baraldi, A., Puzzolo, V., Blonda, P., Bruzzone, L., and Tarantino, C. (2006). Automatic spectral rule-based preliminary mapping of calibrated landsat tm and etm+ images. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 44(9) :2563–2586. 91, 92, 93, 97, 98, 99, 115, 129, 140
- [Barnes, 2014] Barnes, T. (2014). Exact Bounding Boxes for Spheres/Ellipsoids. <https://tavianator.com/exact-bounding-boxes-for-spheres-ellipsoids/>. [En ligne; dernier accès le 12 juillet 2016].

- [Barnsley et al., 2003] Barnsley, M. J., Møller-Jensen, L., and Barr, S. L. (2003). Inferring urban land use by spatial and structural pattern recognition. *Remote sensing and urban analysis*, 9 :115–144. 14
- [Batsakis and Petrakis, 2010] Batsakis, S. and Petrakis, E. G. (2010). Sowl : spatio-temporal representation, reasoning and querying over the semantic web. In *Proceedings of the 6th International Conference on Semantic Systems*, page 15. ACM. x, 51, 52, 61
- [Batsakis and Petrakis, 2012] Batsakis, S. and Petrakis, E. G. (2012). Integrated ontologies for spatial scene descriptions. In *Qualitative Spatio-Temporal Representation and Reasoning : Trends and Future Directions*, pages 321–335. IGI Global. 51
- [Bayarjargal et al., 2006] Bayarjargal, Y., Karnieli, A., Bayasgalan, M., Khudulmur, S., Gandush, C., and Tucker, C. (2006). A comparative study of noaa–avhrr derived drought indices using change vector analysis. *Remote Sensing of Environment*, 105(1) :9–22. 20
- [Bayarsaikhan et al., 2009] Bayarsaikhan, U., Boldgiv, B., Kim, K.-R., Park, K.-A., and Lee, D. (2009). Change detection and classification of land cover at hustai national park in mongolia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11(4) :273–280. 21
- [Belgiu et al., 2014] Belgiu, M., Hofer, B., and Hofmann, P. (2014). Coupling formalized knowledge bases with object-based image analysis. *Remote sensing letters*, 5(6) :530–538. 86
- [Beller, 1991] Beller, A. (1991). A temporal gis prototype for global change research. In *Proceedings of GIS/LIS*. 37
- [Benerecetti et al., 2001] Benerecetti, M., Bouquet, P., and Ghidini, C. (2001). On the dimensions of context dependence : partiality, approximation, and perspective. In *International and Interdisciplinary Conference on Modeling and Using Context*, pages 59–72. Springer. IV
- [Bennett and Galton, 2004] Bennett, B. and Galton, A. P. (2004). A unifying semantics for time and events. *Artificial Intelligence*, 153(1-2) :13–48. 34, 40
- [Bereta, 2013] Bereta, K. (2013). Storing and querying the valid time of triples in linked geospatial data. x, 49
- [Bereta et al., 2013] Bereta, K., Smeros, P., and Koubarakis, M. (2013). Representation and querying of valid time of triples in linked geospatial data. In *Extended Semantic Web Conference*, pages 259–274. Springer. 49, 50
- [Berners-Lee, 1994] Berners-Lee, T. (1994). Universal resource identifiers in www : a unifying syntax for the expression of names and addresses of objects on the network as used in the world-wide web. Technical report. [En ligne; consulté 15-September-2017]. XIII
- [Bestougeff et al., 1993] Bestougeff, H., Ligozat, G., and Alexander-Craig, I. D. (1993). *Logical tools for temporal knowledge representation*. Prentice Hall PTR. 39
- [Bhagwat et al., 2010] Bhagwat, M., Krishna, R., and Pise, V. (2010). Simplified watershed transformation. *International Journal of Computer Science and Communication*, 1(1) :175–177. XXVII
- [Bhatt and Wallgrün, 2014] Bhatt, M. and Wallgrün, J. O. (2014). Geospatial narratives and their spatio-temporal dynamics : Commonsense reasoning for high-level analyses in geographic information systems. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 3(1) :166–205. 34, 40, 73

- [Binh et al., 2005] Binh, T., Vromant, N., Hung, N. T., Hens, L., and Boon, E. (2005). Land cover changes between 1968 and 2003 in cai nuoc, ca mau peninsula, vietnam. *Environment, Development and Sustainability*, 7(4) :519–536. 25
- [Bittner and Smith, 2003] Bittner, T. and Smith, B. (2003). Formal ontologies of space and time. ifomis report. 53
- [Boley and Kifer, 2010] Boley, H. and Kifer, M. (2010). A guide to the basic logic dialect for rule interchange on the web. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 22(11) :1593–1608. XIII
- [Bonn, 1994] Bonn, F. (1994). *Téledétection de l'environnement dans l'espace francophone*. PUQ. XXIII, XXIV
- [Borak et al., 2000] Borak, J., Lambin, E., and Strahler, A. (2000). The use of temporal metrics for land cover change detection at coarse spatial scales. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6-7) :1415–1432.
- [BORDIN, 2010] BORDIN, P. (2010). L'intégration du temps dans les sig. *XYZ*, (122) :51–58. 35
- [Borst and Borst, 1997] Borst, W. N. and Borst, W. (1997). Construction of engineering ontologies for knowledge sharing and reuse.
- [Bouquet et al., 2005] Bouquet, P., Ehrig, M., Euzenat, J., Franconi, E., Hitzler, P., Krotzsch, M., Serafini, L., Stamu, G., Sure, Y., and Tessaris, S. (2005). Specification of a common framework for characterizing alignment. V
- [Bray et al., 2008] Bray, T., Paoli, J., Sperberg-McQueen, C. M., Maler, E., and Yergeau, F. (2008). Extensible markup language (xml) 1.0. [En ligne; consulté 15-September-2017]. XIII
- [Brodaric and Probst, 2009] Brodaric, B. and Probst, F. (2009). Enabling cross-disciplinary e-science by integrating geoscience ontologies with dolce. *IEEE Intelligent Systems*, 24(1) :66–77. 56, 62
- [Burgos, 2011] Burgos, J. L. M. (2011). Semantic web standards. *SNET Computer Engineering*. XIII, XIV, XV
- [Camara et al., 2014] Camara, G., Despres, S., and Lo, M. (2014). Idoschisto : une extension de l'ontologie noyau des maladies infectieuses (ido-core) pour la schistosomiase. In *IC-25èmes Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances*, pages 39–50. 54, 62
- [Campelo and Bennett, 2012] Campelo, C. E. and Bennett, B. (2012). Geographical process representation : Issues and challenges. In *Universal Ontology of Geographic Space : Semantic Enrichment for Spatial Data*, pages 73–96. IGI Global. 34, 62
- [Cardille and Foley, 2003] Cardille, J. A. and Foley, J. A. (2003). Agricultural land-use change in brazilian amazonia between 1980 and 1995 : Evidence from integrated satellite and census data. *Remote Sensing of Environment*, 87(4) :551–562. 11, 15
- [Cassidy et al., 2013] Cassidy, L., Southworth, J., Gibbes, C., and Binford, M. (2013). Beyond classifications : Combining continuous and discrete approaches to better understand land-cover change within the lower mekong river region. *Applied Geography*, 39 :26–45. 22
- [Chander et al., 2009] Chander, G., Markham, B. L., and Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for landsat mss, tm, etm+, and eo-1 ali sensors. *Remote sensing of environment*, 113(5) :893–903. XXII

- [Chavez and MacKinnon, 1994] Chavez, P. S. and MacKinnon, D. J. (1994). Automatic detection of vegetation changes in the southwestern united states using remotely sensed images. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 60(5). 20
- [Chavula et al., 2011] Chavula, G., Brezonik, P., and Bauer, M. (2011). Land use and land cover change (lulc) in the lake malawi drainage basin, 1982-2005. *International Journal of Geosciences*, 2(02) :172. 28
- [Chen et al., 2004] Chen, H., Perich, E., Finin, T., and Joshi, A. (2004). Soupa : Standard ontology for ubiquitous and pervasive applications. In *Mobile and Ubiquitous Systems : Networking and Services, 2004. MOBIQUITOUS 2004. The First Annual International Conference on*, pages 258–267. IEEE. 47
- [Chen et al., 2003] Chen, J., Gong, P., He, C., Pu, R., and Shi, P. (2003). Land-use/land-cover change detection using improved change-vector analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(4) :369–379. 20
- [Chen et al., 2013] Chen, J., Lu, M., Chen, X., Chen, J., and Chen, L. (2013). A spectral gradient difference based approach for land cover change detection. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 85 :1–12. 22
- [Cheng et al., 2008] Cheng, Y., Nie, J., Li, G., Zhang, C., and Wang, W. (2008). Study on land use and land cover change with the integration of rs, gis and gps technologies-the case of baotou city in the ecotone of agriculture-animal husbandry, china. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International*, volume 4, pages IV–691. IEEE. 15
- [Cho and Bui, 2008] Cho, D. and Bui, T. D. (2008). Image inpainting using wavelet-based inter-and intra-scale dependency. In *Pattern Recognition, 2008. ICPR 2008. 19th International Conference on*, pages 1–4. IEEE. XXVII
- [Civco et al., 2002] Civco, D. L., Hurd, J. D., Wilson, E. H., Song, M., and Zhang, Z. (2002). A comparison of land use and land cover change detection methods. In *ASPRS-ACSM Annual Conference*. 21
- [Claramunt et al., 1998] Claramunt, C., Parent, C., and Thériault, M. (1998). Design patterns for spatio-temporal processes. In *Data Mining and Reverse Engineering*, pages 455–475. Springer. 40
- [Claramunt and Thériault, 1995] Claramunt, C. and Thériault, M. (1995). Managing time in gis an event-oriented approach. In *Recent advances in temporal databases*, pages 23–42. Springer. x, 39, 40, 73
- [Claramunt and Theriault, 1996] Claramunt, C. and Theriault, M. (1996). Toward semantics for modelling spatio-temporal processes within gis. *Advances in GIs Research I*, pages 27–43. 34, 40, 42, 61
- [Claramunt et al., 1997] Claramunt, C., Thériault, M., and Parent, C. (1997). A qualitative representation of evolving spatial entities in two-dimensional topological spaces. 33, 35
- [Clark, 2017] Clark, P. (2017). The stardog manual. <http://docs.stardog.com/>. [En ligne; dernier accès le 25 aout 2017]. 114
- [Clementini and Di Felice, 1996] Clementini, E. and Di Felice, P. (1996). A model for representing topological relationships between complex geometric features in spatial databases. *Information sciences*, 90(1-4) :121–136. 35

- [Colby, 1991] Colby, J. D. (1991). Topographic normalization in rugged terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(5) :531–537. XXIV
- [Comaniciu and Meer, 2002] Comaniciu, D. and Meer, P. (2002). Mean shift : A robust approach toward feature space analysis. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 24(5) :603–619. 18
- [Conchedda et al., 2008] Conchedda, G., Durieux, L., and Mayaux, P. (2008). An object-based method for mapping and change analysis in mangrove ecosystems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(5) :578–589. 24
- [Consortium et al., 2011] Consortium, O. G. et al. (2011). Opengis® implementation specification for geographic information-simple feature access-part 1 : Common architecture. *OGC document*. 35
- [Consortium et al., 2014] Consortium, W. W. W. et al. (2014). Rdf 1.1 concepts and abstract syntax. XIV
- [Coppin et al., 2004] Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., and Lambin, E. (2004). Review article digital change detection methods in ecosystem monitoring : a review. *International journal of remote sensing*, 25(9) :1565–1596. 17, 21, 24, 25, 26
- [Coppin and Bauer, 1996] Coppin, P. R. and Bauer, M. E. (1996). Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. *Remote sensing reviews*, 13(3-4) :207–234. 20
- [Deilami et al., 2015] Deilami, B. R., Ahmad, B. B., Saffar, M. R., and Umar, H. Z. (2015). Review of change detection techniques from remotely sensed images. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 10(2) :221–229. 22
- [Del Mondo et al., 2013a] Del Mondo, G., Rodríguez, M. A., Claramunt, C., Bravo, L., and Thibaud, R. (2013a). Modeling consistency of spatio-temporal graphs. *Data & Knowledge Engineering*, 84 :59–80. 3, 71
- [Del Mondo et al., 2013b] Del Mondo, G., Rodríguez, M. A., Claramunt, C., Bravo, L., and Thibaud, R. (2013b). Modeling consistency of spatio-temporal graphs. *Data & Knowledge Engineering*, 84 :59–80. 34, 36, 42
- [Derivaux et al., 2008] Derivaux, S., Forestier, G., Wemmert, C., and Lefèvre, S. (2008). Extraction de détecteurs d'objets urbains à partir d'une ontologie. *Atelier Extraction de Connaissance à partir d'Images (ECOI), Journées Francophones Extraction et Gestion des Connaissances (EGC 2008), Sophia Antipolis, France*, pages 71–81. 72
- [Devaraju and Kuhn, 2010] Devaraju, A. and Kuhn, W. (2010). A process-centric ontological approach for integrating geo-sensor data. In *Proceedings of the 2010 conference on Formal Ontology in Information Systems : Proceedings of the Sixth International Conference (FOIS 2010)*, pages 199–212. IOS Press. 56, 62, 64
- [Devaraju et al., 2015] Devaraju, A., Kuhn, W., and Renschler, C. S. (2015). A formal model to infer geographic events from sensor observations. *International journal of geographical information science*, 29(1) :1–27. 34, 56, 62
- [Diallo et al., 2009] Diallo, Y., Hu, G., and Wen, X. (2009). Applications of remote sensing in land use/land cover change detection in puer and simao counties, yunnan province. *Journal of American Science*, 5(4) :157–166. 21

- [Durand et al., 2007] Durand, N., Derivaux, S., Forestier, G., Wemmert, C., Gançarski, P., Boussaid, O., and Puissant, A. (2007). Ontology-based object recognition for remote sensing image interpretation. In *Tools with Artificial Intelligence, 2007. ICTAI 2007. 19th IEEE International Conference on*, volume 1, pages 472–479. IEEE. 69, 87
- [Dyreson et al., 1994] Dyreson, C., Grandi, F., Käfer, W., Kline, N., Lorentzos, N., Mitsopoulos, Y., Montanari, A., Nonen, D., Peressi, E., Pernici, B., et al. (1994). A consensus glossary of temporal database concepts. *ACM Sigmod Record*, 23(1) :52–64.
- [Egenhofer and Franzosa, 1991] Egenhofer, M. J. and Franzosa, R. D. (1991). Point-set topological spatial relations. *International Journal of Geographical Information System*, 5(2) :161–174. 35
- [Egenhofer and Herring, 1990] Egenhofer, M. J. and Herring, J. (1990). Categorizing binary topological relations between regions, lines, and points in geographic databases. *The*, 9(94-1) :76. 50
- [El-Asmar et al., 2013] El-Asmar, H. M., Hereher, M. E., and El Kafrawy, S. B. (2013). Surface area change detection of the burullus lagoon, north of the Nile delta, Egypt, using water indices : A remote sensing approach. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 16(1) :119–123. 27
- [El Gammal et al., 2010] El Gammal, E. A., Salem, S. M., and El Gammal, A. E. A. (2010). Change detection studies on the world’s biggest artificial lake (Lake Nasser, Egypt). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 13(2) :89–99. 26
- [Ermolayev et al., 2014] Ermolayev, V., Batsakis, S., Keberle, N., Tatarintseva, O., and Antoniou, G. (2014). Ontologies of time : Review and trends. *Cartographica : The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 11(3) :57–115. 36
- [Euzenat, 2001] Euzenat, J. (2001). Towards a principled approach to semantic interoperability. In *Proc. IJCAI 2001 workshop on ontology and information sharing*, pages 19–25. No commercial editor. IV
- [Euzenat, 2007] Euzenat, J. (2007). Semantic precision and recall for ontology alignment evaluation. In *IJCAI*, volume 7, page 348353. 46
- [Euzenat and Shvaiko, 2013] Euzenat, J. and Shvaiko, P. (2013). Ontology matching. 76, IV, V, VI, VII
- [Evangelidis, 2018] Evangelidis, B. (2018). Space and time as relations : The theoretical approach of Leibniz. *Philosophies*, 3(2) :9.
- [Falquet and Ziswiler, 2005] Falquet, G. and Ziswiler, J.-C. (2005). A virtual hyperbooks model to support collaborative learning. *International Journal on E-Learning*, 4(1) :39–56.
- [Fan et al., 2007] Fan, F., Weng, Q., and Wang, Y. (2007). Land use and land cover change in Guangzhou, China, from 1998 to 2003, based on Landsat TM/ETM+ imagery. *Sensors*, 7(7) :1323–1342. 21, 27
- [Ferrario and Kuhn, 2016] Ferrario, R. and Kuhn, W. (2016). Land use and land cover semantics : Distinguishing occurrents from continuants. In *Formal Ontology in Information Systems : Proceedings of the 9th International Conference (FOIS 2016)*, volume 283, page 3. IOS Press. 74, 75

- [Ferreira et al., 2014] Ferreira, K. R., Camara, G., and Monteiro, A. M. V. (2014). An algebra for spatiotemporal data : From observations to events. *Transactions in GIS*, 18(2) :253–269. x, 41, 42
- [Fikes and Farquhar, 1999] Fikes, R. and Farquhar, A. (1999). Distributed repositories of highly expressive reusable ontologies. *IEEE Intelligent Systems and their Applications*, 14(2) :73–79.
- [Foody, 2002] Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote sensing of environment*, 80(1) :185–201. 20, 21
- [Forestier et al., 2012] Forestier, G., Puissant, A., Wemmert, C., and Gançarski, P. (2012). Knowledge-based region labeling for remote sensing image interpretation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(5) :470–480. 87
- [Frank, 1994] Frank, A. U. (1994). Qualitative temporal reasoning in gis-ordered time scales. In *Sixth International Symposium on Spatial Data Handling, SDH*, volume 94, pages 410–430. Citeseer. 34
- [Frank, 1996] Frank, A. U. (1996). Qualitative spatial reasoning : Cardinal directions as an example. *International Journal of Geographical Information Science*, 10(3) :269–290. 35
- [Franklin and Wulder, 2002] Franklin, S. and Wulder, M. (2002). Remote sensing methods in medium spatial resolution satellite data land cover classification of large areas. *Progress in Physical Geography*, 26(2) :173–205. 29
- [Frauman and Wolff, 2005] Frauman, E. and Wolff, E. (2005). Change detection in urban areas using very high spatial resolution satellite images : case study in brussels. In *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology V*, volume 5983, page 59830A. International Society for Optics and Photonics. 16
- [Freksa, 1992] Freksa, C. (1992). Temporal reasoning based on semi-intervals. *Artificial intelligence*, 54(1) :199–227. 34, 35
- [Galleguillos and Belongie, 2010] Galleguillos, C. and Belongie, S. (2010). Context based object categorization : A critical survey. *Computer vision and image understanding*, 114(6) :712–722. 94
- [Galton, 2008] Galton, A. (2008). Experience and history : Processes and their relation to events. *Journal of Logic and Computation*, 18(3) :323–340. 34, 63
- [Galton and Worboys, 2005] Galton, A. and Worboys, M. (2005). Processes and events in dynamic geo-networks. In *International Conference on GeoSpatial Semantics*, pages 45–59. Springer. 42, 61, 63, 73
- [Gangemi et al., 2003] Gangemi, A., Guarino, N., Masolo, C., and Oltramari, A. (2003). Sweetening wordnet with dolce. *AI magazine*, 24(3) :13. VI
- [Gangemi et al., 2002] Gangemi, A., Guarino, N., Masolo, C., Oltramari, A., and Schneider, L. (2002). Sweetening ontologies with dolce. In *International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management*, pages 166–181. Springer. 53
- [Gao, 2008] Gao, J. (2008). *Digital analysis of remotely sensed imagery*. McGraw-Hill Professional. 16

- [Gao and Liu, 2010] Gao, J. and Liu, Y. (2010). Determination of land degradation causes in tongyu county, northeast china via land cover change detection. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(1) :9–16. 25
- [Gavlasová et al., 2006] Gavlasová, A., Procházka, A., and Mudrová, M. (2006). Wavelet based image segmentation. In *Proc. of the 14th Annual Conference Technical Computing, Prague. XXVI*
- [Gehani et al., 1992] Gehani, N. H., Jagadish, H. V., and Shmueli, O. (1992). Event specification in an active object-oriented database. *ACM sigmod record*, 21(2) :81–90. 40
- [Geymen and Baz, 2008] Geymen, A. and Baz, I. (2008). Monitoring urban growth and detecting land-cover changes on the istanbul metropolitan area. *Environmental monitoring and assessment*, 136(1-3) :449–459. 28
- [Ghazouani et al., 2018a] Ghazouani, F., Farah, I. R., and Solaiman, B. (2018a). Qualitative semantic spatio-temporal reasoning based on description logics for modeling dynamics of spatio-temporal objects in satellite images. In *Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), 2018 4th International Conference on*, pages 1–6. IEEE. 104, 105
- [Ghazouani et al., 2018b] Ghazouani, F., Farah, I. R., and Solaiman, B. (2018b). Semantic remote sensing scenes interpretation and change interpretation. In *Ontology in Information Science. InTech*. 88
- [Ghazouani et al., 2015] Ghazouani, F., Messaoudi, W., and Farah, I. R. (2015). A multi-level ontological approach for change monitoring in remotely sensed imagery. In *KEOD*, pages 435–440. 68
- [Ghazouani et al., 2016a] Ghazouani, F., Messaoudi, W., and Farah, I. R. (2016a). Étude de la dynamique des phénomènes géographiques à travers une modélisation sémantique à base d'ontologie des objets spatio-temporels. In *ASD 2016 : 10ème Conférence sur les Avancées des Systèmes Décisionnels*. 68, 74
- [Ghazouani et al., 2016b] Ghazouani, F., Messaoudi, W., and Farah, I. R. (2016b). Towards an ontological conceptualization for understanding the dynamics of spatio-temporal objects. In *Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), 2016 2nd International Conference on*, pages 543–548. IEEE. 68, 74
- [Giri et al., 2003] Giri, C., Defourny, P., and Shrestha, S. (2003). Land cover characterization and mapping of continental southeast asia using multi-resolution satellite sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(21) :4181–4196. 15
- [Gonzalez et al., 2002] Gonzalez, R. C., Woods, R. E., et al. (2002). Digital image processing. *XXV, XXVI*
- [Green et al., 1994] Green, K., Kempka, D., and Lackey, L. (1994). Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 60(3) :331–337. 20
- [Grenon and Smith, 2004] Grenon, P. and Smith, B. (2004). Snap and span : Towards dynamic spatial ontology. *Spatial cognition and computation*, 4(1) :69–104. 34, 53, 54, 75, 76
- [Grenon et al., 2004] Grenon, P., Smith, B., and Goldberg, L. (2004). Biodynamic ontology : applying bfo in the biomedical domain. *Studies in health technology and informatics*, pages 20–38. VI

- [Grosz et al., 2003] Grosz, B. N., Horrocks, I., Volz, R., and Decker, S. (2003). Description logic programs : combining logic programs with description logic. In *Proceedings of the 12th international conference on World Wide Web*, pages 48–57. ACM. XII
- [Gruber, 2009] Gruber, T. (2009). *Ontology, 2007. Dostopno na : http://tomgruber.org/writing/ontology-definition-2007.htm*. 5
- [Gu et al., 2017] Gu, H., Li, H., Yan, L., Liu, Z., Blaschke, T., and Soergel, U. (2017). An object-based semantic classification method for high resolution remote sensing imagery using ontology. *Remote Sensing*, 9(4) :329. 86
- [Guarino, 1995] Guarino, N. (1995). Formal ontology, conceptual analysis and knowledge representation. *International journal of human-computer studies*, 43(5-6) :625–640. 43
- [Guarino, 1998] Guarino, N. (1998). *Formal ontology in information systems : Proceedings of the first international conference (FOIS'98), June 6-8, Trento, Italy*, volume 46. IOS press. 45
- [Guber, 1993] Guber, T. (1993). A translational approach to portable ontologies. *Knowledge Acquisition*, 5(2) :199–229. 43, 44
- [Gui et al., 2016] Gui, R., Xu, X., Dong, H., Song, C., and Pu, F. (2016). Individual building extraction from terrasar-x images based on ontological semantic analysis. *Remote Sensing*, 8(9) :708. 87
- [Gutierrez et al., 2007] Gutierrez, C., Hurtado, C. A., and Vaisman, A. (2007). Introducing time into rdf. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 19(2). 47
- [Haarslev et al., 1999] Haarslev, V., Lutz, C., and Möller, R. (1999). A description logic with concrete domains and a role-forming predicate operator. *Journal of Logic and Computation*, 9(3) :351–384. 105
- [Hall et al., 1991a] Hall, F. G., Botkin, D. B., Strebel, D. E., Woods, K. D., and Goetz, S. J. (1991a). Large-scale patterns of forest succession as determined by remote sensing. *Ecology*, 72(2) :628–640. 25
- [Hall et al., 1991b] Hall, F. G., Strebel, D. E., Nickeson, J. E., and Goetz, S. J. (1991b). Radiometric rectification : toward a common radiometric response among multitemporal, multisensor images. *Remote sensing of environment*, 35(1) :11–27. 25
- [Haralick et al., 1973] Haralick, R. M., Shanmugam, K., Dinstein, I., et al. (1973). Textural features for image classification. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 3(6) :610–621. 18
- [Harbelot, 2015] Harbelot, B. (2015). *Continuum : un modèle spatio-temporel et sémantique pour la découverte de phénomènes dynamiques au sein d'environnements géospatiaux*. PhD thesis, Université de Bourgogne. x, 3, 52, 57, 63
- [Harbelot et al., 2015] Harbelot, B., Arenas, H., and Cruz, C. (2015). Lc3 : A spatio-temporal and semantic model for knowledge discovery from geospatial datasets. *Web Semantics : Science, Services and Agents on the World Wide Web*, 35 :3–24. 57, 61
- [Hashimoto et al., 2011] Hashimoto, S., Tadono, T., Onosato, M., Hori, M., and Moriyama, T. (2011). A framework of ontology-based knowledge information processing for change detection in remote sensing data. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International*, pages 3927–3930. IEEE. x, 58, 59, 87

- [Hay and Castilla, 2008] Hay, G. J. and Castilla, G. (2008). Geographic object-based image analysis (geobia) : A new name for a new discipline. In *Object-based image analysis*, pages 75–89. Springer. 18
- [Hayes and Sader, 2001] Hayes, D. J. and Sader, S. A. (2001). Comparison of change-detection techniques for monitoring tropical forest clearing and vegetation regrowth in a time series. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 67(9) :1067–1075. 20
- [Hernandez, 1994] Hernandez, D. (1994). *Qualitative representation of spatial knowledge*, volume 804. Springer Science & Business Media. 35
- [Hernando et al., 2012] Hernando, A., Tiede, D., Albrecht, F., and Lang, S. (2012). Spatial and thematic assessment of object-based forest stand delineation using an ofa-matrix. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19 :214–225. 24
- [Herre et al., 2006] Herre, H., Heller, B., Burek, P., Hoehndorf, R., Loebe, F., and Michalek, H. (2006). General formal ontology (gfo) : A foundational ontology integrating objects and processes. *Onto-Med Report*, 8. 53
- [Hobbs and Pan, 2004] Hobbs, J. R. and Pan, F. (2004). An ontology of time for the semantic web. *ACM Transactions on Asian Language Information Processing (TALIP)*, 3(1) :66–85. 47
- [Hobbs and Pan, 2006] Hobbs, J. R. and Pan, F. (2006). Time ontology in owl. *W3C working draft*, 27 :133. 55
- [Holland, 1992] Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press. XXVI
- [Homayouni and Roux, 2004] Homayouni, S. and Roux, M. (2004). Hyperspectral image analysis for material mapping using spectral matching. In *ISPRS Congress Proceedings*, volume 20. 28
- [Hornsby and Egenhofer, 1997] Hornsby, K. and Egenhofer, M. J. (1997). Qualitative representation of change. In *International conference on spatial information theory*, pages 15–33. Springer. 33, 38
- [Hornsby and Egenhofer, 2000] Hornsby, K. and Egenhofer, M. J. (2000). Identity-based change : a foundation for spatio-temporal knowledge representation. *International journal of geographical information science*, 14(3) :207–224. 3, 33, 38, 42
- [Horrocks, 1999] Horrocks, I. (1999). Optimizing tableaux decision procedures for description logics. phd thesis, university of manchester, 1999, p. 178. X
- [Horrocks and Patel-Schneider, 1998] Horrocks, I. and Patel-Schneider, P. F. (1998). Comparing subsumption optimizations. In *Description Logics*. Citeseer. X
- [Horrocks et al., 2004] Horrocks, I., Patel-Schneider, P. F., Boley, H., Tabet, S., Grosz, B., Dean, M., et al. (2004). Swrl : A semantic web rule language combining owl and ruleml. *W3C Member submission*, 21 :79. XVI
- [Horrocks et al., 2003] Horrocks, I., Patel-Schneider, P. F., and Van Harmelen, F. (2003). From shiq and rdf to owl : The making of a web ontology language. *Web semantics : science, services and agents on the World Wide Web*, 1(1) :7–26. 43, XV
- [Horrocks and Sattler, 2001] Horrocks, I. and Sattler, U. (2001). Ontology reasoning in the shoq (d) description logic. In *IJCAI*, volume 1, pages 199–204. X

- [Horrocks and Sattler, 2002] Horrocks, I. and Sattler, U. (2002). Optimised reasoning for shiq. In *ECAI*, volume 2, pages 277–281. X
- [Horrocks et al., 1998] Horrocks, I., Sattler, U., and Tobies, S. (1998). A pspace-algorithm for deciding $\mathcal{ALCN}^{\mathcal{I}}_{\mathcal{R}^+}$ -satisfiability. LTCS-Report LTCS-98-08, LuFG Theoretical Computer Science, RWTH Aachen. X
- [Howarth and Wickware, 1981] Howarth, P. J. and Wickware, G. M. (1981). Procedures for change detection using landsat digital data. *International Journal of Remote Sensing*, 2(3) :277–291. 20
- [Hudelot et al., 2005] Hudelot, C., Maillot, N., and Thonnat, M. (2005). Symbol grounding for semantic image interpretation : from image data to semantics. In *Computer Vision Workshops, 2005. ICCVW'05. Tenth IEEE International Conference on*, pages 1875–1875. IEEE. x, 70, 85, 86, 90, 94
- [Hussain et al., 2013] Hussain, M., Chen, D., Cheng, A., Wei, H., and Stanley, D. (2013). Change detection from remotely sensed images : From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 80 :91–106. 23, 24
- [Iakovidis et al., 2009] Iakovidis, D. K., Schober, D., Boeker, M., and Schulz, S. (2009). An ontology of image representations for medical image mining. In *Information Technology and Applications in Biomedicine, 2009. ITAB 2009. 9th International Conference on*, pages 1–4. IEEE. 93
- [Im et al., 2008] Im, J., Jensen, J., and Tullis, J. (2008). Object-based change detection using correlation image analysis and image segmentation. *International Journal of Remote Sensing*, 29(2) :399–423. 24
- [Im et al., 2007] Im, J., Rhee, J., Jensen, J. R., and Hodgson, M. E. (2007). An automated binary change detection model using a calibration approach. *Remote Sensing of Environment*, 106(1) :89–105. 16
- [ISO, 2003] ISO, T. (2003). 211. iso 19107 geographic information–spatial schema. 35
- [Iwaniak et al., 2013] Iwaniak, A., Łukowicz, J., Strzelecki, M., and Kaczmarek, I. (2013). Ontology driven analysis of spatio-temporal phenomena, aimed at spatial planning and environmental forecasting. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Archives*, 7 :W2. 54, 55, 62, 63, 75
- [Jensen et al., 1994] Jensen, C. S., Clifford, J., Elmasri, R., Gadia, S. K., Hayes, P., Jajodia, S., Dyreson, C., Grandi, F., Käfer, W., Kline, N., et al. (1994). A consensus glossary of temporal database concepts. *ACM SIGMOD Record*, 23(1) :52–64.
- [Jensen, 1981] Jensen, J. R. (1981). Urban change detection mapping using landsat digital data. *The American Cartographer*, 8(2) :127–147. 26
- [Jensen, 2005] Jensen, J. R. (2005). Introductory digital image processing 3rd edition. In *Upper saddle river : Prentice hall*. 16, 17, 21, 22, 24
- [Jiang and Worboys, 2009] Jiang, J. and Worboys, M. (2009). Event-based topology for dynamic planar areal objects. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(1) :33–60. 41, 42, 61
- [Jianya et al., 2008] Jianya, G., Haigang, S., Guorui, M., and Qiming, Z. (2008). A review of multi-temporal remote sensing data change detection algorithms. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B7) :757–762. 22, 24

- [Johnson and Kasischke, 1998] Johnson, R. D. and Kasischke, E. (1998). Change vector analysis : a technique for the multispectral monitoring of land cover and condition. *International Journal of Remote Sensing*, 19(3) :411–426. 20
- [Jones et al., 2004] Jones, C. B., Abdelmoty, A. I., Finch, D., Fu, G., and Vaid, S. (2004). The spirit spatial search engine : Architecture, ontologies and spatial indexing. In *International Conference on Geographic Information Science*, pages 125–139. Springer. 47
- [Junfeng et al., 2011] Junfeng, L., Zhibao, D., Guangyin, H., Changzhen, Y., Zhenhai, W., and Xiang, S. (2011). Land use and land cover change and its driving forces in the source region of the yangtze river during 1990–2005. In *Water Resource and Environmental Protection (ISWREP), 2011 International Symposium on*, volume 4, pages 2571–2574. IEEE. 27
- [Kauppinen and de Espindola, 2011] Kauppinen, T. and de Espindola, G. M. (2011). Ontology-based modeling of land change trajectories in the brazilian amazon. *Geoinformatik 2011 Geo-Change*. 58, 62
- [Klein and Fensel, 2001] Klein, M. C. and Fensel, D. (2001). Ontology versioning on the semantic web. In *SWWS*, pages 75–91. 51
- [Koubarakis et al., 2012] Koubarakis, M., Karpathiotakis, M., Kyzirakos, K., Nikolaou, C., and Sioutis, M. (2012). Data models and query languages for linked geospatial data. In *Reasoning Web International Summer School*, pages 290–328. Springer. 48, 49, 50
- [Kuhn, 2009] Kuhn, W. (2009). A functional ontology of observation and measurement. In *International Conference on GeoSpatial Semantics*, pages 26–43. Springer. 56, 62
- [Kumar et al., 2010] Kumar, D., Borah, S., and Shankar, U. (2010). Monitoring forest cover change using remote sensing in amchang wildlife sanctuary, assam, india. *Communicated Data*. 27
- [Kurata, 2009] Kurata, Y. (2009). Semi-automated derivation of conceptual neighborhood graphs of topological relations. In *International Conference on Spatial Information Theory*, pages 124–140. Springer. 35
- [Kurata and Egenhofer, 2006] Kurata, Y. and Egenhofer, M. J. (2006). The head-body-tail intersection for spatial relations between directed line segments. In *International Conference on Geographic Information Science*, pages 269–286. Springer. 35
- [Ladkin, 1987] Ladkin, P. B. (1987). *The logic of time representation*. PhD thesis, Citeseer. 34
- [Lambin and Ehrlich, 1997] Lambin, E. F. and Ehrlich, D. (1997). Land-cover changes in sub-saharan africa (1982–1991) : Application of a change index based on remotely sensed surface temperature and vegetation indices at a continental scale. *Remote sensing of environment*, 61(2) :181–200. 15
- [Lambin et al., 2003] Lambin, E. F., Geist, H. J., and Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual review of environment and resources*, 28(1) :205–241. 15
- [Landsat, 2011] Landsat, N. (2011). Science data users handbook. http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/inst_cal/prog_sectS_2.html/. [En ligne; dernier accès le 12 juillet 2017]. 114
- [Langran and Chrisman, 1988] Langran, G. and Chrisman, N. R. (1988). A framework for temporal geographic information. *Cartographica : The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 25(3) :1–14. x, 34, 36, 37, 38

- [Lenat and Guha, 1990] Lenat, D. B. and Guha, R. V. (1990). Building large knowledge based systems : Representation and inference in the cyc project. VI
- [Li et al., 2016] Li, W., Zhou, X., and Wu, S. (2016). An integrated software framework to support semantic modeling and reasoning of spatiotemporal change of geographical objects : A use case of land use and land cover change study. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(10) :179. x, 59, 60, 61, 62, 87
- [LIGOZAT, 1998] LIGOZAT, G. É. (1998). Reasoning about cardinal directions. *Journal of Visual Languages & Computing*, 9(1) :23–44. 35
- [Lillesand et al., 2014] Lillesand, T., Kiefer, R. W., and Chipman, J. (2014). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons. XXII
- [Liu et al., 2018] Liu, G., Gousseau, Y., and Tupin, F. (2018). Change detection for urban areas using very high resolution satellite images. 16
- [Loveland and Dwyer, 2012] Loveland, T. R. and Dwyer, J. L. (2012). Landsat : Building a strong future. *Remote Sensing of Environment*, 122 :22–29. 27
- [Lu et al., 2008] Lu, D., Batistella, M., and Moran, E. (2008). Integration of landsat tm and spot hrg images for vegetation change detection in the brazilian amazon. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 74(4) :421–430. 22
- [Lu et al., 2004] Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., and Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International journal of remote sensing*, 25(12) :2365–2401. 16, 19, 20, 21, 22
- [Łukowicz and Iwaniak,] Łukowicz, J. and Iwaniak, A. From snapshots to processes description–spatiotemporal modelling using rdf datasets and formal ontologies. 55, 63
- [Lunetta and Elvidge, 1999] Lunetta, R. S. and Elvidge, C. D. (1999). *Remote sensing change detection*, volume 310. Taylor & Francis. 20
- [Luo et al., 2016] Luo, H., Li, L., Zhu, H., Kuai, X., Zhang, Z., and Liu, Y. (2016). Land cover extraction from high resolution zy-3 satellite imagery using ontology-based method. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(3) :31. 87
- [Lutz, 2004] Lutz, C. (2004). Next time-complete description logics with concrete domains. *ACM Transactions on Computational Logic (TOCL)*, 5(4) :669–705. XI
- [Manjunath and Ma, 1996] Manjunath, B. S. and Ma, W.-Y. (1996). Texture features for browsing and retrieval of image data. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 18(8) :837–842. 18
- [Mark et al., 2004] Mark, D., Smith, B., Egenhofer, M., and Hirtle, S. (2004). Ontological foundations for geographic information science. *Research Challenges in Geographic Information Science*, pages 335–350. 57
- [Marr and Vision, 1982] Marr, D. and Vision, A. (1982). A computational investigation into the human representation and processing of visual information. *WH San Francisco : Freeman and Company*, 1(2). 85, 90
- [Martínez et al., 2007] Martínez, L., Palà, V., Arbiol, R., Pineda, L., and Joaniquet, M. (2007). Urban change detection on satellite images series. application to catalunya area. In *Urban Remote Sensing Joint Event, 2007*, pages 1–5. IEEE. 25

- [Marwaha et al., 2017] Marwaha, C. et al. (2017). Review of techniques used for change detection in remotely sensed images. *International Journal Of Engineering And Computer Science*, 6(3). 23
- [Masolo et al., 2003] Masolo, C., Borgo, S., Gangemi, A., Guarino, N., and Oltramari, A. (2003). The wonderweb library of foundational ontologies and the dolce ontology. wonderweb (eu ist project 2001-33052) deliverable d18. Technical report, LOA-ISTC-CNR. 53, 55
- [Masse, 2013] Masse, A. (2013). *Développement et automatisation de méthodes de classification à partir de séries temporelles d'images de télédétection : application aux changements d'occupation des sols et à l'estimation du bilan carbone*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier. xii, 129
- [Mathian and Sanders, 2015] Mathian, H. and Sanders, L. (2015). *Spatio-temporal Approaches : Geographic Objects and Change Process*. John Wiley & Sons. 75
- [Matinfar et al., 2007] Matinfar, H., Sarmadian, F., Alavi Panah, S., and Heck, R. (2007). Comparisons of object-oriented and pixel-based classification of land use/land cover types based on landsat7, etm+ spectral bands (case study : arid region of iran). *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 2(4) :448–456. 25
- [McGuinness et al., 2004] McGuinness, D. L., Van Harmelen, F., et al. (2004). Owl web ontology language overview. *W3C recommendation*, 10(10) :2004. XIV
- [Messaoudi et al., 2014] Messaoudi, W., Farah, I. R., and Solaiman, B. (2014). A new ontology for semantic annotation of remotely sensed images. In *Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), 2014 1st International Conference on*, pages 36–41. IEEE. 69, 70, 87
- [Meyer and Turner, 1992] Meyer, W. B. and Turner, B. L. (1992). Human population growth and global land-use/cover change. *Annual review of ecology and systematics*, 23(1) :39–61. 15
- [Michel-Claude and Colette, 1999] Michel-Claude, G. and Colette, G. (1999). Traitement des données de télédétection. *DUNOD Ed. Paris*, 529. 11
- [Mika et al., 2004] Mika, P., Oberle, D., Gangemi, A., and Sabou, M. (2004). Foundations for service ontologies : aligning owl-s to dolce. In *Proceedings of the 13th international conference on World Wide Web*, pages 563–572. ACM. 56
- [Mishra et al., 2016] Mishra, S., Shrivastava, P., and Dhurvey, P. (2016). Change detection techniques in remote sensing. *JOURNAL OF ADVANCED INFORMATION TECHNOLOGY AND CONVERGENCE*, 6(2) :51–57. 23
- [Mizoguchi et al., 1995] Mizoguchi, R., Vanwelkenhuysen, J., and Ikeda, M. (1995). Task ontology for reuse of problem solving knowledge. *Towards Very Large Knowledge Bases : Knowledge Building & Knowledge Sharing*, 46 :59. 45
- [Motakis and Zaniolo, 1995] Motakis, I. and Zaniolo, C. (1995). Composite temporal events in active database rules : A logic-oriented approach. In *International Conference on Deductive and Object-Oriented Databases*, pages 19–37. Springer. 40
- [Motik et al., 2009] Motik, B., Grau, B. C., Horrocks, I., Wu, Z., Fokoue, A., Lutz, C., et al. (2009). Owl 2 web ontology language profiles. *W3C recommendation*, 27 :61. XV
- [Mujtaba and Karam, 2017] Mujtaba, G. and Karam, F. W. (2017). Monitoring deforestation using remote sensing. *International Journal of Computer Science and Information Security*, 15(1) :75. 25

- [Nackaerts et al., 2005] Nackaerts, K., Vaesen, K., Muys, B., and Coppin, P. (2005). Comparative performance of a modified change vector analysis in forest change detection. *International Journal of Remote Sensing*, 26(5) :839–852. 20
- [Neches et al., 1991] Neches, R., Fikes, R. E., Finin, T., Gruber, T., Patil, R., Senator, T., and Swartout, W. R. (1991). Enabling technology for knowledge sharing. *AI magazine*, 12(3) :36. 43
- [Nefzi et al., 2014] Nefzi, H., Farah, M., Farah, I. R., and Solaiman, B. (2014). A critical analysis of lifecycles and methods for ontology construction and evaluation. In *Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), 2014 1st International Conference on*, pages 48–53. IEEE. 69
- [Niles and Pease, 2001] Niles, I. and Pease, A. (2001). Towards a standard upper ontology. In *Proceedings of the international conference on Formal Ontology in Information Systems-Volume 2001*, pages 2–9. ACM. VI
- [Nordberg and Evertson, 2003] Nordberg, M.-L. and Evertson, J. (2003). Monitoring change in mountainous dry-heath vegetation at a regional scale using multitemporal landsat tm data. *Ambio*, pages 502–509. 15
- [Noy et al., 2006] Noy, N., Rector, A., Hayes, P., and Welty, C. (2006). Defining n-ary relations on the semantic web. *W3C working group note*, 12(4). 51
- [O’connor et al., 2005] O’connor, M., Knublauch, H., Tu, S., and Musen, M. (2005). Writing rules for the semantic web using swrl and jess. *Protégé With Rules WS, Madrid. XVI, XVII*
- [O’Connor and Das, 2011] O’Connor, M. J. and Das, A. K. (2011). A method for representing and querying temporal information in owl. *Biomedical Engineering Systems and Technologies*, page 97. 48
- [Ouma et al., 2008] Ouma, Y. O., Josaphat, S., and Tateishi, R. (2008). Multiscale remote sensing data segmentation and post-segmentation change detection based on logical modeling : Theoretical exposition and experimental results for forestland cover change analysis. *Computers & geosciences*, 34(7) :715–737. 16
- [Papadias and Theodoridis, 1997] Papadias, D. and Theodoridis, Y. (1997). Spatial relations, minimum bounding rectangles, and spatial data structures. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(2) :111–138. xi, 101, 102
- [Paradzayi et al., 2008] Paradzayi, C., Annegarn, H., Matsika, R., and Erasmus, B. (2008). Field surveys for biomass assessment in african savanna woodlands. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International*, volume 3, pages III–632. IEEE. 15
- [Parikh and Shah, 2013] Parikh, R. and Shah, D. (2013). A survey on computer vision based diagnosis for skin lesion detection. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT) Volume, 2*. 18
- [Patil et al., 1992] Patil, R., Fikes, R., Patel-Schneider, P., McKay, D. P., Finin, T., Gruber, T., Neches, R., et al. (1992). The darpa knowledge sharing effort : Progress report. In *Proceedings of the Third International Conference on Principles Of Knowledge Representation And Reasoning*.
- [Perry and Herring, 2012] Perry, M. and Herring, J. (2012). Ogc geosparql-a geographic query language for rdf data. *OGC implementation standard*. 50, 55, XVI

- [Perry et al., 2009] Perry, M., Sheth, A., Arpinar, I. B., and Hakimpour, F. (2009). Geospatial and temporal semantic analytics. In *Handbook of research on geoinformatics*, pages 161–170. IGI Global. 47
- [PERRY, 2008] PERRY, M. S. (2008). *A Framework to Support Spatial, Temporal and Thematic Analytics over Semantic Web Data*. PhD thesis, Wright State University. x, 47
- [Peuquet and Wentz, 1994] Peuquet, D. and Wentz, E. (1994). An approach for time-based analysis of spatiotemporal data. In *the 6th International Symposium of Spatial Data Handling, SDH'94*, pages 489–504. 33
- [Peuquet and Duan, 1995] Peuquet, D. J. and Duan, N. (1995). An event-based spatiotemporal data model (estdm) for temporal analysis of geographical data. *International journal of geographical information systems*, 9(1) :7–24. x, 39
- [Pierkot et al., 2013] Pierkot, C., Andrés, S., Faure, J. E., and Seyler, F. (2013). Formalizing spatio-temporal knowledge in remote sensing applications to improve image interpretation. *Journal of Spatial Information Science*, 2013(7) :77–98. 34, 36
- [Pouget, 2005] Pouget, F. (2005). Notions de base de télédétection. *Université de La Rochelle, France*. 12, 18, XXIII
- [Pratikakis et al., 2011] Pratikakis, I., Bolovinou, A., Gatos, B., and Perantonis, S. (2011). Semantics extraction from images. In *Knowledge-driven multimedia information extraction and ontology evolution*, pages 50–88. Springer-Verlag. 84, 85
- [Quarmby and Cushnie, 1989] Quarmby, N. and Cushnie, J. (1989). Monitoring urban land cover changes at the urban fringe from spot hrv imagery in south-east england. *International Journal of Remote Sensing*, 10(6) :953–963. 20
- [Radoux et al., 2010] Radoux, J., Bogaert, P., and Defourny, P. (2010). Overall accuracy estimation for geographic object-based image classification. In *Ninth International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*. 24
- [Randell et al., 1992a] Randell, D. A., Cui, Z., and Cohn, A. G. (1992a). A spatial logic based on regions and connection. *KR*, 92 :165–176. 35, 50, 55, 105
- [Randell et al., 1992b] Randell, D. A., Cui, Z., and Cohn, A. G. (1992b). A spatial logic based on regions and connection. *KR*, 92 :165–176. 70
- [Rawat and Kumar, 2015] Rawat, J. and Kumar, M. (2015). Monitoring land use/cover change using remote sensing and gis techniques : A case study of hawalbagh block, district almora, uttarakhand, india. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(1) :77–84. 26
- [Rawat et al., 2014] Rawat, J., Kumar, M., and Biswas, V. (2014). Land use/cover dynamics using multi-temporal satellite imagery : a case study of haldwani town area, district nainital, uttarakhand, india. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 4(3) :536–543. 26
- [Riaño et al., 2003] Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., and Aguado, I. (2003). Assessment of different topographic corrections in landsat-tm data for mapping vegetation types (2003). *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 41(5) :1056–1061. XXIV
- [Rimal, 2011] Rimal, B. (2011). Application of remote sensing and gis, land use/land cover change in kathmandu metropolitan city, nepal. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 23(2). 26

- [Robinson and Bauer, 2011] Robinson, P. N. and Bauer, S. (2011). *Introduction to bio-ontologies*. Chapman and Hall/CRC. 54
- [Satellites, 2016] Satellites (2016). Caractéristiques de différents satellites d'observation de la terre. <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs44573>. Visité le : 30-09-2016. xii, XX, XXI
- [Schlieder, 1995] Schlieder, C. (1995). Reasoning about ordering. In *International conference on spatial information theory*, pages 341–349. Springer. 35
- [Schmidt-Schauß and Smolka, 1991] Schmidt-Schauß, M. and Smolka, G. (1991). Attributive concept descriptions with complements. *Artificial intelligence*, 48(1) :1–26. IX
- [Schulz et al., 2010] Schulz, J. J., Cayuela, L., Echeverria, C., Salas, J., and Benayas, J. M. R. (2010). Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of central chile (1975–2008). *Applied Geography*, 30(3) :436–447. 25
- [Sebari and He, 2007] Sebari, I. and He, D.-C. (2007). Les approches de segmentation d'image par coopération régions-contours. *Revue télédétection*, 7(1–2–3–4) :499–506. XXV, XXVI
- [Sezgin and Sankur, 2004] Sezgin, M. and Sankur, B. (2004). Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic imaging*, 13(1) :146–166. XXV
- [Shadbolt et al., 2006] Shadbolt, N., Berners-Lee, T., and Hall, W. (2006). The semantic web revisited. *IEEE intelligent systems*, 21(3) :96–101. xi, XII
- [Shalaby and Tateishi, 2007] Shalaby, A. and Tateishi, R. (2007). Remote sensing and gis for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the northwestern coastal zone of egypt. *Applied Geography*, 27(1) :28–41.
- [Shepherd and Dymond, 2003] Shepherd, J. and Dymond, J. (2003). Correcting satellite imagery for the variance of reflectance and illumination with topography. *International Journal of Remote Sensing*, 24(17) :3503–3514. XXIV
- [Shivhare and Gupta, 2015] Shivhare, P. and Gupta, V. (2015). Review of image segmentation techniques including pre & post processing operations. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 4(3) :153–157. XXV
- [Shvaiko and Euzenat, 2005] Shvaiko, P. and Euzenat, J. (2005). A survey of schema-based matching approaches. In *Journal on data semantics IV*, pages 146–171. Springer. V
- [Singh, 1989] Singh, A. (1989). Review article digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International journal of remote sensing*, 10(6) :989–1003. 2, 16, 33
- [Smeulders et al., 2000] Smeulders, A. W., Worring, M., Santini, S., Gupta, A., and Jain, R. (2000). Content-based image retrieval at the end of the early years. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 22(12) :1349–1380. 84
- [Smith et al., 2005] Smith, B., Ceusters, W., Klagges, B., Köhler, J., Kumar, A., Lomax, J., Mungall, C., Neuhaus, F., Rector, A. L., and Rosse, C. (2005). Relations in biomedical ontologies. *Genome biology*, 6(5) :R46. 79
- [Snodgrass and Ahn, 1986] Snodgrass, R. and Ahn, I. (1986). Temporal databases. *Computer*, 19(9) :35–42.

- [Sotnykova et al., 2005] Sotnykova, A., Vangenot, C., Cullot, N., Bennacer, N., and Aufaure, M.-A. (2005). Semantic mappings in description logics for spatio-temporal database schema integration. In *Journal on Data Semantics III*, pages 143–167. Springer. 106
- [Sowa et al., 2000] Sowa, J. F. et al. (2000). *Knowledge representation : logical, philosophical, and computational foundations*, volume 13. Brooks/Cole Pacific Grove, CA. 45
- [SPOT, 2016] SPOT (2016). Le programme spot (satellite pour l’observation de la terre). http://cours-fad-public.ensg.eu/pluginfile.php/1163/mod_imsdp/content/1/co/Spot.html. Visité le : 30-09-2016. xii, XXI
- [Staab and Studer, 2013] Staab, S. and Studer, R. (2013). *Handbook on Ontologies*. Springer Science & Business Media. VII
- [Stoney, 2006] Stoney, W. E. (2006). Asprs guide to land imaging satellites. In *NOAA Commercial Remote Sensing Symposium : Key Trends and Challenges in the Global Marketplace*. 11
- [Strobl, 2008] Strobl, C. (2008). Dimensionally extended nine-intersection model (de-9im). In *Encyclopedia of GIS*, pages 240–245. Springer. 35
- [Studer et al., 1998] Studer, R., Benjamins, V. R., Fensel, D., et al. (1998). Knowledge engineering : principles and methods. *Data and knowledge engineering*, 25(1) :161–198. 43
- [Sui et al., 2008] Sui, H., Zhou, Q., Gong, J., and Ma, G. (2008). Processing of multi-temporal data and change detection. *Adv. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, pages 227–47. 16
- [Sun et al., 2009] Sun, Z., Ma, R., and Wang, Y. (2009). Using landsat data to determine land use changes in datong basin, china. *Environmental geology*, 57(8) :1825–1837. 21
- [Sunar, 1998] Sunar, F. (1998). An analysis of changes in a multi-date data set : a case study in the ikitelli area, istanbul, turkey. *International Journal of Remote Sensing*, 19(2) :225–235. 20
- [Sundaresan et al., 2007] Sundaresan, A., Varshney, P. K., and Arora, M. K. (2007). Robustness of change detection algorithms in the presence of registration errors. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(4) :375–383. XXII, XXIII
- [Swartout and Tate, 1999] Swartout, W. and Tate, A. (1999). Ontologies. *IEEE Intelligent Systems and Their Applications*, 14(1) :18–19. 43
- [Tamura et al., 1978] Tamura, H., Mori, S., and Yamawaki, T. (1978). Textural features corresponding to visual perception. *IEEE Transactions on Systems, man, and cybernetics*, 8(6) :460–473. 18
- [Teng et al., 2008] Teng, S., Chen, Y., Cheng, K., and Lo, H. (2008). Hypothesis-test-based landcover change detection using multi-temporal satellite images—a comparative study. *Advances in Space Research*, 41(11) :1744–1754. 21
- [TERRE, 2013] TERRE, C. (2013). Centre canadien de cartographie et d’observation de la terre. *Notions fondamentales de Télédétection*. x, 11, 12, 25
- [Thériault and Claramunt, 1999] Thériault, M. and Claramunt, C. (1999). La modélisation du temps et des processus dans les sig : Un moyen d’intégration pour la recherche interdisciplinaire. *Revue Internationale de Geomatique*, 9 :67–103. 34
- [Thériault et al., 1999] Thériault, M., Claramunt, C., and Villeneuve, P. Y. (1999). A spatio-temporal taxonomy for the representation of spatial set behaviours. In *Spatio-temporal database management*, pages 1–18. Springer.

- [Torahi and Rai, 2011] Torahi, A. A. and Rai, S. C. (2011). Land cover classification and forest change analysis, using satellite imagery-a case study in dehdez area of zagros mountain in iran. *Journal of Geographic Information System*, 3(01) :1. 21
- [Trigg et al., 2006] Trigg, S. N., Curran, L. M., and McDonald, A. K. (2006). Utility of landsat 7 satellite data for continued monitoring of forest cover change in protected areas in southeast asia. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 27(1) :49–66. 27
- [Tryfona and Jensen, 2008] Tryfona, N. and Jensen, C. S. (2008). Spatio-temporal database modeling with an extended entity-relationship model. In *Encyclopedia of GIS*, pages 1115–1121. Springer.
- [Tsang and Au, 1996] Tsang, P. W. and Au, A. T. (1996). A genetic algorithm for projective invariant object recognition. In *TENCON'96. Proceedings., 1996 IEEE TENCON. Digital Signal Processing Applications*, volume 1, pages 58–63. IEEE. XXVI
- [Tsarkov and Horrocks, 2006] Tsarkov, D. and Horrocks, I. (2006). Fact++ description logic reasoner : System description. In *International Joint Conference on Automated Reasoning*, pages 292–297. Springer. 95
- [Turner et al., 1995] Turner, B. L., Skole, D., Sanderson, S., Fischer, G., Fresco, L., and Leemans, R. (1995). Land-use and land-cover change : science/research plan. In *Unknown Host Publication Title*. International Geosphere-Biosphere Programme, Stockholm; Report, 35. 15
- [Van Coillie et al., 2008] Van Coillie, F. M., Verbeke, L. P., and De Wulf, R. R. (2008). Semi-automated forest stand delineation using wavelet based segmentation of very high resolution optical imagery. In *Object-Based Image Analysis*, pages 237–256. Springer. 24
- [Van Heijst et al., 1997] Van Heijst, G., Schreiber, A. T., and Wielinga, B. J. (1997). Using explicit ontologies in kbs development. *International journal of human-computer studies*, 46(2-3) :183–292.
- [Van Zyl et al., 2000] Van Zyl, J. D., Corbett, D. R., et al. (2000). A framework for comparing methods for using or reusing multiple ontologies in an application.
- [Verbesselt et al., 2010] Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., and Culvenor, D. (2010). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote sensing of Environment*, 114(1) :106–115. 70
- [Wang et al., 2009] Wang, H., Wang, X., Xiao, R., and Mo, M. (2009). A study on the change of wetland landscape pattern in honghu city by using 3s method. In *2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*, pages 167–170. IEEE. 25
- [Wang et al., 2004] Wang, X. H., Zhang, D. Q., Gu, T., and Pung, H. K. (2004). Ontology based context modeling and reasoning using owl. In *Pervasive Computing and Communications Workshops, 2004. Proceedings of the Second IEEE Annual Conference on*, pages 18–22. Ieee. 47
- [Weichert et al., 2013] Weichert, F., Mertens, C., Walczak, L., Kern-Isberner, G., and Wagner, M. (2013). A novel approach for connecting temporal-ontologies with blood flow simulations. *Journal of biomedical informatics*, 46(3) :470–479. 54, 62
- [Welty et al., 2006] Welty, C., Fikes, R., and Makarios, S. (2006). A reusable ontology for fluents in owl. In *FOIS*, volume 150, pages 226–236. 52

- [Wen and Yang, 2009] Wen, X. and Yang, X. (2009). Change detection from remote sensing images using spectral change vector analysis. In *2009 Asia-Pacific Conference on Information Processing*, pages 189–192. IEEE. 20
- [Wen, 2011] Wen, Y. (2011). Data application of multi-temporal and multi-source data for land cover change detection in guam, usa. *geoinformatics*. In *19th International Conference on IEEE*, page 1. 28
- [Williams et al., 2006] Williams, D. L., Goward, S., and Arvidson, T. (2006). Landsat. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(10) :1171–1178. 27
- [Wong and Clausi, 2007] Wong, A. and Clausi, D. A. (2007). Arrsi : Automatic registration of remote-sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5) :1483–1493. XXIII
- [Worboys, 2005] Worboys, M. (2005). Event-oriented approaches to geographic phenomena. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(1) :1–28. 39
- [Worboys and Hornsby, 2004] Worboys, M. and Hornsby, K. (2004). From objects to events : Gem, the geospatial event model. In *International Conference on Geographic Information Science*, pages 327–343. Springer. 34, 42, 61
- [Worboys, 1992] Worboys, M. F. (1992). A model for spatio-temporal information. In *Proceedings the 5th International Symposium on Spatial Data Handling, 1992*, volume 2, pages 602–611. x, 38
- [Wu et al., 2015] Wu, Y., Ma, W., Gong, M., Su, L., and Jiao, L. (2015). A novel point-matching algorithm based on fast sample consensus for image registration. *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.*, 12(1) :43–47.
- [Xie et al., 2008] Xie, Y., Sha, Z., and Yu, M. (2008). Remote sensing imagery in vegetation mapping : a review. *Journal of plant ecology*, 1(1) :9–23. 25
- [Young et al., 2017] Young, N. E., Anderson, R. S., Chignell, S. M., Vorster, A. G., Lawrence, R., and Evangelista, P. H. (2017). A survival guide to landsat preprocessing. *Ecology*, 98(4) :920–932. xi, XXII, XXIV, XXV
- [YUAN, 1996] YUAN, M. (1996). Temporal gis and spatio-temporal modelling. In *Proceedings, Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, NM, January 21-26, 1996*. National Center for Geographic Information and Analysis. 37
- [Yuan, 1999] Yuan, M. (1999). Use of a three-domain representation to enhance gis support for complex spatiotemporal queries. *Transactions in GIS*, 3(2) :137–159. 39
- [Zaki et al., 2011] Zaki, R., Zaki, A., and Ahmed, S. (2011). Land use and land cover changes in arid region : The case new urbanized zone, northeast cairo, egypt. *Journal of Geographic Information System*, 3(03) :173. 27, 28
- [Zanter, 2016] Zanter, K. (2016). Landsat 8 (l8) data users handbook. <https://landsat.usgs.gov/landsat-8-l8-data-users-handbook>. [En ligne ; dernier accès le 12 juillet 2017]. 114
- [Zhang and Couloigner, 2004] Zhang, Q. and Couloigner, I. (2004). A framework for road change detection and map updating. *International archives of the Photogrammetry, Remote sensing and Spatial information sciences*, 35(Part B2) :720–734. 16

- [Zhang and Zhu, 2011] Zhang, R. and Zhu, D. (2011). Study of land cover classification based on knowledge rules using high-resolution remote sensing images. *Expert Systems with Applications*, 38(4) :3647–3652.
- [Zhou et al., 2008] Zhou, Q., Li, B., and Kurban, A. (2008). Trajectory analysis of land cover change in arid environment of china. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4) :1093–1107. 16, 28

Liste des Publications

Chapitre de livre (1)

- [CH1] **GHAZOUANI F.**, FARAH I.R., and SOLAIMAN B. *Semantic Remote Sensing Scenes Interpretation and Change Interpretation*. In : *Ontology in Information Science*. InTech, 2018.

Conférences internationales (4)

- [C1] **GHAZOUANI F.**, FARAH I.R., and SOLAIMAN B. *Qualitative semantic spatio-temporal reasoning based on description logics for modeling dynamics of spatio-temporal objects in satellite images*. In : *Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), 2018 4th International Conference on*. IEEE, 2018. p. 1-6.
- [C2] **GHAZOUANI F.**, MESSAOUDI W., and FARAH I.R. *Towards an ontological conceptualization for understanding the dynamics of spatio-temporal objects*. In : *Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), 2016 2nd International Conference on*. IEEE, 2016. p. 543-548.
- [C3] **GHAZOUANI F.**, MESSAOUDI W., et FARAH I.R. *Étude de la dynamique des phénomènes géographiques à travers une modélisation sémantique à base d'ontologie des objets spatio-temporels*. ASD 2016 : 10ème Conférence sur les Avancées des Systèmes Décisionnels, May 2016, Annaba, Algérie. Actes ASD 2016 : 10ème Conférence sur les Avancées des Systèmes Décisionnels, 2016. (hal-01505836)
- [C4] **GHAZOUANI F.**, MESSAOUDI W., and FARAH I.R. *A Multi-level Ontological Approach for Change Monitoring in Remotely Sensed Imagery*. KEOD 2015 : 7th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management, 12-14 november 2015, Lisbonne, Portugal, 2015, pp. 435-440.

Soumis et en révision

- [J1] **GHAZOUANI F.**, FARAH I.R., and SOLAIMAN B. *A multi-levels Semantic Scenes Interpretation (SSI) strategy for change interpretation in remote sensing imagery*. (Soumis au journal : *TGRS: Transactions on Geoscience and Remote Sensing*) (en révision majeure)
- [J2] **GHAZOUANI F.**, FARAH I.R., and SOLAIMAN B. *Qualitative semantic spatio-temporal reasoning based on description logics for modeling dynamics of spatio-temporal objects in satellite images*. (Soumis au journal : *Multimedia Tools and Applications*)

Annexes

Annexes A

Liste des acronymes

- ACP** d'analyse en composantes principales. 21, 23, 25, 27
- ATS** Applications Technology Satellites. IV
- BFO** Basic Formal Ontology. vii, 60–62, 71, 86–91
- CDL** Change Description Language. 41
- DE-9IM** Dimensionally Extended Nine-Intersection Model. 36, 37, 56
- DN** nombre digital –ou *Digital Number*–. 13, VIII, XI
- DOLCE** Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering. vii, 60, 63–65, 71
- EPL** langage de modèle d'événement –ou *Event Pattern Language*–. 43
- ESTDM** Event-Based Spatiot-emporal Data Model. vii, 42, 46
- ETM+** Enhanced ThematicMapper Plus. 22, 29, 30, V, VI, VIII
- FCM** Fuzzy C-Means. XIV
- GFO** General Formal Ontology. 60
- GML** Geography Markup Language. 54
- GOES** Geostationary Operational Environmental Satellite. IV
- HRG** Haute Résolution Géométrique. V
- HRV** Haute Résolution Visible. V
- HRVIR** Haute Résolution Visible et Infra-Rouge. V
- LULC** utilisation/occupation des sols–ou *Land-use/land-cover*–. 15–17, 20–23, 25, 27, 29–31, 68–71, 74
- MSS** Multi Spectral Scanner. 29, 30, V, VI, VIII
- NDSI** indice de sol par différence normalisé –ou *Normalized Difference Soil Index*–. 79

- NDVI** indice de végétation par différence normalisé –ou *Normalized Difference Vegetation Index*–. 21, 28, 29, 72, 79, 80, 82
- NDWI** indice d'eau par différence normalisé –ou *Normalized Difference Water Index*–. 28, 29, 79, 82
- OGC** Open Geospatial Consortium. 37, 56
- OLI** Operational Land Imager. V, VI, VIII
- OPV** Ontologie des Primitives Visuelles. viii, 106, 108, 109
- OWL** Web Ontology Language. 48, 52, 53, 57–59, 62, 69, 74, 82, 92, 130
- RCC8** Region Connection Calculus. 36, 52, 56, 62, 80, 118
- RDF** modèle de description de ressources –ou *Resource Description Framework*–. 52–54, 56, 62, 74, 128, 130
- RDFS** Schéma de modèle de description de ressources –ou *Resource Description Framework Schema*–. 74
- RO** Ontologie des relations –ou *Relations Ontology*–. viii, 61, 62, 90, 91
- SGEO** Sensing Geographic Occurrences Ontology. 64
- SIG** Science de l'Information Géographique –ou *Heographic Information System*–. 26, 28–30, 64, 65, 69, 70
- SOWL** Semantic Web Ontology Language. 59, 60
- SPARQL** SPARQL Protocol and RDF Query Language. viii–x, 53, 54, 56, 139, 145, 149, 150, 152, 155, 156
- SPOT** Système Pour l'Observation de la Terre. 23, 30, 107, V
- STC** Space-Time Composites. 39, 40, 46
- ST-Object** Spatio-temporal Object. 40
- SWRL** langage de règles pour le web sémantique –ou *Semantic Web Rule Language*–. 53, 60, 65, 91, 92, 130, 131
- SWRLTO** SWRL Temporal Ontology. 52, 53, 57, 61, 62, 64, 82
- TIROS** Television Infrared Observation Satellite. IV, VIII
- TM** Thematic Mapper. 22, 23, 29–31, V, VI, VIII
- TMS** Temporal Map Sets. 39
- TOA** réflectance sommet-de-l'atmosphère –ou *top-of-atmospheric reflectance*–. 109, XI
- VEL** Versatile Event Logic. 43
- W3C** Consortium du Web –ou *World Wide Web Consortium*–. 14, 48
- WKT** Well-Known Text. 54

Annexes B

Glossaire

Météosat (Meteosat en anglais) une famille de satellites météorologiques réalisés sous maîtrise d'œuvre de l'Agence spatiale européenne (ESA). [IV](#)

Annexes C

Ontologies

Cette annexe illustre un aperçu général sur les différentes formes d'hétérogénéité entre les ontologies, les techniques d'alignement des ontologies utilisées et présente les différents formalismes et langage utilisés pour représenter les ontologies.

C.1 Formes d'hétérogénéité

Selon [Euzenat and Shvaiko, 2013] les formes d'hétérogénéité entre les ontologies peuvent être classifiées en quatre niveaux, comme suit :

○ *Hétérogénéité syntaxique*

Ce type d'hétérogénéité se produit lorsque deux ontologies ne sont pas exprimées avec le même langage d'ontologie (où chaque langage est basé sur une syntaxe différente) ou bien que ces ontologies sont modélisées en utilisant différents formalismes de représentation de connaissances, par exemples, OWL, F-Logic [Euzenat and Shvaiko, 2013].

○ *Hétérogénéité terminologique*

L'hétérogénéité terminologique est due aux variations des noms référençant la même entité dans différents ontologies. Cela peut être causé par l'utilisation soit des langages naturel différents, par exemple : "papier" et "paper", soit des sous-langages techniques, par exemple "papier" et "mémoire", ou bien l'utilisation des synonymes par exemple, "papier" et "article", pour nommer les entités d'une ontologie (concepts, propriétés, relations, etc.) ([Euzenat and Shvaiko, 2013]).

○ *Hétérogénéité conceptuelle*

Elle est également appelé hétérogénéité sémantique dans [Euzenat, 2001] et le décalage logique dans [Klein, 2001], qui signifie les différences dans la modélisation du même domaine d'intérêt. Cela peut être dû à l'utilisation d'axiomes différents (et parfois équivalents) pour définir des concepts ou bien à l'utilisation de concepts totalement différents, par exemple une géométrie axiomatisée avec des points comme objets primitifs ou une géométrie axiomatisée avec des sphères comme objets primitifs ([Euzenat and Shvaiko, 2013]). Selon [Benerecetti et al., 2001], il existe trois aspects d'hétérogénéité conceptuelle à savoir :

- *La couverture* : deux ontologies peuvent décrire, différentes régions du monde, éventuellement se chevauchant, au même niveau de détail et selon une perspective unique. C'est évidemment le cas pour deux cartes géographiques se chevauchant partiellement. Par exemple, le cas pour deux cartes géographiques qui se chevauchant partiellement ([Euzenat and Shvaiko, 2013]).
- *La granularité* : deux ontologies peuvent décrire la même région du monde d'un même point de vue mais avec des niveaux de détail différents. Cela s'applique aux cartes géographiques à différentes échelles, par exemple, une affiche des bâtiments, tandis qu'une autre représente des villes entières en tant que points [Euzenat and Shvaiko, 2013].
- *La perspective* : deux ontologies peuvent décrire la même région du monde, au même niveau de détail, mais avec une perspective différente. Cela se produit pour des cartes avec des objectifs différents : une carte politique et une carte géologique ne présentent pas les mêmes objets [Euzenat and Shvaiko, 2013].

○ *Hétérogénéité sémiotique*

Elle est appelée aussi hétérogénéité pragmatique [Bouquet et al., 2005], ce type d'hétérogénéité se produit lorsqu'il existe différentes interprétation des entités par différentes personnes. Selon [Euzenat and Shvaiko, 2013], les entités qui ont exactement la même interprétation sémantique sont souvent interprétées par les humains en tenant compte, par exemple, du contexte dans lequel elles sont utilisées. Ce type d'hétérogénéité est difficile à détecter pour l'ordinateur et encore plus difficile à résoudre, car il est hors de portée ([Euzenat and Shvaiko, 2013]).

C.2 Techniques d'alignement des ontologies

Plusieurs techniques d'alignement d'ontologies ont été proposées dans la littérature. Généralement, ces techniques sont divisées en deux grandes familles à savoir : les techniques d'appariement au niveau-élément et les techniques au niveau-structure ([Shvaiko and Euzenat, 2005], [Euzenat and Shvaiko, 2013]). Nous présentons dans la suite les différentes techniques appartenant à chacune de ces deux familles.

□ *Techniques au niveau-élément (Element-level techniques)*

Les techniques au niveau élément considèrent les entités de l'ontologie ou leurs instances indépendamment de leurs relations avec d'autres entités ou leurs instances. Les techniques d'appariement de cette catégorie sont les suivantes :

○ *Les techniques basées sur des chaînes de caractères*

Les techniques basées sur des chaînes de caractères sont souvent utilisées pour faire correspondre les noms et les descriptions de noms des entités d'ontologie. Plus les chaînes sont similaires, plus elles sont susceptibles de désigner les mêmes concepts.

○ *Les techniques linguistiques*

Les techniques linguistiques considèrent les noms comme des mots dans un langage naturel, par exemple l'anglais, le français, etc. Elles sont basées sur des techniques de traitement du langage naturel exploitant les propriétés morphologiques des mots d'entrée. Généralement, elles sont appliquées aux noms d'entités avant d'exécuter des techniques basées sur des chaînes de caractères ou sur des lexiques afin d'améliorer leurs résultats.

○ ***Les techniques basées sur les contraintes***

Les techniques basées sur les contraintes sont des algorithmes qui traitent des contraintes internes appliquées aux définitions des entités, telles que les types, la cardinalité (ou la multiplicité) des attributs et les clés.

○ ***Les ressources linguistiques***

Des ressources linguistiques telles que des lexiques ou des thésaurus spécifiques à un domaine sont utilisées pour faire correspondre les mots (dans ce cas, les noms des entités ontologiques sont considérés comme des mots d'un langage naturel) en fonction des relations linguistiques entre eux.

○ ***La réutilisation d'alignement***

Les techniques de réutilisation des alignements représentent un autre moyen d'exploiter des ressources externes, qui enregistrent des alignements d'ontologies précédemment appariées. Par exemple, lorsque nous devons faire correspondre l'ontologie O_1 et O_2 , étant donné les alignements entre O et O_1 , et entre O et O_2 disponibles à partir de la ressource externe.

○ ***Ontologies de haut-niveau et ontologies formelles de domaine***

Des ontologies de haut-niveau, comme Cyc [Lenat and Guha, 1990], SUMO [Niles and Pease, 2001], DOLCE [Gangemi et al., 2003] et BFO [Grenon et al., 2004], peuvent être également utilisées comme sources externes de connaissances communes. La principale caractéristique de ces ontologies est qu'elles sont des systèmes basés sur la logique et par conséquent, les techniques d'application qui les exploitent sont basées sur la sémantique ([Euzenat and Shvaiko, 2013]).

Les ontologies formelles spécifiques à un domaine peuvent également être utilisées comme sources externes de connaissances de base. De telles ontologies se concentrent sur un domaine particulier et utilisent des termes dans un sens qui n'est pertinent que pour ce domaine et qui n'est pas lié à des concepts similaires dans d'autres domaines. Par exemple, [Aleksovski et al., 2006] ont utilisé une troisième ontologie, dites "ontologie support", pour aligner deux autres ontologies dans le domaine médical.

□ ***Techniques au niveau-structure (Structure-level techniques)***

Contrairement aux techniques au niveau-élément, les techniques au niveau-structure considèrent les entités d'ontologie ou leurs instances pour comparer leurs relations avec d'autres entités ou leurs instances ([Euzenat and Shvaiko, 2013]). Nous décrivons dans la suite l'ensemble des techniques appartenant à cette famille.

○ ***Les techniques basées sur des graphes***

Les techniques basées sur des graphes sont des algorithmes de graphe qui considèrent les ontologies d'entrée comme des graphes étiquetés. Les ontologies (y compris les schémas de base de données et les taxonomies) sont considérées comme des structures de graphique étiquetées. Généralement, la comparaison de similarité est basée sur l'analyse des positions des nœuds dans les graphiques. L'intuition derrière ceci est que, si deux nœuds de deux ontologies sont similaires, leurs voisins doivent aussi être similaires. ([Euzenat and Shvaiko, 2013])

○ ***Les techniques basées sur la taxonomie***

Les techniques basées sur la taxonomie sont également des algorithmes de graphe qui ne prennent en compte que la relation de spécialisation. L'intuition des techniques taxonomiques est que les liens "is-a" connectent des termes qui sont déjà similaires (interprétés comme un sous-ensemble ou un sur-ensemble l'un de l'autre), donc leurs voisins peuvent aussi être similaires.

○ ***Les techniques basées sur des modèles***

Les algorithmes basés sur le modèle (ou bien établis sémantiquement) traitent l'entrée en fonction de son interprétation sémantique, par exemple, la sémantique du modèle théorique. L'intuition est que si deux entités sont identiques, elles partagent les mêmes interprétations. Ce sont donc des méthodes déductives bien établies. Les exemples sont les techniques de raisonnement de la satisfiabilité propositionnelle et les logiques de description.

○ ***Les techniques d'analyse de données et de statistiques***

Les techniques d'analyse des données et statistiques sont celles qui tirent parti d'un échantillon représentatif (si possible important) d'une population pour trouver des régularités et des divergences. Cela aide à regrouper des éléments ou à calculer des distances entre eux.

C.3 Ontologies et base de connaissances

C.3.1 Base de connaissances

Les ontologies constituent un moyen efficace pour la création, la conservation et la réutilisation des bases de connaissances. Une base de connaissance permet donc de grouper un ensemble de connaissance spécifique à un domaine donné. En plus, l'intégration d'un ensemble de règles dans une base de connaissances augmente sa capacité, à travers un moteur de raisonnement, d'inférer des nouvelles connaissances. Les logiques de description jouent un rôle important pour la création des base de connaissances. Une base de connaissances \mathcal{K} , en logique de description, est souvent divisée en deux parties, une partie terminologique appelée appelée TBox, noté par \mathcal{T} et une partie assertionnelle dite ABox, noté par \mathcal{A} ([Staab and Studer, 2013], [Baader et al.,]) (voir la formule (C.1)).

$$\mathcal{K} = \langle \mathcal{T}, \mathcal{A} \rangle \tag{C.1}$$

La composante *TBox* représente la terminologie qui définit les concepts pertinents du do-

maine et leurs propriétés. Chaque concept est représenté soit par l'axiome ($C \sqsubseteq D$), ce qui signifie qu'une instance de la classe C appartient également à la classe D, soit par l'axiome ($C \equiv D$) qui indique l'équivalence des deux concepts, c'est-à-dire que toute instance de la classe C appartient également à la classe D et que toute instance de la classe D appartient également à la classe C. Par exemple, nous pouvons utiliser ces deux axiomes pour définir un concept complexe, par exemple, un objet de végétation tel que décrit dans les équations (C.2) et (C.3).

$$Vegetation_object \sqsubseteq non_mineral_object \quad (C.2)$$

$$Vegetation_object \equiv Objet \quad (C.3)$$

$$\begin{aligned} & \sqcap \exists hasValue(Feature \\ & \sqcap ofCharacteristic.ndvi \\ & \sqcap \exists Mean\{\geq 0, 3\} \sqcap \exists Mean\{\leq 0, 8\}) \end{aligned}$$

La composante *ABox* représente les individus apparaissant dans le domaine. Ces individus sont décrits en utilisant la terminologie *TBox*. *ABox* permet de définir les individus en spécifiant leurs noms, les concepts auxquels ils appartiennent et leurs relations avec d'autres individus. L'instanciation d'un concept est définie par « $C(a)$ », où « C » est un concept et « a » est l'instance de ce concept. L'instanciation d'une relation est définie par « $R(a, b)$ », où « a » et « b » sont deux instances liées par la relation « R ». Par exemple, l'équation (C.4) définit la rivière de Majerda (*MajerdaRiver*) comme instance du concept rivière (*River*) et l'équation (C.5) définit la forêt de Jendouba (*ForestJendouba*) comme instance du concept forêt (*Forest*). Nous utilisons aussi l'équation (C.6) pour décrire une instance de la relation binaire adjacent "*Adjacent*", définissant la relation entre l'instance « rivière de Majerda » et l'instance « forêt de Jendouba ».

$$River(MajerdaRiver) \quad (C.4)$$

$$Forest(ForestJendouba) \quad (C.5)$$

$$Adjacent(MajerdaRiver, ForestJendouba) \quad (C.6)$$

En résumé, la terminologie *TBox* (\mathcal{T}) et l'ensemble d'individus *ABox* (\mathcal{A}) permettent de définir une base de connaissances. La figure C.1 illustre le schéma général d'une base de connaissances [bader 2003]. Cette figure montre bien qu'une base de connaissance se base le langage de logique de description pour formaliser les concepts et les relations décrivant les deux composantes de base (*TBox* et *ABox*). Aussi, comme nous avons mentionner, la capacité de supporter des mécanismes de raisonnement est une autre spécification des bases de connaissances. Cela offre la possibilité de déduire d'autres connaissances à partir de celles définies dans la base de connaissance ou bien en fonction d'un ensemble de règles mit en question. Dans ce cadre, nous nous sommes orienté à utiliser la logique de description comme support de représentations de base de connais-

sances¹.

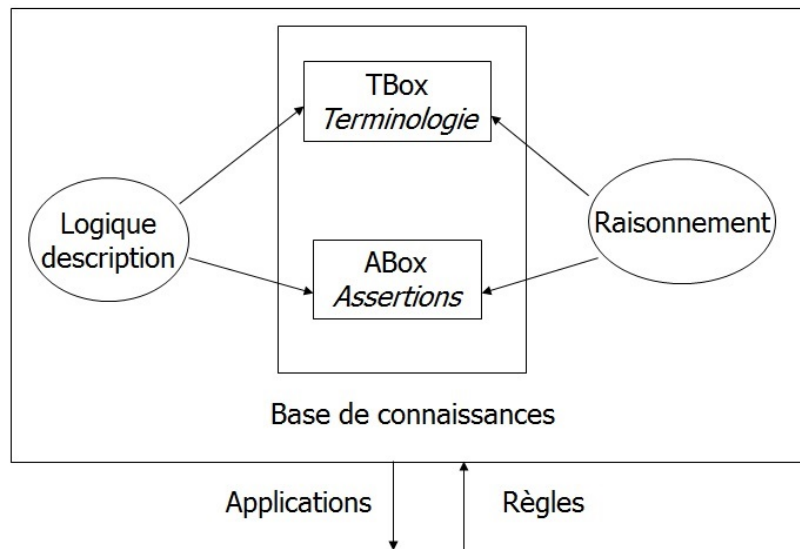


FIGURE C.1 – Schéma général d'une base de connaissances [Baader et al.,]

C.3.2 Logiques de description

Les logiques de description (DLs) [Baader et al.,], sont une famille de formalismes terminologiques avec une sémantique de logique formelle et sont conçues pour représenter et de raisonner sur ces connaissances d'un domaine d'application de manière structurée et bien comprise. Les logiques de description, en tant que fragment décidable de la logique du premier ordre (FOL) (également connu avec le nom de calcul du prédicat de premier ordre (FOPC)), fournissent plus d'expressivité que d'autres langages tels que la logique propositionnelle et l'algèbre relationnelle. Elles sont basées sur une famille commune de langages, qui fournissent un ensemble de constructeurs pour construire des descriptions de concept (classe) et de rôle (propriété). Ces descriptions peuvent être utilisées dans les axiomes et les assertions des bases de connaissances de logiques de description et peuvent être raisonnées sur eux, par rapport aux bases de connaissances de logique de description, par des systèmes de logique de description.

C.3.2.1 Langages de description

Les bases des langages de description sont des descriptions de concept et le rôle. Intuitivement, un concept représente une classe d'objets partageant certaines caractéristiques communes, tandis que le rôle représente une relation binaire entre des objets ou entre des objets et des valeurs de données. Un langage de description se compose des concepts atomiques noté par les lettres (A et B), des rôles atomiques (R) et des descriptions de concepts notés par les lettres C et D; avec un ensemble de constructeurs pour construire les descriptions de concepts et des rôles. Selon [Schmidt-Schauß and Smolka, 1991], les langages de description sont distingués par rapport aux constructeurs qu'ils fournissent. Le langage \mathcal{AL} a été introduit par [Schmidt-Schauß and Smolka,

1. Dans ce mémoire, les termes "base de connaissances" et "ontologie" sont utilisés comme des synonymes

1991] comme un langage minimal ayant un intérêt pratique, après l'ajout de la négation atomique à la logique \mathcal{FL} (F-Logic). Les autres langages de cette famille sont des extensions de \mathcal{AL} . Chaque constructeur supplémentaire est associé à une lettre majuscule spéciale (par exemple, \mathcal{C} pour la négation générale et \mathcal{U} pour la disjonction). Le tableau C.2 illustre un résumé des constructeurs présents dans \mathcal{AL} . Les descriptions de concepts dans le langage \mathcal{AL} sont générées selon la règle syntaxique (C.7), comme suit :

$$C ::= \top \mid \perp \mid A \mid \neg C \mid C \sqcap D \mid C \sqcup D \mid \exists R.C \mid \forall R.C \quad (\text{C.7})$$

Constructeur	Syntaxe DL
Concept atomique	A
Rôle atomique	R
Individu	<i>a</i>
Concept universel	\top
Concept vide	\perp
Négation atomique	$\neg A$
Conjonction	$C \sqcap D$
Quantification universelle	$\forall R.C$
Quantification existentielle limitée	$\exists R.C$

TABLEAU C.1 – Les constructeurs du langage \mathcal{AL}

C.3.2.2 Famille des langages \mathcal{AL}

D'autres langages peuvent être rendus plus expressives en ajoutant de nouveaux constructeurs au langage \mathcal{AL} . Par exemples, la logique \mathcal{ALC} est construite en ajoutant la négation complète ($\neg A$), la logique \mathcal{ALU} est construite en ajoutant le constructeur de disjonction ($C \sqcup D$) et ainsi de suite. Dans les logiques de descriptions modernes, le langage \mathcal{S} est souvent utilisé comme langage minimal, appelé auparavant $\mathcal{ALC}_{\mathcal{R}^+}$. Les langues de la famille \mathcal{S} bien connues sont \mathcal{ST} [Horrocks et al., 1998], \mathcal{SH} , \mathcal{SHI} [Horrocks and Patel-Schneider, 1998], \mathcal{SHF} [Horrocks, 1999], \mathcal{SHIQ} [Horrocks and Sattler, 2002] et $\mathcal{SHOIQ}(\mathcal{D})$ [Horrocks and Sattler, 2001],² etc. Le tableau illustre les différents constructeurs possibles pour la famille des langages \mathcal{AL} ainsi que la lettre associée à chaque constructeur. La lettre \mathcal{U} ajoute introduit la négation complète, \mathcal{R}^+ permet de définir la transitivité des rôles et la disjonction est introduite par \mathcal{C} . La lettre \mathcal{F} donne la possibilité de définir de rôles fonctionnels. Avec le fragment \mathcal{N} , nous pouvons définir la restriction des cardinalités sur les rôles et qu'avec le fragment \mathcal{Q} la restriction qualifiée est définie. La lettre \mathcal{O} indique la possibilité d'utiliser les énumérations, les hiérarchies de rôles atomiques sont rendues possible par le fragment \mathcal{F} , les hiérarchies de rôles non-atomiques quant, quant à elles, sont introduites par le fragment \mathcal{R} . Enfin, le fragment \mathcal{I} indique la possibilité d'inverser des rôles.

2. \mathcal{SHF} , \mathcal{SHIQ} et $\mathcal{SHOQ}(\mathcal{D})$ se prononcent respectivement "chef", "shick" et "shock D".

Lettre	Constructeur	Syntaxe DL
\mathcal{C}	Négation complète	$\neg C$
\mathcal{U}	Disjonction	$C \sqcup D$
\mathcal{E}	Quantification existentielle complète	$\exists R.C$
\mathcal{R}^+	Transitivité des rôles	R^+
\mathcal{F}	Fonctionnalité	$\leq 1R$
\mathcal{N}	Restriction de cardinalité	$\leq nR; \geq nR$
\mathcal{Q}	Restriction de cardinalité qualifiée	$\leq nR.C; \geq nR.C$
\mathcal{O}	Énumération	$\{a_1 \dots a_2\}$
\mathcal{H}	Hiérarchie de rôles atomiques	$R1 \sqsubseteq R2$
\mathcal{R}	Hiérarchie de rôles non-atomiques	$R1 \sqsubseteq R2$
\mathcal{I}	Inversion de rôles	R^{-1}

TABLEAU C.2 – Les constructeurs possibles en DL et leurs lettres

C.3.2.3 Sémantique des logiques de description

Les logiques de description ont une sémantique théorique de modèle, définie en termes d'interprétation. Une interprétation \mathcal{I} est essentiellement se compose par un domaine $\Delta^{\mathcal{I}}$ et une fonction d'interprétation $\cdot^{\mathcal{I}}$, soit $\mathcal{I} = (\Delta^{\mathcal{I}}, \cdot^{\mathcal{I}})$, où un domaine est un ensemble non vide d'individus (objets) et la fonction d'interprétation fait correspondre chaque individu a à un élément $a^{\mathcal{I}} \in \Delta^{\mathcal{I}}$, chaque concept $A \in \mathcal{C}$ à un sous-ensemble $A^{\mathcal{I}} \sqsubseteq \Delta^{\mathcal{I}}$ et chaque rôle $r \in \mathcal{R}$ à un sous-ensemble $r^{\mathcal{I}} \sqsubseteq \Delta^{\mathcal{I}} \times \Delta^{\mathcal{I}}$. En notation mathématique, elle est définie comme suit :

$$\begin{aligned}
\top^{\mathcal{I}} &= \Delta^{\mathcal{I}} \\
\perp^{\mathcal{I}} &= \emptyset \\
(C \sqcap D)^{\mathcal{I}} &= C^{\mathcal{I}} \sqcap D^{\mathcal{I}} \\
(C \sqcup D)^{\mathcal{I}} &= C^{\mathcal{I}} \sqcup D^{\mathcal{I}} \\
\neg C &= \Delta^{\mathcal{I}} - C^{\mathcal{I}} \\
(\forall R.C)^{\mathcal{I}} &= \{x \in \Delta^{\mathcal{I}} / \forall y : (x, y) \in r^{\mathcal{I}} \rightarrow y \in C^{\mathcal{I}}(y)\} \\
(\exists R.C)^{\mathcal{I}} &= \{x \in \Delta^{\mathcal{I}} / \forall y : (x, y) \in r^{\mathcal{I}} \wedge y \in C^{\mathcal{I}}(y)\}
\end{aligned} \tag{C.8}$$

C.3.3 Logiques de description et domaines concrets

Une limitation majeure de nombreuses logiques de description est que les types de données (tels que les nombres entiers et les chaînes), les valeurs de données et les prédicats de types de données ne peuvent pas être représentés de manière adéquate. Sans eux, nous devons utiliser des concepts pour représenter les contraintes de type de données. Par exemple, pour décrire un segment de végétation de valeur d'indice de végétation (NDVI) supérieur à 0.2, nous devons utiliser des concepts comme "NDVIsupérieur0.2" (C.9).

$$segment \sqcap NDVIsupérieur0.2 \tag{C.9}$$

Cependant, cela n'est satisfaisant du tout, car il ne décrit pas vraiment ce que nous voulions dire. Pour palier ce problème, [Baader and Hanschke, 1991] ont présentés un traitement rigoureux des prédicats de types de données dans des « domaines concrets ».

C.3.3.1 Les domaines concrets

Un domaine concret est défini par un ensemble d'éléments concrets, tels que les nombres, les chaînes de caractères et en particulier les objets spatiaux et temporels ([Lutz, 2004]), et un ensemble de prédicats, tels que les relations d'ordre " $<, >$ ", définis sur l'ensemble des éléments concrets. D'après [Lutz, 2004], un domaine concret \mathcal{D} consiste d'une paire $(\Delta_{\mathcal{D}}, \Phi_{\mathcal{D}})$, où $\Delta_{\mathcal{D}}$ est le domaine de \mathcal{D} et $\Phi_{\mathcal{D}}$ est un ensemble de prédicats. Chaque prédicat p est associé avec une arité n et un prédicat n -aire $p^{\mathcal{D}} \subseteq \Delta_{\mathcal{D}}^n$.³ Exemples de domaines concrets, le domaine concret numérique, le domaine concret spatial et le domaine concret temporel. Par exemple le domaine concret numérique est défini comme dans (C.10).

$$\mathcal{N} = (\Delta_{\mathcal{N}}, \Phi_{\mathcal{N}}) \quad (\text{C.10})$$

où $\Delta_{\mathcal{N}}$ est l'ensemble des entiers positifs (non-négatifs) et $\Phi_{\mathcal{N}} := \{\geq, \geq_n\}$

C.3.3.2 La logique de description $\mathcal{ALC}(\mathcal{D})$

La logique de description $\mathcal{ALC}(\mathcal{D})$ est une extension de la logique de description \mathcal{ALC} en introduisant de nouveaux types de données (ou primitives), tels que des nombres entiers ou rationnels, ou pour traiter des dimensions spécifiques d'objets tels que des primitives spatiales ou temporelles et des prédicats de restrictions existentielles. En effet, [Baader and Hanschke, 1991] ont montré que nous pouvons intégrer un domaine concret admissible arbitraire \mathcal{D} en \mathcal{ALC} et de donner la logique de description $\mathcal{ALC}(\mathcal{D})$, avec le domaine abstrait $(\Delta^{\mathcal{I}})$ étant disjoint avec le domaine de \mathcal{D} ($\Delta_{\mathcal{D}}$). La combinaison d'un domaine concret avec des logiques de description est obtenue en ajoutant des constructeurs et des primitives liés au type de données, ou des rôles fonctionnels, dans les langages de description, et en permettant ainsi l'utilisation de prédicats définis dans le domaine concret avec ces constructeurs et primitives. Par exemple, le segment de végétation de valeur d'indice de végétation (NDVI) supérieur à 0.2, peut être maintenant décrit par le concept (C.11).

$$\text{segment} \sqcap \exists \text{NDVI} . >_{0.2} \quad (\text{C.11})$$

Où NDVI est une primitive, $>_{0.2}$ est un prédicat d'entier unaire et $\exists \text{NDVI} . >_{0.2}$ est une application du constructeur lié au type de données appelé prédicat de restriction existentielle.

3. Notez que \geq est un prédicat binaire et \geq_n est un prédicat unaire

C.4 Le langage de représentation des ontologies

Le langage OWL (Web Ontology Language) est un langage de représentation sémantique recommandé par le W3C qui s'appuie sur les logiques de description. Ce langage a été né au sein du Web Sémantique et qui a été utilisé comme standard de représentation, publication et de partage des ontologies. D'après [Grosz et al., 2003], le Web Sémantique en tant qu'une technologie guidée par le W3C permet « la représentation de connaissance qui rencontre le Web ». Le Web Sémantique illustre une liste de technologies sous forme d'une architecture appelée « Pyramide du Web Sémantique » (en anglais, *Semantic Web Stack*) ([Shadbolt et al., 2006]). Les standards qui seront utilisés dans les différentes couches de cette architecture sont recommandés par le W3C. La figure illustre une représentation de l'architecture du Web Sémantique. Une brève définition pour chaque brique de l'architecture sera présentée. OWL, RDF, SPARQL et SWRL seront présentés avec plus de détails dans la suite.

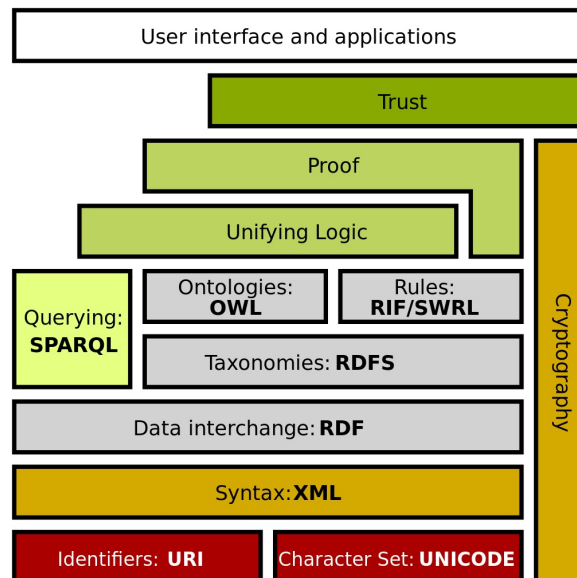


FIGURE C.2 – Architecture générale du Web Sémantique (Semantic web stack) [Shadbolt et al., 2006]

- **URI** (Uniform Resource Identifier) (Uniform Resource Identifier, soit littéralement identifiant uniforme de ressource) ([Berners-Lee, 1994]) permet d'identifier précisément chaque ressource du Web sémantique.
- **UNICODE** permet au Web sémantique de relier différents documents entre eux même s'ils sont écrits avec différents langages.
- **XML** (eXtensible Markup Language) ou Langage de balisage extensible en Français [Bray et al., 2008] est un métalangage informatique qui permet la création de documents composés de données structurées, mais il ne décrit pas la sémantique du document.
- **RDF** (Resource Description Framework) ([Burgos, 2011]) est un modèle de graphe standard qui est destiné à décrire de façon formelle les ressources Web et leurs métadonnées. C'est le langage de base du Web Sémantique et qui peut être représenté avec plusieurs syntaxes (ou sérialisations) à savoir le langage RDF/XML, N3 (Notation3), Turtle, etc.
- **RDFS** (RDF Schema) ([Burgos, 2011]) : est un langage de représentation de connaissances

qui étend le RDF tout en fournissant les éléments de base (classes et propriétés) nécessaires pour la définition des ontologies. Il offre une expressivité nécessaire pour l'élaboration des vocabulaires destinés à structurer des ressources RDF. Ces ressources pouvant être stockées dans des « triplestores » et manipulés à l'aide des requêtes SPARQL.

- ✦ **OWL** (Web Ontology Language) ([Burgos, 2011]) : ce langage apporte plus d'expressivité au langage RDFS. Cela signifie que ce langage ajoute plus de vocabulaires pour décrire les éléments d'une ontologie. Les relations entre les classes, la cardinalité, l'égalité, les caractéristiques de propriétés, etc. peuvent être exprimés avec le langage OWL. En plus, le langage OWL offre la possibilité d'effectuer des raisonnements.
- ✦ **SPARQL** ([Burgos, 2011]) : est le langage de requête pour RDF. Grâce à ce langage, nous pouvons effectuer des recherches, d'ajout, de modification et de suppression des données RDF.
- ✦ **RIF ou SWRL** (Rule Interchange Format) (Semantic Web Rule Language) ([Boley and Kifer, 2010]) : sont les langages d'expression de règles pour le web sémantique, qui autorisent la description de relations ne pouvant pas être décrites directement à l'aide de OWL. SWRL combine le langage OWL-DL et le langage RuleML (Rule Markup Language (Unary/Binary Datalog)).
- ✦ **logique d'unification** (Unifying Logic) : c'est un standard qui permet le raisonnement logique tout en permettant l'inférence des nouveaux faits et la vérification de la consistance des données (notamment des ontologies). En plus, il permet de rassembler des langages d'ontologies et de règles.
- ✦ **Preuve (Proof)** : donne une explication des résultats de l'inférence et la provenance des données. Elle s'appuie sur une logique formelle pour détecter de nouvelles inférences.
- ✦ **Cryptographie (Cryptography)** : protège les données RDF via le cryptage. Elle utilise une signature digitale pour vérifier la provenance des données et en valider la source de confiance des faits.
- ✦ **(Confiance (Trust))** elle permet l'authentification des sources et la fiabilité des faits dérivés. La couche Confiance s'appuiera sur les couches « Preuve » et « Cryptographie » pour déterminer la confiance des données récupérées.

C.4.1 Le langage RDF

RDF (Resource Description Framework) ou encore le cadre de description de ressources [Consortium et al., 2014] est un langage basé sur XML utilisé pour décrire des ressources dans un certain domaine et créer des relations entre elles utilisées pour représenter des informations sur le Web. RDF a été publié comme une recommandation du W3C en 1999 et il a été initialement présenté comme un modèle de données pour les métadonnées. *Ressource* signifie tout ce qui peut avoir un identifiant unique, c-à-d, un URI (Uniform Resource Identifier). Le terme *Description* indique les attributs, les caractéristiques et les relations des ressources. Le terme Cadre représente le modèle, les langages et les syntaxes utilisés pour ces descriptions. En RDF, les données sont représentées sous la forme d'un graphe-orienté étiqueté. Un graphe RDF est un ensemble de triplets, de la forme $\langle \text{sujet}, \text{prédicat}, \text{objet} \rangle$. Le *sujet* est une ressource qui peut être identifiée par un URI. Le

prédicat est une spécification réutilisée et identifiée par l'URI de la relation. Enfin l'objet représente une ressource ou une constante à laquelle le sujet est lié. Il est à noter que l'URI pour le sujet et pour le prédicat doit être un identifiant unique, et non littéral, mais l'objet peut être un URI ou un littéral.

La figure C.3 montre un exemple de triplet RDF décrivant un segment de végétation. Ce segment est vu comme une source (sujet) identifiée par l'URI *VPO:VegetationSegment* et décrit par le prédicat *VPO:hasNDVI* et l'objet *0.3*.

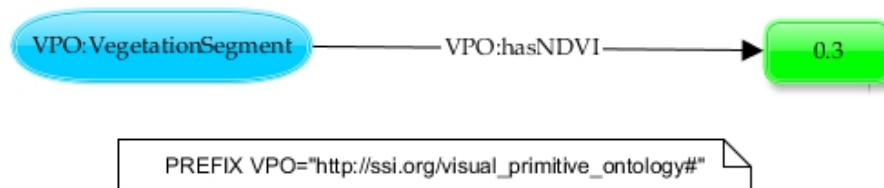


FIGURE C.3 – Exemple de triplet RDF

L'utilisation d'un vocabulaire qui possède les URIs pour nommer toutes les ressources de l'ensemble données, est un point fort du langage RDF. Comme nous avons introduire, RDF est un langage basé sur XML, ce qui signifie que RDF est capable d'échanger des informations entre d'autres applications basées sur XML. Ces spécifications rendent ce système prêt pour une extensibilité future. Par conséquent, cette performance permet de représenter n'importe quelle ressource et son état, bien que le résultat puisse ne pas être compatible avec le monde réel, ainsi, par exemple, de mauvaises contraintes pourraient être établies [Burgos, 2011].

C.4.2 Le langage OWL

Le langage OWL (Web Ontology Language) consiste en une suite de recommandations de W3C et il est devenue standard à partir de 4 Février 2004 [McGuinness et al., 2004]. C'est le langage de définitions et de partage des ontologies dans le Web. OWL est un langage aussi basé sur XML puisque OWL est une extension de RDF. Par exemple, OWL est très utile pour créer des ontologies universitaires, industrielles, médicales, etc., afin de faciliter l'accès aux données renvoyées vers ces domaines de connaissances. Le langage OWL facilite une plus grande interprétabilité du contenu Web par les machines que celle prise en charge par XML, RDF et RDFS en fournissant un vocabulaire supplémentaire avec une sémantique formelle [McGuinness et al., 2004]. La figure C.4 montre comment l'exemple de la figure C.3 (triplet RDF) est enrichi avec d'autre concept. L'ensemble de caractéristiques offertes par le langage OWL sont :

- ✓ Une collection d'opérateurs expressifs pour la description de concepts, y compris les opérateurs booléens (intersection, union et complément), ainsi que des quantificateurs explicites pour les propriétés et les relations.
- ✓ La possibilité de spécifier des caractéristiques de propriétés, telles que la transitivité ou les domaines et les ranges;

- ✓ Une sémantique bien définie facilitant l'utilisation de l'inférence et du raisonnement automatisé.
- ✓ L'utilisation des URI pour nommer les concepts et les ontologies ;
- ✓ Un mécanisme pour importer des ontologies externes ;
- ✓ Une compatibilité avec l'architecture du W3C, en particulier d'autres langages de représentation tels que RDF et RDFS.

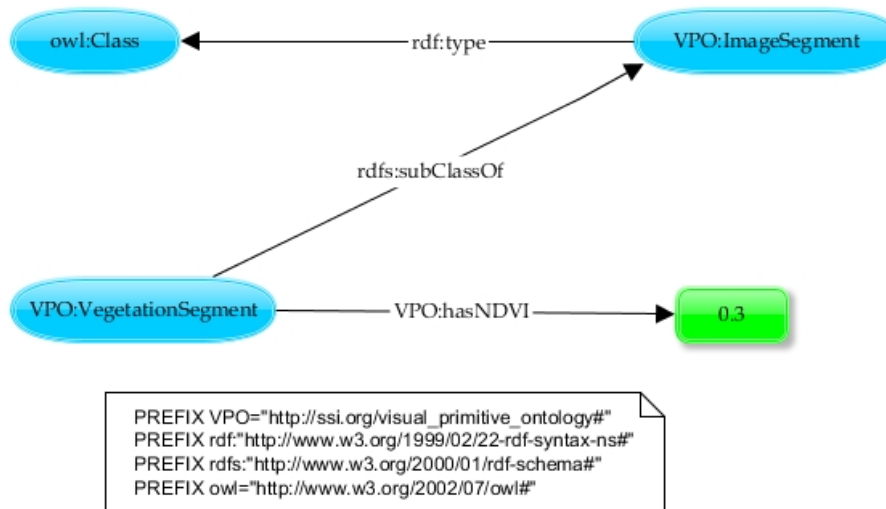


FIGURE C.4 – Un exemple d'extension de triplet RDF

OWL se base sur RDF et RDFS, mais il ajoute plus de vocabulaire pour décrire les propriétés et les classes et il offre une syntaxe plus forte que RDF et RDFS. En outre, OWL fournit aux utilisateurs trois sous-langages (*OWL full*, *OWL DL*, *OWL Lite*) qui répondent à des exigences différentes selon les souhaits du concepteur. OWL Full est essentiellement RDF étendu avec un vocabulaire supplémentaire, sans aucune restriction sur la manière dont ce vocabulaire est utilisé. Selon [Burgos, 2011], *OWL full* peut être utilisé par quiconque a besoin de sa caractéristique principale : la liberté d'utiliser l'ensemble du spectre du langage OWL, mais, d'autre part, l'exhaustivité informatique n'est pas assurée. *OWL DL* (Description Logics) impose des restrictions sur la manière dont le vocabulaire peut être utilisé afin de définir un langage pour lequel un certain nombre de tâches de raisonnement clés (par exemple, la satisfiabilité ou la subsumption de concept) sont décidables. De plus, lorsque l'expressivité maximale est requise, OWL DL peut être utilisé. Il assure le calcul de toutes les conclusions dans une période de temps limitée. OWL Lite restreint davantage l'expressivité autorisée - par exemple, l'union explicite ou le complément sont interdits dans OWL Lite. Ce langage est généralement utilisé pour des classifications et des contraintes simples grâce à sa simplicité, par exemple, traduire de une taxonomie en thésaurus, où une taxonomie et un thésaurus sont deux sortes d'ontologies qui sont vraiment étendues [Burgos, 2011]. OWL DL et OWL Lite ont une sémantique théorique de modèle qui correspond à une logique de description [Baader et al.,] et facilitent ainsi l'utilisation de raisonneurs DL pour fournir un support de raisonnement au langage [Horrocks et al., 2003].

À partir de 27 Octobre 2009, OWL 2, une version étendue de OWL, est maintenant plus adopté. C'est un langage d'ontologie pour le Web sémantique étendu à partir de OWL 1 et enrichi par

de nouvelles fonctionnalités. La logique de description sous-jacente d'OWL 2 est $SR\mathcal{OIQ}(\mathcal{D})$. OWL 2 est supporté par plusieurs raisonneurs sémantiques tels que RacerPro2, Pellet, Hermit et FaCT++. OWL 2 fournit aussi trois profils [Motik et al., 2009] à savoir OWL EL, OWL QL et OWL RL. OWL 2 EL autorise des axiomes de sous-classe avec intersection, existentielle, mais n'autorise pas la négation, la disjonction, la quantification universelle arbitraire et les inverses de rôle. OWL 2 QL autorise les instructions de sous-propriétés, de domaine, de range et de sous-classe mais il n'autorise pas les classes fermées. OWL 2 RL autorise tous les types d'axiomes, les restrictions de cardinalité (seulement ≤ 1 et ≤ 0 à droite) et les classes fermées avec un seul membre. Par contre, il interdit certains constructeurs (universels et la négation sur le côté gauche et extensionnels et l'union sur le côté droit des instructions de sous-classe).

C.4.3 SPARQL : un langage d'interrogation des données

Un langage de requête est un ensemble de primitives et de commandes pouvant exécuter des directives pour extraire des informations du Web sémantique. Ces informations sont sous forme de données et qui peuvent être stockés sur des documents, des bases de données ou des fichiers RDF. SPARQL est le langage standard utilisé pour interroger les données de graphes représentés par des triplets RDF et en retourner un résultat. Son nom est un acronyme récursif signifiant **SPARQL Protocol** et **RDF Query Language**. Il a été normalisé par le groupe de travail sur l'accès aux données (Data Access Working Group : DAWG) RDF du W3C et il est considéré comme une technologie web sémantique clé. Le 15 janvier 2008, SPARQL est devenue une recommandation officielle du W3C. Une requête SPARQL est peut être composée de motifs triplets (sujet, prédicat et objet), de conjonctions, de disjonctions et de motifs optionnels [Perry and Herring, 2012]. Les requêtes SPARQL fonctionnent sur des représentations RDF de données en recherchant des motifs qui correspondent aux motifs de la requête, permettant ainsi de trouver des graphes d'informations dans les données RDF en fonction des motifs et des filtres (contraintes sur les nœuds et les arcs) exprimés dans la requête. Ce modèle de requête est représenté dans la requête SPARQL par un ensemble de "variables de requête" paramétrées apparaissant dans une séquence de triplets et de filtres RDF. Si le processeur de requêtes trouve un ensemble de triplets dans les données, les valeurs que les "variables de requête" prennent dans ces triplets deviennent une solution à la requête. Les valeurs des variables sont renvoyées dans le résultat de la requête dans un format basé sur la clause "SELECT" de la requête [Perry and Herring, 2012]. La figure C.5 illustre un exemple de requête SPARQL ainsi que le résultat retourné par cette requête.

C.4.4 SWRL : un langage de règles

Le langage de règles du Web sémantique (SWRL : Semantic Web Rule Language) a été conçu pour être le langage de règles du Web sémantique [Horrocks et al., 2004], qui peut être combiné avec une base de connaissances OWL. Ce langage a été présenté en mai 2004 au W3C. SWRL est basé sur une combinaison des sous-langages OWL DL et OWL Lite du langage d'ontologie Web OWL avec les sous-langages RuleML Unalog/Binary Datalog du langage de balisage de règle (Rule Markup Language). SWRL permet aux utilisateurs d'écrire des règles de type Horn expri-

Requête SPARQL :

```

PREFIX foaf: <http://xmlns.com/foaf/0.1/>
SELECT ?name ?mbox
WHERE
  { ?x foaf:name ?name .
    ?x foaf:mbox ?mbox }

```

Résultat :

name	mbox
"Johnny Lee Outlaw"	<mailto:jlow@example.com>
"Peter Goodguy"	<mailto:peter@example.org>

FIGURE C.5 – Exemple de requête SPARQL

mées en termes de concepts OWL pour raisonner sur les individus OWL. Les règles peuvent être utilisées pour déduire de nouvelles connaissances à partir des bases de connaissances OWL existantes [O’connor et al., 2005]. Selon [O’connor et al., 2005], la spécification SWRL n’impose pas de restrictions sur la façon dont le raisonnement doit être effectué avec les règles SWRL. Ainsi, les enquêteurs sont libres d’utiliser divers moteurs de règles pour raisonner avec les règles SWRL stockées dans une base de connaissances OWL. Ils sont également libres d’implémenter leurs propres outils d’édition pour créer des règles SWRL. De cette manière, SWRL fournit un point de départ pratique pour intégrer des systèmes de règles au Web sémantique.

Les règles SWRL sont écrites sous forme d’implication entre un antécédent et un conséquent comme montré dans (C.12). Le sens voulu peut être lu comme suit : chaque fois que les conditions spécifiées dans l’antécédent sont valides, les conditions spécifiées dans le conséquent doivent également être conservées. Dans la terminologie SWRL, l’antécédent est appelé le corps de règle et la conséquence est appelée la tête. La tête et le corps se composent d’une conjonction d’un ou de plusieurs atomes. À l’heure actuelle, SWRL ne supporte pas les combinaisons logiques plus complexes d’atomes ([O’connor et al., 2005]). Un atome est une expression de la forme $p(arg_1, arg_2, \dots, arg_n)$, où p est un symbole de prédicat (qui peut être des classes, des propriétés ou des types de données OWL) et $p(arg_1, arg_2, \dots, arg_n)$ représentent des arguments de l’expression qui peuvent être des individus OWL ou des valeurs de données, ou des variables qui s’y réfèrent. Un exemple d’une règle SWRL est montré dans (C.13).

$$\text{ANTECÉDENT} \rightarrow \text{CONSÉQUENT} \quad (\text{C.12})$$

$$\text{hasParent}(?x1,?x2) \wedge \text{hasBrother}(?x2,?x3) \rightarrow \text{hasUncle}(?x1,?x3) \quad (\text{C.13})$$

Annexes D

La télédétection : exemples de satellites, prétraitement et traitement d'images satellites

Cette annexe illustre quelques satellites utilisés en télédétection et présente des opérations de prétraitement des images satellitaires ainsi que les différentes méthodes utilisées pour la segmentation de ces images.

D.1 Les différents satellites

Aujourd'hui, les satellites d'observation de la Terre sont de plus en plus en progrès avec les avancées importantes dans les nouvelles technologies et en fonction des besoins exprimés par certains utilisateurs pour avoir des meilleures images satellites pour pouvoir étudier et suivre les différents événements et les phénomènes qui peuvent se produire sur notre globe terrestre. En effet, divers satellites avec différentes résolutions spatiales, spectrales et temporelles ont été installés dans des orbites pour diverses missions. Les premiers satellites tels que [Television Infrared Observation Satellite \(TIROS\)-1](#) et [Applications Technology Satellites \(ATS\)-1](#) ont été lancés par les États-Unis d'Amérique dans les années soixante. Ces satellites géostationnaires, appartenant à la famille des satellites météorologiques, sont utilisés à des fins d'observation météorologiques et qui sont caractérisées par des résolutions spatiales et temporelles élevées. D'autres satellites géostationnaires comme [Geostationary Operational Environmental Satellite \(GOES\)](#), qui succèdent les satellites [ATS](#), fournissent des images à petites échelles de la surface observée. Les satellites européens [Météosat](#) sont aussi d'autres exemples de satellites à orbite géostationnaires et qui sont utilisés pour observer des images à des fins météorologiques. Une autre famille des satellites est celle des satellites d'observation de la Terre. Exemples des satellites appartenant à cette famille sont les satellites **Landsat** des États-Unis d'Amérique et les satellites **SPOT** de la France. Dans ce qui suit, nous présentons ces deux systèmes avec plus de détails.

D.1.1 LANDSAT

Landsat est l'un des premiers systèmes d'observation de la Terre. Ce système regroupe une famille de huit satellites lancés par les États-Unis d'Amérique. Le premier programme, Landsat-1, a été mis en orbite par la NASA en 1972. Landsat-1 ainsi que Landsat-2 et Landsat-3 sont équipés du capteur **MSS** permettant de fournir des images à quatre bandes spectrales avec une résolution spatiale de $80 * 80 m^2$. Après dix ans, les satellites Landsat-4 et Landsat-5 ont été lancés avec un capteur équipé d'un scanner **TM** qui dispose de sept bandes spectrales plus étroites avec une résolution spatiale de 30 mètres pour six bandes et 120 mètres pour la bande thermique. Le capteur **TM** a été remplacé par le capteur plus amélioré **ETM+** et donne ainsi naissance au satellite Landsat-6. Ce dernier a été perdu et il a été remplacé en 1999 par le Landsat-7 équipé d'un capteur **ETM+** qui capable de fournir des images de à 8 bandes dont 6 bandes de résolution spatiale 30 mètres, une bande panchromatique à 15 m et une bande thermique à une résolution spatiale de 60 m. En 2013, le satellite Landsat-8 a été lancé doté d'un capteur **Operational Land Imager (OLI)** de meilleure résolution spatiale que Landsat-7 et qui permet de fournir des images satellites à 11 bandes spectrales. Nous présentons dans le tableau D.1 les différences de plage de bande et de résolution entre les différents capteurs Landsat.

D.1.2 SPOT

Le **SPOT** est le premier programme européen qui a été conçu par le CNES de la France en coopération avec la Belgique et la Suède. Le premier satellite **SPOT-1** a été lancé en 1986 et qui été suivi par la suite par deux satellites identiques : **SPOT-2** et **SPOT-3**. Ces trois satellites, dotés chacun par deux capteurs **Haute Résolution Visible (HRV)**, permettent de livrer des images multi-spectrales à trois bandes avec une résolution de 20 mètres et d'une panchromatique avec une résolution de 10 mètres. En 1998, **SPOT-4** a été lancé disposant de deux capteurs **Haute Résolution Visible et Infra-Rouge (HRVIR)**, permettant l'acquisition des images à quatre bandes spectrales avec une résolution de 20 mètres. Par la suite, **SPOT-5** a vu le jour en 2002 et qui a remplacé les deux capteurs **HRVIR** par deux **Haute Résolution Géométrique (HRG)** permettant ainsi de produire des images de très haute résolution spatiale avec quatre bandes dont une bande panchromatique de résolution de 2,5 à 5 mètres et des multibandes de résolution 10 mètres. Le Tableau D.2 illustre les différentes résolutions spectrales et spatiales pour chacune des bandes spectrales du satellite **SPOT-5**.

	LANDSAT 1,2 et 3	LANDSAT 4 et 5	LANDSAT 7	LANDSAT 8
PAYS	États-Unis	États-Unis	États-Unis	États-Unis
ANNÉE DU LANCEMENT	1972, 1975 et 1978	1982 et 1984	1999	2013
ALTITUDE	705 km	705 km	705 km	705 km
CAPTEUR	MSS	TM	ETM+	OLI
TYPE	Radiomètre à balayage	Radiomètre à balayage	Radiomètre à balayage	Radiomètre à balayage
RÉSOLUTION SPECTRALE	V (0,5 – 0,6 μm) (B1) R (0,6 – 0,7 μm) (B2) IR (0,7 – 0,8 μm) (B3) IR (0,8 – 1,1 μm) (B4)	B (0,45 – 0,52 μm) (B1) V (0,52 – 0,60 μm) (B2) R (0,63 – 0,69 μm) (B3) IR (0,76 – 0,90 μm) (B4) MIR1 (1,55 – 1,75 μm) (B5) IRT (10,4 – 12,5 μm) (B6) MIR2 (2,08 – 2,35 μm) (B7)	B (0,45 – 0,52 μm) (B1) V (0,52 – 0,60 μm) (B2) R (0,63 – 0,69 μm) (B3) IR (0,76 – 0,90 μm) (B4) MIR1 (1,55 – 1,75 μm) (B5) IRT (10,4 – 12,5 μm) (B6) MIR2 (2,08 – 2,35 μm) (B7) Pan (0,52 – 0,90 μm) (B8)	AC (0,43 – 0,45 μm) (B1) B (0,45 – 0,51 μm) (B2) V (0,53 – 0,59 μm) (B3) R (0,64 – 0,67 μm) (B4) IR (0,85 – 0,88 μm) (B5) MIR1 (1,57 – 1,65 μm) (B6) MIR2 (2,11 – 2,29 μm) (B7) Pan1 (0,50 – 0,68 μm) (B8) C (1,36 – 1,38 μm) (B9) IRT1 (10,60 – 11,19 μm) (B10) IRT2 (11,50 – 12,51 μm) (B11)
RÉSOLUTION SPATIALE	60 x 80 m	Multispectral : 30m IRT : 60m	Multispectral : 30m IRT : 120m Panchromatique : 15m	Multispectral : 30m IRT : 100m Panchromatique : 15m C : 30m
DIMENSION DE L'IMAGE	185 x 185 km	185 x 172 km	185 x 172 km	185 x 172 km
FRÉQUENCE DE PASSAGE	18 jours	16 jours	16 jours	16 jours
VOCATION	VÉGÉTATION ET OCCUPATION DU SOL	VÉGÉTATION ET OCCUPATION DU SOL	VÉGÉTATION ET OCCUPATION DU SOL	VÉGÉTATION ET OCCUPATION DU SOL
PARTICULARITÉ	EN ARCHIVE DEPUIS 1972	GRANDE VARIÉTÉ SPECTRALE	GRANDE VARIÉTÉ SPECTRALE	GRANDE VARIÉTÉ SPECTRALE

TABLEAU D.1 – Caractéristiques des satellites LANDSAT ([Satellites, 2016])

	SPOT 1, 2 et 3	SPOT 4	SPOT 5	SPOT 6	SPOT 7
PAYS	France	France	France	France	France
ANNÉE DU LANCEMENT	février 1986	mars 1998	fin 2001	septembre 2012	juin 2014
ALTIITUDE	822 km	822 km	830 km	694 km	694 km
CAPTEUR	HRV (Haute résolution visible)	HRVIR (Haute résolution visible et infrarouge)	HRG (Haute résolution géométrique)	HRG (Haute résolution géométrique)	HRG (Haute résolution géométrique) Végétation
TYPE	Radiomètre à barrettes (« Push Broom »)	Radiomètre à barrettes (« Push Broom »)	Radiomètre à barrettes (« Push Broom »)	Radiomètre à barrettes (« Push Broom »)	Radiomètre à barrettes (« Push Broom »)
RÉSOLUTION SPECTRALE	B (0,50 - 0,59 μm) (B1) V (0,61 - 0,68 μm) (B2) IR (0,79 - 0,89 μm) (B3) Pan (0,51 - 0,73 μm)	B (0,50 - 0,59 μm) (B1) V (0,61 - 0,68 μm) (B2) IR (0,79 - 0,89 μm) (B3) IRM (1,58 - 1,75 μm) (B4) Pan (0,61 - 0,68 μm)	B (0,50 - 0,59 μm) (B1) V (0,61 - 0,68 μm) (B2) IR (0,79 - 0,89 μm) (B3) IRM (1,58 - 1,75 μm) (B4) Pan (0,61 - 0,68 μm)	B (0,45 - 0,52 μm) (B1) V (0,53 - 0,59 μm) (B2) IR (0,62 - 0,69 μm) (B3) IRM (0,76 - 0,89 μm) (B4) Pan (0,45 - 0,74 μm)	B (0,45 - 0,52 μm) (B1) V (0,53 - 0,59 μm) (B2) IR (0,62 - 0,69 μm) (B3) IRM (0,76 - 0,89 μm) (B4) Pan (0,45 - 0,74 μm)
RÉSOLUTION SPATIALE	20 m Pan : 10 m	20 m Pan : 10 m	B4 : 20 m B1 B2 B3 : 10 m Pan : 5 m et 2 à 3 m	B4 : 6 m B1 B2 B3 : 1,5 m Pan : 1,5 m	B4 : 6 m B1 B2 B3 : 1,5 m Pan : 1,5 m
DIMENSION DE L'IMAGE	60 × 60 km (80 km en visée latérale extrême)	60 km × 60 km (80 km en visée latérale extrême)	60 × 60 km (80 km en visée latérale extrême)	60 km × 60 km	60 km × 60 km
FRÉQUENCE DE PASSAGE	3 à 26 jours	3 à 26 jours	3 à 26 jours	3 à 26 jours	3 à 26 jours
VOCATION	OCCUPATION DU SOL, OCCUPATION URBAINE ET PHYSIOGRAPHIE)	OCCUPATION DU SOL, OCCUPATION URBAINE ET PHYSIOGRAPHIE	OCCUPATION DU SOL, OCCUPATION URBAINE ET PHYSIOGRAPHIE	OCCUPATION DU SOL, OCCUPATION URBAINE ET PHYSIOGRAPHIE	OCCUPATION DU SOL, OCCUPATION URBAINE ET PHYSIOGRAPHIE
PARTICULARITÉ	GRANDE PRÉCISION SPATIALE	GRANDE PRÉCISION SPATIALE	TRÈS GRANDE PRÉCISION SPATIALE	TRÈS GRANDE PRÉCISION SPATIALE	TRÈS GRANDE PRÉCISION SPATIALE

TABLEAU D.2 – Caractéristiques des satellites SPOT ([Satellites, 2016], [SPOT, 2016])

D.2 Prétraitement d'images

Les images acquises par les satellites sont sujettes à des distorsions dues aux effets sensoriels, solaires, atmosphériques et topographiques. Par conséquent, les données spectrales acquises par les capteurs ne coïncident pas avec les données réfléchies ou émises par les objets au sol. La figure D.1 montre comment les effets atmosphériques agissent sur le rayonnement mesuré par des capteurs à distance.

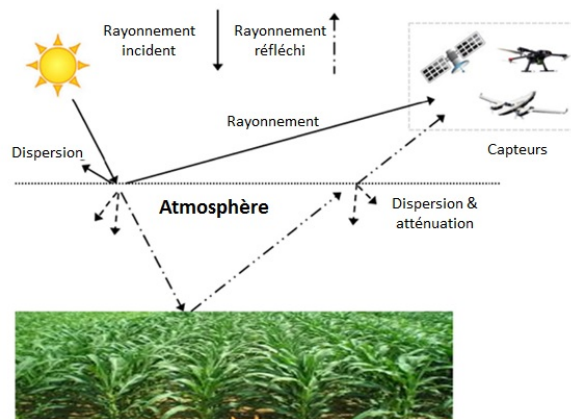


FIGURE D.1 – Effets atmosphère sur un rayonnement.

Les opérations de prétraitements les plus connues sont : les corrections (ou bien calibrations) géométriques, radiométriques et atmosphériques [Lillesand et al., 2014]. Ces opérations de prétraitement peuvent avoir un impact significatif sur les résultats d'analyse [Sundaresan et al., 2007] et avoir un ordre général dans lequel elles doivent être effectuées [Young et al., 2017]. Dans cette section, nous décrivons les opérations de prétraitement les plus courantes appliquées en particulier aux images Landsat.

Avant de présenter les étapes de prétraitement, il est important de comprendre des unités couramment associées avec les images satellites à savoir : le DN, la radiance et la réflectance pour les bandes visibles à infra-rouges (Vis-SWIR), et le DN, la radiance et la température pour les bandes thermiques. La figure montre comment ces unités changent après chaque étape de correction. En effet, les signaux initiaux enregistrés par le capteur sont calibrés aux valeurs de radiance en utilisant les gains et les décalages qui diffèrent entre les capteurs et au fil du temps en raison de la dégradation du capteur. La radiance (mesurée en $\text{watts} \cdot \text{stéradian}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$) représente la mesure du flux d'énergie enregistré par le capteur. Ces valeurs sont ensuite numérisées comme DN en 6 bits ou 7 bits (MSS), 8 bits (TM, ETM+) ou 12 bits (OLI, TIROS) entiers non signés [Chander et al., 2009]. La réflectance est une mesure sans unité qui représente le rapport de rayonnement réfléchi par un objet par rapport au rayonnement incident sur l'objet. Les études écologiques utilisent le plus souvent le DN et la réflectance. Pour les bandes thermiques, les études utilisent souvent le DN ou la température (*degrés Kelvin*) ([Young et al., 2017]).

[Young et al., 2017] ont présenté un cadre général qui résume les étapes de prétraitement des différentes unités ainsi que les corrections radiométriques (c.à.d., DN, radiance et réflectance). Ce cadre général est illustré dans la figure D.2, où la plupart des étapes peuvent être classées en trois grands groupes : géométrique, absolu et relatif ([Young et al., 2017]).

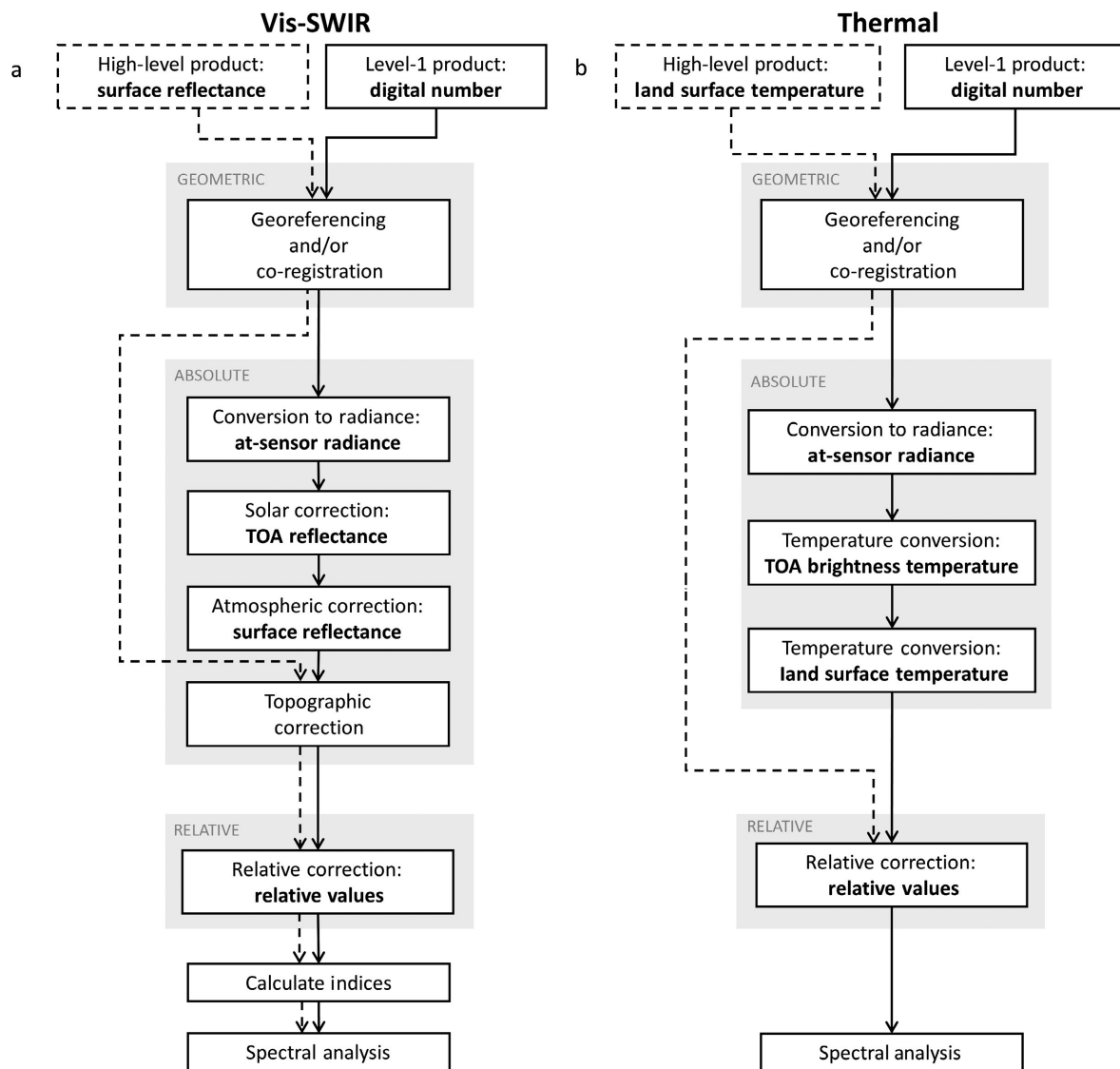


FIGURE D.2 – Les différentes étapes de prétraitement. (Figure extraite de ([Young et al., 2017])

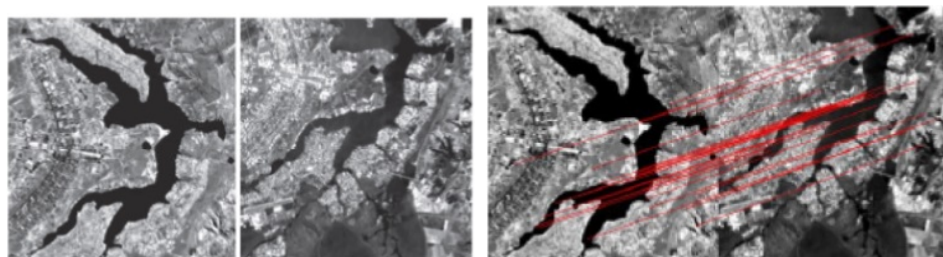
D.2.1 Correction géométrique : géo-référencement

Lors de sa prise, une image satellite peut subir des déformations légères ou encore des distorsions géométriques. Ces dernières sont provoquées par de nombreux facteurs tels que : le mouvement du système de balayage, le mouvement et la stabilité du satellite, l'altitude, la vitesse et le comportement du satellite, les reliefs, la courbure et la rotation de la Terre. Ainsi une correction géométrique est donc nécessaire pour corriger les effets qui affectent l'image afin d'assurer la position exacte d'une image. D'après [Pouget, 2005], le processus de correction géométrique fournit une nouvelle image avec une nouvelle géométrie. Il consiste, dans une première étape, à identifier des points de l'image pour déterminer leur véritable position en coordonnées au sol. Par la suite, de nouvelles coordonnées au sol à partir des coordonnées originales sont produites à partir des fonctions de transformations ([Pouget, 2005]).

— Correction géométrique : Recalage (Registration)

Si le géo-référencement implique l'alignement des couches de données à la localisation géographique correcte, le recalage implique l'alignement des couches de données les unes par rapport aux autres. En fait, le recalage est le processus qui consiste à aligner différentes images d'une même scène acquises à des périodes de temps différentes (multi-temporel), à des points (angles) de vues différentes multiples vues) et/ou avec des capteurs différents [Wong and Clausi, 2007]. Le recalage est une étape importante pour différentes tâches en télédétection à savoir la comparaison des images, la fusion d'images, la détection de changement et le suivi de l'environnement. Il s'agit d'une étape critique dans le prétraitement de l'imagerie satellitaire pour l'analyse écologique, car une erreur de recalage peut entraîner des erreurs significatives, en particulier dans les analyses de détection des changements [Sundaresan et al., 2007].

La figure D.3a illustre deux images d'une même scène prises par deux satellites (Landsat et Spot) et la figure D.3b montre l'application du processus de recalage à ces deux images.



(a) Une paire de deux images de capteur différentes (SPOT/Landsat)

(b) Images recalées.

FIGURE D.3 – Exemple fr processus de recalage.

D.2.2 Correction radiométrique

Le satellite et le capteur ont toujours des dégradations avec le temps et qui peuvent être dans les composants optiques ou électriques ou dans les composants de soutien pendant le lancement, en raison du saut orbital, en raison du bombardement des rayons cosmiques, etc. Ces dégradations affectent directement l'ensemble de données et conduisent à l'incertitude de ces données.

La correction radiométrique est utilisée donc pour éliminer les distorsions dues aux anomalies affectant les capteurs. Généralement, deux types de correction radiométrique sont distingués : la correction radiométrique absolue et la correction radiométrique relative.

D.2.2.1 La correction radiométrique absolue

D'une manière générale, si la correction radiométrique convertit un nombre digital (c.-à-d., l'image brute à partir du capteur) (DN) en radiance en utilisant des coefficients de calibrage généralement fournis dans les fichiers de métadonnées de l'image alors il s'agit d'une calibration radiométrique absolue. Dans ce cas, le traitement n'élimine aucun effet d'illumination [Bonn, 1994]. La correction radiométrique absolue peut se référer à une seule étape de prétraitement ou à une série d'étapes de prétraitement qui tiennent compte des effets des capteurs, du soleil, de l'atmosphère et de la topographie. Ce type de correction inclut, comme montrer dans la figure, un certain nombre de corrections à savoir : la conversion à la radiance, la correction solaire, la correction atmosphérique et la correction topographique.

- *Conversion à la radiance :*

c'est l'étape de prétraitement par laquelle les DNs sont reconvertis en radiance (souvent appelée radiance au capteur (*at-sensor Radiance*)) en utilisant des coefficients de calibration associés à chaque bande pour un capteur donné. Dans le cas des données Landsat, les coefficients de calibrations sont stockés dans le fichier métadonnées associé avec chaque image. La conversion en radiance est une étape nécessaire avant toutes les autres étapes de la correction radiométrique absolue.

- *Correction solaire :*

cette étape tient compte des influences solaires sur les valeurs de pixels. La correction solaire permet de convertir la radiance du capteur (*at-sensor radiance*) à la TOA. Cette étape nécessite des informations additionnelles à savoir la distance Terre-soleil (Earth-sun distance), le rayonnement solaire exoatmosphérique (*exoatmospheric solar irradiance*) et l'angle d'élévation solaire (*solar elevation angle*). Ces informations varient avec la date, le temps et la latitude, dans ce cas il faut tenir compte de leurs variations dans le cas où nous travaillions avec des images multiples, même au sein d'une même scène. Comme pour la conversion à la radiance les informations de corrections solaires peuvent être retrouvées à partir de fichier de métadonnées associé avec chaque image.

- *Correction atmosphérique :*

comme d'autres facteurs tels que le relief, l'atmosphère influe également sur les valeurs des images acquises. En effet, lors de passage des rayonnements réfléchi et incident à travers l'atmosphère, des interactions entre les ondes lumineuses et les composants atmosphériques peuvent se produire. Ces interactions peuvent perturber et modifier les signatures spectrales. Les corrections atmosphériques consistent à éliminer les effets de l'atmosphère et/ou la position du soleil. Cependant, certains effets atmosphériques sont très variables sur la surface de la Terre et peuvent être difficiles à corriger dans les images Landsat ([Young et al., 2017]).

- *Correction topographique :*

la correction topographique est le processus utilisé pour tenir compte des effets d'illumination dus à la pente, à l'aspect et à l'altitude qui peuvent entraîner des variations des valeurs de réflectance pour des caractéristiques similaires avec des positions de terrain différentes ([Riaño et al., 2003]). La correction topographique peut être particulièrement importante pour des applications dans les systèmes de montagne ou des terrains accidentés ([Colby, 1991], [Riaño et al., 2003], [Shepherd and Dymond, 2003]), qui sont des paramètres communs pour la surveillance par satellite en raison de la difficulté d'accéder à ces environnements pour les mesures sur le terrain.

D.2.2.2 La correction radiométrique relative

Si la calibration radiométrique normalise généralement les images soumises au niveau radiométrique d'une image de référence, il s'agit d'une calibration radiométrique relative [Bonn, 1994]. Dans ce cas, les effets de calibrage et d'illumination sont simplement inclus dans les coefficients de régression. En effet, une étape de prétraitement commune lors de l'utilisation de plusieurs images est une correction ou normalisation radiométrique relative (appelée correction relative). La correction relative amène chaque bande d'une image à la même échelle que la bande radiométrique correspondante d'une image de référence. Cela tient vraisemblablement compte des différences entre le capteur, le soleil et l'atmosphère, mais ne tient pas compte expressément des différences phénologiques de la végétation ([Young et al., 2017]).

D.3 Segmentation d'images satellites

Ils existent de nombreuses méthodes de segmentation dans la littérature qui se diffèrent l'une de l'autre en fonction de l'approche en question, c.-à-d., mais il n'y a pas de méthode particulière qui puisse être appliquée sur différents types d'images qui généreraient le même résultat. Les approches les plus connues sont : la segmentation par régions, l'approche de segmentation par seuillage, la détection de contours, les méthodes basées sur le modèle et les approches basées sur la théorie spéciale ([Shivhare and Gupta, 2015]). Le choix d'une méthode de segmentation appropriée pour un type d'image spécifique reste un problème difficile.

D.3.1 Segmentation par seuillage

Une image peut être segmentée en se basant sur un seuillage des pixels. Le seuillage est la plus simple méthode utilisée pour la segmentation d'image. Cette méthode consiste à utiliser une certaine valeur appelée « seuil » pour faire des mesures. L'affectation du pixel de l'image à un objet est faite en fonction de cette valeur. Si la valeur d'un pixel est supérieure ou égale à la valeur du seuil, alors il s'agit d'un pixel d'objet, sinon c'est un pixel d'arrière-plan ([Gonzalez et al., 2002]).

D.3.2 Segmentation basée sur le contour

Les contours sont les limites entre les régions d'une image, ce qui aide à la segmentation et la détection et la reconnaissance des objets. Le contour désigne les pixels auxquels il y a un changement brusque ou une discontinuité dans la luminosité ou l'intensité de l'image. Les méthodes de détection des contours nécessitent un équilibre entre la détection de la précision et l'immunité au bruit dans la pratique. Dans ce cas, les techniques de détections de contours ne conviennent que pour des images simples et sans bruit, par contre elles produisent des contours supplémentaires pour des images complexes et bruitées ([Sezgin and Sankur, 2004]). Une autre limite de la technique de détection des contours, est qu'elles ne peuvent pas parfois fermer les contours ou bien de segmenter à mauvais escient ([Sebari and He, 2007]).

D.3.3 Segmentation par régions

La segmentation par régions est une autre technique de segmentation d'image. Elle permet de diviser une image en des sous-parties qui ont des propriétés similaires connues en tant que régions ([Gavlasová et al., 2006]). Cette méthode utilise des techniques permettant de regrouper des pixels adjacents suivant un critère d'homogénéité de manière à former les régions de l'image. Les principaux techniques sont la croissance par régions et la division-fusion. La croissance par régions est une approche consiste à grouper un groupe de pixels ou de sous-régions en des régions larges tout en se basant des critères de croissance ([Gonzalez et al., 2002]). L'approche division-fusion est une approche de segmentation dans laquelle une image est subdivisée en ensemble de régions disjointes arbitraires, puis ces régions disjointes sont fusionnées pour satisfaire la condition de segmentation (P. Rafael C). Cependant, la sélection des critères de fusion-division n'est pas facile qui permet parfois une non-correspondance entre les régions et les objets ([Sebari and He, 2007]).

D.3.4 Segmentation basée sur des théories spéciales

Plusieurs autres approches ont été proposées pour contribuer à la segmentation d'image. Ces approches incluent des techniques comme : la technique à base de regroupement (*clustering*), la technique à base de réseau de neurones, la technique à base d'algorithmes génétiques, technique à base d'ondelettes, etc. Un algorithme génétique est une procédure d'optimisation des problèmes de recherche qui imite le processus observé dans l'évolution naturelle ([Holland, 1992]). C'est une technique de segmentation d'image non paramétrique très bien connue et efficace ([Awad and Chehdi, 2009]). Il est prouvé que GA est la technique d'optimisation la plus puissante dans un grand espace de solution ([Tsang and Au, 1996]). Un réseau de neurones artificiels est une imitation d'un système nerveux réel. Les réseaux de neurones sont des systèmes de « neurones » interconnectés qui communiquent entre eux et calculent des valeurs à partir d'entrées par l'alimentation avant ou la propagation de retour des informations à travers le réseau. Pour une image, chaque neurone représente un pixel. Le *clustering* est un processus de regroupement de pixels dans différentes classes sans aucune information préalable de telle sorte que les pixels apparte-

nant à la même classe devraient être semblables les uns aux autres. Cette technique peut être classée en deux types : clustering hiérarchique et clustering par partition. Dans la classification hiérarchique, la distance entre chaque motif est calculée. Dans le clustering de partition, le *centroïde* du cluster est calculé. Plusieurs algorithmes de segmentation d'image basés sur le clustering existent tels que l'algorithme de clustering *Fuzzy C-Means* (FCM), l'algorithme de clustering *K-Means* et l'algorithme de déplacement de la moyenne (*Mean shift*) ([Acharya et al., 2013]). Ce dernier permet de regrouper les pixels en fonction de la répartition statistique de leurs valeurs autour des régions de densité maximale.

D.3.5 Autres méthodes de segmentation

La segmentation basée sur les ondelettes et une autre technique de segmentation d'image. Cette technique utilise la transformée en ondelettes pour l'extraction de caractéristiques associées à des pixels d'image individuels ([Cho and Bui, 2008]). La méthode de partage des eaux (*watershed*) est un puissant outil morphologique mathématique pour la segmentation de l'image. En géographie, le partage des eaux désigne la crête qui sépare les zones drainées par différents systèmes fluviaux. Si l'image est considérée comme un paysage géologique, les lignes de partage des eaux déterminent les limites qui séparent les régions de l'image ([Bhagwat et al., 2010]).

Annexes E

Calibration Radiométrique

Les images satellitaires, en particulier les séries temporelles, sont souvent acquises par différents capteurs et sous différentes conditions atmosphériques et géométriques (p. ex., illumination solaire, angles de prise de vue). La normalisation radiométrique de ces images est donc nécessaire pour enlever les distorsions radiométriques et pour les rendre comparables. Les effets d'artefacts, de directionnalité de surface et de l'atmosphère peuvent être corrigés d'une manière absolue ou relative. Conversion en radiance spectrale. Cette Annexe fournit un résumé sur les différentes équations utilisées pour lors de l'étape de prétraitement des images satellites.

E.1 Conversion en radiance spectrale au-capteur

Le calcul de la radiance spectrale au niveau du capteur est l'étape fondamentale de la conversion des données d'images de multiples capteurs et plates-formes en une échelle radiométrique commune physiquement significative.

E.1.1 Conversion en radiance spectrale au-capteur pour Landsat 7 (ETM+)

La conversion en radiance spectrale des images Landsat ETM+, est calculée selon l'équation :

$$\mathcal{L}_\lambda = \mathcal{G}_{rescale} \times Q_{cal} + \mathcal{B}_{rescale} \quad (\text{E.1})$$

Avec,

$$\mathcal{G}_{rescale} = \frac{L_{MAX_\lambda} - L_{MIN_\lambda}}{Q_{calmx} - Q_{calmin}} \quad (\text{E.2})$$

$$\mathcal{B}_{rescale} = LMIN_{\lambda} - \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) \times Q_{calmin} \quad (E.3)$$

Avec,

\mathcal{L}_{λ} = Radiance spectrale à l'ouverture du capteur [*Watts/(m² srad μm)*]

Q_{cal} = Valeur quantifiée de pixel calibré [DN]

Q_{calmin} = Valeur minimale quantifiée de pixel calibré correspondant à $LMIN_{\lambda}$ [DN]

Q_{calmax} = Valeur maximale quantifiée de pixel calibré correspondant à $LMAX_{\lambda}$ [DN]

$LMIN_{\lambda}$ = Radiance spectrale du capteur qui est ajusté à Q_{calmin} [*Watts/(m² srad μm)*]

$LMAX_{\lambda}$ = Radiance spectrale du capteur qui est ajusté à Q_{calmax} [*Watts/(m² srad μm)*]

$\mathcal{G}_{rescale}$ = Facteur de gain analogique spécifique à une bande [*(Watts/(m² srad μm)/DN)*]

$\mathcal{B}_{rescale}$ = Facteur de biais analogique spécifique à une bande [*(Watts/(m² srad μm)/DN)*]

E.1.2 Conversion en radiance spectrale au-capteur pour Landsat 8 (OLI)

La formule de conversion de la radiance spectrale au-capteur pour Landsat 8 est donnée par :

$$\mathcal{L}_{\lambda} = \mathcal{M}_L \times Q_{cal} + \mathcal{A}_L \quad (E.4)$$

Avec,

\mathcal{L}_{λ} = Radiance spectrale [*Watts/(m² srad μm)*]

\mathcal{M}_L = Facteur analogique multiplicatif spécifique à une bande

\mathcal{A}_L = Facteur analogique additif spécifique à une bande

Q_{cal} = Valeurs de pixel du produit standard quantifiées et calibrées [DN]

E.2 Conversion en réflectance au sommet de l'atmosphère (Top-Of-Atmosphere (TOA))

La conversion en réflectance au sommet de l'atmosphère (TOA), également connu sous le nom albédo planétaire dans la bande, permet la réduction de la variabilité de scène-à-scène obtenue après conversion en radiance spectrale au-capteur. Lors de la comparaison d'images de différents capteurs, l'utilisation de la réflectance TOA au lieu de la radiance spectrale au-capteur présente trois avantages. Premièrement, cela supprime l'effet cosinus de différents angles zéniths solaires en raison de la différence de temps entre les acquisitions de données. D'autre part, la réflectance TOA compense les différentes valeurs de l'irradiance solaire exo-atmosphérique due aux différences de bandes spectrales. Troisièmement, la réflectance du TOA corrige la variation de la distance Terre-Soleil entre différentes dates d'acquisition de données. Ces variations peuvent être significatives géographiquement et temporellement.

E.2.1 Conversion en réflectance TOA pour Landsat 7 (ETM+)

La réflectance TOA de la Terre pour les images Landsat ETM+, est calculée selon l'équation :

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \times \mathcal{L}_{\lambda} \times d^2}{ESUN_{\lambda} \times \cos(\theta_{sza})} \quad (E.5)$$

Avec,

ρ_{λ} = Réflectance planétaire TOA [sans unité]

π = Constante mathématique approximativement égale à 3.14159 [sans unité]

\mathcal{L}_{λ} = Radiance spectrale à l'ouverture du capteur [*Watts/(m² srad μm)*]

d = Distance Terre-Soleil [unités astronomiques]

$ESUN_{\lambda}$ = Irradiance solaire exo-atmosphérique moyenne [*Watts/(m² μm)*]

θ_{sza} = Angle zénithal solaire [degrés]

E.2.2 Conversion en réflectance TOA pour Landsat 8 (OLI)

Les données d'images OLI peuvent être converties en réflectance TOA à l'aide de l'équation de conversion suivante :

$$\sigma_{\lambda} = \mathcal{M}_p \times \mathcal{Q}_{cal} + \mathcal{A}_p \quad (E.6)$$

Avec,

σ_{λ} = Réflectance planétaire TOA, sans correction pour l'angle solaire [sans unité]

\mathcal{M}_p = Facteur analogique multiplicatif spécifique à une bande

\mathcal{A}_p = Facteur analogique additif spécifique à une bande

\mathcal{Q}_{cal} = Valeurs de pixel du produit standard quantifiées et calibrées [DN]

La réflectance TOA avec une correction pour l'angle zénith solaire est donnée par

$$\rho_{\lambda} = \frac{\sigma_{\lambda}}{\sin(\theta_{sza})} \quad (E.7)$$

Avec,

ρ_{λ} = Réflectance TOA,

θ_{sza} = Angle zénithal solaire

E.3 Conversion en température de luminosité au niveau du capteur

Les données de bande thermique (bande 6 sur TM et ETM +) peuvent être converties de la radiance spectrale au-capteur à la température de luminosité effective au-capteur. La température de luminosité au niveau du capteur suppose que la surface de la Terre est un corps noir (c'est-à-dire que l'émissivité spectrale est égale à 1) et inclut les effets atmosphériques (absorption et émissions le long du trajet). La formule de conversion de la radiance spectrale au-capteur à la température de luminosité effective au-capteur est la suivante :

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{\mathcal{L}_\lambda} + 1\right)} \quad (\text{E.8})$$

Avec,

T = Température de luminosité effective au capteur [Kelvin]

K2 = Constante de calibration 2 [Kelvin]

K1 = Constante de calibration 1 [*Watts/(m² srad μm)*]

\mathcal{L}_λ = Radiance spectrale à l'ouverture du capteur [*Watts/(m² srad μm)*]

ln = Logarithme naturel

Titre : Modélisation spatio-temporelle multi-niveaux à base d'ontologies pour le suivi de la dynamique en imagerie satellitaire.

Mots clés : Modélisation de la dynamique, Modélisation et raisonnement spatio-temporel, Ontologies, Interprétation sémantique, Interprétation de changements, Extraction de connaissances

Résumé : La modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels fait partie des sujets de recherche pour le suivi et l'interprétation des changements affectant le globe terrestre. Pour cela, l'exploitation des images satellitaires se présente comme un moyen efficace qui aide à l'étude de la dynamique des phénomènes spatio-temporels qui peuvent se produire sur la surface de la Terre notamment l'urbanisation, la déforestation, la désertification, etc.

Divers modèles et approches ont été proposés pour modéliser les évolutions des objets spatio-temporels. Toutes fois, chaque modèle présente une capacité limitée pour capturer l'évolution des différentes caractéristiques de l'environnement, en plus la structure de représentation utilisée par chaque modèle ne permet pas de saisir complètement la sémantique de l'évolution d'un objet spatio-temporel.

Les travaux de notre thèse s'intéressent à la modélisation de la dynamique des objets spatio-temporels pour l'interprétation des changements en imagerie satellitaire. En conséquence, nous avons proposé dans un premier temps une architecture ontologiques multi-niveaux pour la représentation et la modélisation des objets et des processus spatio-temporels dynamiques. Également, nous avons présenté une nouvelle stratégie d'interprétation sémantique de scènes d'images satellites pour l'interprétation de changements. Le cadre applicatif concerne l'interprétation sémantique d'une scène d'images satellites pour l'interprétation des phénomènes de changements, tels que l'urbanisation et la déforestation. Le résultat obtenu est une carte de changements qui pourra guider une meilleure gestion de l'utilisation/couverture des sols.

Title: Ontology-based multi-level spatio-temporal modeling for monitoring dynamics in satellite imagery.

Keywords: Dynamics modeling, Spatio-temporal reasoning and modeling, Ontologies, Semantic interpretation, Change interpretation, Knowledge extraction

Abstract: Modeling the dynamics of spatio-temporal objects is part of the research subjects for monitoring and interpretation of the changes affecting the Earth. Satellite images are an effective way for studying the dynamics of spatio-temporal phenomena, including urbanization, deforestation, flooding, desertification, and so on, that can occur on the surface of the Earth.

Various models and approaches have been proposed to model the evolution of the spatio-temporal objects. However, each of these models has a limited ability to capture the evolution of the different characteristics of the environment, and the representation structure used by each model does not fully capture the semantics of the evolution of a spatio-temporal object.

The works of our thesis interested in modeling the dynamics of spatio-temporal objects for changes interpretation in satellite imagery. Therefore, we proposed initially a multi-level ontological architecture for representation and modeling the dynamic of spatio-temporal objects and process. Also, we have presented a new semantic scene interpretation strategy for change interpretation in remote sensing imagery. The application framework concerns the semantic interpretation of a satellite images scenes for change interpretation of phenomena, such as urbanization and deforestation. The result is a change map that can guide better management of the land use/cover.