



**HAL**  
open science

# Géo-détection des réseaux enterrés par fusion de données multimodales et raisonnement spatial

Meriem Hafsi

► **To cite this version:**

Meriem Hafsi. Géo-détection des réseaux enterrés par fusion de données multimodales et raisonnement spatial. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Grenoble Alpes, 2018. Français. NNT : 2018GREAA024 . tel-02134561

**HAL Id: tel-02134561**

**<https://theses.hal.science/tel-02134561>**

Submitted on 20 May 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.



## THÈSE

Pour obtenir le grade de

## DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : Doctorat STIC Informatique

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

**Meriem HAFSI**

Thèse dirigée par **Philippe BOLON**, USMB  
et codirigée par **Richard DAPOIGNY**, USMB

préparée au sein du **Laboratoire Laboratoire d'Informatique,  
Systèmes, Traitements de l'Information et de la Connaissance**  
dans l'**École Doctorale SISEO - Sciences et Ingénierie des  
Systèmes de l'Environnement et des Organisations**

### **Géo-détection des réseaux enterrés par fusion de données multimodales et raisonnement spatial**

### **Geodetection of underground networks by means of multimodal data fusion and spatial reasoning**

Thèse soutenue publiquement le **18 décembre 2018**,  
devant le jury composé de :

**Monsieur Philippe BOLON**

Professeur, Université Savoie Mont Blanc, Directeur de thèse

**Madame Françoise dite Florence LE BER**

Ingénieur de Recherche, ENGEES / Université de Strasbourg,  
Rapporteur

**Monsieur Patrick BRÉZILLON**

Professeur Emérite, Sorbonne Université, Examineur

**Monsieur Michel HARDY**

Ingénieur, GRTGaz, Examineur

**Monsieur Richard DAPOIGNY**

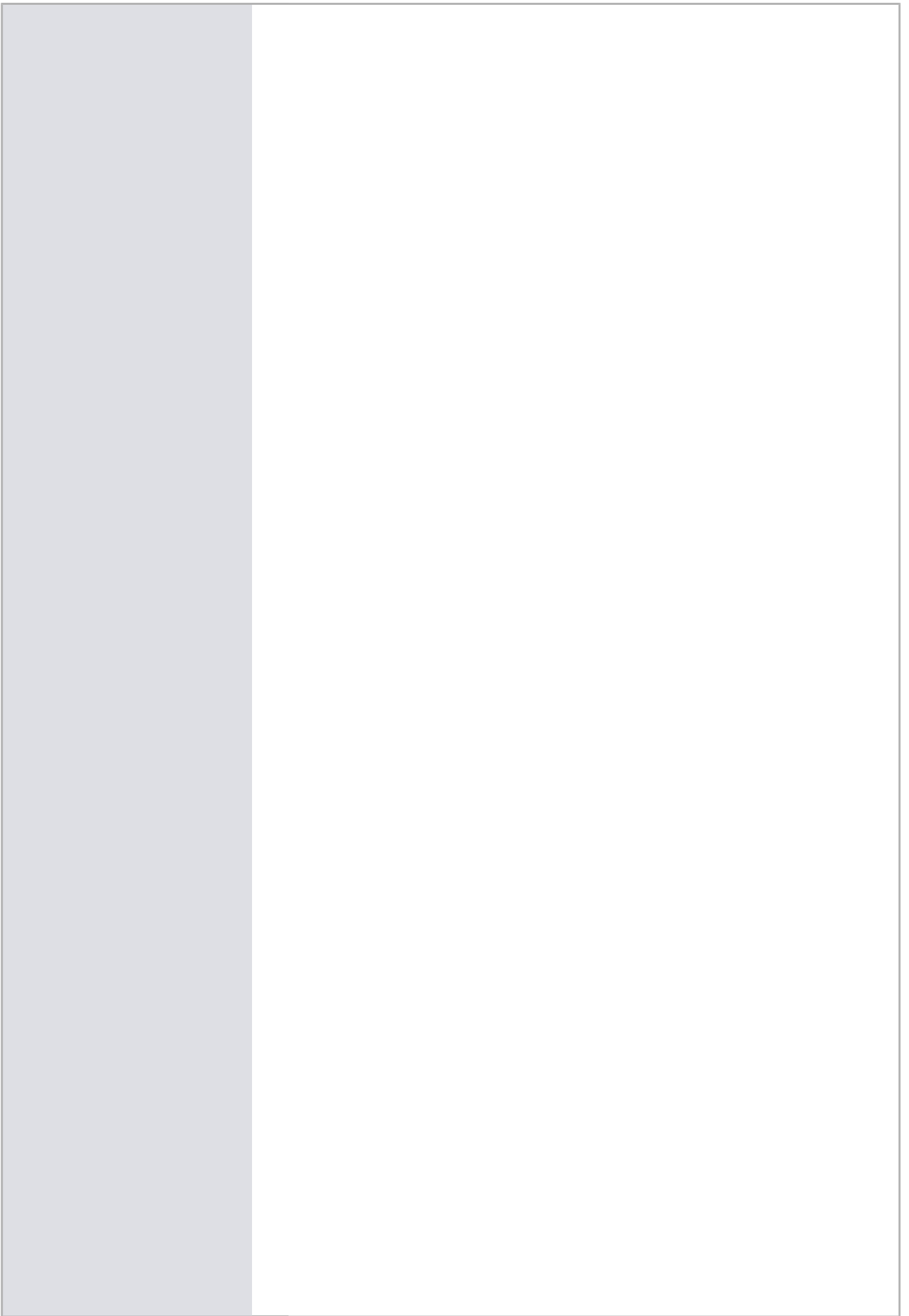
Maître de Conférences, Université Savoie Mont Blanc, Co-directeur de  
thèse

**Monsieur Ollivier HAEMMERLÉ**

Professeur des Universités, Université de Toulouse - Jean Jaurès,  
Rapporteur

**Monsieur Jean-Marie NICOLAS**

Professeur, Institut Mines Telecom, Président



*À mon mari Lamine*  
*À ma fille Nélia*  
*À mes parents Lyes et Farida*  
*À ma sœur Ouerdia et à mon frère Djamel*





# Résumé

---

**Résumé :** Les travaux de cette thèse visent à identifier les verrous de la géodétection des réseaux enterrés et à apporter les solutions adéquates. Plusieurs techniques de détection sont utilisées actuellement mais présentent des limites dues à la nature du sol, aux matériaux des canalisations et au produit transporté. L'objectif de cette thèse est de proposer une nouvelle approche basée sur l'optimisation et la fusion de quatre techniques de détection en s'appuyant sur des informations contextuelles et incertaines. La représentation de ces informations sous forme de connaissances dans une ontologie et la proposition de mécanismes de raisonnement et de représentation spatiale rendent envisageable la géodétection automatique et multi-capteurs des réseaux enterrés indépendamment de leur matériau, du produit transporté et de l'environnement.

**Abstract :** Our work aims to solve the problem of reliable detection of underground networks by optimization of the existing methods. Four methods are planned to identify the underground pipelines but they have limits and depend on many factors. Our investigation aims to solve the problem of reliable detection of underground networks by aggregation of the existing methods and reasoning at different abstraction levels. For that purpose, we must be able to provide an accurate geo-detection of underground networks regardless of their material, their function or the soil in which they are buried. The information collected in the field or soil by these detection methods will be merged in order to achieve and obtain an accurate and reliable single result of geo-detection. For that, we need to check independently these distinct methods and then to aggregate the information/data they provide. Besides, the first step will consist of the representation of this information into symbolic knowledge. The second step is to overcome the limitations of current methods to provide a reliable and expressive reasoning system.

**Mots clefs :** Géodétection des réseaux enterrés, géoradar, détection électromagnétique, détection vibro-acoustique, ontologie, représentation des connaissances, raisonnement spatial, fusion, etc.



# Remerciements

---

C'est un grand plaisir pour moi de remercier toutes les personnes, proches ou lointaines, qui ont permis à ce travail d'être mené à bien.

Tout d'abord, je souhaite adresser mes sincères remerciements à l'ensemble des membres de mon jury de thèse et en particulier aux rapporteurs Françoise Le Ber et Ollivier Haemmerlé. Leurs remarques pertinentes et leurs questions très intéressantes ont contribué à approfondir ma réflexion sur le domaine.

Je tiens à remercier mes directeurs de thèse Philippe Bolon et Richard Dapoigny. Je tiens à leur exprimer ma gratitude pour tout ce qu'ils m'ont apporté, pour leur écoute, leur aide et pour les conseils prodigués tout au long de ce travail.

Les travaux réalisés durant ces trois années de thèse ont été financés par BPI France dans le cadre du projet FUI G4M. Je tiens donc à remercier l'ensemble des partenaires du projet G4M. En particulier Michel Hardy et Elodie Rousset de ENGIE Crigen Lab et Philippe Picon de la société MADE ainsi que l'ensemble des collaborateurs rencontrés dans ce cadre : IDS, RadioDetection, GRTGgaz, Geospective, etc.

Je souhaite aussi remercier l'ensemble des collègues du laboratoire LISTIC de l'université Savoie Mont Blanc pour leur accueil durant ces années de thèse. Je tiens à remercier Emmanuel Trouvé directeur du laboratoire et coordinateur du projet G4M, Patrick Lambert ancien directeur du laboratoire LISTIC, Yajing Yan collègue et amie, Didier Coquin chef du département Réseaux-Télécom et Stéphane Perrin grâce à qui j'ai eu ma première expérience d'enseignement, je les remercie sincèrement pour la confiance qu'ils m'ont accordé. Je remercie également le secrétariat du LISTIC, Joelle Pellet en particulier qui a toujours été d'une grande écoute, les doctorants et les post-doctorants du LISTIC : Rihab, Rizlene, Quentin, Zhangyun, Amaury, Cédric, Siwar, Alex, Héla, Etienne, Mikael et Emna pour leurs amitiés et leur soutien.

Je tiens à adresser toute ma profonde reconnaissance et ma gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont aidé, conseillé et encouragé. Je ne saurais remercier suffisamment ma famille en particulier mon mari, ma fille, mes parents ainsi que mes amis pour le soutien inestimable et inépuisable durant ces années de thèse.

# Table des matières

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>Résumé</b>   | <b>5</b>   |
| <b>Liste des figures</b>  | <b>iii</b> |
| <b>1 Introduction</b>   | <b>3</b>   |
| 1.1 Préambule   | 3          |
| 1.2 Le projet G4M   | 3          |
| 1.2.1 Objectifs du projet G4M                                     | 4          |
| 1.2.2 Pilotage du projet G4M                                      | 5          |
| 1.2.3 Les travaux de recherche                                    | 6          |
| 1.3 Démarche  | 7          |
| 1.4 Organisation du document                                      | 9          |
| <b>2 Géodétection de réseaux enterrés</b>                         | <b>13</b>  |
| 2.1 Introduction  | 13         |
| 2.2 Les problèmes de la géodétection des réseaux enterrés         | 13         |
| 2.3 Les réseaux enterrés  | 15         |
| 2.3.1 Les matériaux constitutants                                 | 17         |
| 2.3.2 Le terrain encaissant                                       | 18         |
| 2.3.3 Les produits transportés                                    | 18         |
| 2.3.4 Typologie des réseaux enterrés                              | 18         |
| 2.3.5 Propriétés des réseaux enterrés                             | 19         |
| 2.4 La procédure de géodétection des réseaux enterrés             | 20         |
| 2.4.1 Préparation des investigations complémentaires              | 20         |
| 2.4.2 Réalisation des investigations complémentaires              | 21         |
| 2.5 Les techniques de détection des réseaux enterrés              | 21         |
| 2.5.1 La technique de détection électromagnétique                 | 21         |
| 2.5.2 La technique vibro-acoustique                               | 24         |
| 2.5.3 Le géoradar   | 25         |
| 2.6 Travaux de recherche sur la géodétection des réseaux enterrés | 29         |
| 2.7 Conclusion  | 29         |
| <b>3 Des données aux connaissances</b>                            | <b>33</b>  |
| 3.1 Donnée, Information et Connaissance                           | 33         |
| 3.2 Imperfections de l'information                                | 34         |
| 3.3 Fusion  | 35         |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.3.1    | Fusion de données . . . . .  | 35        |
| 3.3.2    | Fusion d'informations . . . . .  | 35        |
| 3.3.3    | Fusion de connaissances . . . . .  | 36        |
| 3.4      | Représentation des connaissances et ontologies . . . . .                               | 37        |
| 3.4.1    | Introduction . . . . .   | 37        |
| 3.4.2    | La notion d'ontologie . . . . .  | 37        |
| 3.4.3    | Les composants d'une ontologie . . . . .   | 38        |
| 3.4.4    | Typologies des ontologies . . . . .  | 40        |
| 3.4.5    | La construction d'ontologies . . . . .   | 41        |
| 3.4.6    | Les outils de développement d'ontologies . . . . .                                     | 42        |
| 3.5      | Les connaissances spatiales . . . . .  | 45        |
| 3.5.1    | Notion de relation spatiale . . . . .  | 45        |
| 3.5.2    | Gestion de l'incertain . . . . .   | 48        |
| 3.6      | Conclusion . . . . .   | 49        |
| <b>4</b> | <b>Propositions</b> . . . . .  | <b>53</b> |
| 4.1      | Introduction . . . . .   | 53        |
| 4.2      | L'intégration d'informations contextuelles et a priori . . . . .                       | 54        |
| 4.2.1    | Les informations a priori sur les réseaux . . . . .                                    | 54        |
| 4.2.2    | Les informations contextuelles . . . . .   | 54        |
| 4.2.3    | Intégration par représentation des connaissances . . . . .                             | 54        |
| 4.3      | Vers une méthode de géodétection des réseaux enterrés . . . . .                        | 55        |
| 4.3.1    | Les facteurs influençant les données à partir de l'étude du terrain . . . . .          | 55        |
| 4.3.2    | Les facteurs influençant les connaissances par l'observation . . . . .                 | 56        |
| 4.3.3    | Spécification de la méthode de géodétection . . . . .                                  | 57        |
| 4.3.4    | Exploration . . . . .  | 59        |
| 4.3.5    | Traitement automatique et validation . . . . .   | 59        |
| 4.4      | Optimisation des technologies G4M . . . . .  | 59        |
| 4.4.1    | Améliorations de la technique GPR . . . . .  | 60        |
| 4.4.2    | Améliorations de la technique EM . . . . .   | 63        |
| 4.4.3    | Améliorations de la technique GT . . . . .   | 64        |
| 4.5      | Fusion multi-capteurs basée sur la confiance . . . . .                                 | 68        |
| 4.6      | Identification du tracé par raisonnement spatial . . . . .                             | 71        |
| 4.6.1    | Motivations . . . . .  | 72        |
| 4.6.2    | Extension des travaux de Tarski . . . . .  | 72        |
| 4.7      | Synthèse et discussion . . . . .   | 79        |
| <b>5</b> | <b>Vers une automatisation du traitement des informations et données G4M</b> . . . . . | <b>83</b> |
| 5.1      | Introduction . . . . .   | 83        |
| 5.2      | Détection automatique des données mono-capteur . . . . .                               | 84        |
| 5.2.1    | Détection automatique par électromagnétique . . . . .                                  | 84        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.2.2    | Détection automatique de canalisations en utilisant le Gas Tracker . . . . .     | 89         |
| 5.2.3    | Détection automatique de réseaux enterrés par GPR . . . . .                      | 94         |
| 5.2.4    | Détection des tags Eliot . . . . .   | 100        |
| 5.3      | Fusion multi-capteurs . . . . .  | 101        |
| 5.3.1    | Processus du système . . . . .   | 102        |
| 5.4      | Spécification des connaissances G4M . . . . .                                    | 104        |
| 5.4.1    | L'ontologie G4M . . . . .  | 104        |
| 5.4.2    | Raisonnement avec les règles SWRL et ses limites . . . . .                       | 106        |
| 5.4.3    | Spécification des connaissances terrain . . . . .                                | 110        |
| 5.5      | Spécification méreo-géométrique des données G4M : étude de faisabilité . . . . . | 113        |
| 5.5.1    | Étude de cas . . . . .   | 115        |
| 5.6      | Synthèse et discussion . . . . .   | 120        |
| <b>6</b> | <b>Expérimentations et résultats</b>   | <b>123</b> |
| 6.1      | Introduction . . . . .   | 123        |
| 6.1.1    | Cadre expérimental . . . . .   | 123        |
| 6.2      | Les campagnes expérimentales . . . . .   | 124        |
| 6.3      | Résultats . . . . .  | 125        |
| 6.3.1    | Résultats de la géodétection sur le terrain Savigny-sur-Orge . . . . .           | 125        |
| 6.3.2    | Résultats de la géodétection sur l'aire d'essai Crigen-Paris . . . . .           | 130        |
| 6.3.3    | Résultats de la géodétection sur le terrain MADE-Toulon . . . . .                | 136        |
| 6.4      | Synthèse . . . . .   | 141        |
| <b>7</b> | <b>Conclusion et Perspectives</b>  | <b>145</b> |
| 7.1      | Conclusion . . . . .   | 145        |
| 7.2      | Perspectives . . . . .   | 148        |
| <b>A</b> | <b>Géodétection des réseaux enterrés</b>   | <b>159</b> |
| A.1      | Introduction . . . . .   | 159        |
| A.2      | Cadre réglementaire . . . . .  | 159        |
| <b>B</b> | <b>Classification des réseaux enterrés</b>                                       | <b>163</b> |
| B.0.1    | Les réseaux de transport . . . . .   | 163        |
| <b>C</b> | <b>Présentation de la campagne d'acquisitions Toulon-MADE</b>                    | <b>171</b> |
| <b>D</b> | <b>Présentation de la campagne d'acquisitions Savigny-sur-Orge</b>               | <b>177</b> |
| <b>E</b> | <b>Algorithme de la définition de l'ontologie en Coq</b>                         | <b>179</b> |





# Table des figures

---

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Positionnement des thèses dans le projet G4M et leur intra-collaboration autour des techniques de détection. . . . .   | 7  |
| 2.1  | Exemples d’affleurants présentant des changements de diamètre, de nombre de sorties, et/ou de direction. . . . .   | 19 |
| 2.2  | Illustration de la détection électromagnétique passive (utilisation du détecteur uniquement). . . . .  | 22 |
| 2.3  | Exemples illustrant la détection active par raccordement direction, la détection active par pince d’induction et la technique par induction sans contact. . . . .                | 23 |
| 2.4  | Illustration de la détection électromagnétique active en utilisant la Flexitrace. . .  | 24 |
| 2.5  | Exemple de la propagation d’une onde électromagnétique dans un sol présentant deux milieux [16]. . . . .   | 26 |
| 2.6  | Exemples ; A-Scan, B-Scan et C-Scan[17]. . . . .   | 27 |
| 2.7  | Exemple de radargramme : deux hyperboles générées par deux canalisations enterrées parallèlement à la trajectoire du géoradar - Campagne d’acquisition Savigny-Sur-Orge. . . . . | 28 |
| 3.1  | Présentation de l’interface de l’éditeur Protégé [54]. . . . .   | 43 |
| 3.2  | Ensemble des huit relations topologiques exhaustives disjointes deux à deux [66].  | 46 |
| 3.3  | Relations de type cone-saphed VS projection-based. . . . .   | 46 |
| 3.4  | La relation $x^4$ . . . . .  | 47 |
| 3.5  | relations dimensions . . . . .   | 47 |
| 3.6  | relations distance . . . . .   | 48 |
| 4.1  | Découverte du terrain et détermination des facteurs influençant. . . . .   | 56 |
| 4.2  | Observation, vérification et repérage des affleurants sur le terrain. . . . .  | 57 |
| 4.3  | Les procédures à exécuter en fonction du plan et des affleurants. . . . .  | 58 |
| 4.4  | Procédures du processus de géodétection. . . . .   | 58 |
| 4.5  | Comparaison des techniques de détection en fonction des réseaux détectés, de leur dépendance du contexte et des résultats fournis. . . . .                                       | 60 |
| 4.6  | Détection d’une canalisation par le géoradar et représentation sous forme d’hyperbole sur le radargramme. . . . .  | 61 |
| 4.7  | Gas Tracker : matériel de la technique vibro-acoustique utilisée. . . . .  | 65 |
| 4.8  | Modélisation du terrain d’étude pour la sauvegarde des données récoltées par la technique Gas Tracker et la prise en compte de l’information spatiale associée. . .              | 67 |
| 4.9  | Étude de cas : Modélisation de la vérité terrain sous forme matricielle. . . . .   | 69 |
| 4.10 | Étude de cas : Modélisation des passages du géoradar sur le terrain d’études. . .  | 69 |
| 4.11 | Étude de cas : Les zones du terrain sondées par le géoradar. . . . .   | 70 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 4.12 | Étude de cas : Modélisation des hyperboles détectées sur le terrain d'étude. . . . .   | 70  |
| 4.13 | Étude de cas : Association des données de détection multi-capteurs avec les cases matrices. . . . .  | 71  |
| 4.14 | Représentation en 2D des primitives de Tarski. . . . .   | 74  |
| 4.15 | Exemples de sphères alignées : A,B et C. . . . .   | 76  |
| 4.16 | Exemple de congruence : les sphères A et B sont équivalentes. . . . .  | 76  |
| 4.17 | Exemple de droites parallèles à partir des paires de sphères. . . . .  | 77  |
| 4.18 | Calcul de l'angle fait par les droites de trois sphères. . . . .   | 77  |
| 4.19 | Illustration d'un point marginal F. . . . .  | 78  |
|      |  |     |
| 5.1  | Chaîne de traitement développée pour le système G4M de la géodétection automatique multi-capteurs des réseaux enterrés. . . . .  | 84  |
| 5.2  | Les points de détection sauvegardés par l'opérateur lors d'une campagne d'acquisitions EM. . . . .   | 86  |
| 5.3  | Les points de détection sauvegardés par l'opérateur lors d'une campagne d'acquisitions EM avec un réseau courbé changeant de direction. . . . .  | 87  |
| 5.4  | Nuage de points de détection électromagnétique. . . . .  | 87  |
| 5.5  | Création de segments entre les points de détection. . . . .  | 88  |
| 5.6  | Évaluation des angles faits par les segments successifs dans le but de retrouver le tracé du réseau enterré. . . . .   | 88  |
| 5.7  | Tracé du réseau enterré obtenu à partir des corrections basées sur les angles. . . . .   | 89  |
| 5.8  | Extrait de la base de données de l'acquisition du 11 Avril 2016 à l'aire d'essais de MADE- Toulon. . . . .   | 90  |
| 5.9  | Algorithme de traitement des données Gas Tracker. . . . .  | 92  |
| 5.10 | Les mesures obtenues sont représentées sous forme d'histogramme. . . . .   | 92  |
| 5.11 | L'ensemble des règles définies dans le modèle A1. . . . .  | 92  |
| 5.12 | Détection automatique d'hyperboles par les méthodes adaptative et Curvelet sur le radargramme 'Crigen_Juin2016 : PRC_7 et RAW_4'. . . . .  | 96  |
| 5.13 | Détection automatique d'hyperboles par les méthodes adaptative et Curvelet sur le radargramme 'Crigen_Juin2016 : PRC_11 et RAW_6'. . . . .   | 97  |
| 5.14 | Exemple de détection automatique d'hyperboles par deux approches, File : PRC_41, Site : Savigny-Sur-Orge 18/10/2016. . . . .   | 97  |
| 5.15 | Algorithme B-scan - Détection automatique d'hyperboles dans un B-scan basée sur la fusion de deux techniques de détection automatique : 'Adatative Detection' et 'Curvlet Detection'. . . . .                                | 98  |
| 5.16 | Variation du paramètre ScoreNbBlobs en fonction du nombre de blobs détectés sur le même radargramme. . . . .   | 98  |
| 5.17 | Algorithme C-scan : Détection automatique de réseaux enterrés en séparant le traitement des B-scans obtenus lors des passages transversaux des passages longitudinaux pour prendre en compte la notion de direction. . . . . | 99  |
| 5.18 | Représentation des connaissances du domaine de la géodétection sous forme de plusieurs ontologies décrivant ses sous-domaines. . . . .   | 105 |
| 5.19 | Extrait de l'ontologie conceptuelle des réseaux enterrés. . . . .  | 106 |
| 5.20 | Exemple de réseau de distribution de gaz naturel. . . . .  | 108 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 5.21 | Extrait de l'ontologie G4M implémentée en Coq par la définition de la méréogéométrie. . . . .                                    | 114 |
| 5.22 | Positionnement de notre approche par rapport à l'existant (méréogéométrie de Tarski). . . . .                                    | 114 |
| 5.23 | Scénario de l'étude de cas : trois réseaux détectés. . . . .   | 115 |
| 5.24 | Résultats de la détection de segments. . . . .   | 119 |
|      |  |     |
| 6.1  | Résultats de la représentation spatiale du terrain et des zones parcourues par le GPR. . . . .                                   | 125 |
| 6.2  | Résultats de la représentation spatiale du terrain et des hyperboles détectées. . .  | 126 |
| 6.3  | Résultats de la représentation spatiale du terrain et des hyperboles filtrées. . . . .   | 126 |
| 6.4  | Résultats de la représentation spatiale du terrain et des Blobs détectés. . . . .  | 127 |
| 6.5  | Résultats de la représentation spatiale du terrain et des Blobs filtrés. . . . .   | 127 |
| 6.6  | Résultats de la recherche d'alignements en se basant sur les hyperboles filtrées. . .  | 127 |
| 6.7  | Résultats de la recherche d'alignements en se basant sur les blobs filtrés. . . . .  | 128 |
| 6.8  | Résultats de la détection de tracés par la technique de fusion Blobs-Hyperboles. . .   | 128 |
| 6.9  | Résultats de la technique basée sur l'estimation de la présence d'un réseau enterré par région. . . . .                          | 129 |
| 6.10 | Représentation des points de détection EM. . . . .   | 129 |
| 6.11 | Résultats de la détection automatique par EM. . . . .  | 130 |
| 6.12 | La canalisation détectée par fusion multi-capteurs EM/GPR. . . . .   | 130 |
| 6.13 | Vérité terrain de l'aire d'essais du Crigen-Paris. . . . .   | 131 |
| 6.14 | Modélisation du terrain et représentation des données $D2_L$ . . . . .   | 131 |
| 6.15 | Modélisation du terrain et représentation des données $D2_T$ . . . . .   | 131 |
| 6.16 | Modélisation du terrain et représentation des données $D3_L$ . . . . .   | 131 |
| 6.17 | Modélisation du terrain et représentation des données $D3_T$ . . . . .   | 131 |
| 6.18 | $D2'_L$ : Filtrage des données $D2_L$ . . . . .  | 132 |
| 6.19 | $D2'_T$ : Filtrage des données $D2_T$ . . . . .  | 132 |
| 6.20 | $D3'_L$ : Filtrage des données $D3_L$ . . . . .  | 132 |
| 6.21 | $D3'_T$ : Filtrage des données $D3_T$ . . . . .  | 132 |
| 6.22 | Résultats de la détection d'alignements sur l'ensemble de données $D2'_L$ . . . . .  | 133 |
| 6.23 | Résultats de la détection d'alignements sur l'ensemble de données $D2'_T$ . . . . .  | 133 |
| 6.24 | Résultats de la détection d'alignements sur l'ensemble de données $D3'_L$ . . . . .  | 133 |
| 6.25 | Résultats de la détection d'alignements sur l'ensemble de données $D3'_T$ . . . . .  | 133 |
| 6.26 | Zones de détection avec des scores de confiance exprimés par des couleurs avec les données GPR obtenues en longitudinal. . . . . | 134 |
| 6.27 | Zones de détection avec des scores de confiance exprimés par des couleurs avec les données GPR obtenues en transversal. . . . .  | 134 |
| 6.28 | Résultats de la méthode de détection $M2$ en longitudinal. . . . .   | 134 |
| 6.29 | Résultats de la méthode de détection $M2$ en transversal. . . . .  | 134 |
| 6.30 | Résultats de détection avec la méthode $M3$ sur l'ensemble de données $D2'_L \cup D3'_L$ . . .                                   | 134 |
| 6.31 | Résultats de détection avec la méthode $M3$ sur l'ensemble de données $D2'_T \cup D3'_T$ . . .                                   | 134 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 6.32 | Résultat final de la détection automatique par la technique GPR. . . . .   | 135 |
| 6.33 | Comparaison du résultat avec le plan du terrain d'étude. . . . .   | 135 |
| 6.34 | Modélisation du terrain et représentation des données EM. . . . .  | 136 |
| 6.35 | Résultat de la détection par EM : tracé de la canalisation. . . . .  | 136 |
| 6.36 | Résultat de la détection automatique multi-capteurs. . . . .   | 136 |
| 6.37 | Plan du terrain d'étude du Crigen avec 10 réseaux enterrés. . . . .  | 136 |
| 6.38 | Terrain d'études MADE-Toulon présentant deux types de sol. Trois réseaux y sont enterrés : une canalisation de gaz PE, une canalisation PE d'eaux pluviales et un câble électrique inaccessible pour la détection. . . . . | 137 |
| 6.39 | Filtrage des résultats de la détection par GasTracker par branchement à la canalisation PE de Gaz . . . . .  | 137 |
| 6.40 | Points potentiels de détection sélectionnés par l'algorithme de la détection automatique par GT. . . . .   | 138 |
| 6.41 | Résultat de la détection automatique par GT : Tracé de la canalisation PE de gaz.138   | 138 |
| 6.42 | Filtrage des résultats de la détection adaptative avec un seuil de fausses alarmes fixé à 0.5. . . . .   | 139 |
| 6.43 | Sept réseaux détectés avec seuil détection à 400. . . . .  | 140 |
| 6.44 | Deux réseaux détectés avec seuil détection à 500. . . . .  | 140 |
| 6.45 | Filtrage des résultats de la détection adaptative avec un seuil de fausses alarmes fixé à 0.7. . . . .   | 140 |
| 6.46 | Deux réseaux détectés avec seuil détection à 60. . . . .   | 141 |
| 6.47 | Résultats de détection multi-capteurs GT/GPR. . . . .  | 141 |
| B.1  | Carte du réseau de transport d'électricité existant et les ouvrages en projet ayant obtenus une déclaration d'utilité publique [98]. . . . .   | 164 |
| B.2  | Plan du réseau de transport du gaz naturel en France [100]. . . . .  | 165 |
| B.3  | Plan du réseau français de transport des hydrocarbures [99]. . . . .   | 166 |
| D.1  | Plan des réseaux enterrés dans le terrain d'étude. . . . .   | 178 |
| D.2  | Plan topographique des réseaux enterrés dans le terrain d'étude. . . . .   | 178 |

# Introduction Générale



# Introduction

---

## 1.1 Préambule

Les accidents engendrés par les travaux de voirie ont parfois des conséquences catastrophiques et peuvent causer des pertes humaines et financières importantes. La détection préalable des réseaux enterrés par des techniques récentes non intrusives appelée géo-détection devrait à terme fournir une solution à ce problème. Les autorités gouvernementales s'intéressent davantage à la mise en œuvre de la géodétection et tentent de trouver des solutions. À ce jour, il n'existe aucune méthode efficace permettant de détecter avec précision tous les types de réseaux indépendamment de leur nature, des produits qu'ils transportent et de la nature du terrain dans lequel ils sont enterrés. Par ailleurs, les méthodes utilisées ne permettent pas une détection précise et fiable de l'ensemble des réseaux enterrés. À ces limites s'ajoute leur forte dépendance à l'environnement comme la profondeur des réseaux, les propriétés du terrain et les perturbations environnantes pouvant affecter le signal émis ou altérer son résultat.

## 1.2 Le projet G4M

Le projet FUI G4M "Géodétection Multi-Matériaux Multi-Métiers" est un programme de recherche sélectionné lors du 16<sup>ème</sup> appel à projets du Fonds unique interministériel avec le soutien de plusieurs pôles de compétitivité à savoir : Pôle Risques, Pôle CapEnergies, Pôle Advancity et Pôle Axelera.

Porté par ENGIE, G4M a pour principal objectif d'améliorer la géodétection et géolocalisation des réseaux enterrés par l'optimisation et l'intégration de techniques existantes dans un seul prototype. Parallèlement, le projet vise à répondre à la norme "Anti-endommagements" qui impose aux concessionnaires des réseaux enterrés de classer leurs réseaux d'ici 2020 dans la classe de précision la plus élevée à savoir la classe A.

Pour répondre à ce besoin, le projet G4M réunit plusieurs entreprises et laboratoires de recherche depuis son démarrage en Octobre 2013, afin d'identifier les problèmes de la géodétection de manière efficace, d'améliorer les techniques existantes en prenant en compte les lacunes identifiées et de proposer des solutions efficaces en termes de méthodologies, de procédures, de techniques et d'outils.

### 1.2.1 Objectifs du projet G4M

Le projet G4M est au cœur de la problématique de la géodétection et de la géolocalisation des réseaux enterrés. Il s'intéresse de très près à l'étude de l'origine des problèmes pour apporter les solutions adéquates.

En effet, l'absence d'une méthode universelle permettant de détecter ou de localiser un réseau enterré indépendamment de sa nature ou de celle du milieu encaissant constitue un sérieux problème sécuritaire, économique, patrimonial et environnemental. À cela s'ajoute l'absence de moyens de détection efficaces car les techniques existantes permettent de détecter ou de localiser manuellement certains réseaux, sous réserve de remplir des conditions spécifiques. Elles sont liées à la nature du réseau, du produit transporté ou du milieu du réseau enterré. À cet effet, nous ne disposons aujourd'hui d'aucune technique permettant de réaliser une procédure de géoréférencement complète comprenant la détection, la géolocalisation et la mise à jour d'un système d'information géographique.

Pour surmonter ces difficultés, le projet G4M a pour but de développer un prototype de détection des réseaux enterrés basé sur quatre techniques existantes en les optimisant et en les fusionnant. Ces quatre techniques sont respectivement, le radar géologique (GPR), la détection vibro-acoustique, la détection électromagnétique et l'utilisation de puces communicantes. Pour ce faire, le programme G4M vise à :

(1) Optimiser les quatre techniques de détection les plus utilisées et à les intégrer dans un seul prototype. Le but de cette démarche est de combler les lacunes de chaque technique par les avantages apportés par une autre technique. Outre son acquisition à prix maîtrisé, l'utilisation d'une machine universelle offrira à l'opérateur chargé de réaliser des investigations complémentaires, une utilisation simplifiée et un accès possible et rapide à l'ensemble des techniques.

(2) Par cette démarche, G4M vise notamment à améliorer les performances des techniques existantes en améliorant le traitement des données issues de chaque outil et par la prise en compte d'informations contextuelles dans des systèmes intelligents dotés d'une capacité de transmission et de mise à jour d'un SIG<sup>1</sup>. Par ce biais, le traitement automatique des données et des informations permet de baisser le risque d'erreurs sur les détections et de maximiser les chances de détecter l'ensemble des réseaux enterrés.

Ainsi, le projet G4M répond au cadre réglementaire et à la norme "anti-endommagement" ainsi qu'à plusieurs enjeux :

- Enjeu sécuritaire car il permet de préserver la sécurité des opérateurs, des riverains et des biens.
- Enjeu économique parce qu'il vise à limiter le risque d'endommagement des réseaux enterrés et à offrir une meilleure maîtrise des coûts des investigations complémentaires.
- Enjeu patrimonial par une meilleure précision de localisation et par conséquent, une meilleure connaissance des réseaux enterrés, puis, par la constitution d'une cartographie complète et précise des réseaux enterrés.
- Enjeu environnemental par la réduction de l'impact des chantiers sur l'environnement ce qui implique la réduction des risques d'endommagement des réseaux enterrés pouvant être cause de pollution de l'environnement par la fuite d'un produit.

---

1. SIG : Système d'Information Géographique



Enfin, la convergence vers une méthode de géodétection non-intrusive permet d'éviter la réalisation de tranchées dans le sol.

## 1.2.2 Pilotage du projet G4M

### 1.2.2.1 Partenaires du projet G4M

Le projet G4M est conduit par un comité de pilotage composé de huit partenaires industriels et universitaires et est encadré principalement par son leader ENGIE Crigen Lab. Les partenaires industriels du projet sont :

- **Engie Crigen Lab** est le centre de recherche du groupe ENGIE porteur et leader du projet G4M.
- **J&P GEO** est un cabinet de conseil en innovation technologique qui accompagne le projet G4M dans la compréhension de la problématique et dans l'identification des principaux leviers techniques et organisationnels.
- **MADE-SA** est une société toulonnaise apportant son savoir-faire en électronique et analogie pour les besoins du projet G4M en plus de fournir la technologie Gas Tracker dont elle est propriétaire.
- **RYB** est l'entreprise chargée du développement de la technique de détection à base de puces RFID appelée ELIOT (Équipement de Localisation et D'Identification d'Ouvrage en Terre).
- **GFI Informatique** est un groupe de services informatiques spécialiste de la conception de solutions informatiques. GFI intervient sur les aspects informatiques comme l'architecture du système, l'intégration logicielle et le développement de l'interface Homme-Machine.
- **Design Tech Centre (DTC)** est un bureau d'étude spécialiste de la conception et de la réalisation de prototypes intégrant des innovations technologiques.

Deux laboratoires de recherche sont impliqués dans le projet afin de mener les travaux de recherche à travers trois thèses de doctorat en informatique et en traitement du signal :

- **Télécom-ParisTech** est le centre de recherche de l'institut Mines-Télécom, il apporte ses compétences en traitement d'images pour l'amélioration du traitement des images GPR.
- **LISTIC** est un laboratoire de recherche de l'université Savoie Mont Blanc, il apporte au projet G4M ses compétences en traitement de signal, en ingénierie de connaissances et traitement d'information.

D'autres intervenants ayant participé au projet G4M sans être membre du comité de pilotage peuvent être cités comme US Radar, IDS, Radiodetection, etc.

### 1.2.2.2 Organisation du projet G4M

L'ensemble de ces partenaires participent au pilotage du projet G4M et s'assurent de son bon déroulement en contribuant à une ou plusieurs tâches. En effet, le projet est organisé en huit groupes appelés workpackages. Chaque workpackage traite une problématique spécifique et est réalisé par un ou plusieurs partenaires. La répartition des tâches dans les workpackages peut être résumée comme suit :

- **Coordination du projet (WP1)** : réalisée principalement par ENGIE Crigen Lab avec la collaboration de tous les partenaires. L'équipe se réunit régulièrement lors de comités de pilotage pour assurer le bon fonctionnement et l'avancement du projet, la communication avec les collaborateurs extérieurs et le suivi des travaux des doctorants.
- **Expression des besoins (WP2)** : réalisée principalement par ENGIE Crigen et J&P Geo, l'objectif de cette étape est de réaliser une étude normative et réglementaire du domaine de la géodétection des réseaux enterrés et une étude des besoins du futur prototype.
- **Rédaction du cahier des charges (WP3)** : ce groupe de travail a pour objectif de définir le cahier des charges du prototype G4M.
- **Traitement du signal, de l'image et algorithmie (WP4)** : composé des partenaires MADE-SA, Télécom-ParisTech et LISTIC, ce groupe encadre les travaux de recherche et les études réalisées sur l'analyse, le traitement et la fusion des données issues des techniques de détection prévues dans le prototype G4M.
- **Optimisation et adaptation des technologies (WP5)** : les travaux prévus dans ce groupe portent principalement sur l'intégration fonctionnelle des quatre technologies et sur la conception de l'architecture technique du prototype les combinant.
- **Intégration du prototype (WP6)** : porte principalement sur l'intégration matérielle, l'assemblage sur prototype et l'intégration logicielle la conception du logiciel associé et la réalisation de son interface).
- **Validation en laboratoire et in-situ (WP7)** : Cette étape a pour but de réaliser les tests du prototype développé et d'évaluer ses performances.
- **Dissémination (WP8)** : Ce travail marque la fin du projet et consiste en la remise de l'ensemble des livrables attendus.

### 1.2.3 Les travaux de recherche

La géodétection des réseaux enterrés est un domaine de recherche très peu exploré à ce jour. Il n'existe pas de concurrence au prototype G4M mais des briques techniques, qui utilisées de façon indépendante, présentent des limitations intrinsèques<sup>2</sup>.

Afin d'améliorer l'état de l'art et les connaissances du domaine, le projet G4M a financé trois thèses pour la réalisation des travaux de recherche dans ce cadre. L'objectif des travaux de ces thèses est de maîtriser la problématique de la géodétection des réseaux enterrés, d'améliorer le traitement des données multi-capteurs, de proposer les premières approches innovantes et d'automatiser le traitement des données hétérogènes afin de fournir un unique résultat de détection.

Les travaux des deux premières thèses sont consacrés à l'amélioration des traitements des données GPR. La première thèse réalisée par G. Terrasse [1] a pour but d'améliorer la détection automatique des hyperboles par l'analyse d'images GPR. La seconde thèse est réalisée par Q. Hoarau [2] et s'intéresse à la même problématique mais propose une seconde approche basée sur le traitement des données GPR brutes.

La troisième thèse dont les travaux sont présentés dans ce manuscrit, a pour objectif d'amé-

---

2. Rapport interne G4M

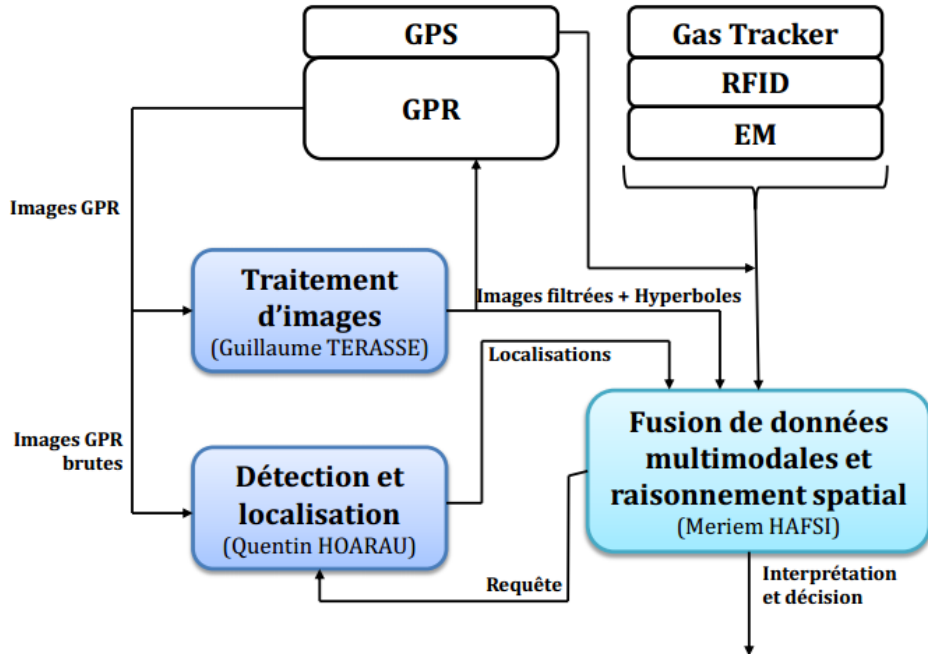


FIGURE 1.1 – Positionnement des thèses dans le projet G4M et leur intra-collaboration autour des techniques de détection.

liorer le traitement des données hétérogènes multi-capteurs et s'intéresse à la représentation et à l'intégration des connaissances métier. De plus, des techniques de raisonnement et de représentation spatiale sont explorées au cours de cette thèse pour proposer une nouvelle technique de géodétection automatique et intelligente basée sur la fusion multi-capteurs multimodale.

### 1.3 Démarche

Pour résoudre les problèmes liés à l'intégration multiple de données et d'informations hétérogènes, il est nécessaire de trouver dans un premier temps, le moyen de les représenter en offrant un discours commun et partagé par les différentes techniques de détection pour en assurer l'interopérabilité. Ce moyen de représentation doit être capable d'assumer les imperfections des informations a priori. L'utilisation d'ontologies est l'approche la plus adaptée pour la représentation de ces dernières sous forme de connaissances symboliques. En effet, les ontologies permettent de modéliser les connaissances d'un domaine sous forme de concepts décrits par leurs propriétés et les relations qui les lient les uns aux autres. De plus, l'utilisation d'ontologies permet d'offrir des mécanismes de raisonnement pour inférer de nouvelles connaissances pouvant améliorer la géodétection des réseaux enterrés et renforcer la certitude des détections obtenues.

L'objectif du projet G4M est de développer un prototype intégrant quatre techniques de détection basées sur des mécanismes différents. La thèse repose sur une dualité entre, d'une part, la nécessité de fournir un outil pouvant répondre rapidement à la problématique de géodétection des réseaux enterrés, et l'étude de faisabilité d'un modèle de représentation des connaissances d'autre part. L'intérêt réside d'une part dans les possibilités d'analyse sémantique des données et d'autre part dans la disponibilité de connaissances intégrables dans un système d'information géographique.

La première partie nécessite la mise au point d'un prototype matériel et logiciel utilisant les quatre techniques de détection citées plus haut. D'un point de vue industriel, la finalité de cette partie est la preuve du concept G4M par la mise en place d'une chaîne de traitement fonctionnelle. En effet, les travaux menés durant cette thèse ont pour but de mettre en place une chaîne de traitement complète des informations et des données récoltées par un opérateur sur un terrain et de fournir un résultat de détection auquel est associé un niveau de confiance. La mise en place de cette chaîne de traitement est une tâche pluridisciplinaire qui doit s'appuyer sur plusieurs domaines de recherche.

Les informations a priori soulèvent un besoin de représentation des connaissances et de raisonnement. L'hétérogénéité des données et des informations soulève le problème des imperfections de l'information et l'importance de leur associer un degré de certitude. Le géoréférencement des données incertaines fait appel aux approches de représentation spatiale et à la modélisation spatiale. Enfin, l'intégration de capteurs multiples soulève le besoin de fusion de connaissances et d'informations.

Dans la pratique, nous n'avons pu utiliser la dernière technique car basée sur la détection de puces communicantes, ces dernières sont aujourd'hui rarement présentes sur le terrain. L'intégration des données capteur a ainsi été réalisée sur les trois techniques suivantes s'articulant sur des principes physiques différents.

La première technique est le géoradar (communément appelé radar géologique ou radar de sol) il permet de sonder le sol suivant une trajectoire en envoyant une onde électromagnétique qui est réfléchié en cas de changement de la permittivité diélectrique dans le sous-sol. Il fournit en sortie des images géoradars appelées radargrammes. Ainsi, la présence d'une forme cylindrique régulière dans le sol générera une hyperbole sur l'image géoradar. L'interprétation et l'analyse de ces images en prenant en compte des paramètres du terrain sondé comme l'humidité et les composants du sol, peut indiquer la présence d'une canalisation correspondant aux hyperboles détectées dans les images.

La seconde technique intégrée est la détection électromagnétique. Elle consiste à détecter les champs électromagnétiques induits par les canalisations métalliques et les réseaux électriques. Cette technique est réalisée suivant différents modes ayant des niveaux de fiabilité variables. Le choix du mode d'utilisation est fait en fonction de la nature du réseau, de l'accès au réseau et de l'environnement.

La troisième technique intégrée est la détection vibro-acoustique. Elle permet d'injecter un signal acoustique dans les canalisations plastiques puis de rechercher, à partir de la surface du sol, le maximum du signal acoustique propagé dans l'ensemble du réseau pour repérer sa position et obtenir son tracé.

Ces techniques possèdent des fonctionnements différents à plusieurs niveaux : la nature du signal émis et/ou reçu, des phénomènes physiques mesurés, de leur sensibilité et des réseaux pouvant être détectés. Leur combinaison ne peut qu'améliorer la détection des réseaux enterrés et renforcer le degré de confiance associé. Cependant, pour permettre la fusion des données qu'elles fournissent, il est primordial qu'elles utilisent le même système référentiel pour la géolocalisation. Ces techniques doivent être liées entre elles par les principaux éléments qu'elles partagent à savoir, le terrain d'études et les réseaux qui y sont enterrés. Pour rendre possible cette fusion, des techniques de représentation spatiale peuvent être appliquées pour combiner les données

géoréférencées et les connaissances a priori et automatiser le processus de géodétection multi-capteurs. Par ailleurs, la combinaison de plusieurs capteurs ne peut être fructueuse que si un système de fusion et d'intégration efficace est mis en place. Il doit intégrer les connaissances de l'ontologie, assurer la fusion des données issues de chaque capteur avec le degré de confiance associé à chaque connaissance et à chaque donnée. Par ailleurs, il est clair que cette partie est principalement centrée sur l'analyse quantitative des données issues des thèses précédentes.

La seconde partie s'appuiera d'une part sur la spécification des connaissances qualitatives au travers d'ontologies et d'autre part sur les travaux de [3] qui introduisent l'approche qualitative de type géométrie sans point dont l'objectif est de disposer d'une base de connaissances spatiales adaptée au raisonnement symbolique. Elle sera développée dans les section 3.6 du chapitre 3 ainsi qu'à la section 4.5 du chapitre 4. L'objectif est de fournir une spécification des connaissances reliée d'une part à l'ontologie métier G4M et aux axiomes spatiaux du modèle de la géométrie sans points. L'intérêt est donc de disposer à terme d'une base de connaissances symboliques facilitant la prise de décision de l'opérateur.

## 1.4 Organisation du document

Le présent document est organisé de la manière suivante :

Dans les deux premiers chapitres, nous présentons l'état de l'art. Nous examinons tout d'abord la méthodologie de géodétection des réseaux enterrés et les moyens actuels pour mettre en évidence les faiblesses de la réalisation de cette pratique, les besoins de représentation des connaissances et de traitement de l'information. Nous présentons ensuite, dans le second chapitre, les modèles de représentation des connaissances et plus précisément les ontologies. Aussi, nous nous intéressons à la formalisation de l'information spatiale en Informatique et au raisonnement spatial. Nous finissons par synthétiser les méthodes de fusion d'informations et de connaissances pour les besoins de la géodétection des réseaux enterrés.

Au cours du troisième chapitre, nous développons les limites de la méthodologie de géodétection des réseaux enterrés et nous proposons de nouvelles approches pour améliorer les techniques existantes et permettre de récolter, traiter et fusionner les données issues de chacune dans un système de traitement d'informations et de connaissances.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons nos contributions dans ce contexte et les différentes approches mises en œuvre pour améliorer la géodétection des réseaux enterrés, pour représenter les connaissances du domaine et pour le traitement des données issues des capteurs du prototype.

Nous développons et évaluons la démarche proposée et adoptée à travers des études de cas et nous présentons les résultats obtenus dans le cinquième chapitre.

Nous terminerons ensuite par une conclusion générale, des perspectives et quelques annexes.



## Chapitre II : La géodétection de réseaux enterrés





# Géodétection de réseaux enterrés

---

## 2.1 Introduction

La géodétection des réseaux enterrés est un métier qui consiste à réaliser une étude du terrain afin de localiser les réseaux qui y sont enterrés. Elle est pratiquée par un ou plusieurs opérateurs expérimentés en utilisant des méthodes ou des technologies spécifiques. L'objectif principal est d'identifier puis de localiser les réseaux enterrés avant la réalisation des travaux de voirie ou simplement pour mettre à jour la cartographie en améliorant sa précision pour des enjeux à long terme. L'intérêt évident consiste à ne pas endommager ces réseaux et ne pas mettre la sécurité des opérateurs et des riverains en jeu.

Les conséquences engendrées peuvent être considérables et exposer les opérateurs et la population à des risques importants. À titre d'exemple, plus de 100000 endommagements sont recensés chaque année en France lors des travaux à proximité des quatre millions de kilomètres de réseaux souterrains, aériens et subaquatiques présents sur le territoire français [4][5].

## 2.2 Les problèmes de la géodétection des réseaux enterrés

Les accidents engendrés par les mauvaises manipulations des réseaux enterrés et les risques qui en découlent ont poussé les autorités à s'intéresser davantage à leur géodétection préalable. En effet, la réglementation sur l'encadrement des travaux est en cours d'évolution depuis plusieurs années et elle n'a jamais été mieux encadrée qu'elle l'est aujourd'hui. Cependant, malgré les efforts qui y sont consacrés, ces derniers restent encore insuffisants face aux risques existants et à la problématique de la géodétection [6]. La réglementation fournit un encadrement complet en mettant en place des normes qui visent principalement à définir et à renforcer le rôle et la responsabilité de chacun des intervenants en les sensibilisant davantage aux risques existants. En revanche, cette dernière ne résout pas la problématique liée à la géodétection des réseaux enterrés qui se heurte à plusieurs difficultés, en particulier les difficultés techniques.

### Réseaux enterrés inconnus

Les premiers réseaux installés ont été enterrés dans des conditions et suivants des règles différentes de celles que l'on peut avoir aujourd'hui. Leur installation a été réalisée sans prévoir les futures évolutions possibles et sans la prise en compte de l'existant puisque les réseaux enterrés étaient rares. Les risques n'étaient pas encore identifiés au vu de la densité faible des réseaux. Au fil du temps, le besoin d'intervention sur les réseaux, l'installation de nouveaux réseaux dans des zones à forte densité et l'apparition des premiers incidents ont fait ressentir le besoin de

les référencer pour mieux les gérer. Les moyens utilisés pour répondre à ce besoin ont connu beaucoup de changements avec les avancées technologiques en passant de la cartographie sur papier aux SIG.

À cela s'ajoutent les mauvaises pratiques de certains gestionnaires lors de l'installation de nouveaux réseaux ou lors de la modification des réseaux existants. En effet, certaines nouvelles installations ne donnent pas forcément lieu à une mise à jour de la cartographie existante et ne sont pas communiquées, ce qui rend les plans obsolètes et augmente le risque de découverte de réseaux non répertoriés lors des travaux. Inversement, des réseaux répertoriés sont introuvables car ils sont supprimés ou modifiés sans mettre à jour la cartographie existante.

D'autres phénomènes peuvent rendre l'identification des réseaux enterrés difficile comme les phénomènes naturels : les glissements de terrain, les séismes, la modification de la chaussée et les constructions/destructions de la surface, etc.

Cette analyse fait ressortir une des principales difficultés de la géodétection des réseaux enterrés qui est liée au manque de connaissances. À ce jour, il n'existe pas de cartographie complète répertoriant l'ensemble des réseaux existants avec précision. L'état actuel et les moyens mis en œuvre à ce jour font que des réseaux en fonction, inconnus ou perdus, peuvent exister. Même s'ils sont répertoriés dans une cartographie, la fiabilité de cette dernière n'est pas garantie. Elle peut être obsolète si des travaux ont été réalisés ou si des réseaux ont été modifiés ou supprimés sans la mettre à jour. Elle peut être incomplète si des réseaux existent sur le terrain et qu'ils n'y sont pas répertoriés et peut être imprécise ou erronée si elle présente des incohérences avec les éléments de surface.

## **Terrain et environnement défavorables**

Le terrain dans lequel les réseaux enterrés n'est pas toujours favorable aux techniques de détection utilisées. En effet, les composants du sol et ses propriétés ont une influence sur le signal émis par les outils utilisés et les résultats peuvent varier considérablement en fonction de l'humidité, des couches souterraines et du remblaiement, de la composition chimique du sol ainsi que des perturbations présentes dans l'environnement comme les perturbation électriques, électromagnétiques et sonores.

## **Densité des réseaux**

Le milieu urbain, dont le besoin de distribution en énergie pour les habitants est de plus en plus important, constitue un terrain potentiellement risqué lors des travaux. En effet, ces zones urbaines représentent un milieu de croisement d'un nombre important de réseaux qui sont très difficiles à identifier et à distinguer les uns des autres, particulièrement dans des zones étroites comme les trottoirs et les routes.

Les réseaux enterrés en question sont nombreux et très denses. Souvent, leur position et les informations les concernant sont indisponibles. Les produits qu'ils transportent diffèrent ainsi que leur sensibilité à la sécurité. En France, il existe quatre millions de réseaux dont un tiers sont aériens et deux tiers sont enterrés ou subaquatiques. 40% de l'ensemble de ces réseaux sont sensibles pour la sécurité des personnes et 60% sont à la fois sensibles pour la sécurité

humaine et ont une importance économique majeure [6]. De ce fait, la méconnaissance de leur sensibilité en plus de leur localisation, conduit à de nombreux accidents : 100000 dommages ont lieu en France chaque année. Parmi ces dommages, 4500 fuites de gaz dont certaines sont suivies d'inflammation ou d'explosion [6].

### Négligences multiples lors des travaux

Le manque de communication entre les différents acteurs intervenant, de façon directe ou indirecte, sur les réseaux constitue un problème majeur. Cette négligence est une accumulation de manquements pouvant engendrer des incidents lors des travaux à proximité des réseaux enterrés [6]. Le manque d'implication et de conscience des enjeux [6] fait qu'il est urgent de mettre en place des procédures obligeant les maîtres d'ouvrage et les exploitants des réseaux à collaborer et à partager les informations nécessaires à la réalisation de travaux en toute sécurité.

### Coûts des prestations

Les prestations de géodétection sont des procédures ayant beaucoup de contraintes pratiques et financières. Elles sont liées à l'environnement du chantier, nécessitent un temps de travail conséquent et génèrent des coûts importants. De plus, ces prestations doivent être réalisées par des opérateurs formés ayant des compétences confirmées en la matière [6].

### Détecteurs impuissants

Enfin, une des difficultés est liée aux outils de détection utilisés. En effet, les méthodes et techniques actuelles sont parfois inefficaces sur certains terrains. Elles dépendent fortement de l'environnement et sont incapables de détecter l'ensemble des réseaux enterrés. Étant dans un environnement dynamique, les résultats de ces techniques sont difficilement interprétables et peuvent être imprécis, erronés ou incohérents.

Afin de réduire ces accidents et prévenir les risques liés aux travaux à proximité des réseaux enterrés, le gouvernement a établi un plan d'action basé sur une refonte de la réglementation. Cette refonte est constituée d'une procédure obligatoire favorisant la communication et l'échange entre les maîtres d'ouvrage et les exploitants des réseaux. Le cadre réglementaire de cette refonte est présenté dans l'annexe A.

## 2.3 Les réseaux enterrés

### Définitions

**Réseau enterré :** Selon Wikipédia, un réseau est un ensemble inter-connecté fait de composants et de leurs inter-relations autorisant la circulation en mode continu ou discontinu de flux ou éléments finis (réseau logistique, routier, ferroviaire, urbain, fluvial, aérien, réseau de ressources).

Un réseau enterré peut être vu comme un ensemble de canalisations ou de câbles interconnectés de façon à autoriser la circulation en mode continu ou discontinu de flux (électricité, eau, gaz et autres) dans le but de le transporter ou de le distribuer [7].

Un réseau enterré est la partie enterrée d'un réseau de transport ou de distribution d'un produit ou d'une énergie d'une ou plusieurs sources vers une ou plusieurs destinations. Il est composé de plusieurs nœuds sources, intermédiaires ou finaux reliés entre eux par des liaisons (câbles ou canalisations).

Selon la nature des produits véhiculés, nous distinguons deux catégories principales : les systèmes de canalisations et les réseaux câblés.

**Système de canalisations :** il est composé de canalisations transportant un fluide dans un état liquide ou gazeux et sous pression dans certains cas. Le choix du matériau de la canalisation et de son diamètre dépend du produit transporté, de l'environnement de la canalisation et de son usage. Des normes d'installation existent depuis quelques années associant les matériaux et les diamètres en fonction du produit et de la fonction de la canalisation.

Outre les sources et les destinations finales, les nœuds intermédiaires ont une fonction et sont faits de matériaux différents. Selon leur fonction, nous retrouverons les coudes qui occasionnent un changement de direction du réseau, les connexions T qui créent une redistribution ou une intersection et les réducteurs impliquant une réduction du diamètre du réseau.

**Canalisation :** elle est constituée d'un ensemble de tubes ou tuyaux soudés entre eux. Une conduite est une canalisation dont le flux et la dimension sont réduits.

**Réseau câblé :** c'est un réseau transportant de l'énergie électrique à haute, moyenne, basse ou très basse tension ou d'autres énergies comme la fibre optique. Les réseaux câblés sont principalement constitués de câbles dont la composition dépend de l'énergie véhiculée.

**Câble :** désigne un ensemble de fils conducteurs regroupés avec un blindage électromagnétique extérieur auxquels s'ajoutent parfois des fils de contrôle ou des fibres optiques. Le câble électrique est utilisé pour le transport d'énergie ou pour la transmission de données.

**Réseau électrique :** c'est un ensemble d'infrastructures énergétiques permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs. Constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans les postes électriques (par l'intermédiaire de transformateurs qui changent la tension).

**Ligne électrique :** assurant le transport de l'énergie, elle est constituée d'un terne composé de trois phases. Chaque phase peut être constituée d'un ou plusieurs conducteurs. Une ligne électrique est composée d'un ou plusieurs câbles électriques enrobés dans une protection (gaine). Elle possède une tension et transporte un flux électrique qui génère un champ magnétique.

**Affleurants :** ce sont des composants du réseau enterré visibles sur la surface du sol. Ce sont des parties émergentes du réseau enterré pouvant servir d'accès ou d'indicateur de présence. Les regards, les bouches d'égouts et les compteurs en sont des exemples.

### 2.3.1 Les matériaux constituants

Le matériau de la canalisation désigne la matière dont la canalisation est fabriquée. Plus généralement, un matériau est la forme marchande d'une matière première choisie en raison de propriétés d'usage spécifiques et mise en œuvre par des techniques appropriées pour l'obtention d'un objet de géométrie donnée à fonction préméditée [8].

Ainsi, pour choisir le matériau le plus adapté lors de la fabrication d'une canalisation, il est nécessaire de déterminer les propriétés adéquates du matériau constituant afin de répondre aux exigences et de remplir le rôle destiné à la canalisation.

**Propriétés des matériaux :** les matériaux sont définis par un ensemble de propriétés qui les distinguent [9] : physiques, chimiques, atomiques, électriques, etc. Dans ce qui suit, nous nous intéressons aux matériaux utilisés pour la fabrication des canalisations et aux propriétés requises pour leur fabrication.

**Matériaux des canalisations :** l'état de l'art a fait ressortir l'existence de canalisations dans divers matériaux. Plusieurs types d'acier (l'acier allié, non allié, inoxydable, au carbone, fileté, galvanisé) ou de fonte (fonte grise, fonte à graphite lamellaire ou à graphite sphéroïdale) sont courants. D'autres métaux comme le cuivre, le laiton ou le plomb peuvent être retrouvés. Des canalisations fréquentes en béton (béton armé ou béton armé en tôle acier épaisse) ou en matière plastique (PVC, le PE, Le PP ou PEHD). Enfin, l'amiante mais qui n'est plus autorisée, le ciment, le grès, le PRV (polyester renforcé de fibres de verre) peuvent être retrouvés.

**Choix du matériau :** en fonction des réseaux enterrés, le choix peut être lié à une tradition locale, au coût des matières premières, aux normes en vigueur et à l'adaptation du matériau [7]. En effet, le choix du matériau constituant les éléments d'un réseau enterré doit prendre en compte plusieurs paramètres : les propriétés (du matériau) et la fonction du réseau, les propriétés du terrain et du produit transporté et les contraintes environnementales. Le matériau doit répondre aux exigences pour assurer la durabilité, la fiabilité et la sécurité du réseau enterré.

#### Caractéristiques des canalisations fréquentes

- Canalisations en béton : ont la particularité d'être rigides et résistantes aux chocs. Elles sont durables lorsque l'eau véhiculée n'est pas trop acide (PH supérieur ou égal à 4,5). Quatre types de béton sont utilisés : béton armé, non armé, fibré, béton âme tôle. Le béton armé est souvent consacré pour les gros diamètres et les débits forts.
- Canalisations en plastique (PVC, PEHD, PP) : souples et très flexibles, elles sont caractérisées par une forte étanchéité et une résistance à la corrosion. Elles sont légères et faciles à poser. En revanche, leur dilatation peut être importante et elles sont sensibles à la température et à la lumière solaire.
- Canalisations en matériau composite : très coûteuses, ce sont des canalisations en PRV (polyester renforcé de fibres de verre) destinées principalement à des usages industriels ou aux milieux très agressifs.
- Canalisations en fonte : les canalisations en fonte ductile ont la particularité d'être résistantes et peu influencées par le sol environnant. Néanmoins elles sont sujettes à la corrosion qui peut être limitée par la présence de revêtements de protection interne et/ou externe. Les canalisations en fonte grise sont inoxydables, solides et résistantes aux chocs extérieurs.

- Canalisations en grès : elles sont résistantes à la corrosion. Recyclables, elles sont durables mais à coût élevé. Leur point fort est leur forte résistance aux acides très oxydants, aux températures élevées, à l'érosion et aux grandes profondeurs.
- Canalisations en acier : résistent aux conditions critiques, aux températures élevées et aux agressions chimiques.
- Canalisations en plomb : sont malléables et résistantes à la corrosion. Cependant, leur installation est interdite depuis quelques années à cause des risques pour la santé publique.

### 2.3.2 Le terrain encaissant

Le terrain encaissant correspond à la portion du terrain sur laquelle les investigations sont réalisées dans le but d'identifier et de localiser les réseaux qui y sont enterrés. Le terrain est donc une zone délimitée caractérisée par sa surface, les propriétés du sous-sol et les objets qui y sont enterrés. Les composants du sol diffèrent d'une zone à une autre. Il peut être caractérisé par plusieurs paramètres comme suit :

- Le nombre de couches du sous-sol.
- La nature de la surface du sol (naturelle ou artificielle).
- La grosseur des éléments le constituant par l'analyse granulométrique du sol. Nous y distinguons deux principaux types : la terre fine composée principalement d'argile, de limons ou de sables, et les éléments grossiers comme les graviers, les cailloux, les pierres ou les blocs.
- Les composants du sol. Nous pouvons distinguer plusieurs types de sol : humifère, terre franche, sol calcaire, sol argileux, sol sableux, etc.

### 2.3.3 Les produits transportés

Les produits principalement transportés sont les fluides et l'énergie. Nous retrouvons l'eau potable, les eaux usées (pouvant être distinguées les eaux unitaires et les eaux pluviales), le gaz naturel, le pétrole, les produits chimiques ou l'air comprimé. Pour le chauffage nous pouvons retrouver l'eau surchauffée et la vapeur d'eau. Enfin, l'électricité, et les télécoms [10].

### 2.3.4 Typologie des réseaux enterrés

Les réseaux enterrés diffèrent selon leur nature, leur fonction, et les produits qu'ils transportent. Les règles d'installation des réseaux enterrés ont beaucoup évolué dans le temps. Ils sont classifiés suivant plusieurs critères comme suit [7] :

(1) En fonction du produit transporté. En effet, c'est un élément décisif quant au choix de la nature du réseau et des matériaux le composant.

(2) La fonction du réseau enterré permet quant à elle, de concevoir son architecture et d'adapter les dimensions des parties du réseau en fonction du besoin. En effet, le transport d'un produit nécessitera une architecture simple et adaptée à un flux important et la distribution nécessitera une architecture plus dense avec dimensions moins importantes.

(3) L'installation des réseaux doit prendre en compte son environnement comme les propriétés chimiques du sol, les installations environnantes notamment l'urbanisation.

Plusieurs classifications des réseaux existants ont été établies selon le besoin. Une description détaillée des trois classifications les plus répandues est fournie dans l'annexe B.

### 2.3.5 Propriétés des réseaux enterrés

Les réseaux possèdent des propriétés différentes en fonction du type du réseau, des matériaux le composant et de leur fonction. Le tableau suivant résume les propriétés des réseaux enterrés les plus courant [10] [7].

| Réseau            | Matériaux usuels                             | Diamètre                                 | Grillage |
|-------------------|--|--|----------|
| Eau potable       | Fonte grise, PVC, PEHD                       | 25-1000 mm                               | Bleu     |
| Assainissement    | Fonte ductile, Ciment, Béton armé, Grès, PVC | 150-2000 mm                              | Marron   |
| Gaz               | Acier, PEHD, Fonte ductile                   | Distribution 20-400 mm, Transport >160mm | Jaune    |
| Electrique        | Cuivre, Aluminium                            | -  | Rouge    |
| Télécommunication | Cuivre, PVC, Fibre optique                   | 28-100mm et enrobage                     | Vert     |
| Chaleur           | Acier avec isolation                         | -  | Violet   |

Les réseaux enterrés sont composés de liaisons (câbles ou canalisations) et de nœuds dont certains sont des affleurants. Les nœuds ont plusieurs rôles : tout d'abord, ils servent à relier les liaisons entre elles pour assurer la circulation du produit. Ils servent notamment à réguler le flux par réduction ou augmentation du diamètre ou de la pression. Ils servent aussi d'intersection pour la distribution du produit et enfin de changement de direction comme les coudes. La figure 2.1 donne une modélisation des nœuds les plus courants.

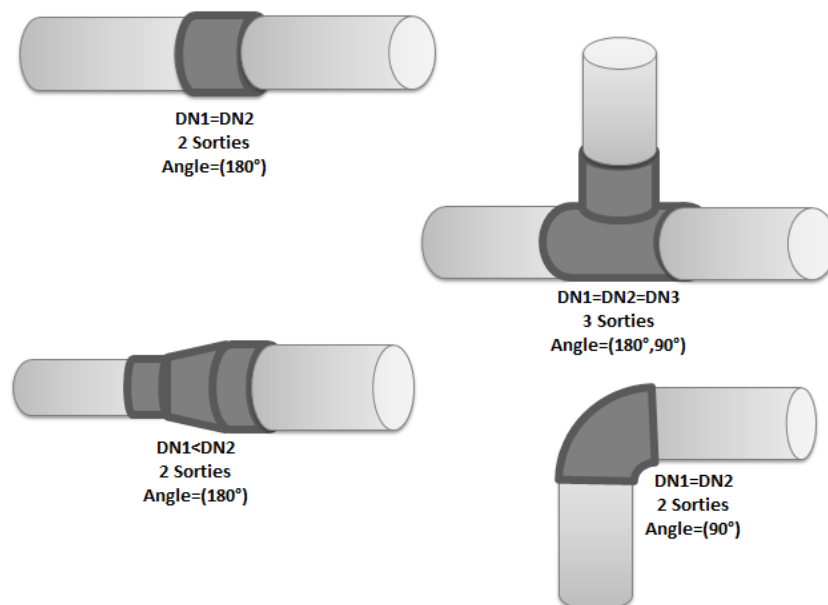


FIGURE 2.1 – Exemples d'affleurants présentant des changements de diamètre, de nombre de sorties, et/ou de direction.

## 2.4 La procédure de géodétection des réseaux enterrés

Avant la réalisation des travaux, des investigations complémentaires permettant de détecter, de localiser et d'identifier les réseaux enterrés dans le périmètre du chantier doivent être réalisées. À ce jour, il n'existe pas de cartographie précise et fiable. Seule une géolocalisation préalable précise en trois dimensions des ouvrages existants et de leur environnement permet d'assurer la faisabilité du projet et de garantir son déroulement en toute sécurité. À cet effet, la norme NF S70-003 prévoit une procédure comme expliqué ci-dessous :

Lorsqu'un projet de chantier est établi, une déclaration de projet de travaux (DT) est formulée aux exploitants des réseaux par le biais du guichet unique mis en place par le gouvernement. En réponse à la déclaration de projet de travaux, les exploitants des réseaux fournissent la cartographie de leur réseaux avec un niveau de précision en classe A, B ou C. Si les réponses des exploitants sont imprécises, c'est à dire que les réseaux sont classés en classe B ou C, alors le responsable du projet de travaux est dans l'obligation de conduire des investigations complémentaires pour identifier et localiser les ouvrages existants avec la meilleure précision possible (classe A) ou de modifier son projet le cas échéant.

Ces dispositions préventives mises en place dans le cadre de la refonte réglementaire permettront d'éviter les découvertes surprises de réseaux enterrés en cours de chantier pouvant engendrer son interruption, et en plus des risques encourus, des sur-coûts ou des délais supplémentaires [4].

### 2.4.1 Préparation des investigations complémentaires

La phase préparatoire consiste à réunir l'ensemble des documents administratifs nécessaires à la préparation des investigations complémentaires préalables aux travaux comme les réponses aux déclarations d'intention de projet et les plans des réseaux enterrés existants. Des recommandations spécifiques au chantier complémentaires peuvent être fournies par le responsable du projet ou par les exploitants des réseaux.

Outre la récolte d'information, deux procédures doivent être réalisées lors de l'exécution de cette phase. La première procédure est la vérification de la cohérence des informations transmises par les exploitants des réseaux enterrés et la deuxième procédure est le marquage et piquetage des ouvrages [4].

#### **Étude des plans fournis :**

Cette étape consiste à vérifier la cohérence du terrain avec les informations et les plans des réseaux. Pour ce faire, il est nécessaire de rechercher et de repérer dans un premier temps les ouvrages sur le terrain et de prendre connaissance des documents en possession tout en portant une attention particulière aux réseaux dont la nature des matériaux est identique. Une fois que la cohérence des plans avec le terrain est vérifiée, il est nécessaire de réaliser un repérage des éléments de surface par la vérification des implantations qui sont communiquées (affleurants). L'ouverture de certains regards permet d'estimer la profondeur et la direction des réseaux. Par ce biais, la comparaison entre les affleurants constatés sur le terrain et les plans transmis des ouvrages existants permet de repérer des ouvrages qui ne sont pas visibles car recouverts ou détruits [4][7].

#### **Marquage-piquetage des ouvrages :**

Cette étape consiste à réaliser un marquage au sol du tracé estimé et au piquetage des nœuds et points particuliers du réseau recherché.



## 2.4.2 Réalisation des investigations complémentaires

La phase de géodétection consiste à détecter les ouvrages enterrés par des techniques dites 'non-intrusives' ou 'sans fouille', permettant de détecter ou de localiser les réseaux enterrés sans intervention dans le sol pour accéder à celui-ci. Ces techniques sont sans incidence et sans risque direct pour le réseau enterré. Elles sont basées sur le principe d'analyse de phénomènes naturels par la mesure d'un signal émis et propagé dans le réseau enterré par raccordement direct d'un générateur ou par l'introduction d'une sonde dans le réseau depuis un organe.

L'avantage de ces techniques est qu'elles ne nécessitent pas de fouille du sol et sont sans risque pour les réseaux enterrés. Néanmoins, il existe plusieurs risques liés à l'utilisation de ces techniques comme l'obtention de résultats erronés, la mauvaise interprétation des résultats, le non repérage d'une canalisation, sa mauvaise localisation ou la confusion entre plusieurs ouvrages.

De plus, aucune technique de localisation non-intrusive n'est universelle ou sans limites. À cet effet, le choix d'une technique doit prendre en compte de la nature des réseaux à détecter, de l'environnement et de la précision des plans fournis.

Enfin, l'utilisation de ces techniques nécessite une formation ainsi qu'une bonne connaissance des règles d'installation des réseaux enterrés. De ce fait, cette phase doit être réalisée par des opérateurs expérimentés [4].

## 2.5 Les techniques de détection des réseaux enterrés

### 2.5.1 La technique de détection électromagnétique

La technique de détection électromagnétique permet de détecter les canalisations et les câbles enterrés en se basant sur le principe du courant de Foucault qui stipule que tout champ électromagnétique se diffusant dans une masse conductrice, ou dans un milieu conducteur, génère un courant induit appelé courant de Foucault, qui génère à son tour un champ électromagnétique secondaire [11][12].

#### 2.5.1.1 Principes de fonctionnement

Des dispositifs de détection électromagnétique ont été développés pour la détection des réseaux enterrés et contiennent principalement un générateur et un détecteur électromagnétiques. Le générateur a pour but d'émettre un courant dans le réseau enterré et le détecteur électromagnétique permet de détecter le champ électromagnétique généré par le réseau enterré en utilisant une ou plusieurs bobines. Suivant les modèles, ces bobines permettent de fournir le sommet du champ électromagnétique qui représente un point d'axe du réseau enterré. Elles permettent aussi d'estimer la profondeur de la cible par calcul différentiel des mesures de chacune. En parallèle, des bobines permettent d'identifier des lignes verticales du champ électromagnétique afin de fournir une indication sur la fiabilité du signal mesuré [12].

Cette technique est très appréciée dans le domaine de la géodétection des réseaux enterrés, elle constitue un moyen fiable et sûr puisqu'elle permet un positionnement  $(x,y,z)$  précis dans un environnement favorable. De plus, la technique électromagnétique est un outil discriminant permettant d'identifier le réseau détecté par l'injection d'un signal. Enfin, les outils de détection électromagnétique sont tout terrain et simples d'utilisation [12].

La technique électromagnétique permet de détecter un grand panel de réseaux enterrés. Trois modes de détection peuvent être mis en œuvre en fonction de la nature du réseau et de la présence d'affleurants.

### 2.5.1.2 Les modes de la détection électromagnétique

#### *Mode de détection passive :*

La détection passive consiste à utiliser le détecteur électromagnétique uniquement (récepteur) sans émetteur pour inspecter un terrain ne présentant pas d'affleurants, quand l'accès aux réseaux enterrés est impossible ou pour la vérification de localisation des réseaux pour des raisons préventives. Ce mode de détection a pour but de rechercher des champs magnétiques provenant des réseaux enterrés conducteurs de manière passive. Trois fréquences sont recherchées en utilisant ce mode [12] [11] [13] :

- (1) Les fréquences 50Hz ou 60Hz permettent de détecter les champs magnétiques générés par les réseaux électriques sous tension.
- (2) Les canalisations métalliques portant des ondes radio produites par des champs induits dus au parallélisme avec des lignes électriques haute tension ou au croisement avec des câbles enterrés sous tension.
- (3) Enfin, la protection cathodique de certaines canalisations de transport génère un signal de 100Hz pouvant être détecté en mode passif.

La détection passive permet d'avoir un positionnement en (x,y) du réseau enterré dont la précision est moins fiable que les autres modes de détection électromagnétique. De plus, l'indication de la profondeur n'est pas systématique, celle-ci est très peu fiable quand elle est fournie. Outre son imprécision, cette technique possède plusieurs limitations comme sa sensibilité excessive au bruit environnant et l'impossibilité de discriminer les réseaux enterrés en l'utilisant [12][11][13].

De ce fait, il est recommandé de recourir à ce mode de détection en dernier lieu et à confirmer les résultats obtenus en l'utilisant avec d'autres méthodes de détection.

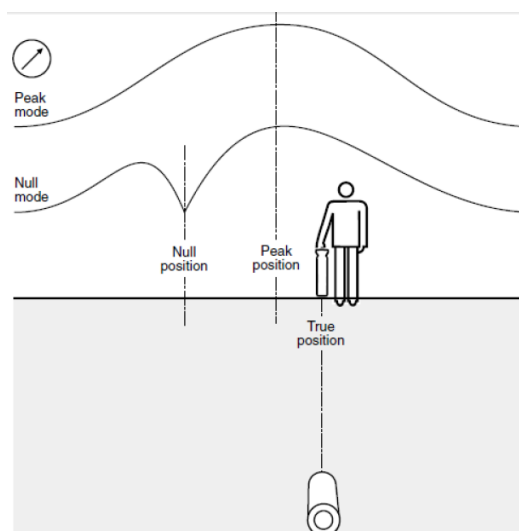


FIGURE 2.2 – Illustration de la détection électromagnétique passive (utilisation du détecteur uniquement).

### ***Mode de détection par induction :***

Le mode induction consiste à induire un champ magnétique dans le réseau enterré à partir de la surface du sol et sans contact avec le réseau, par l'intermédiaire de la bobine du générateur électromagnétique. La détection par induction est utilisée pour la localisation des réseaux enterrés conducteurs ne permettant pas l'accès direct mais dont la position est approximativement connue. La technique consiste à positionner le générateur sur la surface du sol à proximité et parallèlement au réseau enterré. Le générateur génère un champ magnétique en utilisant une fréquence du signal choisie en fonction du matériau du réseau. La recherche du réseau est réalisée par synchronisation du détecteur électromagnétique sur la même fréquence que le générateur électromagnétique.

La détection par induction est considérée comme un outil de détection discriminant et peut même fournir une indication de la profondeur ( $z$ ) si des conditions favorables sont réunies. Néanmoins, la technique perd son efficacité dès lors que plusieurs réseaux métalliques existent à proximité du réseau à détecter. Les risques de confusion sont possibles en particulier en cas de croisement ou de chevauchement des réseaux. De plus, le mode induction reste très sensible aux bruits environnants. Des erreurs de détection importantes (jusqu'à 1 m en  $x$ - $y$ ) peuvent avoir lieu dans un environnement électromagnétique chargé.

Cependant, il est à noter que l'induction à proximité des réseaux de signalisation (les réseaux de signalisation du transport ferroviaire par exemple) peut créer des perturbations capables de provoquer des accidents. De ce fait, la détection par induction est interdite pour la détection de ce type de réseaux [11][13].

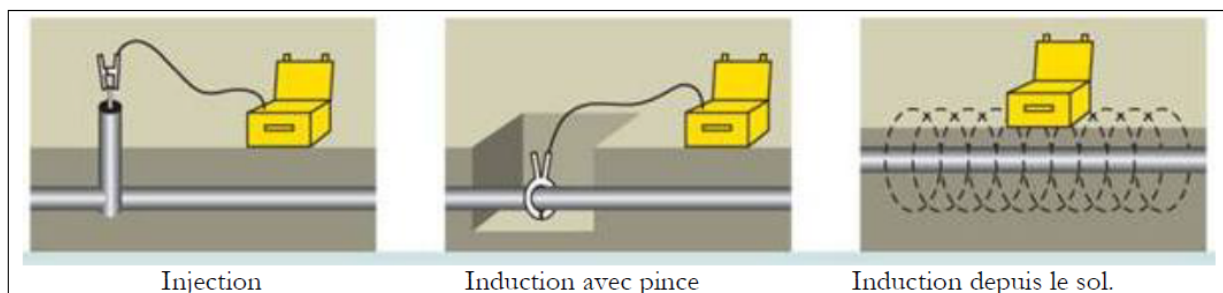


FIGURE 2.3 – Exemples illustrant la détection active par raccordement direction, la détection active par pince d'induction et la technique par induction sans contact.

### ***Mode de détection active :***

La détection électromagnétique active consiste à injecter un signal dans le réseau conducteur par le biais de l'émetteur électromagnétique et de le détecter sur la surface du sol en utilisant le détecteur électromagnétique synchronisé à l'émetteur. Cette technique nécessite d'avoir accès au réseau enterré à travers un affleurant et des habilitations du personnel d'intervention sur les ouvrages concernés.

Cette technique électromagnétique de détection et de localisation est la plus fiable et la seule qui assure une détection en ( $x$ - $y$ - $z$ ) avec précision. Elle est utilisable sur tous les réseaux métalliques et conducteurs ainsi que tous les réseaux visitables avec une sonde. De plus, la synchronisation entre l'émetteur et le récepteur permet de discriminer les réseaux avec clarté. La

technique est adaptable en fonction de l'accès au réseau et de sa nature. Ainsi, nous distinguons plusieurs modes de connexion au réseau comme suit [14] :

(1) Raccordement direct du générateur à la canalisation métallique et injection du signal directement sur le matériau de la canalisation, le détecteur synchronisé à l'émetteur permet de détecter uniquement la canalisation concernée [12].

(2) La pince à champ magnétique est utilisée pour détecter câbles électrique en enserrant le réseau à détecter.

(3) La prise domestique est utilisée pour injecter le signal de l'émetteur par le biais d'un connecteur de prise domestique dans un réseau de distribution électrique sous tension.

(4) La flexitrace est un câble flexible muni d'une sonde qui est introduit par un affleurant dans le réseau à détecter. Le signal du générateur y est injecté soit dans son ensemble ou uniquement dans son extrémité. le suivi de son déplacement dans le réseau à partir la surface du sol permet de le localiser avec précision. De plus, cette technique permet d'identifier les points singuliers du réseau comme les branchements ou certains défauts. Outre sa précision de détection, l'utilisation de la flexitrace permet de détecter les réseaux allant jusqu'à 15 m de profondeur [12].

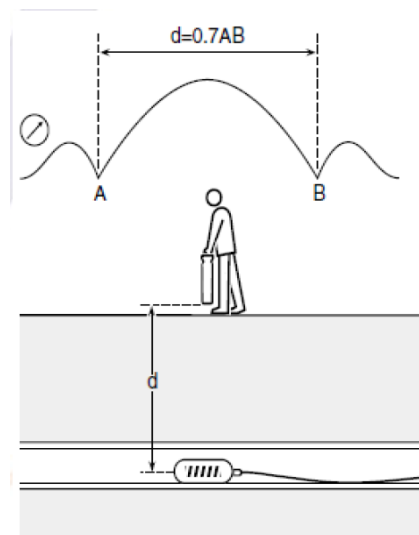


FIGURE 2.4 – Illustration de la détection électromagnétique active en utilisant la Flexitrace.

(5) Une autre technique basée sur le principe de la flexitrace consiste à introduire une sonde émettrice dans les réseaux non métalliques afin de les identifier et de localiser des blocages ou effondrements [14].

### 2.5.2 La technique vibro-acoustique

La technique vibro-acoustique est une méthode de détection non-intrusive permettant de détecter et de localiser les canalisations transportant le gaz naturel ou l'eau potable. La technique consiste à générer un signal acoustique sur la surface de la canalisation ou dans le fluide qu'elle transporte, par un générateur d'impulsion de choc bridé directement sur la canalisation si elle est rigide ou par connexion directe d'un émetteur acoustique au réseau d'eau ou de gaz à localiser. La vibration générée est transmise au fluide et se répercute dans la canalisation, cette dernière est détectée depuis la surface du sol grâce à un détecteur acoustique.

Cette technique permet donc le traçage en surface de la canalisation mais elle est incapable de déterminer sa profondeur. De plus, la technique acoustique nécessite d'avoir un accès direct à la canalisation à travers un point de raccordement de l'émetteur pour pouvoir se connecter au réseau à localiser. Cette opération est sensible, elle doit donc être réalisée par des personnels habilités à travailler sur les installations de gaz.

Enfin, la technique vibro-acoustique peut être efficace quand des conditions favorables sont réunies. Néanmoins, son application peut être inefficace dans un environnement présentant des perturbations sonores comme la proximité du trafic routier par exemple. L'efficacité de la technique est améliorée grâce à l'homogénéité du terrain et de son compactage.

La propagation des ondes sonores dans les canalisations dépend de leur diamètre et de la nature des matériaux les constituant. La vibration de la canalisation peut être plus ou moins transmise aux matériaux environnants. Le signal sonore sera donc plus ou moins aisément détectable depuis le niveau du sol en fonction de la profondeur de la canalisation, de la nature et du compactage du sol, lorsque la canalisation traverse un fourreau, le signal peut être rendu inaudible [5].

Les contraintes énoncées ci-haut et les limites de cette technique font qu'elle est très restreinte à certains réseaux enterrés répondant à plusieurs conditions. Cette technique est donc recommandée (par nous) en complément d'autres méthodes ou seulement si les conditions nécessaires à son bon fonctionnement sont réunies et que les résultats de détection obtenus sont cohérents.

### 2.5.3 Le géoradar

Le géoradar (GPR : Ground Penetrating Radar) est une technique géophysique non destructive permettant d'obtenir des indications sur la structure du sous-sol ou sur ses hétérogénéités. Appelé communément radar de sol ou radar géologique de surface, son fonctionnement s'appuie sur l'émission, la propagation, la réflexion et la réception d'ondes électromagnétiques. En effet, le géoradar possède ou plusieurs antennes émettrice et réceptrice en contact avec le sol qui émettent des ondes électromagnétiques dans le sol qui sont réfléchies ou diffractées aux frontières d'objets qui présentent des différences de propriétés électriques et/ou magnétiques. La réflectivité de limites de couches et la profondeur de pénétration sont déterminées par la permittivité diélectrique, la conductivité électriques et la perméabilité des milieux traversés et de la fréquence de l'onde électromagnétique.

#### 2.5.3.1 Principes de fonctionnement

Lorsque l'onde électromagnétique émise par le géoradar, se propage dans le sol et qu'elle rencontre une interface entre des matériaux possédant des propriétés électriques différentes, une fraction de son énergie est réfléchiée sous la forme d'onde réfléchiée, cette dernière est détectée par l'antenne réceptrice et est récupérée pour constituer une trace du sous-sol en un point précis à un instant donné appelé A-Scan. Cette onde est réfléchiée par les interfaces des couches présentant un contraste de caractéristiques électromagnétiques. Ainsi, la propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu naturel est liée à :

(1) la permittivité diélectrique ( $\epsilon$ ) qui décrit la capacité d'un matériau à être polarisé sous l'influence d'un champ électrique et constitue la propriété ayant l'influence la plus importante

sur la propagation et la réflexion de l'onde électromagnétique. L'eau à l'état liquide est le milieu qui possède la constante diélectrique la plus élevée [15].

(2) La conductivité électrique ( $\delta$ ) décrit le flux de charges électriques pendant le passage d'une onde électromagnétique et la facilité d'un milieu à transmettre un courant. De ce fait, l'interaction entre les charges et le milieu engendre une perte d'énergie, et en conséquent, une atténuation de l'onde émise [15].

(3) la perméabilité magnétique ( $\mu$ ) décrit le comportement d'un matériau soumis à un champ magnétique, autrement dit, elle correspond à l'énergie stockée ou perdue dans le matériau suite aux phénomènes d'induction magnétique. Étant donné que la plupart des matériaux possèdent une variation de perméabilité magnétique négligeable, son influence sur la propagation de l'onde est plutôt minime. Seuls les milieux à forte teneur en oxyde de fer se distinguent par une importante perméabilité magnétique [15].

Ainsi, tout contraste d'un de ces trois paramètres peut provoquer une réflexion de l'onde ou sa transmission. La figure 2.5 illustre un exemple de la propagation d'une onde électromagnétique dans un sol présentant deux milieux séparés par une interface. Cette interface génère deux ondes dont l'une est réfléchie et l'autre transmise au milieu en dessous.

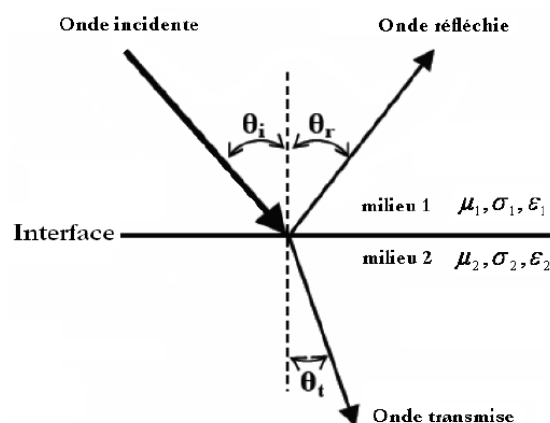


FIGURE 2.5 – Exemple de la propagation d'une onde électromagnétique dans un sol présentant deux milieux [16].

En plus des paramètres électriques et magnétiques du milieu, la fréquence de l'onde électromagnétique est un élément déterminant de la profondeur atteinte. En effet, plus la fréquence est basse et plus la profondeur atteinte est élevée. Ainsi, la propagation de l'onde dans le sol est assujettie aux différentes sources d'atténuation qu'elle rencontre. Une forte atténuation aura comme conséquence de diminuer la pénétration du signal et ainsi réduire la profondeur sondée. L'argile, le sel, le limon et les sols saturés et humides sont des sources d'atténuation du signal électromagnétique et représentent des milieux défavorables pour l'utilisation du géoradar [15].

### 2.5.3.2 Mode d'utilisation

Tout au long de son déplacement sur une trajectoire rectiligne, le géoradar émet des ondes électromagnétiques par le biais de l'antenne émettrice. La réception des ondes réfléchies par l'antenne réceptrice et la juxtaposition des signaux reçus permet de construire une représentation

donnant des informations géométriques sur les interfaces entre les couches et les hétérogénéités des matériaux dans le sol. Cette représentation en trois dimensions (distance, amplitude et temps de propagation) correspond à l'acquisition d'un ensemble de traces du sol suivant une direction rectiligne et permet d'établir un B-scan (appelé aussi radargramme) du milieu sondé.

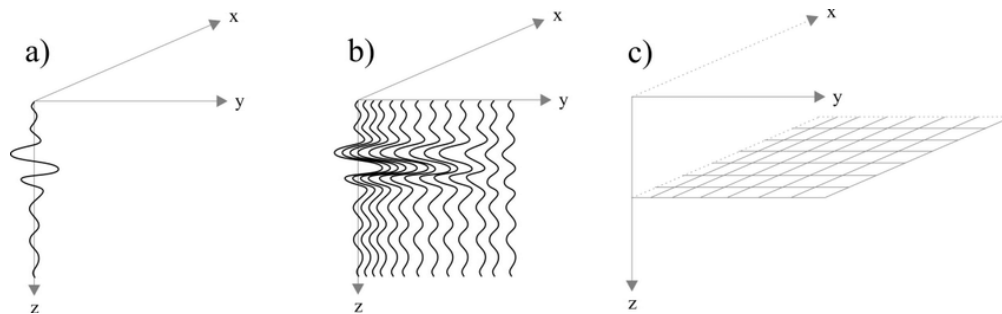


FIGURE 2.6 – Exemples ; A-Scan, B-Scan et C-Scan[17].

Ainsi, le géoradar détecte des cibles qui ont une impédance électrique contrastée par rapport au sol environnant. Il permet de détecter la limite entre deux matériaux différents ou entre un matériau et le vide. Les résultats sont ainsi présentés sous forme d'une coupe transversale où la profondeur relative est estimée en temps aller-retour des ondes. La résistivité est un paramètre déterminant croissant et la conductivité est un paramètre déterminant décroissant. La résistivité effective décroît lorsque la fréquence augmente car la profondeur de pénétration est plus élevée à basse fréquence.

Le GPR est utilisé pour détecter les objets enterrés mais peut aussi détecter les structures non ponctuelles de forme irrégulière (anomalies) comme les vides, les décompressions du sol et les objets de formes irrégulières. Un objet cylindrique sondé de manière perpendiculaire à son axe formera une hyperbole sur une coupe-temps. Les canalisations en sont des exemples. En effet, Les canalisations perpendiculaires ou obliques par rapport au sens de déplacement du radar sont marquées sur la coupe-temps par des hyperboles. La forme de ces hyperboles varie en fonction (1) des propriétés du milieu dans lequel se trouvent les cibles, (2) de la forme, de la profondeur et de la nature de l'objet enterré et enfin, (3) de son orientation par rapport à l'axe de passage du géoradar.

Le géoradar a connu des utilisations dans des applications variées de l'imagerie du sous-sol, les résultats qu'il permet d'obtenir ont permis de toucher un large panel de domaines d'applications. Il est utilisé dans le génie civil pour le repérage des canalisations enterrées, la recherche et la détection de cavités et l'exploration des zones urbaines [18]. Il est notamment utilisé dans les fouilles archéologiques, la recherche de vides, de tombeaux, de chambres cachées dans des anciens bâtiments ou la recherche de galeries souterraines [19], dans la recherche militaire et le déminage. À cet effet, il constitue une solution prometteuse pour la lutte contre les mines antipersonnel et antichar [18], dans les sondages géologiques pour l'étude des failles géologiques, la surveillance en sismologie [18] et l'étude des glaciers [19], l'exploration pétrolière et gazière. Pour finir, un géoradar a été envoyé sur la planète Mars ; il a donc contribué à l'exploration spatiale [18].

### **Les risques liés à la détection de canalisations en utilisant le Géoradar :**

Le géoradar est méthode non intrusive ; elle permet donc de localiser les canalisations sans nécessité de dégrader le milieu urbain. De plus, son utilisation peut permettre de les géolocaliser

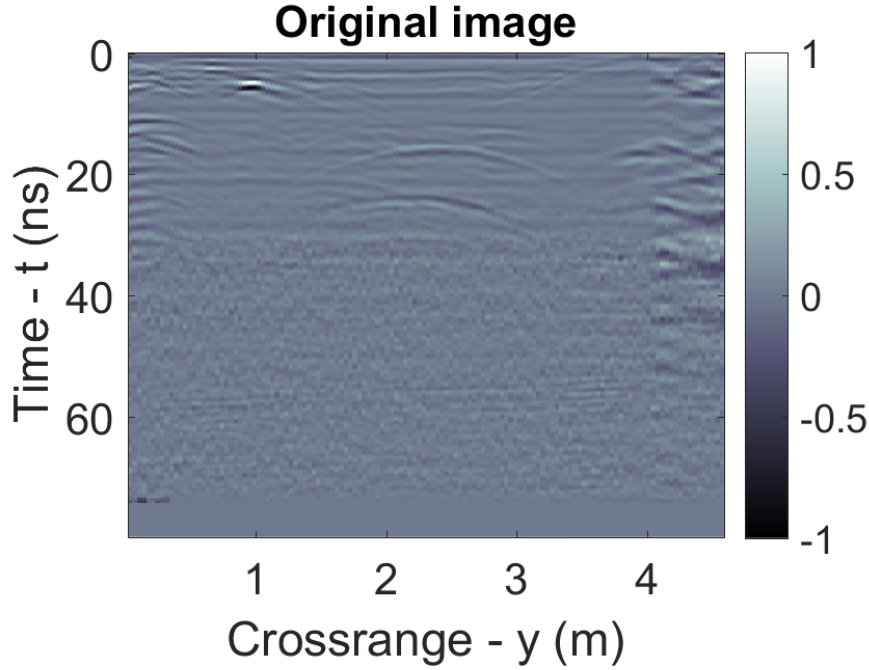


FIGURE 2.7 – Exemple de radargramme : deux hyperboles générées par deux canalisations enterrées parallèlement à la trajectoire du géoradar - Campagne d’acquisition Savigny-Sur-Orge.

avec précision, d’estimer leur profondeur et de bien les identifier. Cependant, l’utilisation du géoradar a des limitations lorsque le sol est trop hétérogène ou lorsque le milieu environnant est argileux ou humide et absorbe entièrement l’énergie émise.

De plus, le matériau de la canalisation peut influencer la qualité des résultats de détection. En effet, le plastique possède des caractéristiques souvent proches de celles du sous-sol et de ce fait, les canalisations ne génèrent pas forcément d’hyperboles apparentes. La profondeur de la canalisation est un élément à prendre en compte car le choix de la fréquence du signal électromagnétique en fonction des caractéristiques du sol peuvent limiter la profondeur, si la fréquence est basse, les profondeurs sondées sont plus importantes et les canalisations enterrées en surface ne seront pas détectées par le géoradar, de la même manière, si la fréquence est élevée, les canalisations profondes risquent de ne pas être détectées par le géoradar. De plus, le diamètre de la canalisation joue un rôle important dans la réflexion des ondes EM.

### 2.5.3.3 Détection de canalisations et traitement des données GPR

Une campagne d’acquisitions GPR consiste à sonder un terrain par la réalisation d’acquisitions GPR (passages optimisés du GPR) en fonction des réseaux recherchés [19]. Les radargrammes obtenus sont traités et visualisés en utilisant des outils spécifiques. En effet, l’interprétation des profils GPR nécessitent de passer par différentes étapes de traitement comme le recentrage, le filtrage, l’application de gains et les migrations [19].



## 2.6 Travaux de recherche sur la géodétection des réseaux enterrés

« Mapping The Underground » (MTU) est un programme de recherche anglais visant à améliorer la localisation des réseaux enterrés et à résoudre les problèmes de détection liés à leur congestion en milieu urbain. MTU est un programme multidisciplinaire regroupant des chercheurs universitaires et des experts du domaine et est financé par l'EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council). Il a été lancé en 2005 et se base sur dix (10) années de recherche sur la problématique de localisation des réseaux enterrés. L'objectif du programme est de mener des études fondamentales sur la géodétection des réseaux enterrés et de développer un prototype multi-capteurs capable de répondre à ce besoin.

Le programme est composé de deux phases principales : la première est composée d'une partie recherche sur quatre problématiques du domaine et d'une partie développement du prototype multi-capteurs. La partie recherche est composée de quatre projets de recherche traitant différentes problématiques. Le premier projet a pour but d'étudier la faisabilité et l'utilité d'un outil de localisation multi-capteurs. Le second projet porte sur la création, la gestion et la mise à jour de la cartographie et de la position de l'appareil de détection.

Le troisième projet porte sur l'intégration des données dans le prototype et le dernier projet comporte une étude sur la possibilité d'intégrer des tags RFID dans les futurs réseaux permettant de les détecter avec un détecteur adapté sur la surface du sol. La seconde partie de la première phase du programme s'appuie sur les projets de recherche ci-dessus pour développer un prototype de localisation fusionnant quatre technologies.

Ces études ont conclu que seule la combinaison de plusieurs outils de détection permettra une détection fiable des réseaux enterrés. L'approche proposée est donc d'associer une fusion intelligente de plusieurs données issues de différentes technologies combinées dans un seul appareil. Des travaux de recherche sont menés sur le fonctionnement de ces technologies et sur leur modèles transmission du signal et de son atténuation dans le sol afin de leur permettre d'être intelligemment adaptées aux différentes conditions du sol. De ce fait, cette approche vise à atteindre un taux de réussite de 100 % de bonnes localisations.

## 2.7 Conclusion

La refonte réglementaire vise à améliorer la procédure de géodétection en terme d'organisation et de responsabilisation. Son objectif est de réduire les risques par l'implication de tous les acteurs, la sensibilisation des intervenants aux enjeux et par la précaution. En aucun cas elle ne permet d'améliorer l'aspect technique, ni l'interprétation des données ou encore l'optimisation des technologies.

L'état de l'art présenté a permis d'identifier les différents verrous de la géodétection des réseaux enterrés que nous tenterons de lever dans la suite du manuscrit.



# Chapitre III : Des données aux connaissances



# Des données aux connaissances

---

## 3.1 Donnée, Information et Connaissance

Dans un contexte général, les notions de 'Donnée', 'Information' et 'Connaissance' sont tellement proches qu'il est difficile de réellement les différencier. En informatique et particulièrement en Ingénierie des connaissances, chaque notion fait référence un concept spécifique et il est important de définir les limites entre elles afin de relever les ambiguïtés. Dans ce qui suit nous tentons de définir ces notions d'un point de vue épistémologique de façon objective dans notre contexte en mettant l'accent sur le processus allant de l'acquisition de la donnée jusqu'à l'organisation du savoir.

### Les données

La donnée est une séquence de symboles associés à une succession de faits en termes de nombres, sons, statistiques, etc. et utilisés pour une analyse. Les données existent et n'ont pas d'autre signification que celle d'exister.

Une donnée peut être vue comme le résultat direct et brut d'une mesure ou d'une observation. Ces dernières sont caractérisées par le type de la donnée qui peut être quantitative ou qualitative. La donnée peut être collectée par un capteur, un outil de mesure ou de calcul, une personne et peut être sauvegardée dans une base de données.

La donnée est donc un élément brut non interprété, en soi, elle n'a pas de signification particulière mais elle est indispensable à la communication d'une information.

Ainsi, elle se transforme en information lorsqu'elle est communiquée à un être humain ou un système capable de lui donner un sens et l'interpréter pour en faire une information utilisable.

### Les informations

L'information est une organisation des données dans un langage. Elle présente un aspect orienté utilisateur ce qui signifie que la valeur de l'information dépend de la relation utilisateur-information [20]. Une information peut être considérée comme une donnée interprétée à laquelle un sens est ajouté. Contrairement à la donnée, l'information a comme conséquence la prise d'une décision par la personne ou le système qui a interprété la donnée qui l'a engendré.

Ainsi, l'information modifie notre vision du monde. Son interprétation engendre son intégration dans notre savoir sous forme d'une connaissance venant s'ajouter aux connaissances qui constituent notre savoir.

## Les connaissances

La connaissance est l'interprétation des informations dans un contexte, des expériences et connaissances préalables de l'utilisateur. Dès lors, les notions de logique, jugements, perspectives et croyances rentrent en jeu. L'information affecte alors la connaissance et réciproquement.

La connaissance peut être vue comme une information comprise et assimilée. Elle résulte d'une réflexion sur une ou plusieurs informations analysées par un humain ou un système en se basant sur son savoir et ses expériences antérieures.

Dans le contexte de l'ingénierie des connaissances, les travaux menés sur la gestion des informations et des connaissances et la modélisation du savoir ont abouti au développement des systèmes experts et les systèmes à base de connaissances.

## 3.2 Imperfections de l'information

### L'information et ses imperfections

Ces dernières années ont été marquées par l'émergence d'outils informatiques basés sur l'analyse des phénomènes naturels. Ces systèmes ont besoin de traiter des informations et des données provenant de multiples sources. Les connaissances issues de ces informations et données proviennent de sources différentes ayant des niveaux de fiabilité différents et sont parfois exprimées dans des formats hétérogènes [21]. Ces connaissances proviennent de sources très variées comme les capteurs ou les observations de phénomènes par des personnes dont la certitude de leur observation est variable. Ainsi, ces connaissances présentent des défauts, elles peuvent être imprécises, incertaines ou incomplètes. Malgré les imperfections de ces informations, les systèmes doivent fonctionner correctement en prenant en compte ces informations hétérogènes.

En Intelligence artificielle, la notion d'imperfection fait référence à trois notions importantes : l'imprécision, l'incertitude et l'incomplétude [21].

**L'imprécision :** est une caractéristique de l'information due au caractère vague ou approximatif de la sémantique utilisée [22]. C'est la conséquence d'une difficulté dans l'expression claire et précise d'un état de la réalité [21].

**L'incertitude :** est une caractéristique de l'information quand un doute concernant sa validité est soulevé. Ce doute est dû à la fiabilité de l'observateur et du degré de confiance qu'il attribue à la valeur de l'information [21][22].

Dans le contexte des informations géographiques, Fisher [23] expose les types d'erreurs et énumère les causes classiques qui sont sources d'incertitude dans les données : erreurs de mesure, d'enregistrement, de classement, de regroupement de classes, de généralisation, temporelle ou de traitement. Ces erreurs sont pour certaines constituantes de l'information contenue dans le système (mesure, enregistrement, classement) et pour les autres de l'exploitation du système (regroupement, analyse, traitement). L'incertitude est alors attachée à l'information se dégageant de l'utilisation du système (données et résultats d'analyses) [21][22].

**L'incomplétude :** est un phénomène lié aux informations partielles ou à l'absence d'informations. Il survient lorsqu'un manque dans les valeurs des données est constaté ou leur absence.

## Représentation de l'imperfection

L'imperfection des données est un problème qui a préoccupé les mathématiciens depuis longtemps. La théorie des probabilités a été parmi les premières et les plus anciennes théories à s'intéresser à la représentation de l'incertitude principalement. Elle s'intéresse à la représentation de tout phénomène aléatoire que l'on peut approcher de manière qualitative [22].

L'émergence des systèmes informatiques, de l'intelligence artificielle et de la théorie de la décision ont donné lieu à plusieurs travaux de recherche sur la prise en compte de l'imperfection des données traitées par ces systèmes [22].

Ainsi, d'autres théories ont vu le jour comme la théorie des ensemble flous pour représenter l'imprécision, la théorie des possibilités qui s'intéresse à l'imprécision et à l'incertitude, la théorie des fonctions de croyance qui permet de modéliser l'ignorance et la théorie des ensembles approximatifs. Toutes ces théories permettent de modéliser les données et leurs imperfections [22]. Ces dernières présentent des approches différentes les unes des autres néanmoins elles sont complémentaires.

Plusieurs travaux ont été consacrés à la comparaison de ces théories. Il semblerait qu'elles ne soient pas contradictoires. De ce fait, le choix de l'utilisation dépend de l'application visée [21].

### 3.3 Fusion

La fusion est un processus qui consiste à mélanger des contenus différents issus de multiples sources dont le niveau de fiabilité est variable. En Informatique et particulièrement dans l'intelligence artificielle, la fusion d'information est un champ d'application en plein essor. Beaucoup de travaux y sont consacrés en particulier dans les domaines ayant un besoin de décision multi-critères [24][25]. Plusieurs définitions de la fusion ont été proposées dans ce contexte.

#### 3.3.1 Fusion de données

La fusion de données est très utilisée en Intelligence Artificielle pour l'apprentissage symbolique à partir de données brutes. Le data mining et l'apprentissage automatique en sont des exemples de domaines d'application.

#### 3.3.2 Fusion d'informations

Ainsi, Wald [26] propose une définition et des termes de référence en fusion d'informations. Selon lui : « La fusion de données constitue un cadre formel dans lequel s'expriment les moyens et techniques permettant l'alliance des informations provenant de sources diverses. Elle vise l'obtention d'information de plus grande qualité ; la définition exacte de 'plus grande qualité' dépendra de l'application. » [27].

Il peut s'agir de la fusion [27] :

- (1) D'une même information vue par différents observateurs,
- (2) De plusieurs informations vues par un seul observateur,
- (3) De plusieurs informations vues par plusieurs observateurs.

### 3.3.2.1 Types de fusion d'informations

Que les informations proviennent d'une ou de plusieurs sources et qu'elles soient de même nature ou pas, deux cas de fusion sont distingués [27], selon que les données sont en compétition ou complémentaires. Pour des données en compétition, la nécessité d'une décision quant à la véracité de deux informations conflictuelles apparaît.

La définition de Bloch [28] va dans ce sens : " La fusion d'informations consiste à combiner des informations hétérogènes issues de plusieurs sources afin d'améliorer la prise en charge de décision ". En traitement d'images, ce type de fusion est appliqué au niveau des pixels (ou voxels) des images recalées. En imagerie médicale, de telles approches ne sont pas nécessairement fondées sur les données biologiques mais le plus souvent sur la représentation de ces données, il s'agit d'une fusion d'informations iconiques [27].

Pour des données complémentaires, le but de la fusion est l'association d'informations. Bien que l'imprécision et l'incertitude puissent également être modélisées par les mêmes méthodes que celles citées ci-dessus, il ne s'agit plus de décision et au choix de la part d'information à retenir d'un observateur. Il s'agit désormais de la stratégie à employer pour combiner les informations, les associer, en extraire de nouvelles, ou les représenter dans un même environnement. Ce type de fusion traite le plus souvent des données de dimensions spatiotemporelles et/ou de nature différentes mais complémentaires [27].

Dans ce type de fusion, on cherche avant tout la visualisation et la représentation de l'information combinée, de la façon la plus claire et intuitive possible. Les données fusionnées peuvent être de nature ou de dimension différentes. Afin de les comparer, des modes d'intégration et de représentation dans un espace commun doivent être mis en place.

L'espace de représentation, sur un même plan dimensionnel, doit permettre de comparer des données de même ou de différent type (longueur, masse, temps, courant électrique, température, quantité de matière ou intensité lumineuse) qu'elles soient statiques ou dynamiques, scalaires ou vectorielles [27].

### 3.3.2.2 Difficultés de la fusion d'informations

La difficulté de la fusion d'informations est liée aux imperfections de l'information apportée par chacune des sources. À leur hétérogénéité, à la fiabilité (connue ou inconnue) des différentes sources, ainsi qu'à la nature de leur dépendance éventuelle. La résolution de ce type de problème nécessite de recourir à des outils de modélisation et de gestion des informations incertaines et imprécises.

Quatre principales théories ont été proposées pour la modélisation et le traitement de telles informations [24] : la théorie des probabilités, la théorie des possibilités, la théorie des fonctions de croyance et la logique propositionnelle.

### 3.3.3 Fusion de connaissances

La fusion de connaissances nécessite la prise en compte de l'aspect logique des connaissances. Elle fait appel au raisonnement symbolique et aux règles empiriques [29].



## 3.4 Représentation des connaissances et ontologies

### 3.4.1 Introduction

La représentation des connaissances est un domaine de l'intelligence artificielle qui fournit un ensemble d'outils et de procédés destinés à représenter et à organiser le savoir humain pour le réutiliser et pouvoir le partager. Des outils plus complexes permettent de formaliser les connaissances dans un langage formel leur permettant d'être comprises et réutilisées par les machines. Une des approches les plus utilisées en représentation des connaissances est l'ontologie. L'ontologie peut être vue comme un ensemble de concepts et leurs propriétés reliés entre eux par différents types de relations. La formalisation permet d'automatiser des traitements comme le raisonnement, un des principaux domaines de l'intelligence artificielle.

Dans le cadre de la représentation des connaissances, les réseaux enterrés et la géodétection font intervenir plusieurs domaines et plusieurs types de connaissances. Pour résoudre les problèmes liés à l'intégration multiple de données hétérogènes, il est nécessaire de trouver un discours commun pour les différents systèmes de détection et assurer une interopérabilité entre eux. Les ontologies peuvent donc être utilisées à cette fin car elles permettent de modéliser le domaine de travail sur lequel opèrent ces systèmes de détection et décrivent les données pour proposer des solutions de raisonnement.

### 3.4.2 La notion d'ontologie

Techniquement, une ontologie peut être vue comme un réseau sémantique qui regroupe un ensemble de concepts décrivant un domaine particulier. Ces concepts sont définis par leurs propriétés et sont reliés entre eux par des relations taxonomiques et sémantiques. Avant d'être réutilisé dans l'informatique, le terme "ontologie" tient son origine de la philosophie grecque et est dérivé des termes "ontos" qui signifie "l'existant ou ce qui existe" et de "logos" qui signifie "étude ou discours". L'ontologie en philosophie désigne une branche de la métaphysique qui s'intéresse à la notion d'existence et à l'étude des propriétés générales de ce qui existe.

Le terme "ontologie" a été repris en informatique dans les années 1980 par John McCarthy dans l'intelligence artificielle où il soulève la nécessité d'énumérer l'ensemble de tout ce qui existe avant de concevoir tout système intelligent fondé sur la logique. C'est à cet effet que les ontologies ont émergé comme réponse aux problèmes de représentation des connaissances dans les systèmes informatiques.

#### 3.4.2.1 Définitions de l'ontologie

Depuis son apparition dans l'intelligence artificielle, plusieurs définitions ont été proposées et ont beaucoup évolué. Gruber [30] avait défini pour la première fois l'ontologie comme :

« Une spécification explicite d'une conceptualisation »

À travers cette définition, Gruber [30] considère la conceptualisation comme une abstraction du monde pour obtenir une représentation. Néanmoins, de nombreux auteurs ont critiqué cette dernière pour son caractère générique et trop vague. Cette définition a été révisée par Borst [31] en considérant l'ontologie comme :

« Une spécification explicite et formelle d'une conceptualisation partagée »

A travers cette définition, quatre notions sont mises en évidence comme suit :

**Explicite** : signifie que les types de concepts et les contraintes sur leurs usages doivent être définis explicitement et sans ambiguïté.

**Formelle** : signifie que l'ontologie doit être standardisée et compréhensible par la machine une fois traduite dans un langage formel.

**Conceptualisation** : se réfère à un modèle abstrait de description et de modélisation d'un phénomène ou d'un domaine par identification et choix de concepts pertinents.

**Partagée** : l'ontologie capture des connaissances consensuelles qui ne sont pas propres à un seul individu mais validées par un groupe ou une communauté représentative du domaine.

### 3.4.2.2 Apport des ontologies

Outre l'interopérabilité sémantique, l'intérêt d'utiliser des ontologies est la représentation des connaissances d'un domaine et l'application de raisonnements sur ces connaissances [32] pour générer de nouvelles connaissances et ce, à travers les apports suivants :

(1) La conceptualisation de connaissances permet d'analyser un domaine de manière approfondie et de rendre toutes ses suppositions explicites. Cela permet aux acteurs de la communauté du domaine en question de se mettre d'accord sur le sens des termes employés, de résoudre les problèmes de compréhension, d'améliorer la communication en levant les difficultés à partager des connaissances entre les différents acteurs du domaine.

(2) La formalisation des connaissances conceptualisées permet de lever les ambiguïtés dans un premier temps et rend possible, dans un second temps, l'interprétation des connaissances par les machines. L'utilisation d'un langage formel permet de réviser la conceptualisation du domaine avant de la rendre compréhensible par les machines. Par ce biais, la communication et l'échange entre humains et machines sont rendus possibles.

(3) La réutilisation et le partage d'informations sont favorisés par la création d'ontologies, en effet, les connaissances conceptualisées et formalisées dans une ontologies peuvent facilement être réutilisées à d'autres fins.

### 3.4.3 Les composants d'une ontologie

L'ontologie est constituée de plusieurs composants pouvant être distingués en deux catégories : la conceptualisation des connaissances et la logique pour le raisonnement. Les éléments de conceptualisation des connaissances permettent de décrire les connaissances du domaine sous forme de concepts, de relations et d'instances de ces derniers. La logique pour le raisonnement est constituée des mécanismes permettant de générer de nouvelles relations entre les éléments de conceptualisation comme les fonctions, les axiomes et les règles, et de vérifier la cohérence du modèle.

#### 3.4.3.1 Les concepts

Appelé aussi terme ou classe, un concept est une notion (ou objet) qui permet de représenter un objet matériel, une notion ou une idée [33]. Les concepts de l'ontologie peuvent être vus

comme des abstractions pertinentes d'une partie du monde réel selon un domaine d'application.

Selon Gomez-Perez [34], la classification des concepts peut être réalisée suivant trois critères : (1) le niveau de son abstraction (concret ou abstrait), (2) de son atomicité (élémentaire ou composé) et (3) de son niveau de réalité (fictif ou réel).

Les concepts sont organisés dans l'ontologie en hiérarchie de concepts (taxonomie) classés en fonction de critères sémantiques particuliers [35]. Selon Uschold et King [36], Un concept est composé de trois parties : (1) un (ou plusieurs) termes permettant de désigner le concept appelé "label de concept", (2) la notion ou l'intension du concept, elle contient la sémantique du concept au travers de ses propriétés et de ses attributs. Enfin, (3) l'extension du concept qui regroupe un ensemble d'objets correspondant aux instances du concept.

Cependant, la définition des concepts du domaine à formaliser, la façon de construire la hiérarchie des concepts et l'importance à leur accorder sont des problèmes qui se posent lors de la création de l'ontologie. Pour résoudre ces problèmes de conceptualisation et afin d'éviter toute ambiguïté de sens, Bachimont [35] propose de recourir à une normalisation sémantique basée sur le paradigme différentiel en fonction des quatre principes différentiels qui sont [37] : (1) le principe de communauté avec le concept père, (2) le principe de différence avec le concept père, (3) le principe de communauté avec les concepts frères et (4) le principe de différence avec les concepts frères. De plus, un concept se définit par les relations qu'il entretient avec les autres concepts du domaine. Par ailleurs, Guarino [38] propose de caractériser un concept en se basant sur ses propriétés formelles de généralité, d'identité, de rigidité et d'unité.

(1) La généralité d'un concept est liée à son extension, ainsi un concept est dit générique s'il n'admet pas d'extension.

(2) Un concept porte une propriété d'identité si cette propriété permet d'identifier de manière unique l'ensemble de ses instances.

(3) La rigidité d'un concept est liée à la persistance de ses instances en fonction du temps, ainsi le concept "humain" est rigide et le concept "étudiant" est non rigide.

Enfin, (4) un concept est dit concept unité si pour chacune de ses instances, les différentes parties de l'instance sont liées par une relation qui n'est pas réutilisée pour lier les instances d'autres concepts.

### 3.4.3.2 Les relations

Dans une ontologie, une relation entre concepts correspond à une interaction possible entre eux. Elle se définit à la fois par sa signature mais aussi par le contenu sémantique qu'elle apporte à travers les concepts qu'elle unit [39]. Ainsi, dans une ontologie, les relations permettent de structurer les connaissances et définir les liaisons entre les concepts [37]. Les liaisons existant entre les concepts diffèrent à plusieurs échelles. Ainsi, Hernandez [40] distingue deux grandes catégories de relations (1) les relations taxonomiques et (2) les relations associatives.

Les relations taxonomiques permettent de structurer et d'organiser hiérarchiquement un ensemble de concepts. La relation de subsumption est la relation taxonomique principale permettant de structurer l'ontologie. Certaines approches utilisent la relation Partie-Tout pour structurer

rer hiérarchiquement les connaissances. Les relations associatives sont des relations sémantiques permettant de relier les concepts. Ces relations ne sont pas taxonomiques mais peuvent être enrichies par des propriétés telles que la symétrie et la réflexivité.

**La relation "Est-Un" :** appelée communément subsumption, la relation "Est-un" est une relation de spécialisation entre les concepts d'un domaine et désigne qu'un concept A est une sous classe (subClassOf) d'un concept supérieur B. Concrètement, le concept A possède des propriétés en plus des propriétés qu'il hérite du concept B.

**La relation "Partie-Tout" :** la relation Partie-de relie un couple de concepts A et B dont l'un (A) dénote une partie et l'autre (B) dénote le tout. Autrement dit, le concept A constitue une partie du concept B.

**Les relations sémantiques :** Elles relient les concepts d'un domaine particulier et apportent plus de sémantique aux modélisations élaborées. Ainsi, elles permettent d'alimenter l'ontologie avec de nouvelles connaissances par le moyen de règles de raisonnement.

### 3.4.3.3 Les fonctions

Les fonctions constituent des cas particuliers de relations dans lesquelles un élément de la relation est défini à partir des éléments précédents.

### 3.4.3.4 Les instances

Communément appelées individus de l'ontologie, les instances constituent la partie extensionnelle de l'ontologie et correspondent aux valeurs concrètes ou occurrences des concepts et des relations définis dans l'ontologie.

### 3.4.3.5 Les axiomes

Les axiomes sont des assertions toujours vraies à propos des abstractions du domaine modélisé, c'est à dire des concepts et des relations de l'ontologie [37][41]. Ils peuvent être décrits comme des formules bien formées de la logique du premier ordre en utilisant des prédicats de l'ontologie. Les axiomes sont utilisés pour définir la sémantique et le sens des composants de l'ontologie, pour imposer des restrictions sur les valeurs des attributs et les contraintes liées à leur interprétation et afin de vérifier la validité des informations spécifiées dans l'ontologie [40].

## 3.4.4 Typologies des ontologies

Comme dans le cas de la définition d'une ontologie, la classification de sa topologie est très discutée. Nous nous intéressons aux types d'ontologies selon l'objet de conceptualisation et nous en distinguons les quatre types suivants :

**L'ontologie de haut niveau :** Communément appelée ontologie générique ou ontologie supérieure, l'ontologie de haut niveau permet de décrire des concepts généraux ou de haute abstraction qui ne dépendent pas d'un problème ou d'un domaine particulier comme le temps, l'espace, les entités, les événements, les processus et les actions, etc.

**L'ontologie de domaine :** Elle permet de conceptualiser et de formaliser les concepts d'un domaine particulier avec un vocabulaire associé. Des exemples d'ontologies de domaine peuvent être cités : l'ontologie Entreprise qui décrit le domaine de l'entreprise et l'ontologie KADS.

**L'ontologie de tâche :** Permet de conceptualiser les tâches d'un processus comme le diagnostic, planification, configuration ou conception. Elle régit un ensemble de vocabulaires et

de concepts qui décrivent la structure de réalisation de tâches indépendantes du domaine[32][42].

**L'ontologie d'application :** Décrit les connaissances d'un domaine spécifique à une application particulière [43].

### 3.4.5 La construction d'ontologies

Comme tout projet de développement, le processus de construction d'une ontologie doit s'appuyer sur une méthodologie et un ensemble de règles qu'il est nécessaire de respecter afin que l'ontologie résultante soit pérenne et qu'elle réponde aux objectifs attendus. En effet, les ontologies sont destinées à être intégrées dans des systèmes d'information, leur développement doit donc s'appuyer sur des principes similaires aux principes en génie logiciel [37].

#### 3.4.5.1 Cycle de développement d'une ontologie

De nombreuses méthodologies ont été proposées suite à l'émergence des ontologies. ces dernières s'inspirent de sources et d'expériences différentes. Néanmoins, malgré l'absence de consensus sur les meilleures pratiques à adopter lors de la création d'une ontologie, les auteurs s'accordent tous sur un cycle de développement passant par quatre étapes principales (spécification, conceptualisation, formalisation et implémentation). Toutefois, ce processus de développement nécessite la collaboration des experts du domaine, des ingénieurs de la connaissance et des futurs utilisateurs de l'ontologie. Cette collaboration ne peut être fructueuse que si les objectifs du processus et les besoins qui en découlent ont été clairement définis [35].

Le cycle de développement d'une ontologie passe par les étapes suivantes [34] :

**Spécification des besoins :** consiste à définir l'objectif opérationnel, le domaine et le type de l'ontologie et à identifier ses utilisations futures.

**Conceptualisation :** consiste à définir les concepts et les relations à partir d'études et d'analyses de documents, notes, comptes rendus d'interviews, livres, etc.

**Formalisation :** formaliser l'ontologie conceptuelle revient à utiliser un langage formel ou un formalisme permettant de les exprimer dans un langage partagé par l'homme et par la machine. Des outils d'aide à la construction d'ontologies sont mis à disposition pour accompagner cette tâche [44].

**L'opérationnalisation :** c'est l'implémentation de l'ontologie formelle dans un langage de représentation des connaissances.

**Évaluation et évolution de l'ontologie :** vérification de la consistance et validation de l'ontologie.

#### 3.4.5.2 Méthodologies de construction d'ontologies

L'ingénierie ontologique ne propose à l'heure actuelle aucune méthode normalisée ou méthodologie générale de construction d'ontologies. Cependant, certains auteurs ont proposé des méthodologies inspirées de leur expérience. Plusieurs ontologies ont été proposées dans la littérature comme : ENTREPRISE [45], TOVE [46], Methontology [47] [48], Cyc [49], NeOn [50], Terminae [51], HCOME [52], etc.

**La méthodologie Methontology :** développée au laboratoire d'intelligence artificielle de l'université polytechnique de Madrid, Methontology [47] [48] est une méthodologie com-

plète s'inspirant des travaux réalisés en ingénierie des connaissances et en génie logiciel pour la construction d'ontologies au niveau "connaissances". Recommandée par la FIPA<sup>1</sup> pour la construction d'ontologies, des études [53] ont montré qu'elle est la méthode la plus avancée et l'une des méthodologies les plus complètes disponibles actuellement. Elle décrit en détail les différentes étapes à réaliser et énumère les différentes tâches de chaque étape comme suit :

*Spécification du domaine* : comprend la définition du domaine et sa portée par la réponse à une série de questions : quel est le domaine que l'ontologie va découvrir ? À quoi cette ontologie va servir ? À quels types de questions les informations de l'ontologie doivent fournir des réponses ? Qui va utiliser et maintenir l'ontologie ? , etc. Les réponses peuvent évoluer au cours du processus de développement tout en limitant la portée du modèle.

*Conceptualisation des connaissances* : consiste à identifier et à structurer les connaissances du domaine à partir des sources d'informations. L'acquisition de ces connaissances peut s'appuyer à la fois sur l'analyse de documents et sur l'interview des experts du domaine. La conceptualisation permet d'identifier les concepts par leurs termes, leur sémantique est décrite dans un langage semi-formel (tables et graphes) à travers leurs propriétés, leurs instances et les relations qui les relient.

*Formalisation* : consiste à formaliser le modèle conceptuel en utilisant un formalisme de représentation d'ontologie (exemple : logiques de description).

*Implémentation* : comprend le codage de l'ontologie formelle dans un langage de représentation des connaissances en utilisant un éditeur d'ontologie.

*Maintenance* : pouvant être corrective ou évolutive (adaptation à de nouveaux besoins de l'utilisateur), elle permet de valider l'ontologie et la faire évoluer.

### 3.4.5.3 Choix d'une méthodologie

Les méthodologies ont beaucoup évolué par l'expérience et le nombre important des travaux de recherche menés dans ce contexte. Le choix d'une méthodologie doit être fait en se basant sur les critères suivants : le besoin de représentation des connaissances, le type de l'ontologie souhaitée, le domaine de connaissances et le besoin l'intégration d'ontologies existantes.

## 3.4.6 Les outils de développement d'ontologies

Le développement d'ontologies nécessite de recourir à différents outils tout au long du processus. Les outils de base utilisés sont décrits ci-dessous.

### 3.4.6.1 Les formalismes de représentation de connaissances

Le formalisme intervient lors de la représentation des connaissances d'un domaine pour le décrire et coder toutes les entités le constituant de manière à ce qu'une machine puisse les manipuler et les comprendre. Ils permettent de représenter les connaissances sous forme de concepts, de rôles et d'individus. Les formalismes ont connu des évolutions au cours du temps, les plus connus dans l'état de l'art sont les frames, les réseaux sémantiques et les logiques de description.

---

1. FIPA : Foundation for Intelligent Physical Agents

**Les logiques de description (LD) :** c'est une famille de langages de représentation de connaissances qui peuvent être utilisés pour représenter les concepts d'un domaine de manière formelle et structurée. La logique de description a été développée comme une extension des frames et des réseaux sémantiques, qui ne possédaient pas de sémantique formelle basée sur la logique. Non seulement elle offre une expressivité supérieure mais elle permet aussi de raisonner sur les connaissances.

### 3.4.6.2 Les langages de représentation de connaissances

Un langage de représentation de connaissance permet d'implémenter l'ontologie formelle dans un langage compréhensible et interprétable par un système informatique. Les langages de représentation des connaissances les plus utilisés sont : XML (eXtensible Markup Language), RDF (Resource Description Framework), RDFS (RDF Schéma), DAML-OIL et OWL (Lite, DL, Full) et OWL2. SKOS et OBO sont des langages obsolètes qui ne sont plus utilisés.

### 3.4.6.3 Les éditeurs d'ontologies

Pour faciliter l'élaboration des ontologies, plusieurs éditeurs proposent des formalismes variés et offrent différentes fonctionnalités. Les outils les plus cités sont : OIEd (Université de Manchester), OntoEdit (Université de Karlsruhe), Ontolingua (proposé par l'université de Stanford), Web ODE (Université Polytechnique de Madrid), SWOOP (Université du Maryland), Protégé (Stanford Medical Informatics), DOE (Institut national de l'audiovisuel).

**Protégé :** est un éditeur d'ontologies développé en Java et créé à l'université Stanford. Protégé est très populaire dans le domaine du Web sémantique, il peut lire et sauvegarder des ontologies dans la plupart des formats d'ontologies comme RDF, RDFS et OWL. Il est reconnu pour sa capacité à travailler sur des ontologies de grandes dimensions. La figure 3.1 donne un aperçu de son interface.

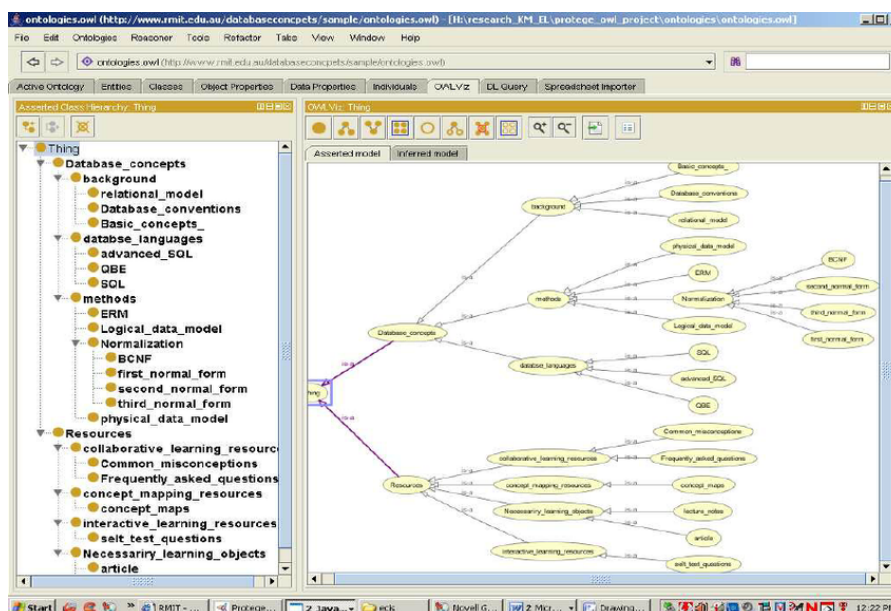


FIGURE 3.1 – Présentation de l'interface de l'éditeur Protégé [54].

#### 3.4.6.4 Les moteurs d'inférences

Appelé communément raisonneur, un moteur d'inférence est un mécanisme permettant de déduire de nouvelles connaissances à partir de faits initiaux présents dans une base de connaissances. Des inférences sont réalisées en exécutant un ensemble de règles. Plusieurs approches sont possibles : le chaînage avant qui consiste à partir du but et remonter jusqu'aux faits initiaux, et le chaînage arrière qui va à partir des faits initiaux pour aller vers le but.

Dans les ontologies, les moteurs d'inférence permettent de vérifier la consistance de la définition des connaissances et d'interroger l'ontologie. De plus, ils permettent d'enrichir la base de faits par le raisonnement. La plupart des moteurs existant actuellement sont conçus pour raisonner à partir des logiques de descriptions et peuvent donc prendre en entrée une ontologie au format RDF(S) ou OWL [53]. Plusieurs moteurs d'inférences sont proposés dans la littérature. Ils se différencient par la méthode d'inférence utilisée, par le type d'information et la puissance. Protégé intègre les moteurs d'inférence Hermit, Racer et Pellet.

#### 3.4.6.5 Le langage de règles SWRL

Une règle SWRL est exprimée sous la forme de règles de Horn : (**Antécédent**  $\rightarrow$  **Conséquent**) qui signifie que si **Antécédent** est vrai alors **Conséquent** l'est aussi. Chacun présente sous la forme d'une conjonction d'atomes où chaque atome fait partie de l'une des familles d'atomes proposées par SWRL :

- **Atomes classe** : permettent de définir l'individu d'une classe ou une variable classe `Network(?x)` , `Network(GasNetwork64)`.
- **Atomes propriété** : permettent de définir des propriétés sur des instances ou des variables de classe : `Carry(?x,?y)` , `YearInstallation (GasNetwork64,1998)`.
- **L'atome DifferentIndividual** : définir deux instances différentes : `DifferentFrom(Client1,Client2)`
- **L'atome SameIndividual** définir deux instances identiques : `SameAs(Client1, Meter215)`
- **Les atomes Datarange** : définir des intervalles : `[1,2,3](?x)`
- **Atomes prédéfinis (Builtin)** : permettent d'ajouter d'autres fonctionnalités comme la comparaison : `GreatherThan(YearInstallation(?x) , 1995)`

#### 3.4.6.6 Les langages d'interrogation des ontologies

Un langage d'interrogation d'ontologies (exemple SPARQL) est un outil qui permet de lancer des requêtes sur l'ontologie et joue le rôle d'une interface entre l'utilisateur ou l'application et l'ontologie.



## 3.5 Les connaissances spatiales

### Introduction

Le temps et l'espace sont des notions génériques et universelles dont la perception par l'humain dépend de ses visions et des projections internes qu'il se fait pour maîtriser et comprendre son environnement [53][55]. En effet, toutes les perceptions et les activités humaines sont relatives à ces deux notions qui ont toujours suscité la curiosité de philosophes et scientifiques qui n'ont jamais réussi à fournir de définition unanime [56].

La modélisation des relations spatiales est un sujet de recherche qui a suscité l'intérêt de nombreuses communautés [57]. Cet intérêt repose principalement sur la compréhensibilité, l'efficacité et la disponibilité de fonctions calculables. Parmi ces communautés citons la théorie des ontologies formelles [58], les systèmes d'informations géographiques (SIG) [59], le traitement d'images [60], le traitement des langues naturelles [61], la navigation en robotique [62] et les bases d'informations spatiales [63].

#### 3.5.1 Notion de relation spatiale

Les relations spatiales ont pour objectif de décrire la façon dont les entités spatiales sont reliées avec d'autres au sein d'un espace de représentation. Pour cela il est nécessaire de spécifier les entités spatiales et la structure de l'espace. Les approches utilisent généralement des espaces à deux ou trois dimensions, qui sont soit discrets (raster, grille) soit continus (vectoriels). Ces approches débouchent sur un ensemble de formalismes adaptés à chacune de ces configurations. Les relations spatiales peuvent être catégorisées en relations topologiques, métriques et relations d'ordre [59]. Nous nous limitons ici aux relations statiques et éliminons de fait les approches dynamiques s'intéressant aux déplacements d'objets dans l'espace. Alors que les relations métriques représentent des distances quantitatives, elles peuvent être converties en distances qualitatives [64]. Parmi les représentations topologiques, l'approche du Region Connection Calculus (RCC) constitue une des références de description des relations topologiques entre deux surfaces. La théorie des relations d'ordre est développée principalement dans [65] tandis que des approches voisines s'intéressent plus particulièrement aux relations d'orientation telles que l'orientation relative entre différentes entités par rapport à un contexte de référence [65]. Les relations directionnelles [59] s'appuient sur un cadre de référence général dans lequel les informations sont exprimées en termes de directions cardinales. Elles sont souvent mélangées avec des approches de type distance.

##### 3.5.1.1 Méréotopologie

La topologie a influencé différentes théories spatiales qualitatives telles que le RCC ou les n-intersections [59]. La méréotopologie qui intègre la méréologie (théorie du tout et des parties) avec la topologie s'intéresse plus particulièrement aux propriétés invariantes au travers des déformations continues des objets (translation, rotation). Elle est à la base de la plupart des approches de type topologique. Le RCC (Region connection calculus) est un formalisme destiné à la représentation des relations entre des régions spatiales. Il est basé sur la relation primitive  $C(x,y)$  qui signifie que  $x$  est connecté à  $y$ . Un ensemble de huit relations exhaustives et disjointes deux à deux entre deux régions sont spécifiées. Toute relation entre deux régions spatiales est exprimable à partir de ces relations comme illustré dans la figure 3.2.

La représentation de type n-intersections est une alternative méréotopologique basée sur une théorie topologique de type ensemble de points. Tout objet est considéré comme un ensemble

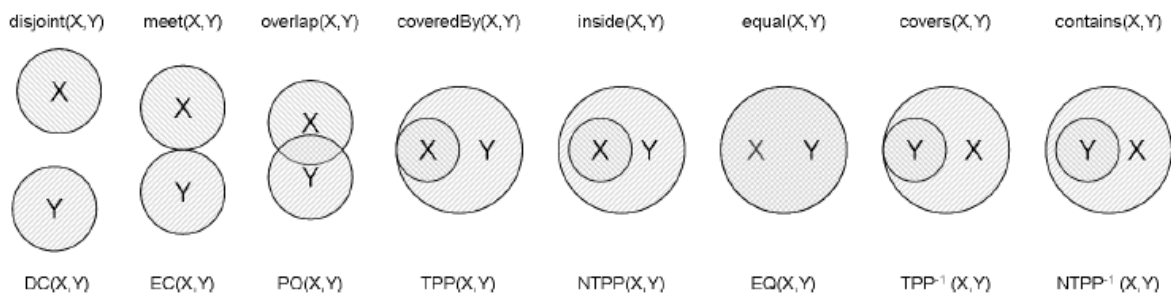


FIGURE 3.2 – Ensemble des huit relations topologiques exhaustives disjointes deux à deux [66].

de points topologiquement situés dans un espace donné. Par exemple une région de  $\mathbb{R}^2$  est un ensemble de points  $x$  qui repose sur l'introduction de trois ensembles de points, l'intérieur ( $x^o$ ), la frontière ( $\partial x$ ) et l'extérieur ( $x^-$ ). Les relations entre deux régions connectées  $x$  et  $y$  (à deux dimensions) s'expriment par une matrice  $2 \times 2$  appelée 4IM :

$$R(x, y) = \begin{bmatrix} x^o \cap y^o & x^o \cap \partial y^o \\ \partial x^o \cap y^o & \partial x^o \cap \partial y^o \end{bmatrix}$$

### 3.5.1.2 Les relations basées sur la direction

Les relations de direction décrivent comment une entité spatiale est positionnée par rapport à une autre. Les relations sont plus contraignantes que dans le cas des informations topologiques mais plus faibles que les informations métriques. Les relations peuvent être binaires, ternaires ou plus. Citons par exemple le calcul de type cone-shaped dans lequel les relations de base utilisent quatre ou huit secteurs disjoints de l'espace délimités par des lignes issues d'un point de référence. Dans le calcul de type projection-based, les relations de base sont séparées par des lignes horizontales et verticales à partir d'un point de référence.

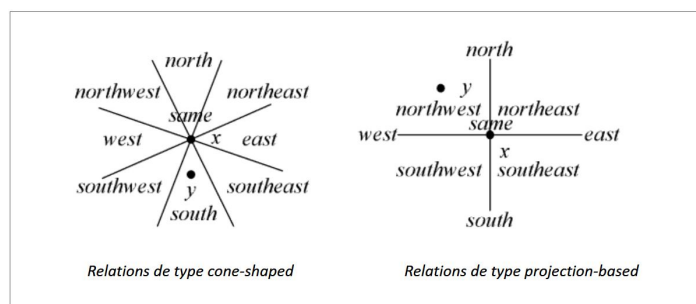
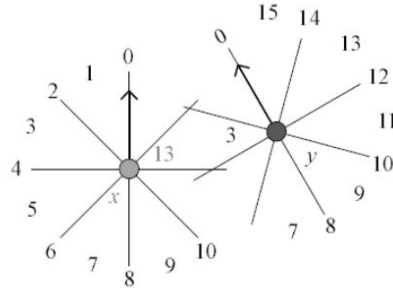


FIGURE 3.3 – Relations de type cone-shaped VS projection-based.

D'autres approches plus expressives ont été proposées telles que l'Oriented Point Algebra [67]. Avec une granularité permettant un passage à l'échelle. L'espace autour d'un point est découpé en 16 secteurs avec orientation dans le sens trigonométrique. La figure suivante présente un exemple de la relation  $x_4$  dans laquelle un point orienté  $x$  se situe dans la troisième portion de l'espace relative au point  $y$  tandis que le point  $y$  perçoit le point  $x$  dans son 13<sup>ème</sup> secteur.

Citons encore CYCORD (CYClic ORDERing) qui utilise des relations ternaires ( $x, y, z$ ) dans un espace 2D [59]. D'autres approches exploitent le calcul à double croix ternaire [65]. Trois



La relation  $x_4 \angle_{13}^3$  dans  $OPRA_4$

FIGURE 3.4 – La relation  $x^4$ .

modèles à différents niveaux de granularité sont introduits pour représenter à différentes échelles l'information de direction. Une relation est perçue comme une relation entre un point  $z$  par rapport à un vecteur  $xy$  et notée  $xy : z$ . Des opérateurs de composition unaires (par ex. INV qui déduit  $xy : z$  de  $yx : z$ ) et binaires calculent toutes les possibilités entre trois points. D'autres relations peuvent être spécifiées pour une extension à trois dimensions comme illustré dans la figure 3.5.

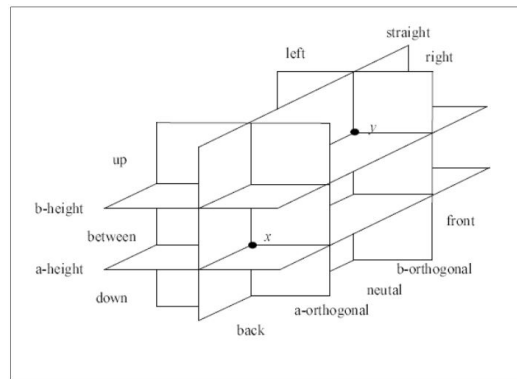


FIGURE 3.5 – relations dimensions

Enfin, des calculs de type RST (Rotation Scaling Translation) ont été proposés [68]. Ils sont centrés sur l'invariance de relations par rapport aux rotations, homothéties et translations de points. Toutefois, il a été prouvé que les sous-algèbres sur lesquels reposent ces approches demeurent NP-hard et donc que ces calculs directionnels ne sont pas calculables.

### 3.5.1.3 Les relations basées sur la distance

On distingue les approches absolues (par ex.  $X$  est proche de  $Y$ ) et relatives (par ex.  $X$  est plus proche de  $Y$  que de  $Z$ ). Le cas absolu recouvre les représentations qualitatives et quantitatives tandis que le cas relatif est réservé au qualitatif. Il est à noter que l'évaluation de la distance seule ne suffit pas et qu'elle doit être complétée par des informations de direction [64] ou d'angles [69]. La figure suivante présente un exemple de la première approche avec des relations de type distance telles que  $vc$  (very close),  $cl$  (close), commensurate ( $cm$ ), far ( $fr$ ) et very far ( $vf$ ).

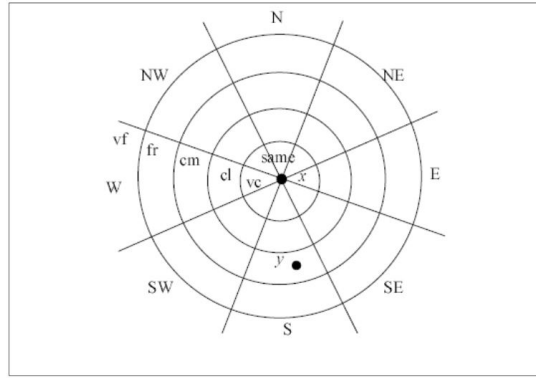


FIGURE 3.6 – relations distance

### 3.5.1.4 Les relations relatives à la forme

C'est une des caractéristiques spatiales les plus difficiles à exprimer mathématiquement. Une des approches les plus significatives dans ce domaine est le calcul *BA* (Bipartite Arrangements) [70]. Dans cette méthode, l'auteur donne une représentation des situations (des paires de segments) par un alphabet (chaînes de caractères) qui génère un langage. On obtient ainsi en ensemble de 23 relations de base utilisées en recherche de similarités [71]. Ce type d'approche n'est pas directement relié aux objectifs de représentation du projet G4M.

### 3.5.2 Gestion de l'incertain

Toutes les approches qualitatives, de par leur nature et contrairement aux approches quantitatives, contiennent déjà un degré d'incertitude. Dans certaines situations cependant (par ex. des frontières précises d'une région), le degré d'incertitude est insuffisant. Ces difficultés reposent essentiellement sur les limites de l'observation et sur l'identification (sémantique) des objets spatiaux. L'essentiel des travaux dans ce domaine fait apparaître deux stratégies. Dans la première on étend les modèles spatiaux pour prendre en compte l'indétermination [72] tandis que dans la seconde on utilise des modèles mathématiques basés sur l'imprécision (fuzzy sets, rough sets) pour exprimer les relations spatiales. Dans les premiers modèles l'incertitude peut par exemple se traduire par un passage d'un modèle booléen à un modèle de treillis. La seconde stratégie repose sur des valeurs d'entrée numériques. L'incertitude se traduit par un degré d'appartenance à une relation spatiale dans l'intervalle  $[0, 1]$ . Le problème de l'incertitude peut également s'aborder en choisissant un niveau de granularité. On peut ainsi représenter différents niveaux d'information topologique et fournir des primitives permettant de passer d'un niveau à un autre [73].

Cette section s'est intéressée aux approches de la représentation spatiale et du raisonnement spatial. L'objectif est d'identifier les premières pistes pour aborder l'aspect spatial pour la géodétection multi-capteurs et la détection du tracé d'un réseau par la recherche d'alignements de plusieurs points. Dans le chapitre suivant nous raffinerons les contraintes attendues pour l'application G4M et envisagerons une alternative à ces approches qui permettra de mieux intégrer ces contraintes.

## 3.6 Conclusion

Le présent chapitre a donné un aperçu des domaines d'étude de notre problématique qui est la géodétection automatique multimodale des réseaux enterrés.

Pour traiter ce problème en profondeur nous nous sommes intéressés dans un premier temps à la problématique de la géodétection des réseaux enterrés. En effet, les difficultés de ce domaine sont liées aux problématiques du terrain, aux limites des techniques de détection et à la complexité des réseaux enterrés. Après étude du problème, plusieurs solutions et pistes ont été identifiées. La première piste porte sur la maîtrise du contexte et de l'environnement. Pour ce faire, nous nous sommes intéressés à la représentation des connaissances et à leur modélisation pour les intégrer dans le système.

La seconde piste porte sur l'amélioration des techniques de détection et la fusion de leurs résultats sur le même terrain. Pour cela, nous avons étudié les techniques de fusion de données qui sont parfois aberrantes et incertaines.

Enfin, pour mettre en place une méthode automatique multi-capteurs avec des données et des connaissances géoréférencées nous nous sommes intéressés à la représentation de l'information spatiale et au raisonnement spatial.

Le chapitre suivant présente les approches étudiées et les pistes proposées pour résoudre ce problème et combiner plusieurs tâches multi-disciplinaires.



## Chapitre IV : Propositions





# Propositions

---

## 4.1 Introduction

Dans le présent chapitre, nous proposons des solutions à différents niveaux pour répondre à la problématique de la géodétection des réseaux enterrés. Pour améliorer les performances, le projet G4M a pour objectif de fusionner quatre techniques de détection existantes. La fusion logique de ces techniques relève de notre travail, qui consiste, en amont, à apporter des solutions à différentes échelles du projet G4M, en allant du choix des informations à utiliser jusqu'à la fusion des résultats de détection multi-capteurs.

Afin de présenter les différentes propositions de cette thèse, le chapitre présent est structuré en cinq sections comme suit :

- La première section met en avant l'importance des informations contextuelles et des connaissances a priori dans le processus de décision. Nous y présenterons l'approche proposée pour le choix, la représentation et l'utilisation des informations a priori.
- La deuxième section présente le processus de géodétection que nous proposons dans le but d'améliorer la méthode actuelle et de lever toute ambiguïté due à l'absence d'une méthodologie générale.
- La troisième section constitue la partie de travail la plus importante et porte sur l'étude et la proposition de solutions d'améliorations possibles des techniques Géoradar, Gas Tracker et électromagnétique.
- La quatrième section porte sur la fusion de connaissances afin d'améliorer la détection mono-capteur et sur la fusion de données multi-capteurs afin de fournir un seul résultat de détection avec le meilleur niveau de fiabilité qui soit. A travers une étude de cas, nous y présentons notre approche de fusion multi-capteurs combinée avec la représentation spatiale des données géoréférencées.
- La cinquième section traite le problème de la représentation spatiale des données géoréférencées et le passage des données de détection vers le tracé du réseau enterré. Nous y proposerons deux pistes, la première est basée sur les données et la seconde sur le raisonnement spatial en utilisant les sphères de Tarski.
- La dernière section résume dans une courte synthèse les différentes propositions, les difficultés pouvant être rencontrées et les risques persistants.

## 4.2 L'intégration d'informations contextuelles et a priori

Les investigations complémentaires regroupent l'ensemble des travaux de géodétection des réseaux enterrés réalisés sur le terrain d'étude par des techniques adaptées à leur nature.

Pour ce faire, un ensemble d'informations, obtenues par observation et analyse du terrain et de la cartographie, est nécessaire pour établir un plan de géodétection optimal. Cet ensemble d'informations permet d'organiser les investigations et de se positionner sur le terrain en fonction des réseaux recherchés pour permettre de les détecter de manière efficace. Ainsi, l'opérateur en charge de réaliser les investigations de géodétection s'appuie sur cet ensemble d'informations sur l'environnement et le terrain pour identifier les points favorables pour une meilleure géodétection et identifier les faiblesses pour le choix des outils les plus adaptés.

Dans ce contexte, nous considérons deux catégories d'informations utiles : les informations a priori sur les réseaux enterrés recherchés et les informations contextuelles.

### 4.2.1 Les informations a priori sur les réseaux

C'est l'ensemble des informations a priori sur les réseaux enterrés éventuellement présents sur le terrain d'étude. Elles sont obtenues par la supposition de la présence d'un réseau enterré dans le terrain à partir de la cartographie ou par les indices de présence sur la surface tels que les affleurants. De ce fait, toute indication sur la présence éventuelle d'un réseau enterré peut être utile à l'opérateur car elle permet de le guider dans sa recherche par la délimitation de la zone de recherche et sa concentration sur l'axe de la cible. De plus, la possession d'informations sur les réseaux enterrés permet d'établir un protocole d'acquisition précis et plus favorable pour une géodétection rapide et efficace.

### 4.2.2 Les informations contextuelles

Les informations contextuelles sont des informations relatives à l'environnement et au terrain encaissant. Elles sont obtenues par analyse du contexte et par énumération de toutes les perturbations présentes (électriques, électromagnétiques, sonores, etc.) pouvant interférer avec les techniques de détection et par conséquent, altérer leurs résultats.

Une étude préalable du terrain permet d'identifier et d'estimer ses propriétés (compactage du sol, granularité, propriétés électriques et diélectriques, nombre de couches du sous-sol, etc.) nécessaires à la bonne configuration des appareils de détection et permettant la meilleure interprétation des données qui soit. Ces informations, dont la nature est très hétérogène et la fiabilité incertaine, sont des éléments déterminants pour guider les opérateurs dans le choix des techniques les plus adaptées à la situation et dans leurs configurations. En effet, une bonne maîtrise de l'environnement contextuel offre une meilleure certitude des résultats par la réduction des incohérences et des ambiguïtés sur l'identification des cibles. Toutefois, ces informations sont fondées sur des estimations à partir de l'observation d'éléments accessibles à l'opérateur. Leur disponibilité et leur fiabilité ne sont pas garanties, elles peuvent donc être incomplètes, imprécises ou erronées.

### 4.2.3 Intégration par représentation des connaissances

Modéliser le processus de géodétection de détection revient à récupérer, modéliser, stocker et réutiliser l'ensemble des informations utiles. Cette tâche soulève la question de la formalisation

de la connaissance en prenant en compte ses imperfections.

La représentation des connaissances est le domaine de l'intelligence artificielle qui fournit un ensemble d'outils et de procédés destinés à représenter et à organiser le savoir humain pour le réutiliser et pouvoir le partager. L'état de l'art nous a montré que l'ontologie est un des outils les plus forts de ce domaine. En plus de la capacité de représentation qu'elle offre, l'ontologie permet de désambiguïser les connaissances en offrant un discours commun et partagé à la fois par les humains et par les machines.

Pour répondre à ce besoin de représentation, nous proposons d'utiliser l'ontologie comme outil de formalisation des connaissances du domaine de la géodétection. L'ontologie est un outil parfaitement adapté à la formalisation des connaissances a priori sur les réseaux enterrés et des connaissances contextuelles. De plus, les mécanismes de raisonnement sur l'ontologie permettront de générer de nouvelles connaissances qui permettront à leur tour de réduire les incertitudes, de lever les ambiguïtés et de faciliter la prise de décision de l'opérateur. Les propositions de représentation des connaissances seront présentées en détail dans le chapitre suivant.

### **4.3 Vers une méthode de géodétection des réseaux enterrés**

Les problèmes d'organisation et l'absence de procédure réglementaire complète soulevés dans nos études préalables montrent que la mise en place d'un processus complet est un point levier pour améliorer la géolocalisation des réseaux enterrés et la précision des cartographies tout en offrant un meilleur confort aux opérateurs et un gain de temps considérable. Pour répondre à ce besoin d'organisation, nous proposons un processus de géodétection complet ayant pour objectifs de :

- Faciliter le travail de l'opérateur en le guidant et en lui proposant plusieurs tâches à réaliser. En complément de nos propositions, cela permet d'organiser la procédure et d'améliorer la qualité des données obtenues par les techniques de géodétection.
- Récolter l'ensemble d'informations et les données dans le système informatique G4M pour permettre leur sauvegarde, leur formalisation et leur traitement automatique.
- Définir une méthodologie organisationnelle complète, claire et commune à tous.
- Définir les processus métier et utilisateurs du prototype développé.

Nous proposons un processus de géodétection des réseaux enterrés composé de cinq grandes étapes comme suit.

#### **4.3.1 Les facteurs influençant les données à partir de l'étude du terrain**

La première étape consiste à analyser l'environnement et à étudier le terrain pour récolter les informations contextuelles et identifier les points favorisant une bonne géodétection. Cette étape permet notamment d'introduire les connaissances acquises dans le système informatique.

L'étape de découverte du terrain permet de délimiter la zone d'étude. Grâce à la modélisation du terrain par le système, ce dernier pourra associer une position géographique à chaque donnée ou connaissance acquise. En effet, l'absence de GPS dans le premier prototype G4M nécessite de recourir à un autre moyen permettant de relever les données en leur associant une position géographique afin de les traiter automatiquement.

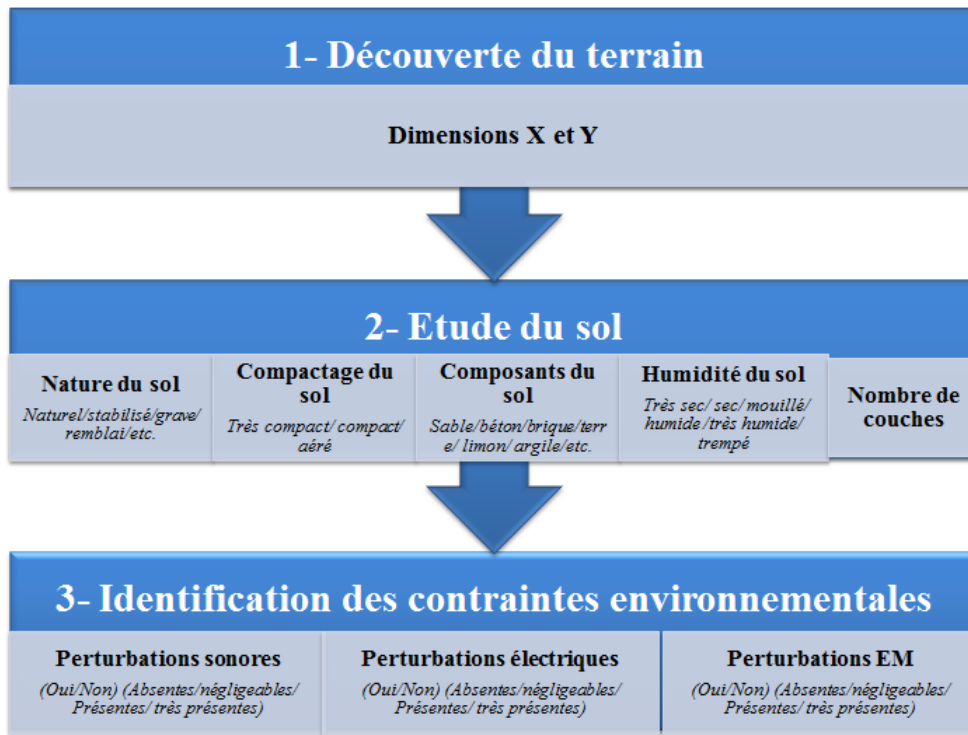


FIGURE 4.1 – Découverte du terrain et détermination des facteurs influençant.

L'étude du sous-sol a pour objectif de relever des informations sur la nature du sol, sur ses composants, sur le nombre de couches, son compactage et son humidité. Ces informations sont déterminantes pour le choix des techniques utilisées, leur calibration, la confiance qui leur est accordée et lors de l'interprétation de leurs données. À titre d'exemple, la détection par GPR est de meilleure qualité sur un terrain stabilisé, compact et sec. De plus, la pénétration des ondes est facilitée par certains composants comme le sable, ce qui augmente la profondeur atteinte. Enfin, l'interprétation des images GPR est facilitée si les couches du sous-sol sont connues et facilement identifiables.

Pour garantir le choix des techniques les plus adaptées et favoriser une bonne détection, il est important d'identifier les contraintes environnementales. Nous nous intéressons à trois facteurs pouvant modifier le signal émis ou/et reçu par les outils utilisés. (1) Les perturbations sonores comme la proximité d'un axe routier important ou des travaux à nuisance sonore peuvent amplifier ou masquer le signal vibro-acoustique émis rendant ainsi la détection GT impossible. Les perturbations électriques (2) comme une ligne haute tension ou les perturbations EM (proximité d'un chemin de fer ou d'un transformateur) peuvent générer des inductions ou interférences électromagnétiques pouvant altérer ou fausser les résultats des techniques EM et GPR.

#### 4.3.2 Les facteurs influençant les connaissances par l'observation

Cette étape consiste à analyser le terrain d'étude en s'appuyant sur les éléments de surface et sur la cartographie disponible. En effet, l'observation minutieuse du terrain a pour but de rechercher des affleurants appartenant aux réseaux enterrés dans le but de les identifier et de sélectionner des repères clés permettant de confronter le plan au terrain. Cette confrontation per-

met de valider la cohérence de la cartographie pour rechercher les réseaux qui y sont répertoriés.

Le repérage des réseaux se fait notamment par l'analyse des affleurants et la vérification de leur présence sur le plan pour déterminer leur appartenance à un réseau qui peut être répertorié, inconnu ou abandonné. La présence de tranchées dans le sol indique la présence éventuelle d'un réseau enterré. Pour finir, l'accès à certains ouvrages (comme les regards) permet d'estimer la profondeur et la direction des réseaux sortants.

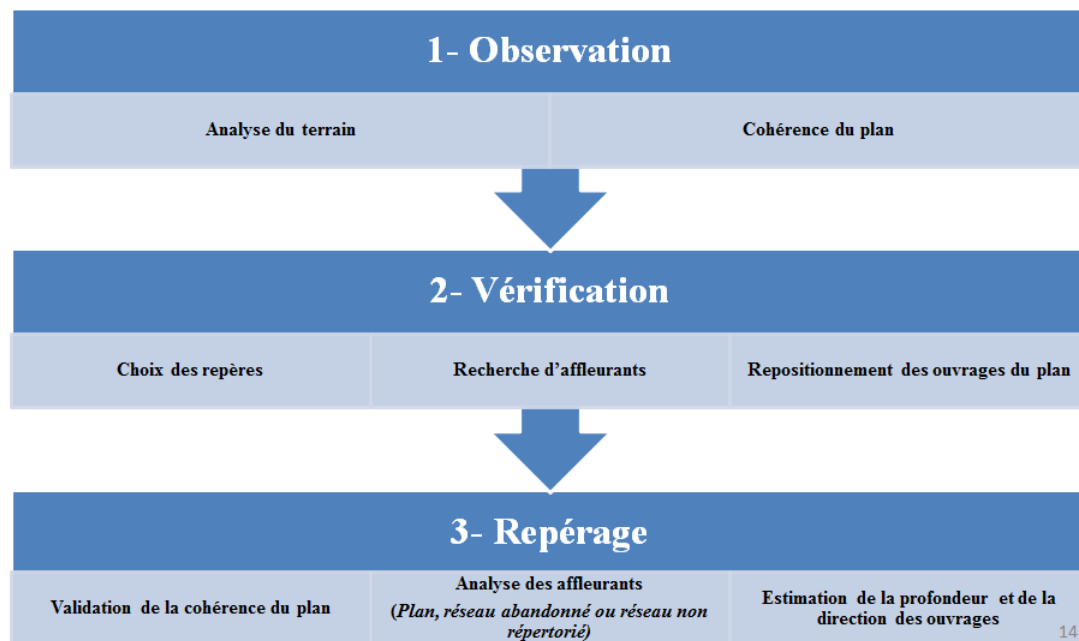


FIGURE 4.2 – Observation, vérification et repérage des affleurants sur le terrain.

La finalité de cette étape est d'établir un plan de recherche avec la configuration optimale et le choix des techniques de détection les plus adaptées en s'appuyant sur les connaissances acquises sur les éventuels réseaux enterrés.

### 4.3.3 Spécification de la méthode de géodétection

La configuration de la méthode de géodétection consiste à établir la liste des tâches à réaliser en fonction du niveau de cohérence de la cartographie et des affleurants identifiés. Nous considérons trois niveaux de cohérence :

Un plan est considéré comme cohérent s'il semble parfaitement à jour, si les infrastructures énumérées concordent avec la réalité du terrain et si le repérage des affleurants coïncide avec leurs positions sur le plan. Avec un plan cohérent la procédure consiste à rechercher les réseaux du plan et à vérifier rapidement l'absence de réseaux non énumérés.

Un plan est moyennement faiblement cohérent est un plan qui présente quelques incohérences mineures qui sous-entendent qu'il n'est pas parfaitement à jour. Dans ce cas, il est recommandé de se méfier du plan tout en recherchant les réseaux qui y sont énumérés dans un premier temps puis de rechercher des réseaux non énumérés dans un second temps.

Un plan est incohérent s'il est obsolète et que le repérage de ses éléments est impossible. Ce dernier est alors ignoré et la procédure consiste à explorer le terrain et à rechercher des réseaux inconnus.

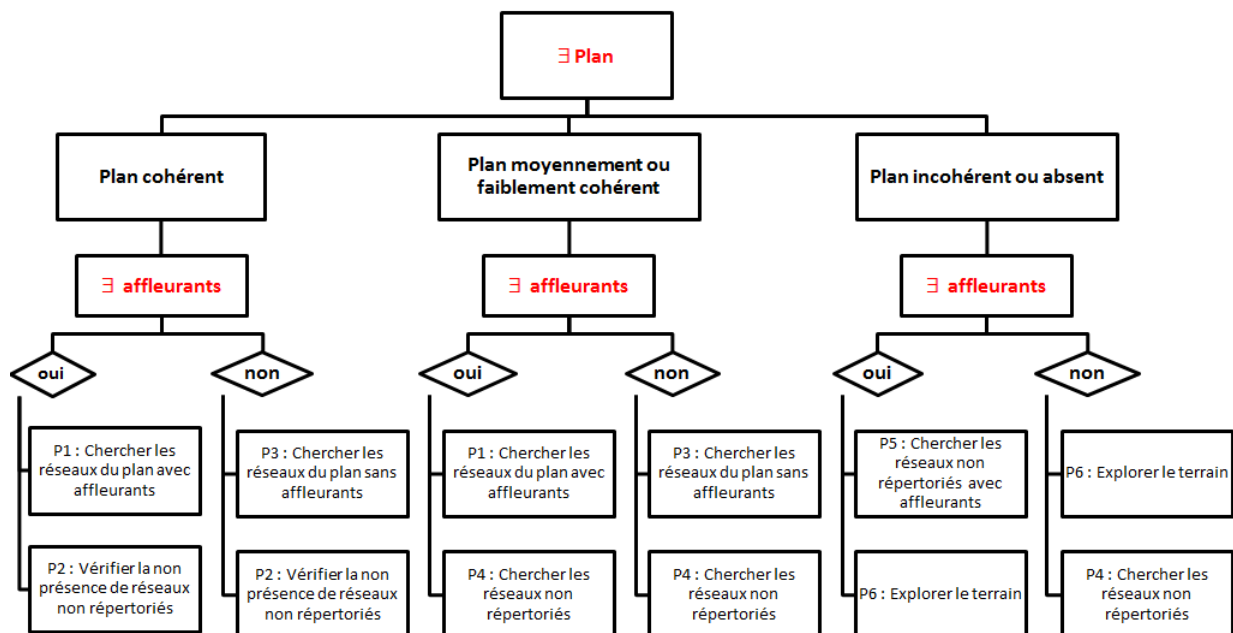


FIGURE 4.3 – Les procédures à exécuter en fonction du plan et des affleurants.

En fonction de la présence ou non d'affleurants, nous distinguons six procédures à réaliser avec les techniques de détection : le géoradar, l'électromagnétique, la vibro-acoustique ou la technique RFID.

| ID procédure        | P1  | P2  | P3  | P4                                   | P5  | P6                  |
|---------------------|---|---|---|--------------------------------------|---|---------------------|
| <b>Explication</b>  | Chercher les réseaux du plan avec affleurants | Vérifier la non présence de réseaux non répertoriés | Chercher les réseaux du plan sans affleurants | Chercher les réseaux non répertoriés | Chercher les réseaux non répertoriés avec affleurants | Explorer le terrain |
| <b>Que faire ?</b>  | Chercher                                      | Absence<br>Vérifier la non existence                | Chercher                                      | Chercher                             | Chercher  | Chercher            |
| <b>Quoi</b>         | Réseaux connus                                | Réseaux inconnus                                    | Réseaux connus                                | Réseaux inconnus                     | Réseaux inconnus                                      | Réseaux inconnus    |
| <b>Informations</b> | Affleurants présents                          | -   | Affleurants absents                           | Affleurants absents                  | Affleurants présents                                  | Affleurants absents |

FIGURE 4.4 – Procédures du processus de géodétection.

#### 4.3.4 Exploration

Cette étape consiste à mettre en œuvre la méthode de géodétection par la réalisation des acquisitions avec les techniques de détection intégrées dans l'outil G4M suivant la méthode de géodétection préalablement définie. Cette étape comprend aussi la sauvegarde des données récoltées dans la base de données et le relevé de la position géographique associée à chaque donnée.

#### 4.3.5 Traitement automatique et validation

Cette étape consiste à traiter automatiquement les données et les connaissances acquises par le système mis en place permettant de fournir des résultats de détection associés à des niveaux de confiance. Ces résultats doivent être validés par l'opérateur et conduisant à mettre à jour la cartographie s'ils sont jugés cohérents.

### 4.4 Optimisation des technologies G4M

La finalité de nos travaux est de permettre de réunir les quatre techniques de détection sur le même prototype et de fournir un résultat de géodétection unique ayant la meilleure fiabilité possible. Pour ce faire, nous nous intéressons à chacune de ces techniques afin d'identifier leurs faiblesses et les pistes d'amélioration. Notre démarche vise à tirer le meilleur de chaque technique et de l'apporter pour compléter ou renforcer les résultats des autres techniques. Ainsi, en les intégrant ensemble, des résultats meilleurs sont garantis.

#### Limites d'utilisation actuelles

Outre les limites de détection liées aux propriétés des réseaux enterrés et à l'environnement, les techniques de détection actuelles présentent des difficultés liées à leur utilisation et aux données qu'elles fournissent (figure 4.5).

En effet, les données sont souvent obtenues en temps réel et interprétées instantanément par l'opérateur. Ces données sont rarement sauvegardées pour un usage ultérieur et ne sont jamais réutilisées pour des post-traitements. Notre contribution s'appuie sur ces limites et pour les combler nous proposons une nouvelle méthodologie d'utilisation permettant de sauvegarder et de modéliser les données de détection à travers une chaîne de traitement automatique complète.

Par conséquent, la nature et le format des données issues des quatre techniques sont des éléments à prendre en compte quant à leur différence et incompatibilité. Ainsi, pour permettre de les fusionner, il est nécessaire d'assurer une interopérabilité entre elles en proposant un format de données compatible avec l'ensemble des techniques, assuré par des ponts entre les techniques et l'unité d'acquisition des données.

La méthodologie que nous proposons permet de récolter les données et de représenter les informations dans un format commun afin de permettre la fusion de leur résultats de détection à la fin du processus.

Les résultats de détection de chaque technique sont obtenus par le traitement automatique des données fournies par cette dernière et par les connaissances contextuelles. Ainsi, nous proposons des méthodes automatiques de détection améliorée par chaque technique.

| Méthode de détection              | Cible   | Contexte   | Résultats               |
|-----------------------------------|---|--|-------------------------|
| <b>GPR</b>                        | Tous les câbles et canalisations                      | Composants du sol, Humidité, Diamètre et Matériau de la canalisation, etc. | Images GPR + Hyperboles |
| <b>Electromagnétique (Passif)</b> | Câbles électriques et canalisations métalliques       | Perturbations électromagnétiques   | Signal                  |
| <b>Electromagnétique (Actif)</b>  | Canalisations métalliques                             | Accès au réseau  | Signal                  |
| <b>Gas Tracker</b>                | Canalisations plastiques transportant du Gaz          | Accès au réseau<br>Perturbations sonores                                   | Signal                  |
| <b>Eliot</b>                      | Tous les câbles et canalisations équipés de Tags RFID | -  | Informations            |

FIGURE 4.5 – Comparaison des techniques de détection en fonction des réseaux détectés, de leur dépendance du contexte et des résultats fournis.

#### 4.4.1 Améliorations de la technique GPR

Le géoradar (GPR) permet de sonder le sous-sol en envoyant des ondes électromagnétiques dans un cône comme illustré dans la figure 4.6.

Lors de son passage au niveau de la canalisation (A), le GPR détecte les ondes réfléchies par l'interface supérieure, le contenu et l'interface inférieure de la canalisation (B). Ces réflexions sont représentées sur le radargramme par une forme hyperbolique comme indiqué sur la figure (C). En plus des formes hyperboliques, le radargramme représente les variations des matériaux du sous-sol sous d'autres formes parfois hétérogènes comme l'onde directe générée par le passage de l'onde de l'air vers le sous-sol et l'interface entre deux couches différentes du sous-sol.

Ainsi, la détection des canalisations en utilisant le géoradar consiste à réaliser plusieurs passages perpendiculaires et à analyser les radargrammes résultants dans le but d'identifier des formes hyperboliques redondantes pouvant être générées par la même canalisation. En effet, une hyperbole ne suffit pas à elle seule pour identifier une canalisation car elle peut être générée par des objets cylindriques ou de forme régulière. Seul l'appariement de plusieurs profils et l'identification d'hyperboles positionnées de façon cohérente sur le terrain peut localiser une canalisation.

Outre les éléments ayant une influence sur le géoradar, la représentation d'une canalisation par une hyperbole et son contraste dépendent de plusieurs facteurs liés à la canalisation :

- **Le matériau de la canalisation** : en fonction du matériau, la réponse de la canalisation n'est pas la même. En effet, une canalisation composée de matériau ayant une permitti-



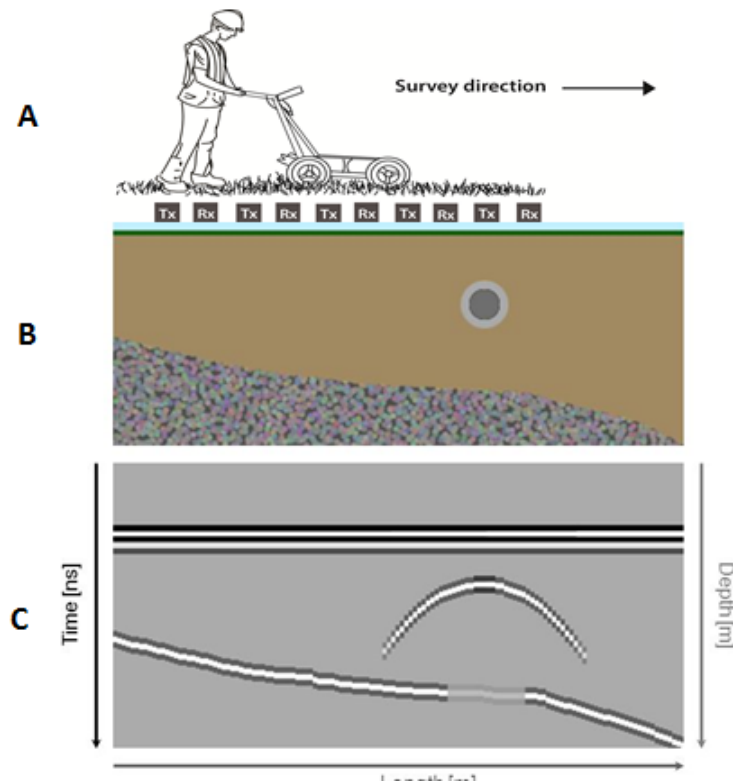


FIGURE 4.6 – Détection d’une canalisation par le géoradar et représentation sous forme d’hyperbole sur le radargramme.

tivité diélectrique proche de celle du sous-sol répondra moins qu’une canalisation dont le matériau présente un contraste de permittivité comme les métaux (l’acier ou la fonte).

- **La profondeur de la canalisation :** la profondeur maximale atteinte par les ondes du géoradar dépend de plusieurs facteurs comme la fréquence utilisée, la nature et l’humidité du sol. De ce fait, la profondeur de la canalisation joue un rôle important sur le contraste et l’hyperbole qu’elle peut générer sur le radargramme et ce dans le cas où elle est sondée par le géoradar, c’est-à-dire qu’elle est à une profondeur que les ondes émises par le géoradar atteignent.
- **Le diamètre de la canalisation :** les canalisations ayant un grand diamètre possèdent une surface plus volumineuse ce qui rend le contraste plus important et le nombre d’ondes réfléchies devient plus important. De plus, le diamètre important signifie que l’intérieur de la canalisation réfléchira plus d’ondes EM et enfin l’interface inférieure de la canalisation renverra. De ce fait, les câbles et les canalisations à faible diamètre sont difficilement voire rarement détectables par le géoradar.

Cette analyse a permis de montrer que la présence d’une hyperbole sur un radargramme ne suffit pas pour affirmer la présence d’une canalisation enterrée à la position correspondant à l’hyperbole. De plus, l’absence d’hyperboles sur un radargramme ne signifie pas l’absence de réseaux enterrés dans un terrain sondé.

L’étude de la technique de détection par géoradar a révélé plusieurs limites tant dans la

démarche utilisée que dans la présentation et l'interprétation des données fournies. Notre étude nous a permis d'identifier plusieurs points d'amélioration possibles présentés ci-dessous :

#### 4.4.1.1 Des hyperboles à la canalisation

L'analyse ci-haut a prouvé que seuls plusieurs passages GPR sur la même canalisation et leur analyse peuvent indiquer la présence d'une canalisation. En effet, la répétition d'hyperboles générées par la même canalisation sur plusieurs radargrammes parallèles augmente la chance de son identification comme canalisation.

Pour mettre en place cette démarche, nous proposons un protocole d'acquisitions basé sur une grille permettant le passage du GPR sur toutes les positions possibles que peuvent avoir les canalisations enterrées. En plus de permettre une détection optimale, les données acquises sont récoltées avec le sens de passage en leur attachant une information géographique. Ce qui permettra d'identifier le tracé de la canalisation avec précision.

#### 4.4.1.2 Rehausser le signal des hyperboles invisibles

Un des objectifs du projet G4M est d'améliorer la qualité des images GPR affichées à l'opérateur pour rendre possible une analyse manuelle.

Une partie des travaux de la thèse de G. Terrasse [1] a pour objectif de rehausser le signal des hyperboles et d'affaiblir les signaux bruits. Les résultats de ses travaux sont intégrés dans cette thèse afin de récupérer les positions et les paramètres des hyperboles et permettre de les traiter automatiquement.

#### 4.4.1.3 Détection automatique d'hyperboles

Plusieurs travaux de recherche sont consacrés à la détection automatique d'hyperboles dans le contexte de la géodétection des canalisations.

Malgré l'investissement des chercheurs et des industriels, la détection automatique reste insuffisante à l'heure actuelle pour déterminer avec certitude la position de l'ensemble des réseaux enterrés. La détection automatique de canalisations en utilisant le GPR consiste à analyser les images (radargrammes) qu'il fournit en sortie en utilisant des techniques de traitement d'images ou par des techniques de traitement de signal appliquées au signal brut fourni en sortie. Ces analyses consistent à détecter automatiquement les hyperboles générées par la présence d'un objet de forme régulière dans le sous-sol. La détection automatique d'hyperboles dans les radargrammes est au cœur des problèmes traités en traitement d'images et traitement de signal. Beaucoup d'approches sont proposées et sont basées sur Hough Transform [74][75], Neural network [76] or Wavelet [1]. Ces approches obtiennent des résultats très prometteurs. Cependant, les difficultés liées à l'environnement, aux propriétés du sol et aux réseaux enterrés font qu'il n'existe pas de techniques efficaces permettant d'identifier avec certitude les canalisations à partir des hyperboles générées sur une image. Des analyses complémentaires doivent être réalisées pour confronter l'ensemble des radargrammes du même terrain et attacher un niveau de confiance plus important aux hyperboles répétitives. De plus, à ce jour, des informations a priori sur la position des canalisations sont nécessaires pour guider le processus d'analyse.

Dans le contexte du projet G4M, nous distinguons deux problématiques : la détection automatique des hyperboles et le traitement des images pour rehausser le signal et améliorer la qualité des hyperboles. Ainsi, elles apparaîtront mieux, ce qui permet à l'opérateur de mieux les distinguer et aux algorithmes de mieux les détecter.

#### 4.4.1.4 Représentation spatiale du terrain

Pour traiter les données multi-capteurs et permettre une fusion multimodale, il est indispensable de modéliser et de formaliser le terrain sur lequel sont détectées ces données. Pour ce faire, nous considérons le terrain d'étude comme une zone délimitée de forme rectangulaire représentée par une matrice dont les dimensions dépendent de la taille du terrain. Le choix de cette représentation permet d'assurer la précision des données récoltées et de leur associer une information spatiale.

En effet, l'utilisation du GPS n'a été intégrée qu'à la fin du projet, il était nécessaire de trouver une solution alternative permettant d'associer aux données la position géographique ou l'information spatiale spécifique.

La technique d'acquisition GPR proposée sous forme de grille permet de contrôler les déplacements du GPR et de sauvegarder les informations spatiales associées à chaque passage GPR. Le but est de réaliser une projection du radargramme sur la portion sondée puis de reconstruire une représentation 3D du terrain sondé.

Le terrain est représenté par une matrice  $M$  de taille  $(n, m)$  tels que  $n$  et  $m$  sont les dimensions du terrain. Une acquisition GPR est représentée par un vecteur dont l'origine et la destination correspondent au début et à la fin de l'acquisition et l'orientation à la direction de passage du GPR sur le terrain.

#### 4.4.1.5 Fusion de données post-traitées

Étant donnée la diversité des algorithmes de détection automatique d'hyperboles, nous proposons d'utiliser plusieurs algorithmes de détection d'hyperboles et de tester différentes approches de fusion pour tenter de détecter le maximum d'hyperboles possibles et de limiter le nombre de fausses alarmes.

### 4.4.2 Améliorations de la technique EM

*La technique de détection électromagnétique utilisée et présentée dans ce manuscrit correspond au détecteur RD8000 de Radio Detection et les informations fournies sont issues de la documentation du RD8000.*

La détection par technique électromagnétique (RD8000) consiste à rechercher la cible (canalisation ou câble) par des passages perpendiculaires de façon à localiser le maximum du signal induit correspondant à la position de la cible. Les maximums obtenus sont marqués au sol puis reliés entre eux pour constituer le tracé de la canalisation.

Cette méthode est réalisée manuellement par l'opérateur et la précision n'est pas assurée ; cette dernière dépend des choix faits par l'opérateur pour positionner le maximum du signal, le risque d'erreurs est fréquent. En fonction de l'environnement et du réseau à détecter, il existe plusieurs modes d'utilisation avec des niveaux de confiance différents.

Ainsi, le mode actif est le mode le plus sûr puisqu'il est discriminant et permet de détecter un réseau précis. Le mode induction est moins précis que le mode actif mais permet dans certains cas de discriminer le réseau détecté ; néanmoins des risques de passage du signal d'un réseau à un autre existent, ce qui affaiblit la précision des résultats obtenus. Enfin, le mode passif permet de détecter tous les réseaux électriques et métalliques et est sensible aux perturbations extérieures. De ce fait, ce mode possède le niveau de fiabilité le plus faible.

Pour optimiser la détection électromagnétique, nous proposons ci-dessous plusieurs pistes d'améliorations possibles à différents niveaux. Concrètement, nous proposons d'automatiser le processus de détection électromagnétique comme suit.

#### 4.4.2.1 Traitement automatique des données

Nous proposons un modèle de représentation spatiale des points de détection résultants qui fournit en sortie le tracé de la cible sur un plan.

Pour compléter, nous proposons un module de raisonnement spatial permettant de représenter le sol sous forme matricielle dans laquelle sont projetés les points de détection EM. Ensuite, une analyse de la cohérence des points est réalisée afin de relier les points de détection par des segments. Des vérifications sont faites par évaluation des angles entre les segments. Ce modèle permet d'améliorer la précision de détection et de corriger les erreurs qui peuvent résulter des phénomènes EM.

#### 4.4.2.2 Du mode de détection au niveau de fiabilité

Comme énoncé dans l'état de l'art, la technique électromagnétique permet de détecter une catégorie de réseaux enterrés en utilisant plusieurs modes. Le mode choisi dépend des conditions du terrain et du réseau recherché. Selon le mode utilisé, la fiabilité et la précision des données obtenues varient. Ainsi, le mode actif est le mode le plus sûr et le mode passif est le moins sûr.

Pour permettre une fusion logique et fiable des données multi-capteurs, il est important de prendre en compte la fiabilité attachée au mode de détection électromagnétique utilisé. La prise en compte de ce paramètre permet d'attribuer un poids aux données détectées lors de la fusion d'un côté et d'un autre côté, de prendre en compte le risque d'erreur dans le mode d'utilisation lors de la détection automatique des réseaux par électromagnétique.

De plus, le mode choisi permet de discriminer ou pas le réseau recherché puisque, dans certains modes, le réseau est identifié avant sa recherche.

#### 4.4.3 Améliorations de la technique GT

*L'ensemble des informations sur Gas Tracker sont issues de la documentation fournie par la société MADE-SA dans le cadre du projet G4M.*

Développé par la société MADE-SA en collaboration avec GrDF, le Gas Tracker (GT) est un dispositif permettant de détecter les canalisations de gaz et de localiser les branchements en polyéthylène. C'est un détecteur vibro-acoustique composé d'un générateur du signal vibro-acoustique, d'un détecteur (appelé base GT) et d'un récepteur PDA permettant d'afficher les résultats des mesures. Le matériel du Gas Tracker est présenté dans la figure 4.7<sup>1</sup>.

La force de la technique GT réside dans sa capacité à détecter la canalisation dans un délai réduit, sans sa mise en hors gaz et sans la réalisation d'excavations. De plus, elle permet le repérage en  $(X, Y)$  avec une précision proche de 10 cm sur une longueur pouvant aller jusqu'à 250 mètres de part et d'autre du point d'injection du signal. A travers l'interface intuitive du récepteur PDA, le Gas Tracker permet un affichage ergonomique et simple des résultats des mesures. Le GT permet de détecter les canalisations de gaz en polyéthylène souvent exploitées sous pression en 21 mBar et 4 Bar. La technologie est basée sur l'émission d'un signal acoustique par

---

1. [www.made-sa.com](http://www.made-sa.com)



FIGURE 4.7 – Gas Tracker : matériel de la technique vibro-acoustique utilisée.

le générateur dans le réseau de gaz à détecter. La connexion au réseau se fait par raccordement sur le compteur client ou sur une prise de pression. Le signal acoustique émis se propage dans la canalisation provoquant sa mise en vibration. Le capteur sous forme d'une base d'acquisition et de calcul permet de détecter la canalisation sur la surface du sol et d'établir son tracé à partir de plusieurs mesures.

Deux paramètres doivent être configurés lors de la prise de mesures : le niveau du bruit estimé et le gain. En retour, la mesure prise sur une surface de (20cm, 20cm) fournit en sortie le signal potentiel mesuré en fonction du bruit et du gain, et une indication sur la qualité de ce signal et sur sa saturation.

La procédure GT passe par plusieurs étapes. La première étape consiste à situer approximativement la canalisation en réalisant plusieurs mesures aléatoires sur le terrain afin de repérer un point de départ de la recherche. Une fois la canalisation repérée, l'opérateur tentera de réaliser plusieurs mesures sur plusieurs axes perpendiculaires à la canalisation et espacés de 30 à 50 centimètres. Lorsque le signal maximal est détecté sur un axe, il est associé à la position la plus probable de la canalisation avec une incertitude de 10 centimètres.

Après l'identification de plusieurs points de détection sur plusieurs axes perpendiculaires à la canalisation, son tracé peut-être obtenu en traçant une médiane de ces points de détection.

Malgré les avantages qu'offre le GT, des limites liées à l'environnement sont observées. En effet, son efficacité et la qualité du signal dépendent du compactage du sol, du diamètre de la canalisation et des perturbations éventuelles. D'autres risques liés à l'interprétation des résultats ont été constatés lors des campagnes d'essais dans le cadre du projet G4M. Des incohérences peuvent survenir dans les résultats et peuvent être engendrés par le compactage du sol et l'hétérogénéité du sous-sol en particulier au niveau des tranchées. Une zone moins compacte peut entraîner une perte du signal vibro-acoustique sur une ou plusieurs mesures ou un niveau de signal moindre. Une zone plus compacte peut entraîner une mesure ponctuellement élevée du signal et laisser penser que le point de mesure correspond à la position de la canalisation.

Enfin, une limite du Gas Tracker peut résider dans son utilisation manuelle par l'opérateur

et dans les choix faits par ce dernier. En effet, la réussite de la géodétection dépend principalement de son expertise. La recherche initiale de la canalisation et du point de départ est faite aléatoirement par l'opérateur en se basant sur des estimations et ses connaissances a priori. Il a donc le choix des mesures, des axes et de la sélection du point de détection. Le tracé est obtenu par une succession de décisions et de choix effectués par le même opérateur ; une erreur peut donc engendrer une succession d'erreurs et de mauvais choix. De plus, la géodétection d'une canalisation peut nécessiter plusieurs mesures réalisées dans plusieurs axes ce qui engendre un temps de travail important.

#### 4.4.3.1 Optimisation de la détection par Gas Tracker

L'étude de la technologie Gas tracker et les campagnes d'essais durant la thèse ont fait ressortir plusieurs limites :

- La pratique de détection par Gas Tracker telle qu'elle est réalisée aujourd'hui est compliquée. Elle se base principalement sur l'opérateur, son expérience et ses choix en fonction du terrain et des informations auxquelles il a accès. Elle suit un protocole imprécis et successif qui est réalisé manuellement.
- La base de détection GT perçoit un signal variable en fonction de la canalisation (diamètre, profondeur), du sol (compactage et composants) et du terrain (perturbations sonores, vibrations). Dans des cas défavorables (terrain non compacté, petits diamètres, grandes profondeurs, forte circulation routière à proximité, etc.), la technique vibro-acoustique peut s'avérer inefficace.
- L'interprétation des données GT est souvent difficile. En effet, la recherche du maximum du signal est une tâche fastidieuse qui doit prendre en compte les risques de perte ou d'amplification du signal dus aux éléments extérieurs.
- Les données GT sont affichées instantanément et ne sont pas sauvegardées. Seule est disponible une sauvegarde limitée des dernières mesures pour un affichage optimal des données. Un risque de confusion entre les mesures existe suite à ce manque d'affichage et de sauvegarde.
- L'utilisation actuelle ne permet pas de prendre en compte la position des mesures. L'opérateur doit faire correspondre les mesures aux positions d'acquisition par marquage au sol.

Dans une perspective d'amélioration de la géodétection par le Gas Tracker et pour remédier aux limites constatées, nous proposons un processus complet allant de la préparation des acquisitions jusqu'à la détection de la canalisation de gaz. Ce processus comporte un protocole d'acquisitions des données GT et un système de détection automatique.

Un des points d'amélioration concerne l'acquisition des données et le choix des mesures. En effet, les données doivent être analysées par l'opérateur instantanément parce que l'outil est incapable de sauvegarder un nombre important de mesures. Pour mieux encadrer ces étapes, nous proposons de sauvegarder l'ensemble des données acquises dans une base de données en leur attachant une information spatiale liée à la position géographique de l'acquisition.

Une amélioration du matériel est proposée dans le cadre du projet G4M. En effet, le prototype développé intègre cinq bases GT ce qui permet de réaliser cinq mesures à la fois. Ainsi, le temps d'acquisition est divisé par cinq.

Pour permettre l'acquisition et la sauvegarde des données sur le terrain, nous nous intéressons à la révision du protocole d'acquisition sur le terrain en proposant une procédure permettant de réaliser cinq mesures à chaque acquisition, de géoréférencer et de sauvegarder dans une base de données l'ensemble des données obtenues. La technique que nous proposons permet de modéliser le terrain d'étude sous forme matricielle et d'associer à chaque position la mesure GT comme indiqué dans la figure 4.8.

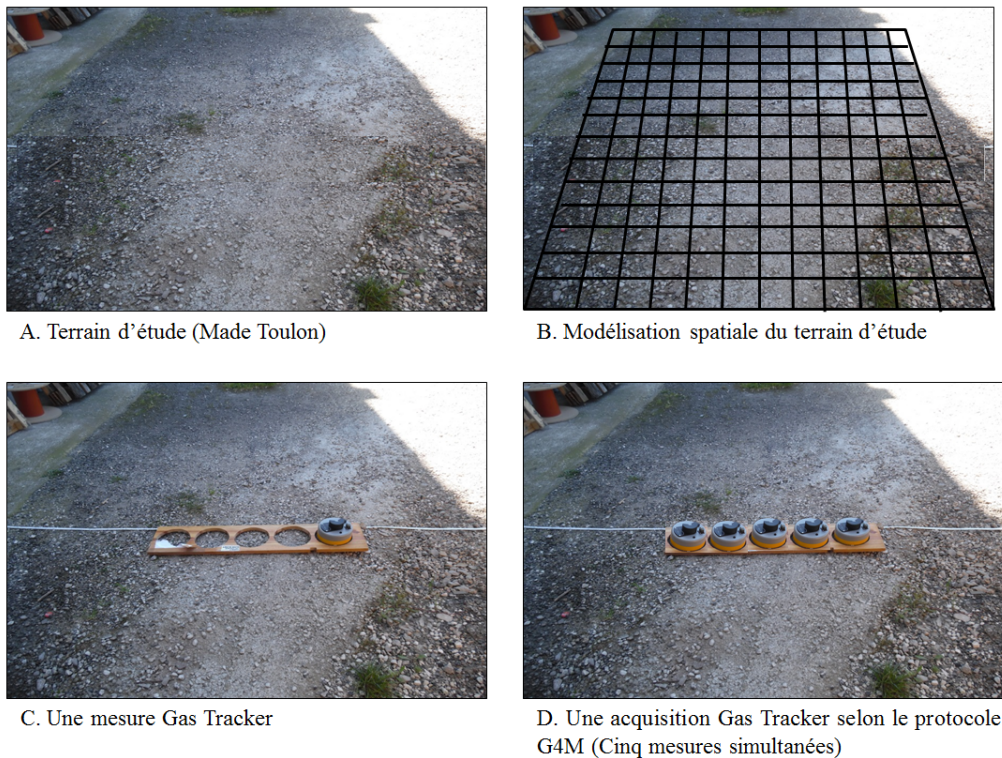


FIGURE 4.8 – Modélisation du terrain d'étude pour la sauvegarde des données récoltées par la technique Gas Tracker et la prise en compte de l'information spatiale associée.

L'approche proposée offre plusieurs avantages comme suit :

- Le géoréférencement des données permet de les sauvegarder de façon structurée et de rendre possible leur traitement automatique.
- La sauvegarde des données permet de les analyser et de les traiter en post-traitement. Les résultats de détection sont plus précis et les risques d'erreur ou de confusion sont réduits.
- Enfin, la proposition d'une procédure complète offre plus de confort et de facilité à l'opérateur et le traitement automatique de données permet d'avoir des résultats de détection avec plus de précision et de cohérence.

L'accumulation de plusieurs mesures consécutives permet d'afficher un histogramme dans lequel chaque colonne représente une mesure. Le niveau de la colonne exprime le signal mesuré (CO), la couleur exprime la qualité du signal et la hachure indique la saturation du signal.

## 4.5 Fusion multi-capteurs basée sur la confiance

Outre la prise en compte d'informations a priori et l'optimisation des techniques actuelles, nous proposons une approche de fusions multi-techniques pour détecter l'ensemble des réseaux enterrés. En effet, malgré l'amélioration de ces techniques, aucune d'elle n'est universelle et ne permet de détecter les réseaux enterrés quels-que soient leurs matériaux et leurs configurations. De plus, l'état de l'art et nos expériences nous ont prouvé que seule une fusion multi-capteurs permet d'assurer une géodétection efficace.

Pour ce faire, nous nous intéressons à la notion de confiance attribuée aux résultats de détection par une technique et à la probabilité de fournir un résultat erroné.

De plus, nous proposons une démarche de géodétection complète permettant de récolter les informations a priori et les données de chaque technique puis de les traiter séparément et de fusionner les résultats de détection pour fournir un résultat unique. L'étude de cas suivante illustre un exemple de la démarche proposée.

L'étude consiste à détecter les réseaux enterrés dans un terrain délimité, sous forme rectangulaire pour mettre en place un système de géoréférencement des données. La modélisation de ce terrain se fait par représentation matricielle  $M(x, y)$  telle que  $x$  correspond à la représentation de la longueur du terrain et  $y$  à la représentation de sa largeur.

Ainsi, nous appelons  $Case(i, j)$  l'élément de notre matrice correspondant à une superficie de ( $20cm \times 20cm$ ) localisée à la position  $(i, j)$  dans le terrain comme indiqué dans la figure 4.9.

Dans le terrain étudié, deux objets de forme irrégulière et une canalisation métallique de gaz sont enterrés. La surface du terrain ne présente aucun affleurant ni indication sur la présence éventuelle d'un réseau enterré mais une cartographie obsolète indique la présence de tags RFID dans la zone. Les objets enterrés sont représentés par les cases colorées comme indiqué sur la figure 4.9.

Le géoradar est utilisé dans un premier temps pour sonder le terrain. Cinq passages GPR A1 à A5 sont réalisés et sont représentés par la couleur orange dans la figure 4.10. Chaque passage du géoradar sur une zone géographique est sauvegardé en le liant à la case de la matrice qui la représente. A titre d'exemple, le géoradar a parcouru lors de son passage A1 toutes les cases avec  $j$  égal à 5 et lors de son passage A4 toutes les cases avec  $i$  égal à 13 :

$$Case([0 : 19], 5) = PassageGPR(A1)$$

$$Case(13, [0 : 29]) = PassageGPR(A4)$$

Étant donné que la direction du géoradar est un élément déterminant dans l'identification des réseaux enterrés, cette information est sauvegardée dans les caractéristiques de chaque passage GPR. De plus, les résultats de géodétection sont plus fiables sur une zone si celle-ci a été sondée plusieurs fois.

En prenant en compte la direction du géoradar, la case  $Case(13,5)$  est sondée par le géoradar deux fois dans le sens longitudinal par le passage A4 et vertical par le passage A1 comme montré sur la figure 4.11.

$$Case(13, 5) = [PassageGPR(A1), PassageGPR(A4)]$$



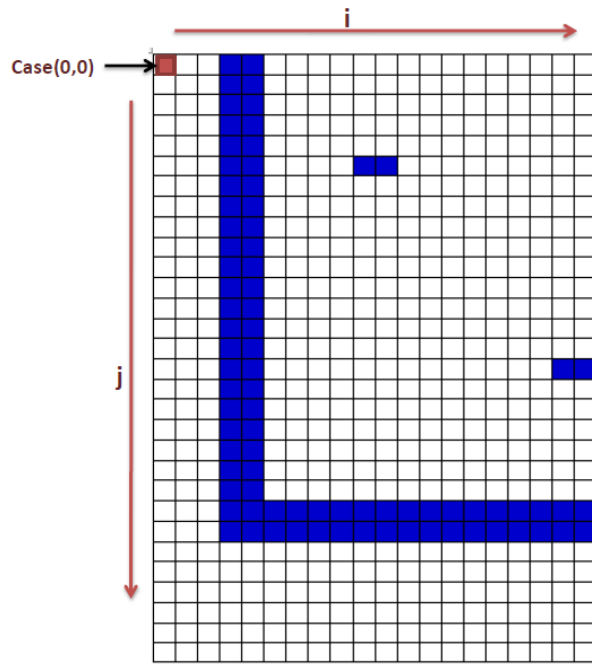


FIGURE 4.9 – Étude de cas : Modélisation de la vérité terrain sous forme matricielle.

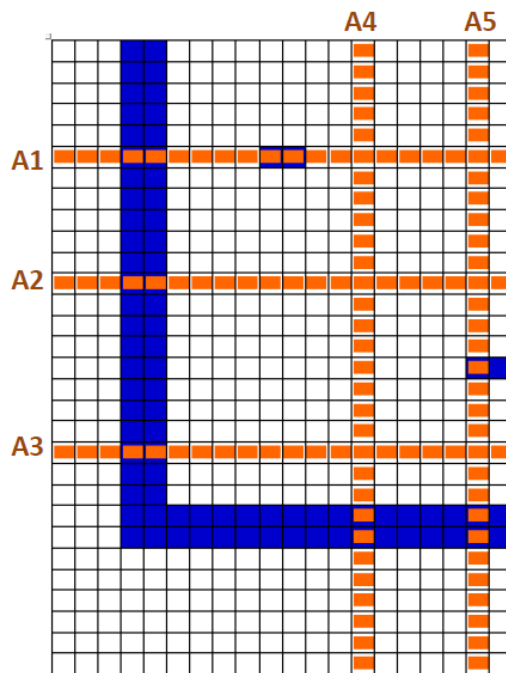


FIGURE 4.10 – Étude de cas : Modélisation des passages du géoradar sur le terrain d'études.

Le traitement automatique des hyperboles et la technique de géoréférencement permettent d'associer chaque hyperbole à la case correspondant à la position du terrain sur laquelle elle est observée. Le traitement automatique des radargrammes des passages GPR A1 à A5 a permis d'obtenir des hyperboles comme indiqué dans la figure 4.12.

Ainsi, la liste des données associées à chaque case s'enrichit avec les hyperboles qui y sont

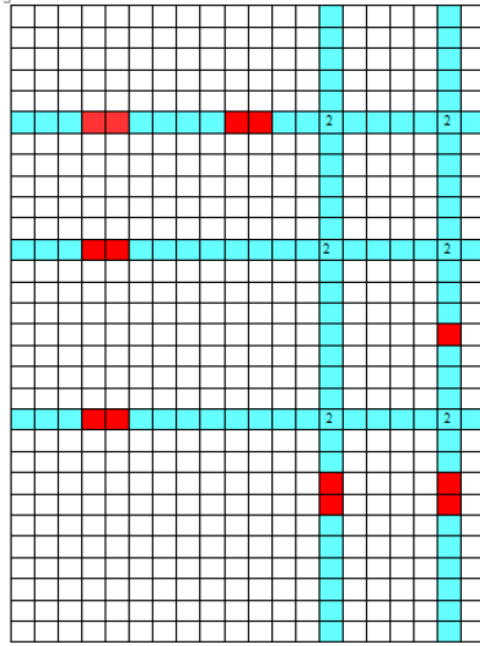


FIGURE 4.11 – Étude de cas : Les zones du terrain sondées par le géoradar.

déTECTÉES. À titre d'exemple, la case(3,5) est sondée lors du passage A1 et une hyperbole  $H_n$  est détectée à son niveau.

$$Case(3, 5) = PassageGPR(A1), Hyperbole(A1, H_n)$$

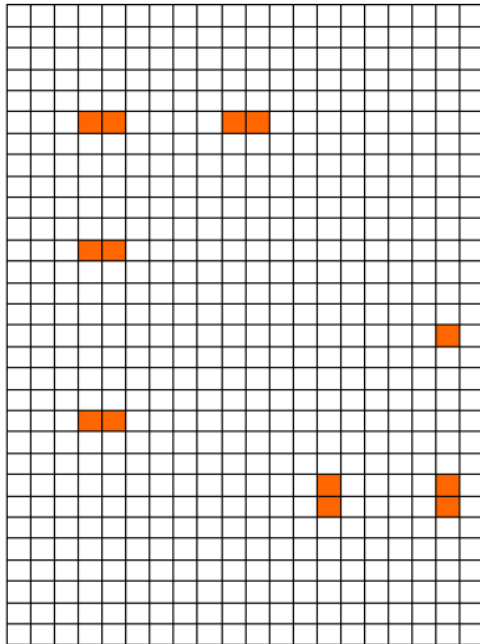


FIGURE 4.12 – Étude de cas : Modélisation des hyperboles détectées sur le terrain d'étude.

Deux techniques de détection sont utilisées, le détecteur RFID Eliot pour rechercher d'éventuelles puces RFID enterrées et l'électromagnétique en mode passif. Les résultats de ces détections sont représentés dans la figure 4.13 par la couleur marron pour le détecteur RFID et bleu pour l'électromagnétique.

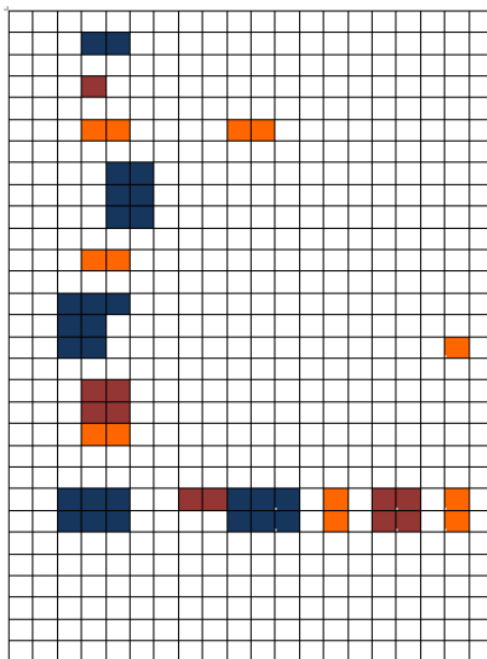


FIGURE 4.13 – Étude de cas : Association des données de détection multi-capteurs avec les cases matrices.

Les données RFID sont les données présentant le niveau de fiabilité le plus élevé alors que l'électromagnétique en mode passif présente le niveau de fiabilité le plus faible. De ce fait, le meilleur moyen de traiter ces données multi-capteurs consiste à trouver la combinaison parfaite qui permet d'attribuer le niveau de confiance adapté à chaque donnée. Par ailleurs, le raisonnement spatial sur ces données et leur fiabilité doit pouvoir reconstruire le tracé de la canalisation en se basant sur les cases non visitées qui sont donc inconnues, des cases visitées ne présentant aucun objet enterré et des cases visitées avec résultat de détection.

À travers cette étude de cas, nous avons présenté notre approche qui permet de passer d'informations non géoréférencées et incertaines à une base de données riche basée sur la représentation spatiale du terrain où toutes les informations récoltées à une position  $(a, b)$  sont rattachées à sa représentation  $Case(a, b)$ . Cette démarche ouvre plusieurs perspectives pour traiter ces données en utilisant des techniques issues du raisonnement spatial ou de la fouille de données.

## 4.6 Identification du tracé par raisonnement spatial

Les propositions présentées jusqu'ici ont porté sur l'amélioration de l'acquisition, de la représentation, de la sauvegarde, du traitement et de la fusion de données de détection.

Nous nous intéressons à présent à l'appariement de ces données pour reconstruire le tracé du réseau enterré. Cette étape se présente comme un problème de raisonnement spatial basé sur les attributs attachés à des données géoréférencées et à leur degré de confiance.

En effet, les données de détection sont géoréférencées sur le terrain et doivent être traitées par des techniques spatiales suivant une logique basée sur l'architecture des réseaux enterrés pour obtenir le tracé du réseau enterré à partir des données de détection.

#### 4.6.1 Motivations

Outre les aspects de fusion et de traitement de la problématique de la géodétection des réseaux enterrés, celle-ci est aussi considérée comme un problème d'ordre spatial. En effet, les données de détection sont des données spatiales ayant comme particularité d'être incertaines et imprécises. Pour cela, nous nous intéressons aux travaux sur le raisonnement spatial pour plusieurs raisons :

- Il s'agit d'un problème de représentation et de raisonnement spatial, les données sont géoréférencées et ont besoin de traitement basé sur l'identification d'alignement et la reconnaissance de formes correspondants aux réseaux enterrés.
- L'approche utilisée est issue de la représentation de connaissances, il est donc possible d'intégrer un module spatial à l'ontologie développée.
- Les données sont issues de capteurs et sont de nature incertaine, imprécise, avec un degré de confiance variable.
- La description symbolique permet le raisonnement à partir de règles et facilite ainsi le travail de l'opérateur en lui fournissant des diagnostics partiels à partir de requêtes.

Dans le contexte de la géodétection des réseaux enterrés, notre problème revient à connecter des éléments spatiaux (données récoltées par les technologies) et à les relier dans le but d'identifier des formes correspondant à des segments représentant des parties de réseaux enterrés.

L'objectif est de reconstruire le tracé du réseau enterré à partir de points de détection ayant un degré de confiance variable en s'appuyant sur des règles logiques liées à l'architecture des réseaux enterrés. Par exemple, s'assurer que les points de détection sont alignés quand il s'agit d'un réseau rigide, détecter les points d'intersection et prendre en compte les changements de direction, de diamètres et parfois du matériau qui pourraient se manifester par le changement brusque de la nature des données. Pour résoudre ce problème, nous proposons d'explorer deux pistes :

La première piste consiste à implémenter un système de raisonnement spatial basé sur les données et le calcul de probabilité par régions ou par recherche d'alignements. Cette piste orientée données a pour but de garantir l'implémentation et le fonctionnement d'un système pouvant être intégré dans le prototype G4M. Cette piste sera présentée dans la suite de ce manuscrit. La seconde approche plutôt théorique traite le sujet en profondeur en tant que problème spatial en se basant sur les travaux de Tarski. Cette piste est présentée dans la section suivante.

#### 4.6.2 Extension des travaux de Tarski

Une approche alternative à la méréotopologie est appelée méréogéométrie. Elle repose sur des primitives géométriques et a connu récemment un regain d'intérêt. Si on se limite à la géométrie affine par exemple, il est nécessaire que les relations méréogéométriques soient invariantes vis à vis des transformations affines. Elle fournit une alternative intéressante à la théorie des ensembles, à la topologie basée sur les points et à la géométrie Euclidienne.

Plusieurs travaux ont été réalisés dans ce cadre. Larvor [77] présente deux approches de traitement qualitatif de l'espace. La première approche aborde le problème par ses aspects cognitifs et la deuxième par les traitements méréologique et méréotopologique de l'espace. Dans le cadre de sa thèse [77], Larvor a établi un état de l'art sur les différents systèmes de représentation et de raisonnement méréotopologiques.

#### 4.6.2.1 Retour sur les travaux de Tarski

Pour traiter le problème de la géodétection des réseaux enterrés d'un point de vue théorique par du raisonnement spatial, nous nous intéressons aux travaux de Tarski sur l'axiomatisation de la géométrie élémentaire et la géométrie des corps basée de la méréologie de Lésniewski [3]. Ces travaux sont repris en détail dans la thèse de Laure Vieu [78] et dans la thèse de Yannick Larvor [79].

Dans un premier temps, Tarski s'intéresse à la géométrie élémentaire et en propose une axiomatisation à partir des prédicats  $Between\ B(A, B, C)$  qui signifie que  $B$  est entre  $A$  et  $C$  et la congruence  $CG(x, y, z, t)$  qui signifie que les segments  $xy$  et  $zt$  sont de même longueur.

Ensuite, Tarski construit la géométrie des corps à partir de la méréologie de Lésniewski en intégrant la primitive  $P$  'Part-of' et en considérant la sphère  $S$  comme l'unique primitive de la géométrie des corps. A partir de ces éléments, Tarski définit un ensemble de relations spatiales constituant ainsi la base de la méréogéométrie comme présenté ci-dessous :

- $ET(A, B)$  : La sphère  $A$  est extérieurement tangente à la sphère  $B$  si  $A$  et  $B$  sont des sphères,  $A$  est une partie propre de  $B$ , et s'il existe deux sphères  $X$  et  $Y$  qui sont disjointes de  $B$ , qui contiennent  $A$  comme partie telles que l'une fait partie de l'autre.

$$ET(A, B) \stackrel{def}{=} \forall AB(S(A) \wedge S(B) \wedge EXT(A, B) \wedge \exists XY(S(X) \wedge S(Y) \wedge A \leq X \wedge A \leq Y \wedge EXT(X, B) \wedge EXT(Y, B) \wedge (X \leq Y \vee Y \leq X)))$$

Avec  $(a \leq b)$  qui signifie que  $a$  est une partie propre (Proper part) de  $b$  et  $EXT(a, b)$  qui signifie que  $a$  est disjoint de  $b$ .

$\leq$  et  $EXT$  sont des définitions méréologiques désignant respectivement les relations 'element-of' et 'external-to'.

- $IT(A, B)$  : La sphère  $A$  est intérieurement tangente à la sphère  $B$  si  $A$  et  $B$  sont des sphères disjointes et s'il existe deux sphères  $X$  et  $Y$  qui contiennent  $A$  comme partie et qui font partie de  $B$  telles que l'une fait partie de l'autre.

$$IT(A, B) \stackrel{def}{=} \forall AB(S(A) \wedge S(B) \wedge EXT(A, B) \wedge \exists XY(S(X) \wedge S(Y) \wedge A \leq X \wedge X \leq B \wedge A \leq Y \wedge Y \leq B \wedge (X \leq Y \vee Y \leq X)))$$

- $ED(A, B, C)$  : Deux sphères  $A$  et  $B$  sont diamétralement tangentes à l'extérieur (diamétralement opposées à l'extérieur) à la sphère  $C$  si chacune des premières sphères  $A$  et  $B$  est tangente à l'extérieur à  $C$  et étant données deux sphères  $X$  et  $Y$  disjointes de  $C$ ,  $A$  est une partie propre de  $X$  et  $B$  est une partie propre de  $Y$  avec  $X$  et  $Y$  disjointes.

$$ED(A, B, C) \stackrel{def}{=} \forall ABC(S(A) \wedge S(B) \wedge S(C) \wedge ET(A, C) \wedge ET(B, C) \wedge S(X) \wedge S(Y) \wedge DIS(X, C) \wedge DIS(Y, C) \wedge PP(A, X) \wedge PP(B, Y) \wedge DIS(X, Y))$$

- $ID(A, B, C)$  : Deux sphères  $A$  et  $B$  sont diamétralement tangentes à l'intérieur (diamétralement opposées à l'intérieur) à la sphère  $C$  si chacune des premières sphères  $A$  et  $B$  est tangente à l'intérieur à  $C$  et étant données deux sphères  $X$  et  $Y$  disjointes de  $C$ ,  $A$  est extérieurement tangente à  $X$  et  $B$  à  $Y$  avec  $X$  et  $Y$  disjointes.

$$ID(A, B, C) \stackrel{def}{=} \forall ABC(S(A) \wedge S(B) \wedge S(C) \wedge IT(A, C) \wedge IT(B, C) \wedge S(X) \wedge S(Y) \wedge DIS(X, C) \wedge DIS(Y, C) \wedge ET(A, X) \wedge ET(B, Y) \wedge DIS(X, Y))$$

- $CNC(A, B)$  : La sphère  $A$  est concentrique avec la sphère  $B$  si l'une des conditions suivantes est satisfaites : (i) :  $A$  et  $B$  sont identiques, ou si (ii) :  $A$  est une partie propre de  $B$ , étant données  $X$  et  $Y$  des sphères diamétralement tangentes à l'extérieur avec  $A$  et sont tangentes à l'intérieur avec  $B$ , ces sphères sont diamétralement tangentes à l'intérieur à  $B$ , ou si (iii) : La sphère  $B$  est une partie propre de  $A$ , étant données  $X$  et  $Y$  deux sphères diamétralement tangentes à l'extérieur avec  $B$  et tangentes à l'intérieur avec  $A$ , ces sphères sont diamétralement tangentes à l'intérieur avec  $A$ .

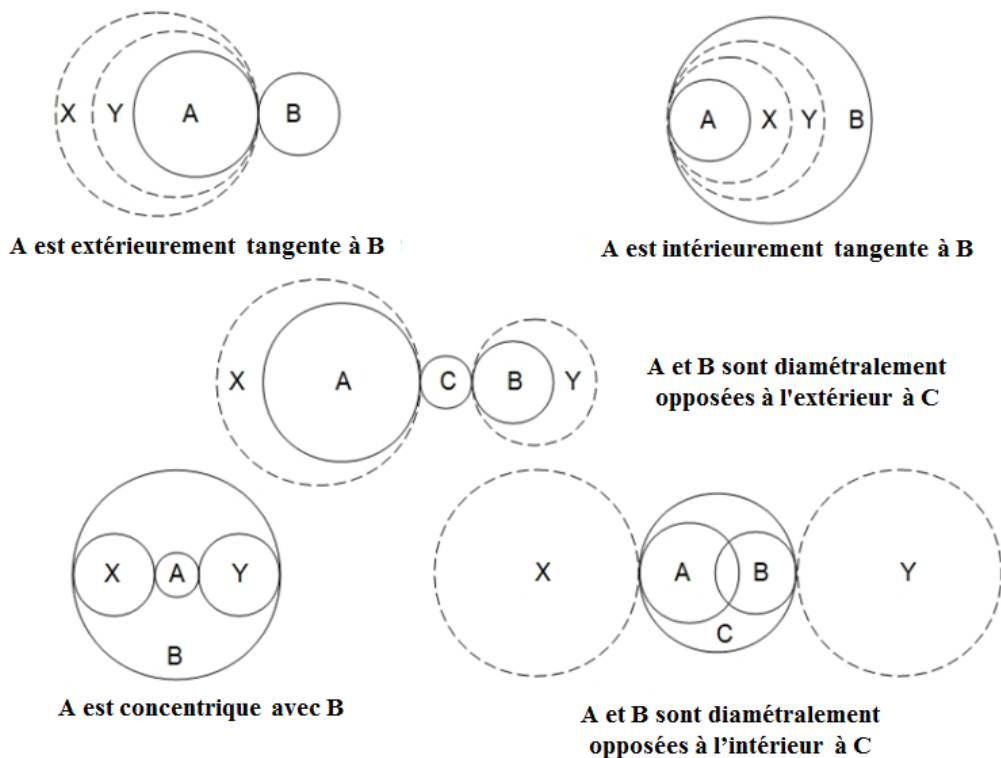


FIGURE 4.14 – Représentation en 2D des primitives de Tarski.

D'autres définitions comme les points et les corps sont abordées par Tarski comme suit [79] :

- $POINT(A)$  : Un point  $A$  est la classe de toutes les sphères concentriques avec une sphère donnée.
- $EQUID(A, B, C)$  : deux points  $A$  et  $B$  sont équidistants de  $C$  s'il existe une sphère  $X$  qui est un élément de  $C$  et qui satisfait la condition suivante : il n'existe pas de sphère  $Y$  qui soit un élément de  $A$  ou de  $B$  et qui soit disjoint ou une partie de  $X$ .

- $CORPS(A)$  : Un corps (solid)  $A$  est la somme de plusieurs sphères.
- $INTER(P, B)$  : Un point  $P$  est un point intérieur au corps  $B$  s'il existe une sphère  $A$  qui est au même temps un élément du point  $P$  et une partie du corps  $B$ .

- $BTW(A, B, C)$  : la sphère  $A$  est entre les sphères  $B$  et  $C$  comme défini ci-dessous :

$$BTW(A, B, C) \stackrel{def}{=} \forall ABC, S(A) \wedge S(B) \wedge S(C) \wedge \exists XY, (S(X) \wedge S(Y) \wedge EDT(A, X, B) \wedge EDT(X, B, Y) \wedge EDT(B, Y, C)) \vee CG(B, A) \vee CG(B, C)$$

- $SS(A, B, C)$  : Les sphères  $A$  et  $B$  sont du même coté par rapport à la sphère  $C$

$$SS(A, B, C) \stackrel{def}{=} \forall ABC, S(A) \wedge S(B) \wedge S(C) \wedge BTW(A, B, C) \vee BTW(B, A, C) \vee CNC(A, B)$$

L'ensemble de ces définitions structurées sont issues des travaux de Tarski qui applique la méréologie de Lesniewski. Á partir de ces définitions, nous proposons une extension de la méréogéométrie de Tarski permettant de réutiliser les sphères pour représenter les points de détection des réseaux enterrés en prenant en compte leur degré de confiance et de rechercher des alignements logiques de ces sphères pour reconstruire le tracé du réseau enterré et permettre de le localiser de façon précise.

Pour cela, il est nécessaire de définir un ensemble de notions comme l'alignement et les angles à partir des définitions citées ci-haut.

#### 4.6.2.2 Extension de la méréogéométrie de Tarski pour la géodétection des réseaux enterrés

Le but est de permettre la représentation des points de détection et de rechercher des alignements correspondant au tracé de la canalisation. Pour ce faire, nous avons besoin de définir l'alignement de sphères.

$LINE(AB)$  : si deux sphères ne sont pas concentriques alors une droite existe entre ces deux sphères.

$$LINE(AB) \stackrel{def}{=} \forall AB(S(A) \wedge S(B) \wedge \neg CNC(A, B))$$

$AL(A, B, C)$  : l'alignement de trois (3) sphères est une conséquence naturelle des définitions de Tarski. En effet, trois sphères sont alignées s'il existe trois autres sphères concentriques avec les premières et sont diamétralement tangentes à l'extérieur de façon successive.

$$AL(A, B, C) \stackrel{def}{=} \forall ABC(S(A) \wedge S(B) \wedge S(C) \wedge \exists(A', B', C') : S(A') \wedge S(B') \wedge S(C') \wedge CNC(A, A') \wedge CNC(B, B') \wedge CNC(C, C') \wedge [(EDT(A', B') \wedge EDT(A', C')) \vee ((EDT(B', A') \wedge EDT(B', C')) \vee (EDT(C', A') \wedge EDT(C', B')))]$$

$CG(A, B)$  : la congruence des sphères peut être définie de la même façon que l'équivalence dans l'ontologie de Lesniewski. Ainsi, deux sphères sont égales si elles sont équivalentes.

$$CG(A, B) \stackrel{def}{=} S(A) \wedge S(B) \wedge A \leq B \wedge B \leq A$$

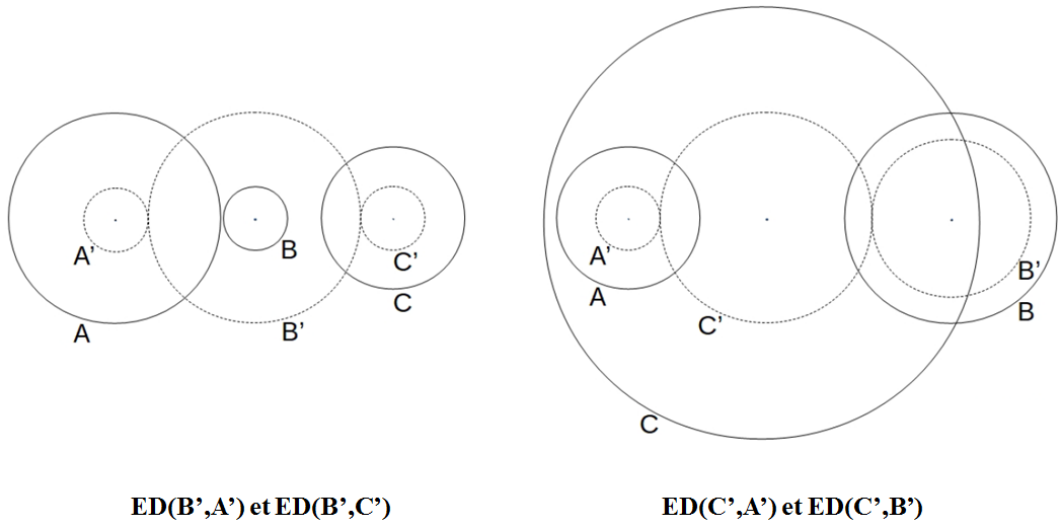


FIGURE 4.15 – Exemples de sphères alignées : A,B et C.

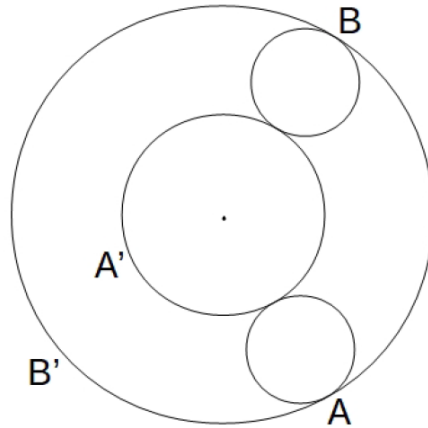


FIGURE 4.16 – Exemple de congruence : les sphères A et B sont équivalentes.

$PARA(AB, A'B')$  (les droites parallèles) : deux paires de sphères constituent deux droites pouvant être parallèles s'il existe deux secondes paires de sphères alignées avec les précédentes respectivement telles que les quatre sphères des secondes paires sont congruentes et tangentes à l'extérieur deux par deux.

$$PARA(AB, A'B') \stackrel{def}{=} \forall ABA'B' (S(A) \wedge S(B) \wedge S(A') \wedge S(B') \wedge LINE(AB) \wedge LINE(A'B') \wedge \exists (X, Y, X', Y') : S(X) \wedge S(Y) \wedge S(X') \wedge S(Y') \wedge AL(A, B, X) \wedge AL(A, B, Y) \wedge AL(A', B', X') \wedge AL(A', B', Y') \wedge CG(X, Y) \wedge CG(Y, Y') \wedge CG(Y', X') \wedge ET(X, Y) \wedge ET(Y, Y') \wedge ET(X', Y') \wedge ET(X, X'))$$

Pour retrouver le tracé du réseau enterré, il est nécessaire d'introduire la notion d'angle. En effet, les réseaux enterrés peuvent présenter des changements de direction et des intersections. De ce fait, pour pouvoir raisonner sur les sphères des points de détection, nous avons besoin de formaliser les angles pouvant être engendrés par un changement de direction manifesté par les points de détection.



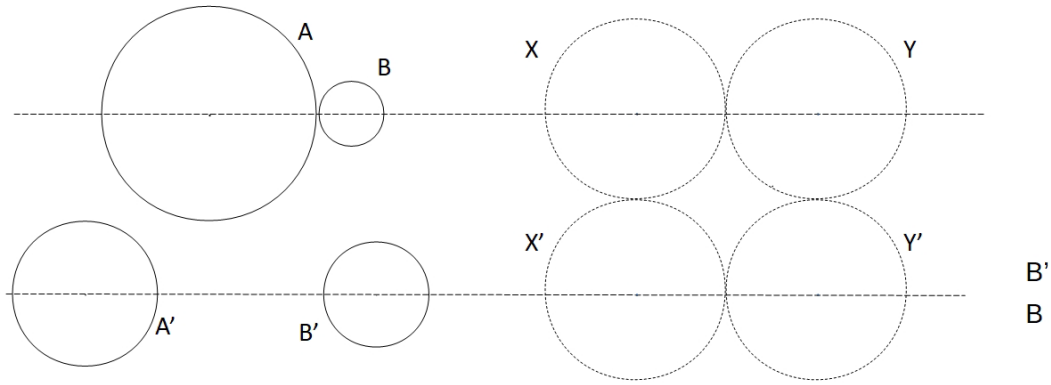


FIGURE 4.17 – Exemple de droites parallèles à partir des paires de sphères.

Pour définir l'angle nous nous intéressons aux droites obtenues par l'alignement de plusieurs sphères comme illustré dans la figure 4.18.

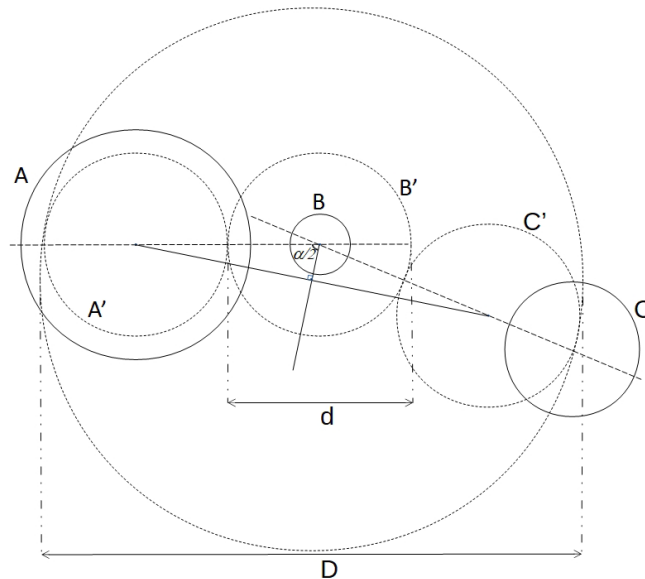


FIGURE 4.18 – Calcul de l'angle fait par les droites de trois sphères.

Nous considérons trois sphères  $A$ ,  $B$  et  $C$ . Deux droites  $(AB)$  et  $(BC)$  sont obtenus par l'alignement des sphères  $A$   $B$  et  $B$   $C$ . Nous nous intéressons à l'angle  $\widehat{ABC}$ , à ce niveau, nous ne sommes pas en mesure de le déterminer.

Soient  $A'$  et  $B'$  deux sphères congruentes et concentriques de  $A$  et  $B$  respectivement. Soit  $C'$  une sphère congruente avec  $A'$  et  $B'$  et est décalée sur la droite  $(BC)$  du même coté que  $B'$ . A partir de ce schéma, nous pouvons définir l'angle  $\widehat{ABC}$  comme suit :

$$ANGLE(ABC) \stackrel{def}{=} \forall ABC(S(A) \wedge S(B) \wedge S(C) \wedge LINE(AB) \wedge LINE(BC) \wedge \exists A'B'C' \wedge (S(A') \wedge S(B') \wedge S(C') \wedge CNC(A', A) \wedge CNC(B', B) \wedge CG(A', B') \wedge CG(B', C') \wedge LIN(C', B, C) \wedge$$

$ET(B', C') \wedge SS(CC', B'))$

Pour définir l'angle  $\widehat{ABC}$  ( $\alpha$ ), nous nous intéressons aux diamètres des sphères étudiées. Comme montré dans le schéma 4.18,  $d$  correspondant au diamètre normalisé des sphères  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  et  $D$  correspondant au diamètre de la sphère recouvrant les sphères congruentes  $A'$ ,  $B'$  et  $C'$ .

En appliquant la fonction trigonométrique, nous obtenons :

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{d} \left( \frac{D}{2} - \frac{d}{2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{D}{d} - 1 \right)$$

Cela signifie que l'angle  $\alpha$  peut être obtenu si le ratio du diamètre de la sphère recouvrante est connu.

La notion d'angle est ici duale. En effet, le prédicat  $ANGLE(ABC)$  représente (si ses termes constitutifs sont prouvés) une preuve de l'existence d'un angle entre les segments  $AB$  et  $BC$ . Par ailleurs, le calcul de cet angle ( $\alpha$ ) est la formule très simple (rapport de 2 longueurs) qui permet de passer des données (distances entre sphères) aux connaissances : le calcul de l'angle valide le prédicat.

$$FR(F, A) \stackrel{def}{=} \forall BFA(CORPS(A) \wedge S(B) \wedge POINT(F) \wedge PP(B, F) \wedge \neg(B \leq A) \wedge \neg(EXT(B, A)))$$

$F$  est un point marginal relatif au corps  $A$  (une somme de sphères) s'il n'y a pas de sphère dans  $F$  qui soit un élément de  $A$  ou qui lui soit extérieur [80]. Avec la notion de point marginal et à partir des définitions de Tarski sur la méréogéométrie, nous introduisons la relation de connexion dans ce qui suit.

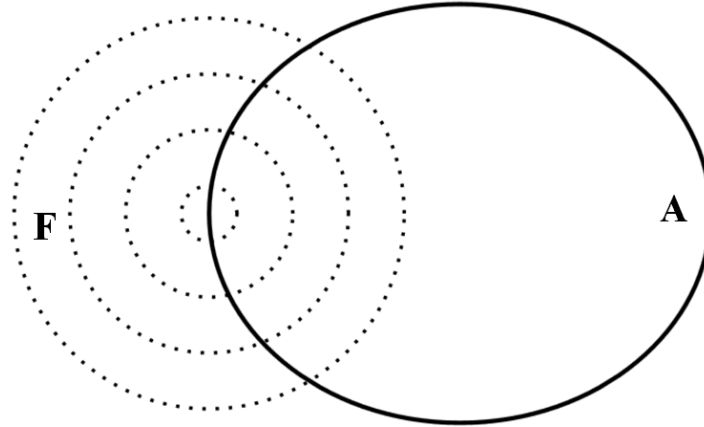


FIGURE 4.19 – Illustration d'un point marginal F.

$$ALTR(A, B, D) \stackrel{def}{=} \forall ABCD(AL(A, B, C) \wedge AL(A, B, D))$$

La transitivité de la relation d'alignement  $ALTR$  permet de définir des segments rectilignes de tuyaux par raisonnement (application des listes de points alignés au 4.4).

La relation de connexion peut être définie comme suit :

$$CONNECT(A, B) \stackrel{def}{=} \forall AB(CORPS(A) \wedge CORPS(B) \exists P : (POINT(P) \wedge FR(P, A) \wedge FR(P, B)))$$

En se basant sur les primitives existantes, à notre extension basée sur l'utilisation des sphères de Tarski. Notre démarche consiste à représenter chaque donnée de détection géoréférencées par une sphère dont le volume dépend du degré de confiance associé. Le volume est important si le niveau de confiance est bas et inversement, le volume de la sphère est minimale si le niveau de confiance de la donnée est élevé.

A partir de ces sphères et des définitions ci-haut, l'objectif est de rechercher des alignements de ces sphères et d'évaluer les angles faits par les alignements de ces sphères. Si un alignement est obtenu par plusieurs sphères cela pourrait correspondre au tracé de la canalisation.

## 4.7 Synthèse et discussion

Les problèmes de géodétection soulevés précédemment laissent le champ ouvert à plusieurs possibilités d'améliorations à différents niveaux du processus. À travers les propositions citées ci-dessous, nous avons présenté nos champs d'action et les pistes que nous avons choisi d'explorer avec les moyens mis à notre disposition pour répondre au problème de géodétection des réseaux enterrés.

Les études de cas réalisées dans cette thèse ont prouvé que nos propositions sont des solutions prometteuses, permettant d'améliorer la détection mono-capteur d'une part, par l'étude et l'optimisation de chaque technique, et multi-capteurs d'autre part, par la représentation des connaissances contextuelles et la fusion de données hétérogènes.

Plusieurs difficultés sont à prendre en compte comme les risques liés à la qualité et à la disponibilité des données. De plus, il faut garder à l'esprit que les informations a priori ne sont que des indications qui peuvent aider et guider l'opérateur ou le système dans le processus de décision. En aucun cas la détection ne doit être basée uniquement sur ces informations car elles restent malgré tout, incertaines et difficilement vérifiables.

L'originalité de notre approche réside dans la combinaison de ces différentes informations et de leurs niveaux de confiance pour arriver à un meilleur résultat en prenant en compte et en surmontant leurs imperfections.



# Chapitre V : Vers une automatisation du traitement des informations et données G4M



# Vers une automatisation du traitement des informations et données G4M

---

## 5.1 Introduction

Le chapitre suivant présente la mise en œuvre des solutions proposées pour améliorer la géodétection des réseaux enterrés. Pour répondre à chaque problématique et mettre en place la solution la plus adéquate, plusieurs pistes sont explorées dans un premier temps. Souvent deux catégories de solutions sont envisagées : les solutions efficaces d'un point de vue industriel et les solutions avec des approches scientifiques innovantes qui nécessitent un long travail d'étude. Afin de choisir la solution la plus adaptée au problème, un compromis est fait afin de mettre en place une solution innovante qui puisse être implémentée.

Nous présenterons au cours de ce chapitre les différentes réalisations implémentées pour le traitement des données multi-capteurs ainsi que les différentes pistes explorées pour améliorer la géodétection des réseaux enterrés.

Rappelons que la finalité de notre thèse est le développement d'une chaîne de traitement complète allant des informations a priori et des données récoltées sur le terrain jusqu'aux résultats de détection. Cette chaîne de traitement doit être la preuve du concept de la fusion multi-capteurs pour la géodétection des réseaux enterrés. Pour ce faire, nous avons proposé l'architecture du système G4M comme illustré dans la figure 5.1. Le système est composé de plusieurs unités (sous-systèmes) comme suit :

- **Récolte d'informations et de données** : concerne les informations a priori fournies par l'opérateur, les données et méta-données des capteurs, les résultats de traitement d'images et d'extraction d'information.
- **Acquisition des connaissances** : l'ensemble de ces informations sont récupérées et traitées par le système d'acquisition qui prend en entrée ces informations et les stocke sous forme de connaissances dans une base de données associée à l'ontologie G4M.
- **L'ontologie G4M** : Elle correspond à l'ontologie développée dans le cadre du projet G4M. Elle contient les concepts du domaine et leurs relations, une base de faits initiale et une base de règles pour le raisonnement.
- **Représentation spatiale et modélisation** : à partir de l'ontologie et des données, cette étape consiste à mettre en place une représentation spatiale du terrain et de l'ensemble des données récoltées en y attachant une information spatiale.

- **Processus de détections automatiques** : appelé aussi système de calcul, il regroupe l'ensemble des processus mono-capteurs et multi-capteurs. Il est doté d'un processus principal qui gère les processus à exécuter et la coordination des tâches pour réunir et fusionner les résultats.
- **Vérification** : cette étape a pour but d'évaluer les résultats de détection obtenus par confrontation avec les données initiales. Le système fait appel au démonstrateur de théorèmes Coq pour l'exécution des preuves préalablement définies.

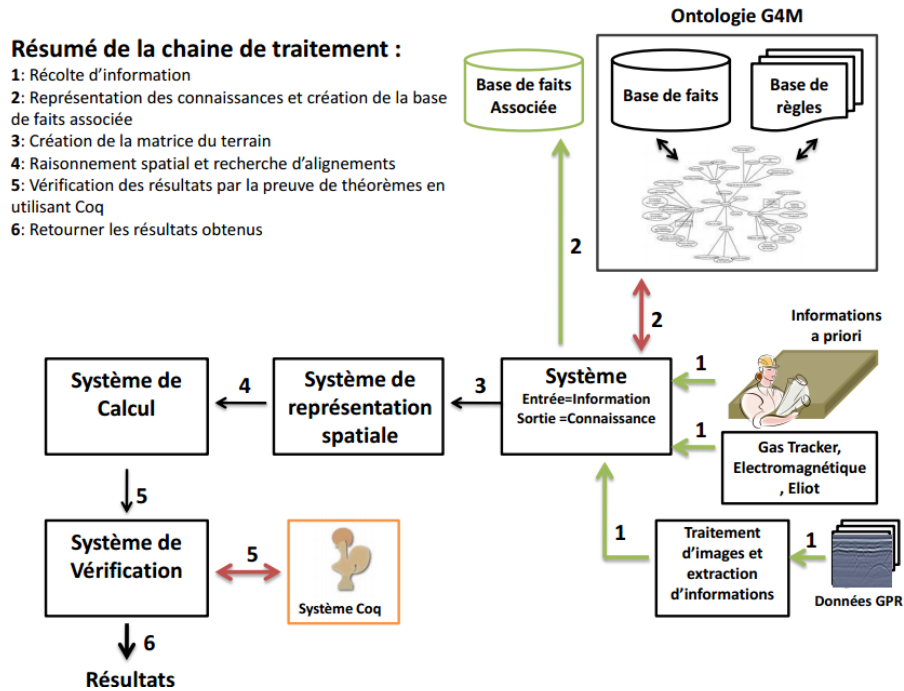


FIGURE 5.1 – Chaîne de traitement développée pour le système G4M de la géodétection automatique multi-capteurs des réseaux enterrés.

## 5.2 Détection automatique des données mono-capteur

Outre la représentation des connaissances du domaine de la géodétection des réseaux enterrés, l'amélioration des instruments de mesure est au cœur de la problématique traitée dans le présent manuscrit. En effet, les capteurs permettent d'observer le même système de plusieurs manières mais ils sont sujets à des erreurs de détection dues à des erreurs de mesure. Néanmoins, la redondance d'informations est une solution proposée pour corriger l'incertitude des capteurs.

Afin de mettre en place un système de détection multi-capteurs, nous proposons dans un premier temps des sous-systèmes de détection locale mono-capteur qui seront fusionnés, dans un second temps, dans un système de détection général.

### 5.2.1 Détection automatique par électromagnétique

Afin d'améliorer le processus de détection électromagnétique, nous nous intéressons à la méthode et aux modes de détection qui constituent les points d'amélioration de base. Le choix



de ces derniers dépend de plusieurs facteurs comme le terrain, le réseau enterré recherché et la possibilité de raccordement.

Pour compléter l'état de l'art, nous avons établi une comparaison des trois modes d'utilisation en se basant sur les tests réalisés au cours de cette thèse, sous réserve de conditions favorables pour une bonne détection.

| Critère                      | Mode Passif   | Mode Induction                                | Mode Actif         |
|------------------------------|---|---|--------------------|
| Détecteur                    | Oui   | Oui   | Oui                |
| Générateur                   | Non   | Oui   | Oui                |
| Raccordement                 | Non   | Non   | Oui                |
| Réseaux                      | Réseaux conducteurs transportant ou croisant un courant | Réseaux conducteurs à proximité du générateur | Le réseau raccordé |
| Discrimination               | Non   | Oui avec des risques                          | Oui                |
| Fiabilité profondeur         | Non   | Faible  | Correcte           |
| Risque de confusion          | Important   | Existant                                      | Existant           |
| Risque de fausses détections | Important   | Important                                     | Existant           |

L'étude et les tests réalisés sur le RD8000 nous a montré que l'état de l'art est moins exigeant avec le mode passif et le mode induction. En effet, les essais sur le terrain de ces modes se sont toujours soldés par un échec car le signal se propage rapidement dans le milieu ce qui rend la discrimination et la détection du réseau difficiles voir impossibles.

En se basant sur les résultats obtenus, nous avons choisi d'accentuer nos travaux sur le mode actif qui a fait ses preuves. Pour ce faire, nous établissons un protocole d'acquisition intégrant le GPR comme complément afin de vérifier ou de valider les résultats de détection en prenant en compte le degré de fiabilité de celle-ci qui dépend du mode de détection EM.

Pour ce faire, nous proposons l'association d'une information spatiale à chaque information récoltée et le traitement automatique des données pour obtenir un tracé précis du réseau enterré. La détection par RD8000 est réalisée par la prise de plusieurs mesures EM de manière instantanée. Un fichier interne peut être récupéré si l'opérateur sauvegarde les points de détection validés. Contrairement au GT et au GPR où il faut analyser l'ensemble du flux de données (radargramme pour le GPR et histogramme des mesures pour le GT), nous considérons uniquement les points de détection validés par l'opérateur en supposant que les mesures ont été prises correctement.

Afin de rendre leur traitement automatique possible, nous proposons de modifier la base de données du RD8000 pour le prototype G4M afin d'ajouter la position géographique en  $(X, Y)$  aux points de détection. À travers cet ajout, nous pouvons traiter les données EM sous la forme d'un nuage de points et rechercher des alignements correspondant au tracé du réseau recherché. De plus, l'utilisation du même système de géoréférencement des données permettra de réaliser la fusion multi-capteurs sur le même terrain d'étude.

Des illustrations de détections électromagnétiques sont fournies dans les figures 5.2 et 5.3. La

première figure est un exemple de recherche d'un réseau enterré simple droit avec un a priori sur sa position. De ce fait, des zones de recherches perpendiculaires sont balayées afin de retrouver les points de détection.

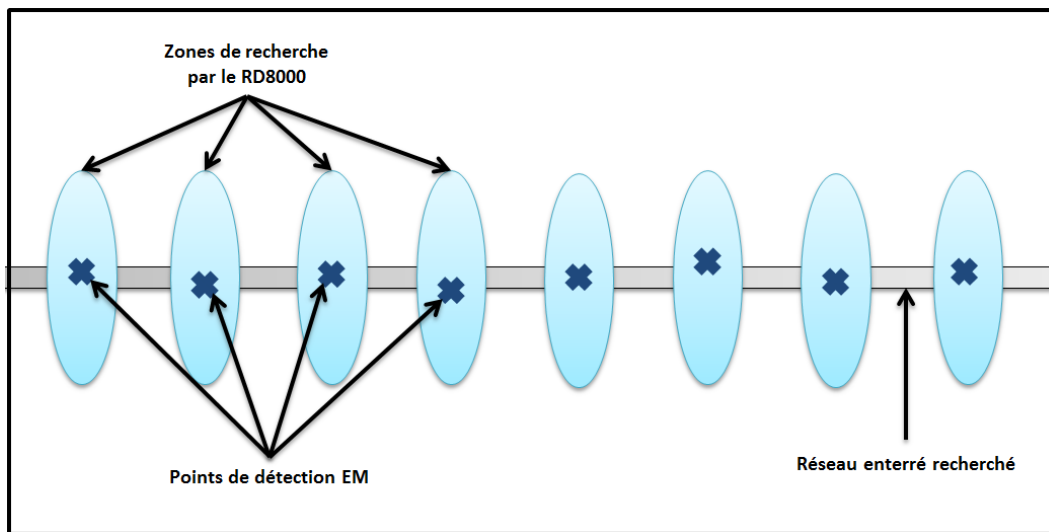


FIGURE 5.2 – Les points de détection sauvegardés par l'opérateur lors d'une campagne d'acquisitions EM.

La figure 5.3 illustre un exemple de recherche d'un réseau enterré avec un coude impliquant un changement de direction. Allant de gauche vers la droite, l'opérateur ignore la présence du coude et procède par la réalisation de plusieurs recherches perpendiculaires jusqu'à la perte du signal. Des zones de recherche sont élargies dans l'axe inverse jusqu'à retrouver le signal perdu.

Afin de permettre un traitement automatique des points de détection nous considérons le nuage de points  $P$  contenant les points  $p_0$  jusqu'à  $p_n$ .

Soit  $SG$  l'ensemble des vecteurs segments obtenus par la liaison de chaque paire de points consécutifs. Le vecteur  $SG_i$  est formé par la liaison des points consécutifs  $p_i$  et  $p_{i+1}$  :

$$SG_i = (p_i, p_{i+1})$$

Pour chaque point en allant de  $p_1$  jusqu'à  $p_n$ , calculer l'angle fait par les vecteurs  $(p-1, p)$  et  $(p, p+1)$

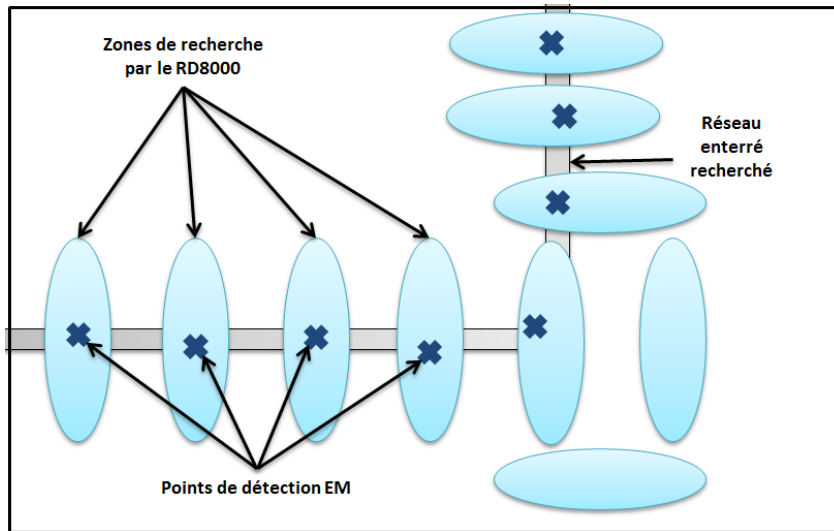


FIGURE 5.3 – Les points de détection sauvegardés par l’opérateur lors d’une campagne d’acquisitions EM avec un réseau courbé changeant de direction.

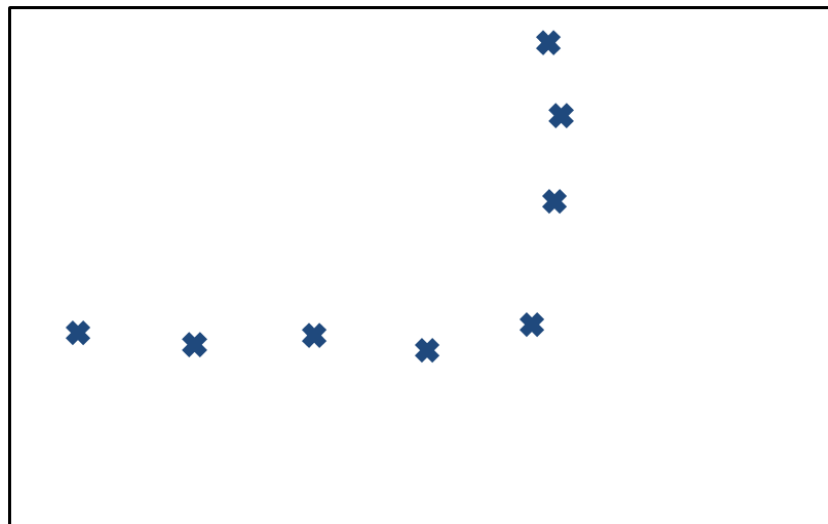


FIGURE 5.4 – Nuage de points de détection électromagnétique.

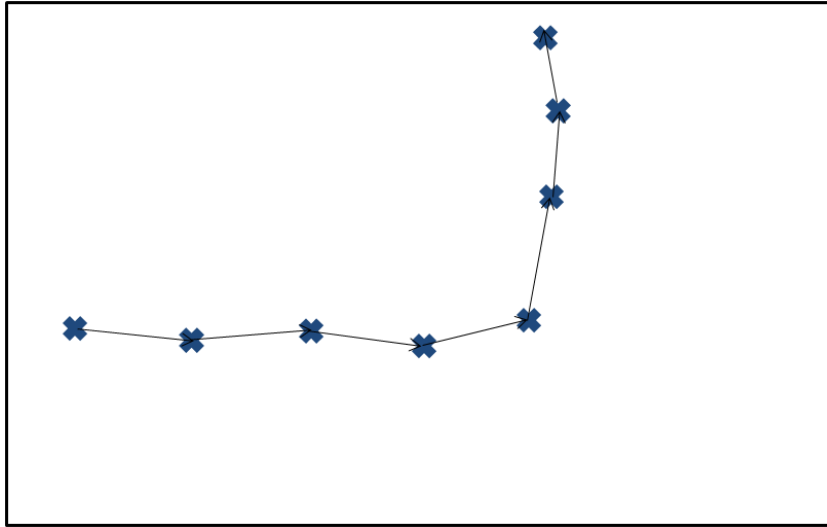


FIGURE 5.5 – Création de segments entre les points de détection.

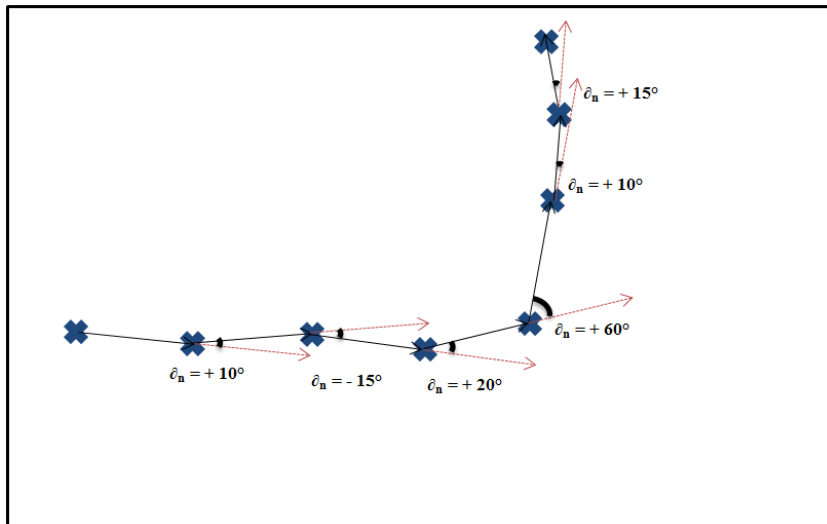


FIGURE 5.6 – Évaluation des angles faits par les segments successifs dans le but de retrouver le tracé du réseau enterré.

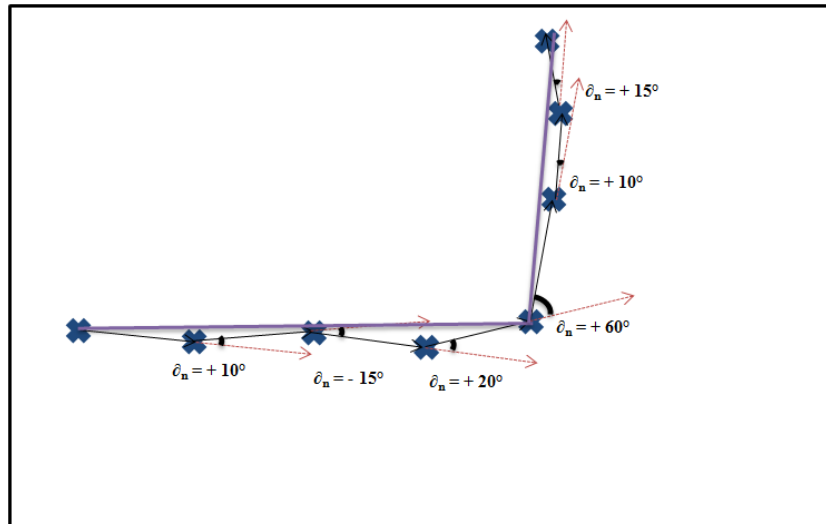


FIGURE 5.7 – Tracé du réseau enterré obtenu à partir des corrections basées sur les angles.

Un niveau de confiance est attribué au tracé final en fonction de la fiabilité de la technique EM et du mode utilisé. Ce tracé est validé par le système en reliant les points jugés fiables par une moyenne des angles ne présentant pas d'anomalies.

## 5.2.2 Détection automatique de canalisations en utilisant le Gas Tracker

Comme énoncé précédemment, la détection par Gas Tracker est une méthode manuelle réalisée suivant une procédure compliquée et sujette à des erreurs de mesures. Nous proposons d'améliorer l'utilisation de cette technique sur plusieurs volets comme suit :

- Proposition d'une procédure d'acquisitions et une approche de sauvegarde de données.
- Traitements automatiques des données GT suivant plusieurs modèles.
- Détection du tracé final de la canalisation.

### 5.2.2.1 Sauvegarde des données

L'acquisition de données Gas Tracker (GT) consiste à réaliser plusieurs mesures GT en configurant les paramètres bruit et gain comme entrées. En sortie, L'acquisition d'une mesure permet de fournir plusieurs informations comme le signal perçu (CO), le rapport signal/bruit (S/B) et le niveau de saturation (SAT).

La succession de plusieurs mesures consécutives fournit comme résultat l'affichage d'un histogramme où chaque colonne représente une mesure. Le niveau de la colonne exprime le signal mesuré (CO) tandis que la couleur exprime la qualité du signal et la hachure de la colonne la saturation du signal.

Pour mettre en place un traitement automatique des mesures GT nous proposons un nouveau format de données basé sur la modélisation comme suit :

*Une mesure GT est une prise réalisée par une base GT sur une surface de (20cm × 20cm) sur un terrain géoréférencé. Elle correspond à une ligne dans la base de données contenant les informations citées précédemment auxquelles s'ajoute une information spatiale traduite par la position (X, Y) sur le terrain.*

Une acquisition GT peut être vue comme un ensemble de mesures GT (souvent au nombre de cinq) réalisées successivement dans le même axe. L'histogramme obtenu permet de retrouver la position approximative de la canalisation recherchée.

Une campagne d'acquisition GT consiste à réaliser plusieurs acquisitions en allant de l'affleurement sur lequel le branchement a été réalisé, dans un axe majoritairement perpendiculaire à la canalisation afin de la géolocaliser.

L'ensemble des données sont sauvegardées dans une base de données et sont géoréférencées suivant le modèle de représentation spatiale proposé dans le chapitre précédent. La figure 5.8 présente un extrait d'une base de données GT.

| Terrain     | Compagne_Acquis | Acquisition | PositionX | PositionY | MODE | GAIN | BAT | CO% | S/B | SAT |
|-------------|-----------------|-------------|-----------|-----------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| MADE_110416 | CA110416_A      | 1           | 29        | 64        | 3    | 1    | 100 | 13  | 89  | 0   |
| MADE_110416 | CA110416_A      | 1           | 29        | 63        | 3    | 1    | 100 | 72  | 94  | 0   |
| MADE_110416 | CA110416_A      | 1           | 29        | 62        | 3    | 1    | 100 | 21  | 92  | 0   |
| MADE_110416 | CA110416_A      | 1           | 29        | 61        | 3    | 1    | 100 | 25  | 92  | 0   |
| MADE_110416 | CA110416_A      | 1           | 29        | 60        | 3    | 1    | 100 | 17  | 94  | 0   |
| MADE_110416 | CA110416_A      | 2           | 29        | 59        | 3    | 1    | 100 | 29  | 93  | 0   |
| MADE_110416 | CA110416_A      | 2           | 29        | 58        | 3    | 1    | 100 | 13  | 89  | 0   |
| MADE_110416 | CA110416_A      | 2           | 29        | 57        | 3    | 1    | 100 | 10  | 77  | 0   |
| MADE_110416 | CA110416_A      | 2           | 29        | 56        | 3    | 1    | 100 | 8   | 94  | 0   |
| MADE_110416 | CA110416_A      | 2           | 29        | 55        | 3    | 1    | 100 | 18  | 91  | 0   |
| MADE_110416 | CA110416_A      | 3           | 34        | 64        | 3    | 1    | 100 | 18  | 78  | 0   |
| MADE_110416 | CA110416_A      | 3           | 34        | 63        | 3    | 1    | 100 | 42  | 93  | 0   |
| MADE_110416 | CA110416_A      | 3           | 34        | 62        | 3    | 1    | 100 | 62  | 94  | 0   |

FIGURE 5.8 – Extrait de la base de données de l'acquisition du 11 Avril 2016 à l'aire d'essais de MADE- Toulon.

### 5.2.2.2 Traitement des données

Après la formalisation et la récupération des données sous forme numérique dans une base de données, il est nécessaire d'analyser et de sélectionner les données à traiter et à utiliser afin de détecter automatiquement les canalisations enterrées. Le terrain est une zone délimitée représentée par une matrice  $M_T$  ou chaque élément  $a_{ij}$  représente une zone du terrain correspondant à une surface de  $(20cm \times 20cm)$  telle que :

$$M_T = (a_{ij})_{1 \geq i \geq m, 1 \geq j \geq n}$$

Avec  $m$  et  $n$  les dimensions de la matrice obtenues par conversion des mesures du terrain. Par exemple, un terrain de longueur égale à 20 mètres et de largeur égale à 13,4 mètres sera représenté par une matrice avec  $m = 100$  et  $n = 67$ .

Une campagne d'acquisitions GT est réalisée par la prise de plusieurs mesures GT dans le but de tracer une canalisation. De ce fait, une campagne GT est caractérisée par l'une des matrices  $M_{GT_X}$  et  $M_{GT_Y}$  selon l'axe de recherche de la canalisation :

$$M_{GT_X} = (msr_{ij})_{1 \geq i \geq m, 1 \geq j \geq n}$$

$$M_{GT_Y} = (msr_{ij})_{1 \geq i \geq m, 1 \geq j \geq n}$$

$msr_{ij}$  correspond à la mesure réalisée à la position  $i$  et  $j$  et est calculée à partir des paramètres de la mesure.

### 5.2.2.3 Processus de détection automatique

Le processus du système de détection automatique par GT proposé passe par plusieurs étapes comme suit :

#### Étape 1 : Chargement des données

Il s'agit de la représentation spatiale et de la modélisation du terrain sous forme matricielle dont chaque élément représente une superficie d'un carré de  $20cm$  de coté. La donnée  $CO$  mesurée par le GT sur cette position et les paramètres associés sont associés à chaque élément de la matrice.

#### Étape 2 : Création des listes de détections

L'objectif de cette étape est de rechercher dans une acquisition la position la plus probable de la canalisation en repérant la mesure correspondant au maximum du signal. Pour ce faire, des listes de détections sont créées et analysées en deux étapes.

La première étape a pour but de rechercher un motif (forme parabolique) sur un ensemble de cinq mesures et de calculer le niveau de confiance de chaque motif retrouvé. Ensuite, L'algorithme de détection automatique se charge de retrouver la position de la canalisation la plus probable dans le motif en calculant des niveaux de confiance associés à chaque élément du motif.

Le but de cette étape est de sélectionner la détection correspondant à la position de la canalisation dans le motif et de l'ajouter à la liste des points potentiels de détection.

#### Étape 3 : Choix et sélection de la détection représentative d'une acquisition ou d'un groupe d'acquisitions

Cette étape consiste à sélectionner une liste ordonnée de points potentiels de détection d'une acquisition donnée. Une acquisition en  $X$  correspond à l'ensemble des détections ayant le même  $X$  et la même direction, le but étant de sélectionner les meilleurs points de détection qui permettront de positionner la canalisation enterrée. Plusieurs modèles de calcul des points de détection sont étudiés et proposés dans la sous-section suivante.

#### Étape 4 : Calcul des segments entre les points de détection

La présente étape permet de créer des segments entre les points de détection sélectionnés. Pour chaque suite de points il faut calculer les composantes du vecteur, sa direction à partir de la source GT et la longueur du vecteur afin d'obtenir le segment représentant. Le tracé de la canalisation est obtenu par la liaison de plusieurs segments.

#### Étape 5 : Évaluation

L'étude de la cohérence des segments et des angles permet de détecter les incohérences dans le tracé. Si une incohérence est validée, le point de détection est abandonné au profit du point de détection suivant dans la liste des points de l'acquisition ayant permis de les obtenir.

L'algorithme du processus est résumé comme suit :

```

1: Entrées : Base de données, dimensions du terrain.
2: DEBUT_ALGORITHME
3: Sélectionner les acquisitions (suite de mesures)
4: Pour chaque acquisition
5:     DEBUT_POUR
6:     Pour chaque mesure
7:         DEBUT_POUR
8:         Calculer son niveau de confiance (Modèle X)
9:         Calculer son score
10:        FIN_POUR
11:    Trier les mesures par le score
12:    Sélectionner le point potentiel de détection
13:    FIN_POUR
14: Lier des points potentiels
15: Pour chaque suite de deux points
16:     DEBUT_POUR
17:     Créer un Segment
18:     Calculer le niveau de confiance du Segment
19:     FIN_POUR
20: Pour chaque suite de deux segments
21:     DEBUT_POUR
22:     Calculer l'angle fait par leurs droites
23:     FIN_POUR
24: FIN_ALGORITHME

```

FIGURE 5.9 – Algorithme de traitement des données Gas Tracker.

### 5.2.2.4 Modèles de calcul et de sélection des points de détection

Cette étape consiste à rechercher les points potentiels de détection dont chacun correspond à la mesure où le signal est potentiellement élevé tout en respectant une décroissance avant et après celui-ci. Cela consiste donc à rechercher des formes paraboliques et à récupérer leur sommet. Des méthodes d'analyse d'histogramme, des approximations polynomiales ou moindres carré peuvent être utilisées pour résoudre ce type de problème. Néanmoins, ces méthodes sont inefficaces quand des données sont incomplètes ou erronées, ce qui est souvent le cas en situation réelle. L'histogramme des données obtenues est différent du modèle théorique attendu car les canalisations se trouvent souvent dans des tranchées où l'on rencontre un fort changement de matériaux et de compactage dus au remblaiement. Ces phénomènes sont donc susceptibles d'altérer le signal reçu en rendant les méthodes proposées ci-haut inefficaces.

Pour résoudre le problème des données manquantes ou erronées, nous proposons une méthode adaptative basée sur des règles logiques calculant un niveau de confiance pour chaque mesure  $m(i, j)$  comme indiqué dans la figure 5.10.

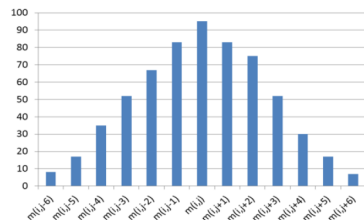


FIGURE 5.10 – Les mesures obtenues sont représentées sous forme d'histogramme.

L'ensemble des règles définies est :

- |                          |                             |                             |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| C1 : $m(i,j) > m(i,j-1)$ | C9 : $m(i,j) > m(i,j+3)$    | C17 : $m(i,j-5) > m(i,j-6)$ |
| C2 : $m(i,j) > m(i,j-2)$ | C10 : $m(i,j) > m(i,j+4)$   | C18 : $m(i,j+1) > m(i,j+2)$ |
| C3 : $m(i,j) > m(i,j-3)$ | C11 : $m(i,j) > m(i,j+5)$   | C19 : $m(i,j+2) > m(i,j+3)$ |
| C4 : $m(i,j) > m(i,j-4)$ | C12 : $m(i,j) > m(i,j+6)$   | C20 : $m(i,j+3) > m(i,j+4)$ |
| C5 : $m(i,j) > m(i,j-5)$ | C13 : $m(i,j-1) > m(i,j-2)$ | C21 : $m(i,j+4) > m(i,j+5)$ |
| C6 : $m(i,j) > m(i,j-6)$ | C14 : $m(i,j-2) > m(i,j-3)$ | C22 : $m(i,j+5) > m(i,j+6)$ |
| C7 : $m(i,j) > m(i,j+1)$ | C15 : $m(i,j-3) > m(i,j-4)$ |                             |
| C8 : $m(i,j) > m(i,j+2)$ | C16 : $m(i,j-4) > m(i,j-5)$ |                             |

FIGURE 5.11 – L'ensemble des règles définies dans le modèle A1.



Ce modèle attribue un niveau de confiance compris entre 0% et 100%. Il est composé d'une base de 22 règles qui permettent de vérifier que la mesure  $m(i, j)$  correspond au maximum de l'histogramme (Eq1). Si les 22 règles sont satisfaites alors le niveau de confiance calculé pour la mesure  $m(i, j)$  obtient la valeur 100% (avec  $a$  la constante de normalisation fixée à 4, 5). Si une règle est satisfaite alors la condition obtient une valeur de 1, 0 sinon.

$$Confiance[m(i, j)] = \sum_{i=1}^2 2a \times C_i \quad (5.1)$$

L'ensemble des règles définies est présenté dans la figure 5.11. Ce modèle permet de détecter des points potentiels mais reste très sélectif car le niveau de confiance baisse rapidement si plusieurs mesures sont erronées ou perdues. D'où la nécessité d'une approche robuste et plus dynamique. Nous proposons un deuxième modèle capable d'attribuer des poids et des priorités à certaines mesures en fonction des règles ci-haut et de la relation entre les mesures concernées. Ce modèle calcule puis fusionne (Eq.2 et Eq.3) deux coefficients en vérifiant les hypothèses suivantes :

- *H1* : La mesure  $m(i, j)$  correspond à la position de la canalisation (*Max*)
- *H2* : Le signal est atténué en s'éloignant de la mesure  $m(i, j)$

Les règles définies sont distinguées dans deux catégories de façon à vérifier chaque hypothèse. La première catégorie a pour objectif de vérifier l'hypothèse *H1* en comparant la mesure  $m(i, j)$  avec son voisinage et en attribuant un poids aux mesures proches (Eq.6). La deuxième catégorie privilégie la recherche de décroissance du signal dans les mesures voisines lointaines (Eq.4 et Eq.5). Enfin, la confiance d'une mesure  $m(i, j)$  est obtenue par la somme des coefficients de la relation de la mesure  $m(i, j)$  et toutes les mesures voisines (Eq. 4.2).

$$Confiance[m(i, j)] = \sum_{a=-6}^6 Relation[(m(i, j), m(i, j + a))] \quad (5.2)$$

$$Relation[(m(i, j), m(i, j + a))] = F[(m(i, j), m(i, j + a))] + G[(m(i, j), m(i, j + a))] \quad (5.3)$$

$$F[(m(i, j), m(i, j + a))] = \begin{cases} 1 & \text{si } (m(i, j) = m(i, j + a)) \\ f(|a|) & \text{si } (m(i, j) > m(i, j + a)), \\ 0 & \text{sinon .} \end{cases} \quad (5.4)$$

$$f(a) = \log[(a - 1)^2 + \cos(a - \log(a)) + 1] \quad (5.5)$$

$$G[(m(i, j), m(i, j + a))] = \begin{cases} \begin{cases} 1 & \text{si } ((m(i, j) = m(i, j + a + 1)), \\ \frac{10}{|a|} & \text{si } ((m(i, j) > m(i, j + a + 1)), \\ 0 & \text{sinon .} \end{cases} & \text{si } a < 0, \\ \begin{cases} 1 & \text{si } ((m(i, j) = m(i, j + a - 1)), \\ \frac{10}{|a|} & \text{si } ((m(i, j) > m(i, j + a - 1)), \\ 0 & \text{sinon .} \end{cases} & \text{si } a > 0, \\ 0 & \text{sinon .} \end{cases} \quad (5.6)$$

### 5.2.3 Détection automatique de réseaux enterrés par GPR

*Le système d'acquisition des données présenté dans le présent manuscrit est basé sur les données fournies par le GPR IDS Hi Mod. Les travaux ont été initiés sur un GPR USradar qui n'a finalement pas été retenu pour les besoins du projet G4M. Cette précision est nécessaire pour la prise de décisions futures, pour le choix des informations a priori à retenir.*

La détection automatique par GPR proposée ci-dessous est une approche basée sur la modélisation, le traitement et la fusion de données GPR hétérogènes. Sa mise en place passe par plusieurs étapes et nécessite des prises de décision à plusieurs niveaux. Dans ce qui suit nous présenterons une étude des différentes informations et données prises en compte dans le processus de géodétection automatique. Ensuite, nous présenterons l'approche utilisée pour la fusion des hyperboles détectées en se basant sur deux méthodes de détection automatique. Enfin, nous présenterons le système général mis en œuvre et implémenté dans le prototype G4M.

#### 5.2.3.1 Les informations et les données GPR

En plus des informations a priori sur le terrain et les informations contextuelles, le GPR IDS sauvegarde des fichiers internes que nous pouvons exploiter pour extraire des informations utiles sur la campagne d'acquisition.

**Les méta-données du GPR :** Le système d'acquisition de données récupère et exploite les méta-données du GPR pour extraire l'information pertinente, apporter une aide lors de l'acquisition des données incertaines et améliorer la précision de la représentation spatiale du terrain sondé.

**Les informations fournies par l'opérateur :** Elles permettent de représenter le terrain, de sauvegarder les données récoltées et de déterminer la fiabilité de ces dernières et la confiance à accorder aux résultats de détection obtenus en les utilisant. Elles sont fournies par l'opérateur à travers l'interface et concernent entre autre les dimensions, les composants du sol, le niveau d'humidité, le niveau de compactage et des indications sur les éventuelles perturbations pouvant avoir une incidence sur le signal du GPR. Ces informations sont nécessaires pour le calibrage du GPR et la représentation spatiale des radargrammes sur le terrain. De plus, une analyse du terrain par l'opérateur permet d'énumérer les éléments de surface (affleurants) présents sur le terrain pouvant indiquer la présence probable d'un réseau pré-identifié.

**Les informations extraites de la cartographie :** En fonction de son niveau de confiance, elle peut être utilisée pour guider l'opérateur dans son processus de géodétection. Le niveau de cohérence est déterminé au cours des acquisitions. Si elle est validée, elle permet d'identifier rapidement et efficacement les réseaux enterrés.

L'objectif est d'exploiter l'ensemble des informations pertinentes et les méta-données pour améliorer le traitement des données GPR. En effet, les données GPR sont les radargrammes obtenus par les passages GPR. Leur analyse permet d'extraire les hyperboles pouvant être générées par des réseaux enterrés.

### Liste d'hyperboles : Extraction automatique par la méthode Curvelet

La méthode Curvelet a été développée par G. Terrasse [81] dans le cadre de sa thèse. L'objectif est de fournir une aide à la décision pour l'opérateur par l'amélioration de la qualité des radargrammes en travaillant sur la diminution du bruit et sur le rehaussement du signal utile, sur la suppression du clutter (l'onde directe et la limite entre deux couches du sous-sol), la détection automatique d'hyperboles et leur mise en évidence par l'utilisation de classification ou par la corrélation avec un dictionnaire [1]. La méthode Curvelet est basée sur une approche orientée traitement d'images. Elle prend en entrée un radargramme puis l'analyse et fournit en sortie une liste d'hyperboles détectées décrites par un ensemble de paramètres comme la profondeur estimée, l'angle d'ouverture et le contraste de l'hyperbole.

### Liste de Blobs : Extraction automatique par la méthode adaptative

La méthode adaptative est basée sur une approche orientée traitement de signal. Développée par Q. Hoarau [2] dans le cadre de sa thèse. Cette méthode consiste à traiter des données GPR brutes sans pré-traitements. La technique prend en entrée le signal brut d'un radargramme (fichier swath des données du GPR IDS) et un paramètre d'entrée  $\epsilon$  correspondant au taux de fausses alarmes tolérées. La méthode fournit par la suite en sortie des objets appelés blobs. Un blob est une région représentant une hyperbole et est caractérisé par un ensemble de paramètres comme la profondeur de la canalisation, la valeur et la surface du blob.

Les figures 5.12 et 5.13 illustrent des exemples de détection automatique d'hyperboles par les deux méthodes. Comme indiqué sur les figures, le taux de fausses alarmes est si important qu'il est difficile de discriminer les canalisations.

#### 5.2.3.2 Vers une approche de fusion d'hyperboles

La finalité de cette approche est de récupérer les données GPR sous la forme d'une liste de radargrammes (B-scans) et d'en extraire la liste d'hyperboles détectées. L'analyse des résultats des deux méthodes d'extraction automatique d'hyperboles a montré qu'ils ne peuvent être exploités en l'état. Des traitements doivent être appliqués pour raffiner ces données et pouvoir les exploiter.

Pour ce faire, nous proposons un système de détection automatique d'hyperboles basé sur l'intégration des deux méthodes issues des travaux des thèses de Hoarau Q. [2] et de Terrasse G. [1]. Elles peuvent être considérées comme des méthodes complémentaires pour la détection d'hyperboles. De ce fait, nous proposons de filtrer puis de fusionner les résultats issus des deux méthodes pour combler les lacunes de l'une par les points forts de l'autre.

La figure 5.14 présente un exemple de B-scan obtenu par passage sur une canalisation métallique. L'image A correspond au B-scan original fourni par le GPR. L'image B correspond au résultat de détection automatique par curvelet [1], cinq (5) hyperboles sont détectées dont l'une est générée par la canalisation. Les quatre autres sont des fausses alarmes.

L'approche de détection adaptative prend en entrée le signal GPR et fournit en sortie deux images : l'image (C) correspond aux blobs détectés avec un contraste allant de 0 à 100 et l'image

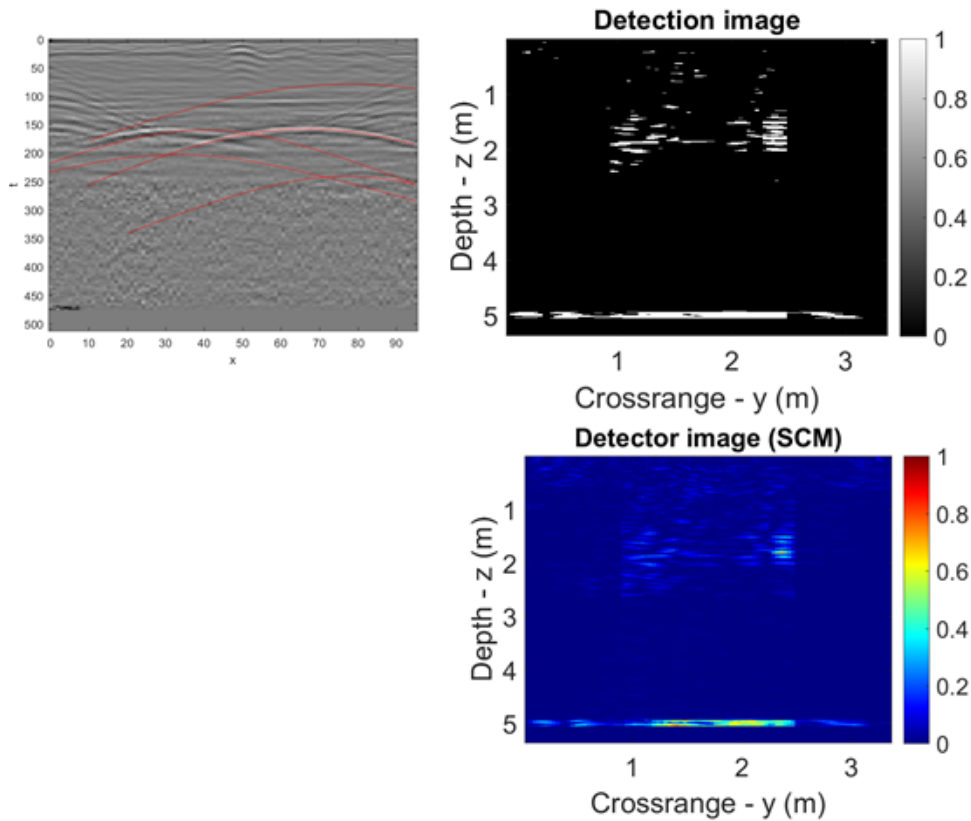


FIGURE 5.12 – Détection automatique d’hyperboles par les méthodes adaptative et Curvelet sur le radargramme ‘Crigen\_Juin2016 : PRC\_7 et RAW\_4’.

(D) présente un affichage binaire ( $[0 - 49]$  ou  $[50 - 100]$ ) des blocs. Quatre blocs sont détectés avec des surfaces différentes dont deux ont une surface importante. Un de ces derniers est généré par la canalisation métallique.

Le processus de fusion d’hyperboles est illustré dans la figure 5.15. Chaque B-scan est traité par les sous-systèmes ‘Adaptive Detection’ et ‘Curvelet Detection’ qui fournissent chacun une liste d’hyperboles. Les listes sont filtrées puis fusionnées pour obtenir la liste finale des hyperboles détectées.

Les blocs et les hyperboles qui représentent des points potentiels de détection sont sélectionnés et retenus. Pour limiter le taux de fausses alarmes, nous supposons qu’il ne peut y avoir un grand nombre de réseaux enterrés sur le même radargramme. Si plusieurs hyperboles et blocs sont présents alors certains représentent probablement des fausses alarmes. L’étape de filtrage permet de diminuer les données insignifiantes, il est donc important de choisir les bons paramètres de filtrage.

**Filtrage des hyperboles :** La comparaison et l’étude des résultats des deux approches montrent que leurs résultats ne peuvent être utilisés en l’état pour la détection des réseaux enterrés. Une étape de filtrage est nécessaire afin d’éliminer les hyperboles les moins significantes. Pour mettre en place un filtrage permettant de réduire le nombre d’hyperboles sans supprimer les hyperboles générées par les réseaux enterrés, il est nécessaire de choisir les bons paramètres de filtrage. Les paramètres de filtrage sont fixés en se basant sur des critères expérimentaux. Dans premier temps, un niveau de confiance est calculé pour chaque bloc. La liste des blocs est

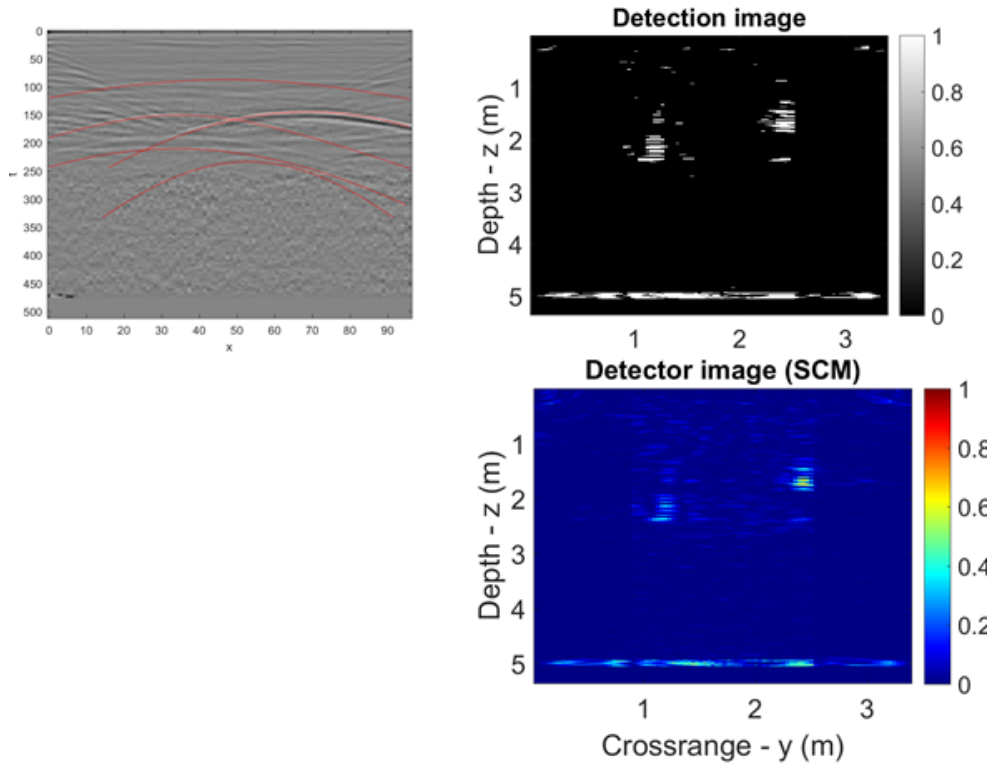


FIGURE 5.13 – Détection automatique d’hyperboles par les méthodes adaptative et Curvelet sur le radargramme ‘Crigen\_Juin2016 : PRC\_11 et RAW\_6’.

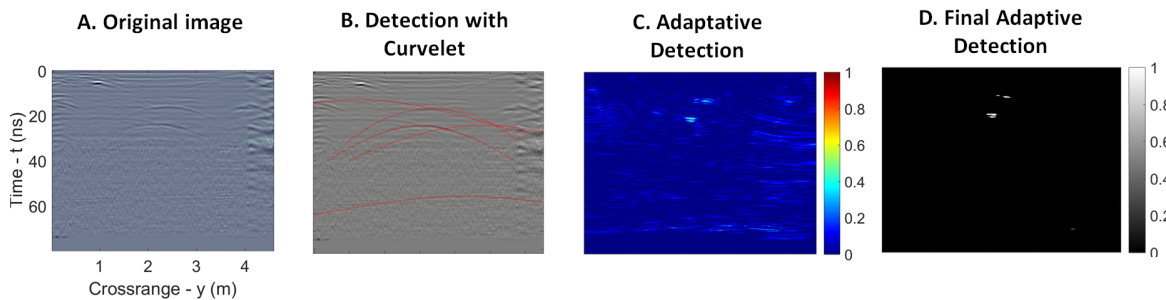


FIGURE 5.14 – Exemple de détection automatique d’hyperboles par deux approches, File : PRC\_41, Site : Savigny-Sur-Orge 18/10/2016.

alors triée et seuls les meilleurs blobs sont retenus. Le niveau de confiance d’un blob est calculé à travers la combinaison linéaire suivante :

$$Confiance(Blob) = (P1 \times ScoreValue + P2 \times ScoreArea + P3 \times ScoreNbBlobs)$$

Avec :

- Le paramètre *ScoreValue* qui désigne la valeur du blob.
- Le paramètre *ScoreArea* qui correspond à la surface du blob.
- Le nombre de blobs détectés sur le même radargramme. Le blob est plus important si le radargramme présente un nombre faible de blobs.
- Les paramètres de la combinaison linéaire sont fixés comme suit :  $P1 = 0,6$  ,  $P2 = 0,3$  et  $P3 = 0,1$ . Ces valeurs sont choisies parce qu’elles ont permis d’obtenir un filtrage de

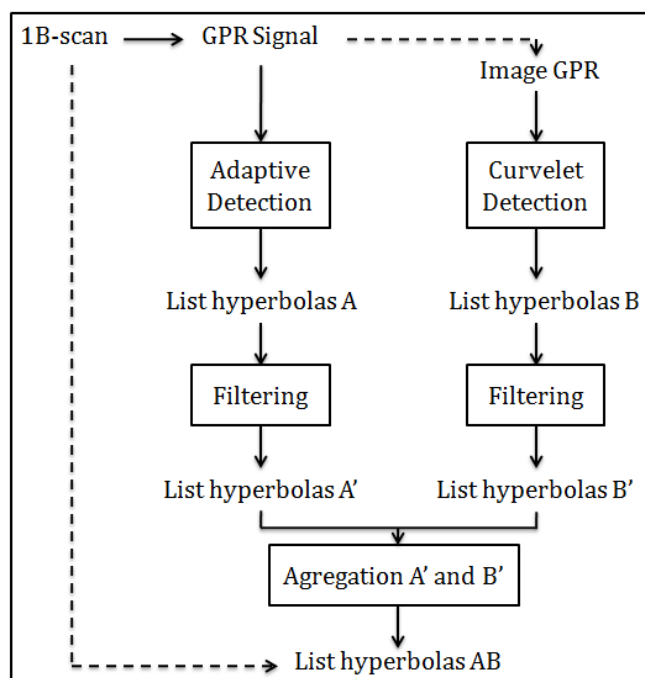


FIGURE 5.15 – Algorithme B-scan - Détection automatique d’hyperboles dans un B-scan basée sur la fusion de deux techniques de détection automatique : ‘Adaptive Detection’ et ‘Curvelet Detection’.

bonne qualité lors des tests et des évaluations.

- Indicateur de qualité, le paramètre *ScoreNbBlobs* varie entre 5 et 100. Il est calculé sur la base du nombre de blobs détectés dans le même radargramme comme indiqué dans la figure 5.16.

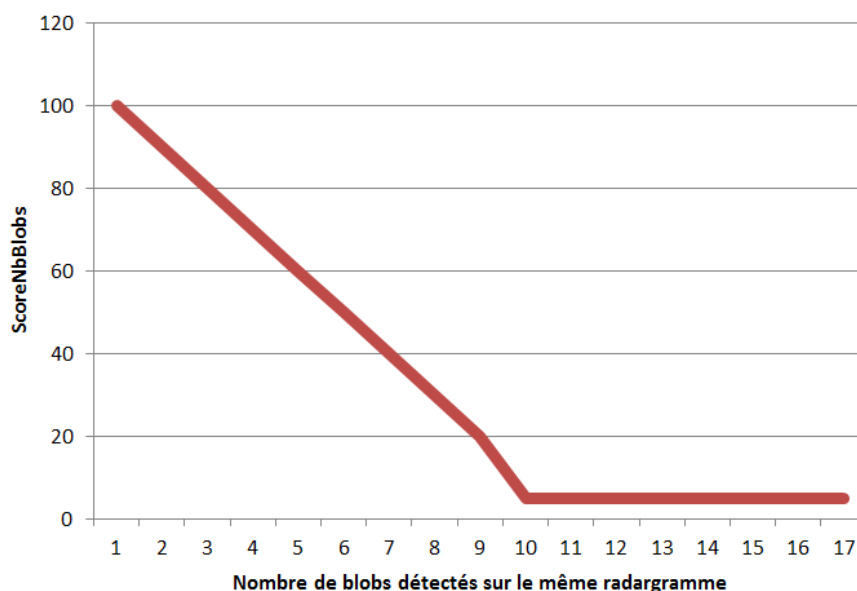


FIGURE 5.16 – Variation du paramètre *ScoreNbBlobs* en fonction du nombre de blobs détectés sur le même radargramme.

### 5.2.3.3 Modélisation des données GPR sur le terrain

Afin de rechercher les réseaux enterrés, une modélisation du terrain est nécessaire pour traiter les points de détection de l'ensemble des radargrammes (B-scans). En effet, le système d'appariement des B-scans a pour objectif de construire une vue C-scan en 3D. La représentation spatiale des données extraites de l'ensemble des B-scans et l'appariement des hyperboles et blocs permet de rechercher des alignements et de calculer leurs niveaux de confiance. En fonction d'un ensemble de paramètres comme : les poids des hyperboles, le nombre d'hyperboles sur un même alignement, inclusion d'un affleurant dans un alignement, comparaison avec le plan, etc, l'identification d'un alignement comme réseau enterré est réalisée.

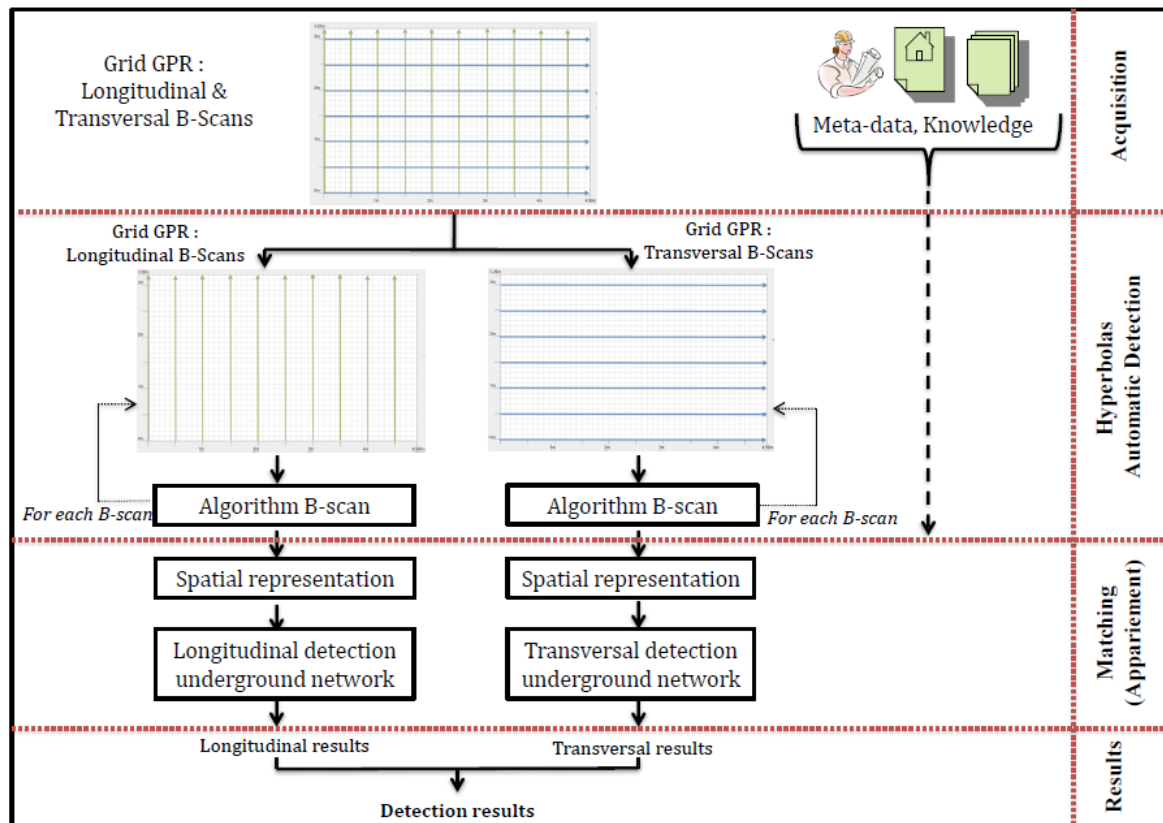


FIGURE 5.17 – Algorithme C-scan : Détection automatique de réseaux enterrés en séparant le traitement des B-scans obtenus lors des passages transversaux des passages longitudinaux pour prendre en compte la notion de direction.

Le processus de représentation spatiale et de traitement des données GPR est résumé dans la figure 5.17 et les étapes de l'algorithme sont présentées comme suit.

La première étape consiste à récupérer les données, les méta-données, les listes des blocs et des hyperboles de chaque radargramme (dit Swath) dans le but d'associer le passage du GPR aux différentes positions spatiales visitées. A chaque position visitée sont associées une ou plusieurs relations avec le Swath :  $Visite(Pos, Swath)$ ,  $Debut(Pos, Swath)$ ,  $Fin(Pos, Swath)$ ,  $Blob(Pos, Swath)$ ,  $Hyperbole(Pos, Swath)$ . L'ensemble de ces informations sont représentées sous forme de connaissances et servent pour enrichir la base de faits de l'ontologie. La direction du passage est une information cruciale car elle permet d'indiquer la direction des réseaux recherchés. Pour cela, les détections finales sont réalisées en deux temps en séparant les données

---

**Algorithm 1** Algorithme de traitement des données GPR

---

```
1: Entrées :  
  – Méta-données GPR  
  – Listes des Blobs (Méthode Adaptative)  
  – Listes des Hyperboles (Méthode Curvelet)  
  – Ontologie G4M  
2: Enrichissement de l'ontologie G4M  
3: Parcourir la liste des Swaths  
4: for chaque  $S$  : Swaths do  
5:   Créer l'instance  $S\_XX\_YY$  dans l'ontologie  
6:   Créer les relations entre l'instance  $S\_XX\_YY$  et les instances de l'ontologie  
7:   En fonction de la direction de  $S$ , calculer les positions spatiales  $DEBUT$  et  $FIN$   
8:   Calculer les positions spatiales visitées par  $S$   
9:   Ajout des relations aux positions spatiales si visité,  $DEBUT$  ou  $FIN$   
10:  Récupérer la liste des Blobs de  $S$  et ajout dans l'ontologie  
11:  Récupérer la liste des Hyperboles de  $S$  et ajout dans l'ontologie  
12: end for  
13: Filtrage(Liste Blobs)  
14: Filtrage(Liste Hyperboles)  
15:  $ResDecl$  : Détection des tracés en  $L$   
16:  $ResDecT$  : Détection des tracés en  $T$   
17: Fusion des résultats  $ResDecl$  et  $ResDecT$ 
```

---

acquises en transversal (T) des données acquises en longitudinal (L).

La détection de tracés en T ou en L consiste à rechercher les alignements à partir de la fusion des blobs et hyperboles ou de leurs résultats. Ainsi, deux approches sont possibles : fusion des blobs et hyperboles et recherche du tracé à partir de l'ensemble ou de la fusion des tracés détectés avec les blobs et les hyperboles respectivement.

Les paramètres des blobs et des hyperboles étant différents, les expérimentations menées sur les deux types d'informations nous ont montré que la seconde approche est plus intéressante car les deux approches diffèrent sur leur discrimination. L'approche basée sur le traitement de signal est très sélective contrairement à l'approche basée sur le traitement d'images qui détecte beaucoup d'hyperboles et qui inclut un nombre très important de fausses alarmes.

#### 5.2.4 Détection des tags Eliot

La technique de détection Eliot permet de relever les données sauvegardées dans une puce (tag) RFID enterrée sur le réseau. Cette méthode de détection est récente et l'installation des Tags RFID n'a commencé que depuis quelques années, au même titre que l'obligation de la mise à jour automatique des cartographies. De ce fait, la détection Eliot n'est utilisée que si la cartographie indique la présence d'un Tag. Les informations contenues dans le Tag sont variables mais concernent souvent le produit transporté, le matériau du réseau et le propriétaire.

La technique Eliot consiste à récupérer les informations du Tag et à mesurer sa profondeur. En revanche, la direction ou le positionnement du réseau ne sont pas fournis. Il peut être obtenu de plusieurs manières :

- A partir de la cartographie si elle est cohérente.
- Par alignement de plusieurs Tags RFID.



- Par le suivi du tracé avec une autre technique de détection complémentaire, le GPR par exemple.

À partir de ces éléments, nous concluons que la technique Eliot ne peut être considérée comme technique de détection principale. Même si les informations qu'elle fournit sont sûres, elle doit être utilisée en complément d'autres techniques permettant un suivi complet du réseau enterré.

De ce fait, plutôt que de proposer un processus de détection dédié à la technique Eliot, nous proposons de l'inclure dans le processus de détection multi-capteurs quand des Tags RFID sont présents sur le terrain. Les informations contenues dans le Tag permettent de discriminer et d'identifier le réseau enterré d'un côté et de l'autre côté, d'assurer une fiabilité et une certitude liées au réseau identifié.

### 5.3 Fusion multi-capteurs

La redondance de connaissances est une solution habituellement proposée pour corriger l'incertitude des instruments de mesure fournissant des informations à partir de l'observation d'un système donné. Sachant que les capteurs (instruments de mesure) n'observent pas le système de la même manière, il est intéressant de fusionner les informations issues des différents capteurs afin de limiter les répercussions que peuvent avoir les erreurs de mesure sur la qualité de la géodétection des réseaux enterrés.

Dans le contexte de la géodétection des réseaux enterrés, nous nous inspirons des méthodes de fusion de données multi-capteurs. Cependant, nos données diffèrent des données traitées dans l'état de l'art par l'aspect temporel et redondant des données. Les méthodes de fusion proposées dans l'état de l'art ne peuvent être appliquées aux données traitées dans notre contexte pour la simple raison qu'un système multi-capteurs fournit en général de grandes quantités d'informations en continu alors que notre situation consiste à observer un système de façon itérative (en une seule fois) en fournissant des données limitées et partiellement redondantes. La redondance dans notre contexte concerne la détection d'une même cible par plusieurs capteurs mais en une seule itération d'où la différence avec les autres travaux dans lesquels le suivi de cible se fait par le suivi temporel multi-capteurs. La prise de plusieurs mesures par le même capteur permet de corriger les erreurs des mesures, chose qu'on ne peut pas faire dans notre cas étant donné que les capteurs sont sujets à des erreurs de détection et des performances amoindries à cause des erreurs de mesure.

La fusion multi-capteurs consiste à fusionner les données issues des différentes techniques ou les résultats de ces dernières lors d'une campagne d'acquisition. Elle a pour objectif de fournir un meilleur résultat de détection et le niveau de fiabilité le plus élevé possible en unissant les forces des détecteurs et en réduisant les risques liés à chacun.

Le processus de fusion est basé sur la qualité des données, la fiabilité des techniques utilisées et les informations contextuelles. Il doit être dynamique et flexible pour s'adapter à chaque situation car les techniques utilisées et leurs modes d'utilisation peuvent varier en fonction du terrain et des réseaux recherchés. Il faut donc être capable de fusionner toutes les techniques utilisés avec les poids associés.

Nous nous appuyons sur une modeste base de données et d'informations de test pour proposer

un modèle de fusion multi-capteurs simple basé sur une combinaison linéaire des résultats de détection comme suit :

$$\text{Détection finale} = (P_{GPR} \times GPR + P_{EM} \times EM + P_{GT} \times GT + P_{Eliot} \times Eliot)$$

$$\text{Avec } P_{GPR} + P_{EM} + P_{GT} + P_{Eliot} = 1$$

Les paramètres  $P_{GPR}$ ,  $P_{EM}$ ,  $P_{GT}$ , et  $P_{Eliot}$  sont les poids de la combinaison linéaire, leur utilisation garantit la prise en compte des techniques uniquement utilisées. De ce fait, la géodétection automatique n'est pas pénalisée par l'absence d'une ou plusieurs techniques. Le calcul des poids  $P_{GPR}$ ,  $P_{EM}$ ,  $P_{GT}$ , et  $P_{Eliot}$  est basé sur plusieurs connaissances pouvant être fournies par :

- Données extraites des informations contextuelles.
- Le nombre d'informations contextuelles.
- Le niveau de confiance attribué à la technique de détection.
- Le niveau de connaissance et de maîtrise de l'environnement (réseaux enterrés et terrain) à partir des affleurants et de la cartographie.
- Qualité des données obtenues par chaque technique. Elle est jugée par la prise en compte du nombre d'alignements, de la variation importante des angles, du nombre de fausses alarmes éliminées et des modes utilisés.

Les niveaux de confiance attachés aux capteurs sont obtenus par la fusion de plusieurs connaissances qui ne sont pas garanties, leur présence est souhaitée mais leur absence n'a pas d'incidence majeure. L'influence de ces connaissances peut se résumer à trois effets :

- Réduction du niveau de confiance.
- Renforcement du niveau de confiance.
- Aucun impact sur le niveau de confiance.

Certaines connaissances sont plus importantes que d'autres, le niveau de confiance doit être calculé sur la base des informations fournies. Le niveau de confiance est plus élevé si le nombre d'informations permettant de le calculer est important. De ce fait, il serait intéressant de calculer deux informations : le niveau de confiance d'un capteur et la crédibilité de ce niveau de confiance (à partir du nombre de connaissances fournies et le nombre de connaissances ayant une influence sur le niveau de confiance, pouvant la réduire ou la renforcer).

### 5.3.1 Processus du système

L'algorithme principal 2 constitue le cœur (programme Main) du système et gère l'ensemble des procédures réalisées.

La première étape consiste à charger les données et à récolter les informations saisies par l'opérateur comme les informations a priori sur les réseaux, les informations contextuelles et les technologies utilisées lors de la campagne d'acquisition.

Le système de récolte d'information se charge notamment d'enrichir l'ontologie G4M en créant des instances à partir des connaissances acquises, leurs propriétés et leurs relations. Le mécanisme de raisonnement SWRL mis en place permet d'enrichir la base de faits par raisonne-

---

**Algorithm 2** Processus d'une campagne d'acquisition

---

- 1: Chargement des données et connaissances :
    - Méta-données GPR IDS
    - Listes des Blobs Q. Hoarau
    - Listes des Hyperboles G. Terrasse
    - Saisie de l'opérateur (Info Context)
    - L'ontologie G4M
    - Données EM
    - Données GT
    - Données Eliot
  - 2: Chargement de l'ontologie G4M
  - 3: Enrichissement de la ABox
    - Instances
      - Connaissances contextuelles : Terrain Etude, Nb Couches, constante diélectrique, niveau humidité, compactage sol, nature sol, composants sol, perturbations
      - Infos a priori : Dimensions du terrain, affleurants, réseaux à rechercher, etc.
    - Propriétés des instances
    - Instanciation des relations
  - 4: Choix des techniques de détection
  - 5: Raisonnement sur la Abox avec les règles SWRL
  - 6: Estimation des niveaux de confiance ConfEM, ConfGPR, ConfEM
  - 7: Estimation des réseaux existants à partir des affleurants
  - 8: Création de la campagne d'acquisition,
  - 9: Modélisation du terrain et représentation spatiale
    - Si GPR représentation matricielle à partir des méta-données
    - Calcul des dimensions et représentation matricielle
    - Création des cases matrices dans l'ontologie comme instances
    - Création de plusieurs matrices pour avoir une version 3D des données récoltées
  - 10: Procédure : Traitement données GPR  $\Rightarrow$  Résultats GPR
  - 11: Procédure : Traitement données EM  $\Rightarrow$  Résultats EM
  - 12: Procédure : Traitement données GT  $\Rightarrow$  Résultats GT
  - 13: Procédure : Traitement données RFID  $\Rightarrow$  Résultats RFID
  - 14: Procédure : Fusion Multi-données  $\Rightarrow$  Résultats de détection  $\Rightarrow$  Réseaux enterrés
-

ment et de générer de nouvelles connaissances qui entre autres permettent d'obtenir les niveaux de confiance de chaque technique si elle est utilisée.

Le système récupère les dimensions du terrain et en propose une représentation spatiale permettant d'associer les données à leur position géographique et de traiter les données spatiales avec des techniques spatiales afin de retrouver le tracé du réseau enterré. La détection GPR étant faite par grille, il est intéressant de se baser sur les méta-données GPR pour réutiliser la grille lors de la représentation spatiale.

Après le choix des technologies par l'opérateur, le système charge les données et lance les procédures spécifiques à chaque technologie puis récupère les résultats.

Enfin, le système de fusion basé sur une combinaison linéaire des résultats de détection et des niveaux de confiance permet d'obtenir les points potentiels du tracé des réseaux enterrés en se basant sur l'ontologie et le module de raisonnement associé.

## 5.4 Spécification des connaissances G4M

### 5.4.1 L'ontologie G4M

Afin de répondre au besoin de représentation des connaissances contextuelles et de permettre leur prise en compte dans le système de la géodétection automatique, nous proposons de développer une ontologie de domaine appelée "G4M" qui décrit les concepts de celui-ci.

L'étude du domaine nous a montré que la tâche est difficile car il est difficile de délimiter le sujet pour mieux le traiter. Pour éviter de travailler sur un domaine large nous proposons de construire plusieurs ontologies de domaine auxquelles sera rattachée notre ontologie G4M comme suit :

- **L'ontologie des réseaux enterrés** : décrit le domaine des réseaux enterrés, leurs matériaux, diamètres, fonctions, les normes d'installation.
- **L'ontologie du sol** : décrit le terrain d'étude et l'ensemble des informations sur le sol comme les composants, les propriétés physiques, le nombre de couches souterraines, les types de surface, etc.
- **L'ontologie du Gas Tracker** : décrit les concepts liés à l'utilisation du Gas Tracker et ses interactions avec l'environnement.
- **L'ontologie du Géoradar** : décrit le contexte du géoradar, ses paramètres et ses résultats.
- **L'ontologie de L'électromagnétique** : décrit le contexte de la détection électromagnétique.
- **L'ontologie de l'Eliot** : décrit la technologie Eliot, ses paramètres et les informations pré-enregistrées.

Pour mieux structurer ces connaissances, un squelette DOLCE est utilisé comme base conceptuelle et les concepts de nos ontologies lui sont rattachées comme illustré dans la figure 5.18.

Dans ce qui suit, nous nous focalisons sur la création de la première ontologie, l'ontologie des réseaux et canalisations enterrés et la base de règles associée pour le raisonnement.

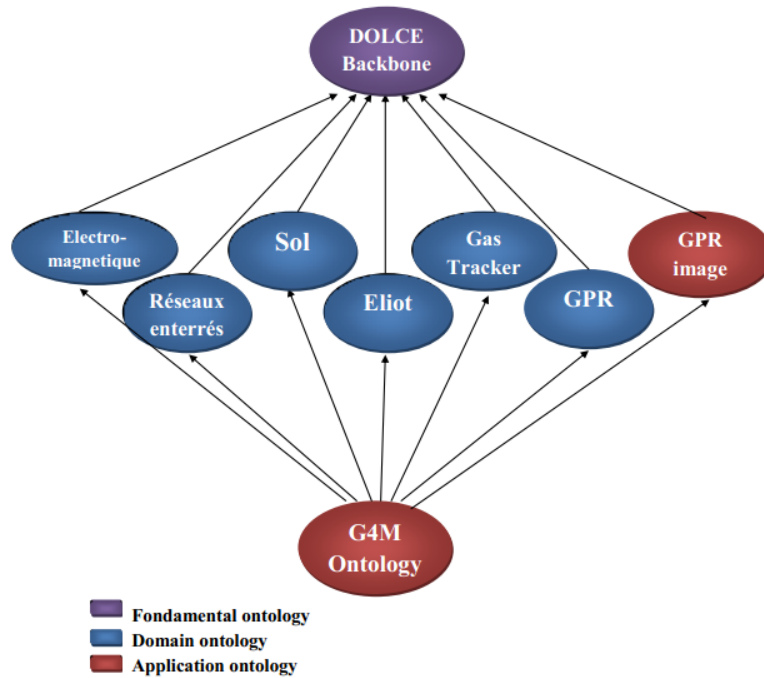


FIGURE 5.18 – Représentation des connaissances du domaine de la géodétection sous forme de plusieurs ontologies décrivant ses sous-domaines.

#### 5.4.1.1 Création de l'ontologie des réseaux enterrés

Pour la création de notre ontologie, nous utilisons la méthodologie complète "METONTHOLOGY" [82]. La première étape consiste à créer un document formel d'expression des besoins dans lequel nous définissons le domaine de connaissances exact à représenter. La deuxième étape est la conceptualisation dans laquelle nous définissons l'ensemble des concepts, relations et propriétés. Chaque concept est défini par ses attributs et ses relations avec les autres concepts.

#### La conceptualisation

Nous définissons plusieurs documents comme le dictionnaire des concepts, le glossaire des relations binaires, le glossaire des propriétés, etc. Cette étape a été faite en collaboration avec les partenaires du projet G4M et les experts du domaine où chaque concept est bien étudié. Toutefois, notre conceptualisation est temporaire et des modifications peuvent être apportées. La figure 5.19 présente un extrait de l'ontologie conceptuelle des réseaux enterrés.

#### Formalisation et implémentation de l'ontologie conceptuelle

Dans cette étape nous exprimons les connaissances conceptuelles dans un formalisme de représentation des connaissances qui leur permettra d'être interprétées par la machine. Nous utilisons la logique de description comme formalisme en créant la TBox (Terminological box) et la ABox (Assertional box). Ci-dessous un exemple de la définition de trois concepts dans la TBox en utilisant la logique de description :

$$\text{Network} \sqsubseteq \forall \text{Made\_of.Material} \sqcap \text{Carry}=1\text{Product\_carried} \sqcap \exists \text{Has\_part} . (\text{Link}$$

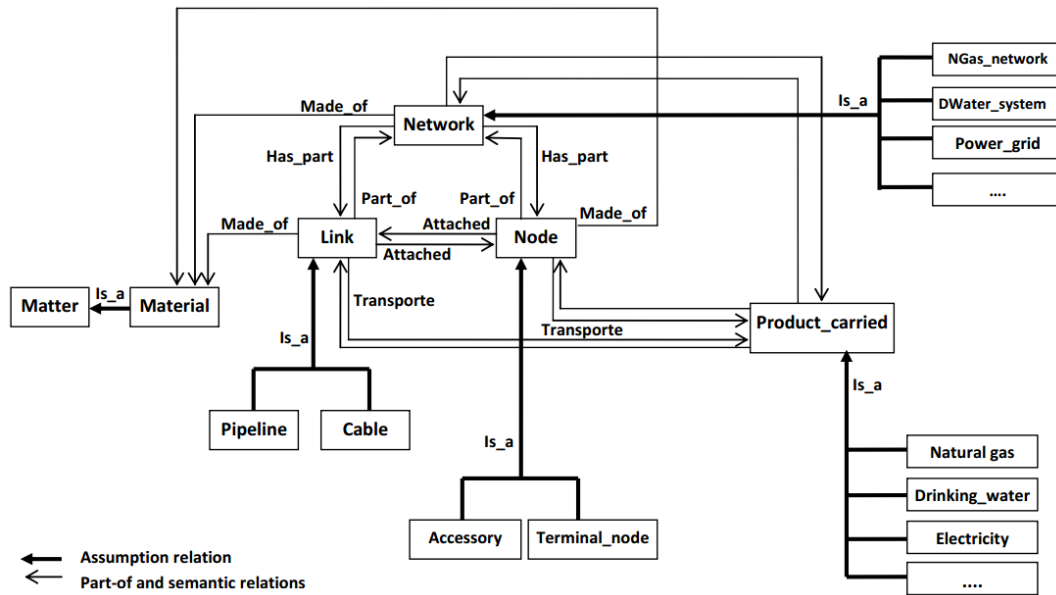


FIGURE 5.19 – Extrait de l’ontologie conceptuelle des réseaux enterrés.

`⊑ Node ⊑ Proprietor=1String ⊑ Owner=1String ⊑ Function_network=1String`

`Naturalgas_System ⊑ Network ⊑ ∇ Has_part.(Pipeline ⊑ Node) ⊑ Carry=‘Natural gas’`

`Power_grid ⊑ Network ⊑ ∇ Has_part.(Cable ⊑ Node) ⊑ Carry=‘Electricity’`

L’ontologie formelle est ensuite implémentée dans le langage OWL en utilisant Protégé 4.3. Nous avons donc défini les concepts, leur propriétés et relations et testé la consistance de l’ontologie pour nous assurer de la formalisation correcte des connaissances représentées dans l’ontologie et corriger les éventuelles erreurs.

## 5.4.2 Raisonnement avec les règles SWRL et ses limites

Le raisonnement en OWL-DL est effectué à deux niveaux : au niveau terminologique TBox et au niveau assertionnel ABox. Plusieurs travaux ont montré les difficultés de raisonnement avec OWL-DL et ses limites [83]. En effet, les logiques de description ont une expressivité très limitée et ne permettent pas des raisonnements avancés, d’où la nécessité d’utiliser un langage de règles permettant d’exprimer les connaissances qui ne peuvent être décrites en DL. Il existe plusieurs langages de règles comme SWRL (Semantic Web Rule Language) qui est un langage basé sur les LD et les règles de Horn.

### 5.4.2.1 Création de la base de règles SWRL

La logique de notre raisonnement s’articule autour des réseaux enterrés et l’interconnexion de leurs composants. Comme défini dans l’ontologie un réseau enterré peut être vu comme un ensemble de nœuds (accessoires, nœuds finaux comme les coupures, les sources ou les clients) connectés entre eux par des liaisons (canalisations s’il s’agit d’un système de canalisations ou

câble si c'est un réseau électrique ou de télécommunication). Chaque liaison possède un diamètre, une profondeur et deux extrémités à travers lesquelles elle est rattachée à exactement deux nœuds. Un nœud possède quant à lui au moins une extrémité (une extrémité si c'est un nœud final, deux extrémités si c'est un réducteur, trois extrémités si c'est une connexion T, etc). Ces connaissances peuvent être exprimées avec la règle SWRL suivante :

$$\text{Node(?a) , Node(?c) , DifferentFrom(?a,?c) , Link(?b) , Attached(?a,?b) , Attached(?c,?b) \rightarrow \text{Connected(?a,?c) ... (1)}$$

L'axiome OWL "InverseOf" permet de définir deux relations inverses. De ce fait, la connexion (Noeud/Liaison) peut être exprimée en utilisant les relations inverses `Attached(Node,Link)` et `Attached(Link,Node)`. La définition des relations inverses est importante comme dans le cas où l'on n'aurait pas la connaissance `Attached(Noeud,Link)` qui exprime que c'est le nœud qui est raccordé à la canalisation. Avec la relation inverse, nous assurons l'exécution de la règle (1) dans tous les cas de figure.

La règle (1) permet de connecter tous les nœuds du réseau enterré à partir des raccordements entre nœuds et liaisons. Elle permet donc de reconstruire les composants du réseau qui sont préalablement inconnus.

Ensuite, il est nécessaire de les associer au réseau auquel ils appartiennent. L'idée est de connaître un réseau et un de ses composants, d'associer ensuite tous les nœuds auxquels il est connecté et toutes les canalisations auxquelles il est rattaché à ce même réseau. Nous définissons les règles suivantes :

$$\text{Network(?a) , Link(?b) , Part_of(?b,?a) , Node(?c) , Attached(?b,?c) \rightarrow \text{Part_of(?c,?a) ... (2)}$$

$$\text{Network(?a) , Node(?b) , Node(?c) , Connected(?b,?c) , Part_of(?b,?a) \rightarrow \text{Part_of(?c,?a) ... (3)}$$

Un réseau enterré et tous ses composants transportent le même produit. Si le produit transporté par un réseau n'est pas identifié alors il suffit de l'identifier au niveau de l'un de ses composants comme montré dans les règles suivantes :

$$\text{Link(?a) , Product_carried(?b) , Carry(?a,?b) , Network(?c) , Part_of(?a,?c) \rightarrow \text{Carry(?c,?b) ... (4)}$$

$$\text{Network(?a) , Product_carried(?b) , Carry(?a,?b) , Part_of(?c,?a) \rightarrow \text{Carry(?c,?b) ... (5)}$$

Nous définissons d'autres règles sur la spécialisation des réseaux enterrés. La règle suivante permet de préciser qu'un réseau de gaz naturel ne transporte comme produit que du gaz naturel :

$$\text{Naturalgas\_network(?x) \rightarrow \text{Carry(?x, Natural\_gas) ... (6)}$$

### 5.4.2.2 Exemple d'utilisation de la base de règles SWRL

La figure 5.20 présente un exemple de réseau enterré de distribution de gaz naturel à partir d'une source (appelée **SourceAB**) vers deux clients finaux (**ClientA** et **ClientB**) à travers six canalisations et quatre accessoires (deux coudes, un réducteur et une connexion T). Nous fournissons peu d'informations sur ce réseau pour tester nos règles.

Notre base de faits (ABox) contient initialement 28 connaissances qui sont principalement : l'instanciation des concepts Réseau, Canalisation et Accessoire. Chaque canalisation est rattaché à deux nœuds en utilisant la relation `Attached(Link, Node)`, nous instancions les relations `Part-of(Channel_5, GasNetwork64)` et `Carry(Channel_1A, Natural_gas)`.

Après le raisonnement (exécution la base de règles), la base de faits (ABox) s'enrichit de nouvelles connaissances et passe de 28 à 103 connaissances décrivant complètement et parfaitement notre réseau et ses composants. Par exemple, l'instance de l'accessoire (Connexion T) appelée **T\_AB** est inconnue au départ et aucune connaissance n'a été définie à son égard dans la base de faits mais après l'exécution des règles nous obtenons les informations suivantes sur celui-ci : c'est une partie du réseau **GasNetwork64** et transporte comme produit le gaz naturel. Il est raccordé à trois canalisations : **Channel\_1B**, **Channel\_2AB** et **Channel\_3** et est connecté aux nœuds : **ClientA**, **ElbowA** et **ReducerB**.

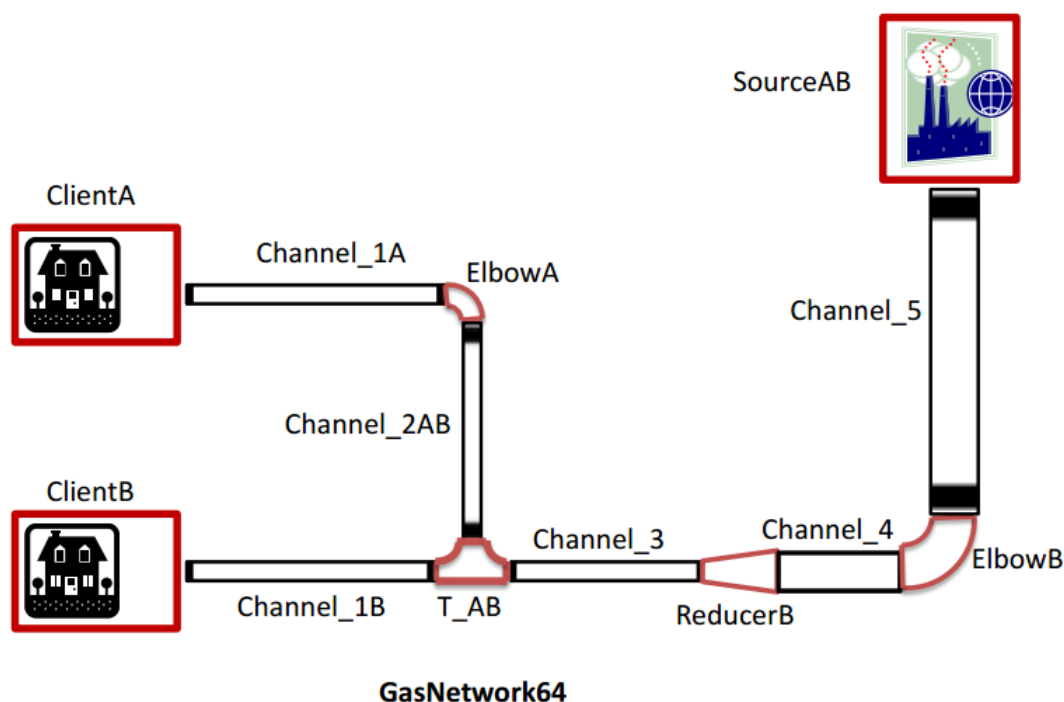


FIGURE 5.20 – Exemple de réseau de distribution de gaz naturel.



### 5.4.2.3 Limites des règles SWRL

Après la définition et la reconstitution du réseau enterré, de ses composants et du produit transporté, nous souhaitons explorer de nouvelles pistes de raisonnement. Pour cela, nous considérons le cas où la présence d'un composant est inconnue. L'idée c'est que si toutes les conditions nécessaires sont réunies, nous pourrions déduire l'existence d'un composant enterré. Nous souhaitons exprimer les connaissances suivantes : "*Si deux nœuds appartenant au même réseau enterré sont connectés entre eux alors il existe une liaison à laquelle ils sont tous les deux rattachés*" ou "*Une intersection regroupant trois canalisations au même endroit implique l'existence d'une connexion T (Nœud accessoire) à cet endroit auquel elles sont rattachées*". Néanmoins ces connaissances ne peuvent être exprimées en règles SWRL car celles-ci sont incapables de déduire l'existence de nouvelles instances et donc leur création.

En dépit des avantages de SWRL et de sa complémentarité avec OWL-DL, son expressivité reste limitée et insuffisante pour effectuer des raisonnements de haut niveau. L'utilisation des règles SWRL n'est pas possible en OWL-DL et réclame l'ajout d'un outil externe. SWRL utilise la supposition du monde ouvert (OWA) : si on ne peut pas prouver qu'une proposition est vraie avec les connaissances disponibles, le système ne peut pas déclarer cette proposition comme fausse. Pour la supposition du monde clos (CWA) toute proposition est fausse s'il manque des connaissances. Or dans un système industriel, les connaissances sont finies et le raisonnement devrait utiliser un CWA ce qui est contradictoire avec la supposition OWA à la base de SWRL [84]. De plus, SWRL présente des difficultés pour exprimer des règles complexes, par exemple des règles avec de nombreux prédicats [85]. En tant que fragment de la logique du premier ordre les règles SWRL ne permettent pas de représenter des expressions vagues, la non-monotonie alors que la logique modale l'autorise.

Après la définition et la reconstitution du réseau enterré, de ses composants et du produit transporté, nous souhaitons explorer de nouvelles pistes de raisonnement. Pour cela, nous considérons le cas où la présence d'un composant est inconnue. L'idée consiste à supposer que si toutes les conditions nécessaires sont réunies, nous pourrions déduire l'existence d'un composant enterré. Nous souhaitons exprimer les connaissances suivantes : "*Si deux nœuds appartenant au même réseau enterré sont connectés entre eux alors il existe une liaison à laquelle ils sont tous les deux rattachés*" ou "*une intersection regroupant trois canalisations implique l'existence d'une connexion T (Nœud accessoire) à cet endroit*". Cependant, ces connaissances ne peuvent être exprimées en règles SWRL car celles-ci sont incapables de déduire l'existence de nouvelles instances et donc leur création. Les règles SWRL sont basées sur les règles de Horn qui ne contiennent que des conjonctions d'atomes, il est donc impossible d'exprimer la négation dans la définition des règles ce qui réduit son expressivité. La nécessité d'utilisation de règles sûres (safe rules) pour éviter le risque d'indécidabilité limite son pouvoir expressif.

Dans certains cas, ces travaux ont montré qu'il était possible de pallier à ces lacunes par l'ajout de built-ins. Cela ajoute de la complexité à l'outil et à sa réutilisabilité. Hors de ces limitations, il s'avère nécessaire de faire appel à un système logique de représentation des connaissances qui soit expressif et puisse autoriser une forme d'incertitude. A cette fin nous allons utiliser le démonstrateur de théorèmes Coq et montrer qu'il a les capacités pour prendre en compte des connaissances complexes et raisonner sur ces connaissances.

### 5.4.3 Spécification des connaissances terrain

#### 5.4.3.1 Motivations

Il est bien connu que la logique de premier ordre (qui subsume SWRL) manque de pouvoir expressif : par exemple elle ne peut pas exprimer certain types de requêtes booléennes telles que les requêtes concernant la fermeture transitive. Le choix qui s'offre à nous résulte d'un compromis entre expressivité et efficacité. Notre choix s'est porté sur la théorie des types dépendants, et plus particulièrement sur son implémentation en Coq. Ce choix implique un certain nombre d'avantages :

- Le premier intérêt de ce type de théorie est que l'on peut programmer et raisonner dans un système unifié unique.
- Les termes sont d'ordre supérieur ce qui signifie qu'ils peuvent représenter des valeurs d'ordre supérieur telles que des ensembles, des relations et des fonctions. Les prédicats et fonctions peuvent être appliqués aux termes d'ordre supérieur, et la quantification peut porter sur des variables d'ordre supérieur dans les formules. Les types sont utilisés pour organiser et classer les termes, restreindre l'espace de validité des variables et contrôler la formation des termes. Dans ce contexte il devient possible de raisonner sur les propriétés des entités du monde réel.
- La syntaxe est uniforme et simple basée sur un lambda calcul typé. Henkin [86] a montré qu'en se limitant à utiliser l'application fonctionnelle, la  $\lambda$ -abstraction, et l'égalité on pouvait reconstruire les connectives et quantifier le calcul propositionnel.
- Le polymorphisme (des opérateurs peuvent s'appliquer à des types différents) ainsi que la notion de type dépendant (type indexé sur des valeurs) confère une expressivité qui va au-delà de tous les langages classiques.
- La notion de sous-typage est également disponible permettant ainsi de hiérarchiser les types associés aux connaissances.
- La logique sous-jacente est intuitionniste (si une proposition n'est pas prouvée, elle n'est pas fausse non plus). On dispose ainsi d'une forme de modalité. Par ailleurs, la théorie des types dépendants a été montrée équivalente à la logique modale en pouvoir expressif.
- La logique est également d'ordre supérieur (HOL) et il est important de noter que beaucoup d'avancées ont été faite dans le domaine du raisonnement automatique en ordre supérieur (HOL-ATP). Ainsi un raisonneur HO devient de plus en plus performant vis à vis d'un raisonneur FO.
- Le système de Coq est fortement normalisé et consistant. Le typage (type checking) y est décidable.
- C'est un langage de spécification expressif qui permet de représenter des connaissances complexes. « Prouver c'est calculer » est le paradigme sur lequel s'appuie la logique intuitionniste.

Enfin, le système Coq ayant été utilisé au préalable pour exprimer la méréogéométrie de Tarski [3], il apparaît naturel de prolonger son utilisation sur un cas concret.

#### 5.4.3.2 Présentation de Coq

Coq est un outil de développement mathématique et assistant de preuves fondé sur le calcul des constructions inductives et une théorie des types d'ordre supérieur ayant un langage de spécification sous forme de lambda-calcul typé. Plus particulièrement, Coq permet de manipuler des assertions du calcul et de vérifier mécaniquement des preuves de ces assertions. Il permet aussi d'aider à la recherche de preuves formelles et de synthétiser des programmes certifiés à

partir de preuves constructives de leurs spécifications [87].

Coq est utilisé pour la vérification des types. En effet, son langage consiste en une séquence de déclarations et de définitions. Une déclaration associe un nom avec une qualification qui peut être soit une proposition logique de type *Prop* ou un type abstrait de type *Type*. Coq fournit des mécanismes de recherche de preuves appelés tactiques. Ces dernières sont la pierre angulaire du processus de démonstration de théorèmes.

### 5.4.3.3 Formalisation du domaine des réseaux enterrés en Coq

En supposant que les concepts et relations soient décrits par des types, nous formalisons avec Coq un extrait de l'ontologie de domaine et les règles qui ne peuvent être exprimées en OWL-DL et SWRL [88]. Pour définir notre ontologie de domaine, nous utilisons la taxonomie DOLCE comme concepts sources et nous lui rattachons les concepts du domaine des réseaux enterrés. Ces définitions sont faites en Coq comme suit :

- Les concepts sont définis par des types bien formés.
- Les individus sont définis par des objets de preuve.
- La hiérarchie de concepts est définie en formalisant la subsomption dans la théorie des types en utilisant les coercions.

Le raisonnement se décline en plusieurs modes. Le premier mode est la vérification des types qui est décidable en Coq et est fait en vérifiant que tous les concepts sont bien typés, des erreurs sont générées dans le cas contraire. Dans ce mode de raisonnement, les prédicats sont des types dont l'instance est une preuve du prédicat et permet une représentation des connaissances structurale et riche. La taxonomie DOLCE est subsumée par un type générique (type **kind**) . Un extrait est défini comme suit :

```
Class PT : Type.
Parameter D1 : PT → kind. Coercion D1 : PT ↦ kind.
Class PD : Type.
Parameter D2 : PD → PT. Coercion D2 : PD ↦ PT.
Class ED : Type.
Parameter D3 : ED → PT. Coercion D3 : ED ↦ PT.
Class AB : Type.
Parameter D4 : AB → PT. Coercion D4 : AB ↦ PT.
Class Q : Type.
Parameter D5 : Q → PT. Coercion D5 : Q ↦ PT.
```

De la même manière, nous définissons les concepts de l'ontologie de domaine en la rattachant à DOLCE comme montré ci-dessous :

```
Class Network : Type.
Parameter D29 : Network → NAPO. Coercion D29 : Network ↦ NAPO.
Class DistributionNetwork : Type.
Parameter D30 : DistributionNetwork → Network.
Coercion D30 : DistributionNetwork ↦ Network.
Class UndergroundDistributionNetwork : Type.
Parameter D31 : UndergroundDistributionNetwork → DistributionNetwork.
Coercion D31 : UndergroundDistributionNetwork ↦ DistributionNetwork.
Class UDNNode : Type.
```

Parameter  $c1 : \mathbf{UDNNode} \rightarrow \mathbf{NAPO}$ .  
 Coercion  $c1 : \mathbf{UDNNode} \rightsquigarrow \mathbf{NAPO}$ .  
 Class  $\mathbf{UDNLink} : \mathbf{Type}$ .  
 Parameter  $c2 : \mathbf{UDNLink} \rightarrow \mathbf{NAPO}$ .  
 Coercion  $c2 : \mathbf{UDNLink} \rightsquigarrow \mathbf{NAPO}$ .  
 Class  $\mathbf{C\_UndergroundDistributionNetwork} (x1 : \mathbf{UDNNode})(x2 : \mathbf{UDNLink})$   
 $(x : \mathbf{UndergroundDistributionNetwork}) :=$   
 $\mathbf{CUndergroundDistributionNetwork} :> x1 \sqsubseteq x \wedge x2 \sqsubseteq x$ .  
 Class  $\mathbf{UDNEndNode} : \mathbf{Type}$ .  
 Parameter  $D32 : \mathbf{UDNEndNode} \rightarrow \mathbf{UDNNode}$ .  
 Coercion  $D32 : \mathbf{UDNEndNode} \rightsquigarrow \mathbf{UDNNode}$ .  
 Class  $\mathbf{UDNInterconnectionNode} : \mathbf{Type}$ .  
 Parameter  $D33 : \mathbf{UDNInterconnectionNode} \rightarrow \mathbf{UDNNode}$ .  
 Coercion  $D33 : \mathbf{UDNInterconnectionNode} \rightsquigarrow \mathbf{UDNNode}$ .  
 Class  $\mathbf{UDNReducer} : \mathbf{Type}$ .  
 Parameter  $D34 : \mathbf{UDNReducer} \rightarrow \mathbf{UDNInterconnectionNode}$ .  
 Coercion  $D34 : \mathbf{UDNReducer} \rightsquigarrow \mathbf{UDNInterconnectionNode}$ .  
 Class  $\mathbf{UDNTConnection} : \mathbf{Type}$ .  
 Parameter  $D35 : \mathbf{UDNTConnection} \rightarrow \mathbf{UDNInterconnectionNode}$ .  
 Coercion  $D35 : \mathbf{UDNTConnection} \rightsquigarrow \mathbf{UDNInterconnectionNode}$ .  
 Class  $\mathbf{UDNElbow} : \mathbf{Type}$ .  
 Parameter  $D36 : \mathbf{UDNElbow} \rightarrow \mathbf{UDNInterconnectionNode}$ .

Le deuxième mode est le raisonnement automatique reposant sur les classes type (TC) qui sont une récente structure [89, 90] ayant de nombreuses propriétés intéressantes. Ce mode de raisonnement automatique a pour but de créer la hiérarchie de concepts à partir des définitions établies et permet aussi de créer automatiquement des instances des concepts [90]. La TC  $\mathbf{CUndergroundDistributionNetwork}$  décrit la propriété des réseaux enterrés : c'est un ensemble composé de deux parties au moins : un noeud et une liaison. De ce fait, pour chaque réseau, deux instances seront créées automatiquement, à savoir une liaison et un noeud [91].

Le troisième mode est le raisonnement pur basé sur les axiomes des règles du domaine comme suit :

Definition  $\mathbf{Attached\_to} (a : \mathbf{UDNLink})(a' : \mathbf{UDNNode}) := \mathbf{Association} a a'$ .  
 Definition  $\mathbf{Connected\_to} (a a' : \mathbf{UDNNode}) := \mathbf{Association} a a'$ .  
 Axiom  $r\_of\_part\_of : \mathbf{Reflexive} \mathbf{Part\_of}$ .  
 Axiom  $a\_of\_part\_of : \mathbf{Asymmetric} \mathbf{Part\_of}$ .  
 Axiom  $t\_of\_part\_of : \mathbf{Transitive} \mathbf{Part\_of}$ .  
 Axiom  $t\_of\_has\_part : \mathbf{Transitive} \mathbf{has\_part}$ .  
 Axiom  $s\_of\_connected\_to : \mathbf{Symmetric} \mathbf{Connected\_to}$ .  
 Axiom  $t\_of\_connected\_to : \mathbf{Transitive} \mathbf{Connected\_to}$ .

Le terme *Association* signifie que la relation définie existe concrètement entre les arguments cités. Les axiomes suivant correspondent à des méta-propriétés des langage du premier ordre sur les règles.

Axiom  $\mathbf{NDist\_Part\_Attached\_to} : \forall (l1 : \mathbf{UDNLink})(n1 : \mathbf{UDNNode})(udn1 : \mathbf{Underground} \mathbf{DistributionNetwork}), \mathbf{Attached\_to} l1 n1 \wedge n1 \sqsubseteq udn1 \rightarrow l1 \sqsubseteq udn1$ .  
 Axiom  $\mathbf{LDist\_Part\_Attached\_to} : \forall (l1 : \mathbf{UDNLink})(n1 : \mathbf{UDNNode})(udn1 : \mathbf{Underground} \mathbf{DistributionNetwork}), \mathbf{Attached\_to} l1 n1 \wedge l1 \sqsubseteq udn1 \rightarrow n1 \sqsubseteq udn1$ .

```

Axiom intro_of_connected_to :  $\forall (n1\ n2 : \mathbf{UDNNode})(l1 : \mathbf{UDNLink}),$ 
    Attached_to l1 n1  $\wedge$  Attached_to l1 n2  $\rightarrow$  Connected_to n1 n2.
Axiom elim_of_connected_to :  $\forall (n1\ n2 : \mathbf{UDNNode}),$  Connected_to n1 n2  $\rightarrow$ 
     $\exists l1 : \mathbf{UDNLink},$  Attached_to l1 n1  $\wedge$  Attached_to l1 n2.

```

Après la définition de ces axiomes, ces derniers sont utilisés pour construire des lemmes au niveau type. Prenons le lemme suivant qui stipule que si deux nœuds sont connectés et que si l'un d'eux est une partie d'un UDN, alors le deuxième nœud est aussi une partie de ce même UDN. Ceci est obtenu et prouvé en utilisant des tactiques.

```

Lemma Dist_Part_Connected_to :  $\forall (n1\ n2 : \mathbf{UDNNode})(udn1 : \mathbf{Underground}$ 
    DistributionNetwork), Connected_to n1 n2  $\wedge$  n1  $\sqsubseteq$  udn1  $\rightarrow$  n2  $\sqsubseteq$  udn1.

```

```

Proof.
  intros n1 n2 net1 H1.
  destruct H1 as [H1 H2].
  apply elim_of_connected_to in H1.
  elim H1; intros l1 H3; clear H1.
  destruct H3 as [H3 H4].
  assert (H5 : Attached_to l1 n1  $\wedge$  n1  $\sqsubseteq$  net1).
  split; assumption.
  apply NDist_Part_Attached_to in H5.
  assert (H6 : Attached_to l1 n2  $\wedge$  l1  $\sqsubseteq$  net1).
  split; assumption.
  apply LDist_Part_Attached_to in H6; assumption.

```

Qed.

Le troisième mode de raisonnement consiste à collecter les axiomes et les variables dans des bases de données *HintDb* que l'utilisateur interrogera avec des requêtes, ces dernières seront vues comme des buts initiaux à obtenir avec des recherches automatiques en utilisant des tactiques (par exemple la tactique **eauto** ).

## 5.5 Spécification méréo-géométrique des données G4M : étude de faisabilité

L'objectif ici est de mettre en place un mécanisme de raisonnement spatial permettant de traiter les données géo-référencées et détecter le tracé du réseau enterré. Pour ce faire, nous nous appuyons sur l'extension de la méréo-géométrie de Tarski et l'implémentation des relations spatiales formalisées dans la section 3.2.2.

Pour mettre en place une telle approche deux étapes sont nécessaires : la définition des relations spatiales en Coq comme illustré dans la figure 5.22 et la définition des connaissances du domaine en Coq comme illustré dans la figure 5.21. La figure 5.21 présente un extrait (fragment) de l'ontologie G4M qui montre comment sont utilisées les différentes connaissances avec l'implémentation des définitions de méréogéométrie en Coq.

La figure 5.22 donne un aperçu du positionnement de notre approche par rapport à la méréogéométrie de Tarski. Chaque flèche entre deux éléments correspond à une preuve de l'inclusion sémantique : si la relation du dessus est prouvée, elle implique la ou les relations du dessous.

Notre objectif est d'implémenter un système de raisonnement spatial en utilisant le prouveur de théorèmes Coq. Les définitions des relations spatiales présentées dans le chapitre précédent sont alors définies sous formes de théorèmes et les recherches d'alignements de sphères sous forme

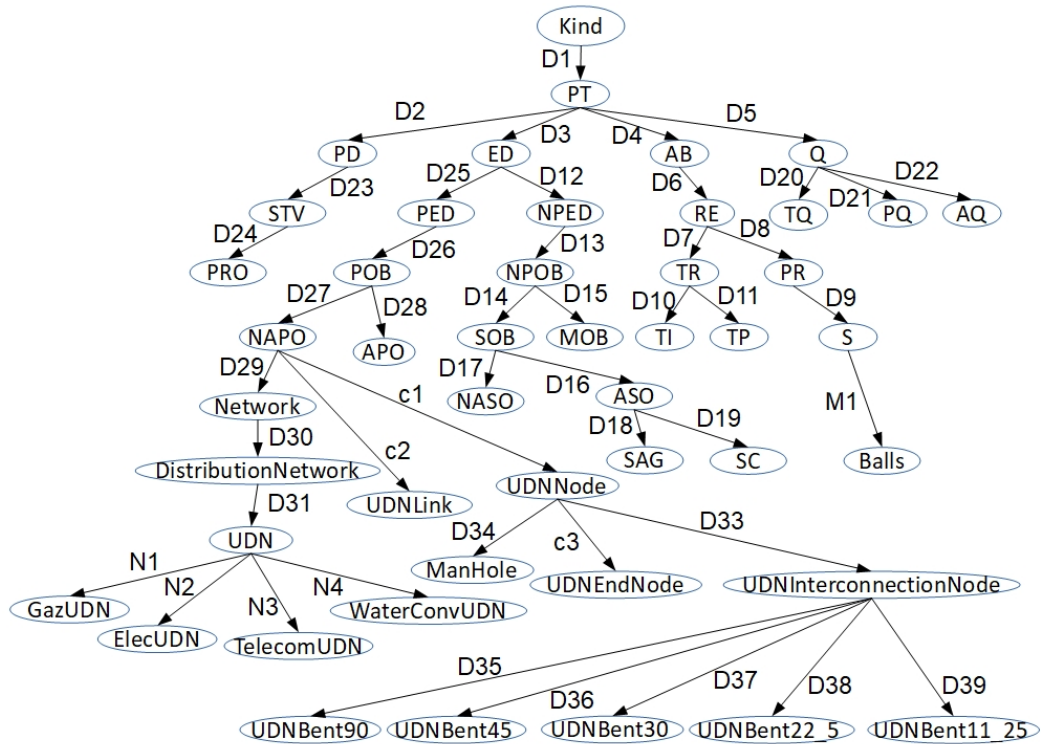


FIGURE 5.21 – Extrait de l'ontologie G4M implémentée en Coq par la définition de la méréogéométrie.

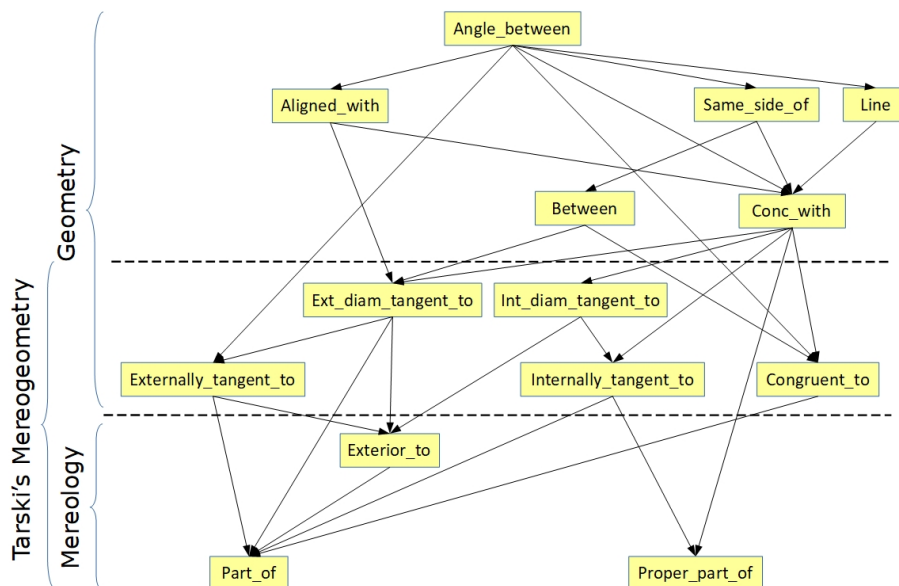


FIGURE 5.22 – Positionnement de notre approche par rapport à l'existant (méréogéométrie de Tarski).

de preuves.

Nous posons ensuite quelques règles comme suit :

- Si un seul tuyau existe : chercher les sphères alignées et éliminer les sphères insignifiantes.
- S’il existe au moins deux tuyaux : chercher les alignements possibles des sphères et tester toutes les sphères pour voir si elles appartiennent à une ligne droite.
- S’il existe deux réseaux superposés, enterrés au même endroit à des profondeurs différentes : différencier les deux réseaux.
- Si un alignement s’arrête au début d’un autre alignement : alors il s’agit du même réseau avec un coude et une connexion des deux alignements.
- Si trois alignements s’arrêtent au même endroit : alors il s’agit du même réseau avec un T et une connexion des trois alignements.

### 5.5.1 Étude de cas

L’objectif de la présente section est de réaliser une étude de faisabilité de l’approche basée sur l’extension des sphères de Tarski à travers une étude de cas sur des données simulées comme illustré dans la figure 5.23. Le scénario étudié comporte trois réseaux présents dans le terrain d’études : un réseau d’assainissement, un câble télécom et un réseau de gaz composé de deux canalisations.

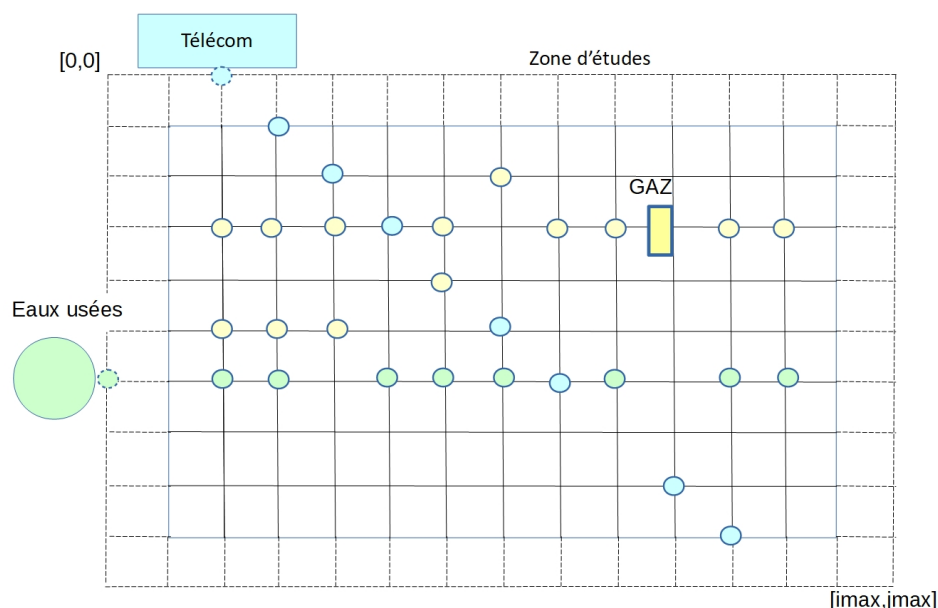


FIGURE 5.23 – Scénario de l’étude de cas : trois réseaux détectés.

La modélisation en Coq des connaissances (dont le code est présenté dans l’annexe E) se base sur un ensemble de principes comme la relation «partie de». En effet, la relation *Partie – de* est modélisée en instanciant la classe *KDTL* qui elle-même instancie un treillis construit à partir de cette relation étant donné que la méréologie est formalisée par un treillis. Ensuite, l’ontologie inclut un ensemble de concepts reliés par la relation de subsomption et un ensemble de relations dépendantes de la relation *Partie – de*.

Pour détecter le tracé du réseau, chaque nœud détecté dans la grille (*UDNNode*) est modélisé par une classe contenant quatre champs : une sphère associée, ses coordonnées entières, le type de capteur responsable de sa détection et son niveau de confiance. Particulièrement, les nœuds de type affleurant sont modélisés par une classe à trois champs : une sphère associée, ses coordonnées entières et le type de réseau concerné. Les coudes normalisés de 90, 45, 30, 22, 5 et 11, 25 sont respectivement modélisés par les classes *UDNBent90*, *UDNBent45*, *UDNBent30*, *UDNBent22\_5* et *UDNBent11\_25*. Enfin, l'ensemble des classes constitue un graphe orienté par la relation de subsomption. Le graphe est acyclique et modélise l'ontologie de terrain.

Ensuite, l'algorithme de détection consiste à rechercher des segments rectilignes à partir des sphères. Chaque sphère représente un point de détection. La première étape consiste à rechercher les segments par la liaison d'un maximum de sphères et la seconde étape consiste à rechercher la connexion de segments rectilignes.



**Function** *ComputeSegmentFromManHole()* **is**

```

input : s : pair(u, v) ;
dir : bool ;
MatrixZone [[]];
output : Seg
Seg ← (u, v);
emptyLine ← 0;
SecondLevel ← ∅;
count ← 0;
if (u < imax) & (dir = 1) then
    u0 ← u;
    for i ← u + 1 to imax - 1 do
        if SecondLevel = ∅ then
            Traitement premier niveau;
            for j ← 1 to jmax - 1 do
                if c(MatrixZone[i][j]) ≥ 0.8 then
                    SecondLevel ← (i, j);
                    count ← count + 1;
                end
            continue ;
        end
        if count = 0 then
            emptyLine ← emptyLine + 1 ;
        end
    end
    if size(SecondLevel) > 0 then
        for k ← 0 to count - 1 do
            for j ← 1 to jmax - 1 do
                if c(MatrixZone[i][j]) ≥ 0.8 then
                    if CalculeAngle ((u, v), SecondLevel[k], (i, j)) < 3 deg
                        then
                            temp ← SecondLevel[k];
                            SecondLevel ← ∅;
                            SecondLevel ← (i, j);
                            u ← temp.first;
                            v ← temp.second;
                            if (i = u0 + 2 + emptyLine) then
                                Seg ← temp;
                            end
                            Seg ← (i, j);
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
end
end

```

```

if ( $u > 0$ ) & ( $dir = 0$ ) then
   $u0 \leftarrow u$ ;
  for  $i \leftarrow u - 1$  to 0 do
    if  $SecondLevel = \emptyset$  then
      for  $j \leftarrow 1$  to  $jmax - 1$  do
        if  $c(MatrixZone[i][j]) \geq 0.8$  then
           $SecondLevel \leftarrow (i, j)$ ;
           $count \leftarrow count + 1$ ;
        end
      end
      if  $count = 0$  then
         $emptyLine \leftarrow emptyLine + 1$ ;
      end
    end
    if  $size(SecondLevel) > 0$  then
      for  $k \leftarrow 0$  to  $count - 1$  do
        for  $j \leftarrow 1$  to  $jmax - 1$  do
          if  $c(MatrixZone[i][j]) \geq 0.8$  then
            if  $CalculeAngle$ 
               $((u, v), SecondLevel[k], (i, j)) < 3 \text{ deg}$  then
                 $temp \leftarrow SecondLevel[k]$ ;
                 $SecondLevel \leftarrow \emptyset$ ;
                 $SecondLevel \leftarrow (i, j)$ ;
                 $u \leftarrow temp.first$ ;
                 $v \leftarrow temp.second$ ;
                if  $(i = u0 - 2 - emptyLine)$  then
                   $Seg \leftarrow temp$ ;
                end
                 $Seg \leftarrow (i, j)$ ;
              end
            end
          end
        end
      end
    end
  end
end

```

La détection de segments suit un sens qui est en deux modes comme suit :

- Automatique si on part d'affleurants placés au préalable sur la grille.
- Semi-automatique si l'utilisateur choisit un point de départ sur la grille et un sens de parcours.

Le calcul de l'angle entre les segments est réalisé en semi-automatique, l'utilisateur entre un segment de deux points ( $AetB$ ) soit  $d = [AB]$ . Ensuite, il choisit un point d'intérêt  $C$  ; on porte le point  $C'$  sur  $BC$  tel que  $[BC'] = d$ . La mesure  $[AC']$  permet ensuite de calculer automatiquement l'angle par :  $\sin(\alpha/2) = [AC']/2 * [AB]$

L'angle est validé s'il appartient aux valeurs normalisées. Pour chaque angle validé, il est considéré comme point initial et une nouvelle recherche de segments est effectuée. Si aucun segment n'est retrouvé à nouveau, pour chaque segment détecté (dont on prend deux points AB) on recherche si un angle normalisé existe avec ce point. Le résultat de la détection de segments est présenté dans les figures 5.24 et 5.5.1.

```
segment détecté à partir de l'affleurant (simulation calcul d'angles) :
0, 2
1, 3
2, 4
3, 5
4, 6
5, 7
6, 8
8, 10
9, 11
=====

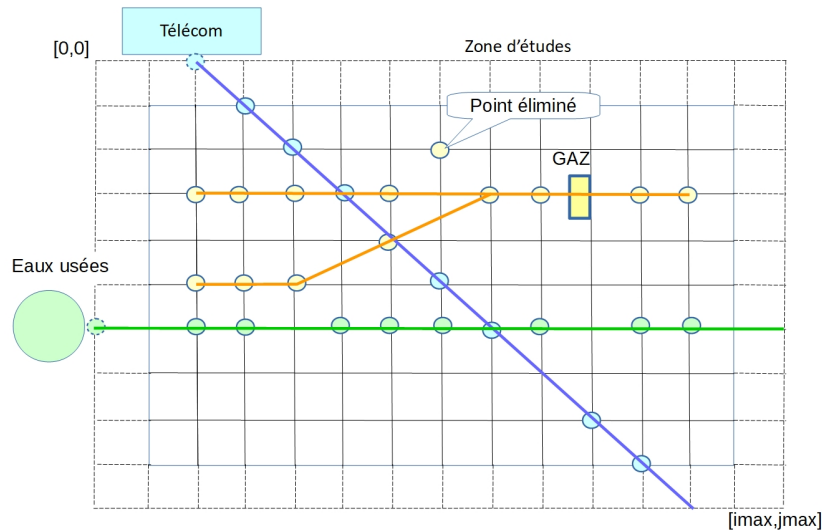
segment horizontal détecté (marche arrière) à partir de l'affleurant interne (simulation calcul d'angles) :
3, 10
3, 9
3, 8
3, 6
3, 5
3, 4
3, 3
3, 2
=====

segment horizontal détecté (marche avant) à partir de l'affleurant interne (simulation calcul d'angles) :
3, 10
3, 11
3, 12
=====

segment horizontal détecté (marche avant) à partir d'un point interne (simulation calcul d'angles) :
5, 2
5, 3
5, 4
=====

segment horizontal détecté à partir de l'affleurant (simulation calcul d'angles) :
6, 0
6, 2
6, 3
6, 5
6, 6
6, 7
6, 8
6, 9
6, 11
6, 12
Appuyez sur une touche pour continuer...
```

FIGURE 5.24 – Résultats de la détection de segments.



## 5.6 Synthèse et discussion

L'objectif des travaux de cette thèse était de développer un système 'preuve de concept' implémentant les solutions étudiées et proposées dans le présent manuscrit pour améliorer et automatiser le processus de géodétection.

L'objectif étant l'étude et la preuve de faisabilité, les performances du système n'ont pas fait l'objet d'étude, et n'ont pas constitué une priorité lors de cette thèse. L'objectif est de construire une chaîne de traitements complète basée sur des approches innovantes. Les performances seront étudiées et ultérieurement dans d'autres thèses dans le cadre de projets futurs sur la géodétection automatique des réseaux enterrés.

Dans le cadre du projet G4M, certaines propositions n'ont pas pu être mises en œuvre comme la cartographie ou complètement exploitées comme le raisonnement spatial basé sur les sphères de Tarski. En effet, l'absence de SIG n'a pas permis d'intégrer une cartographie et récupérer les réseaux existants automatiquement, seule la prise en compte d'affleurants sûrs est possible. Quant au raisonnement spatial basé sur les sphères de Tarski en utilisant le démonstrateur de théorèmes Coq, la nécessité de redéfinir l'ontologie, l'ensemble des théorèmes et de construire les preuves constitue un travail considérable qui ne peut être réalisé au cours de cette. Même si l'approche est bien fondée et très prometteuse, son implémentation et son intégration dans la première version du prototype industriel G4M n'a pas pu être réalisée par manque de temps.

# Chapitre VI : Expérimentations et Résultats



# Expérimentations et résultats

---

## 6.1 Introduction

Afin d'évaluer le système de géodétection mis en place et de valider les algorithmes proposés, des campagnes d'essais ont été réalisées sur des terrains réels. Nous présentons au cours de ce chapitre les expérimentations réalisées pour tester le système proposé et les résultats obtenus.

Pour ce faire, un résumé des expérimentations et des campagnes d'acquisitions réalisées est présenté dans un premier temps. Ensuite, une présentation détaillée des résultats obtenus est fournie pas à pas en exécutant chaque étape du processus. Enfin, une synthèse rétrospective sur les résultats et les approches développées est fournie pour conclure.

### 6.1.1 Cadre expérimental

Les expérimentations réalisées au cours de cette thèse sont des campagnes d'acquisition réelles sur des terrains d'études en réalisant plusieurs étapes comme prévu dans le processus de géodétection proposé dans le présent manuscrit et le protocole d'acquisition de données associé rendant possible leur post-traitement.

Chaque campagne est précédée d'une étude qui permet de fixer ses objectifs, permet de choisir le terrain le plus favorable et présentant le moins de perturbations et de faire appel aux intervenants habilités pour l'accès aux réseaux sensibles.

#### 6.1.1.1 Outils utilisés :

Les technologies utilisées sont principalement celles prévues dans le prototype G4M, les outils nécessaires pour assurer la précision des données et les instruments de mesures. D'autres technologies ont été testées lors des campagnes d'acquisition.

- Le GPR IDS Hi Mod implémenté dans le protocole G4M. La majorité des campagnes d'acquisition ont été réalisées à l'aide de ce modèle.
- Le GPR US-Radar, initialement prévu dans le prototype G4M. Les données des campagnes d'essais réalisées en l'utilisant ne sont pas traitées dans le présent manuscrit.
- Le détecteur électromagnétique RadioDetection RD8000 (détecteur et générateur).
- Le détecteur ELIOT qui utilise la technologie RFID.
- Le Gas Tracker 2 de MADE-SA est le détecteur vibro-acoustique utilisé (détecteur, générateur et base GT).

- D'autres outils sont nécessaires pour assurer la bonne précision des données récoltées : mètre-ruban, télémètre, appareil photo, planche multi-bases GT, etc.

### **6.1.1.2 Géo-référencement des données**

Les données n'étant pas géoréférencées, un protocole basé sur une grille a été utilisé afin de sauvegarder la position des données récoltées par rapport au référentiel choisi et rendre possible leur appariement spatial et la détection de réseaux par traitement automatique. Un suivi manuel est réalisé afin d'attacher l'information spatiale à chaque donnée récoltée sur le terrain.

### **6.1.1.3 Habilitations nécessaires**

L'accès aux réseaux sensibles comme les réseaux de gaz nécessite des habilitations spécifiques. Pour cela, des collaborateurs habilités sont intervenus lors des expérimentations pour réaliser les branchements nécessaires afin géolocaliser les réseaux explorés dans le cadre de nos expérimentations (représentants de GRTgaz, RadioDetection, IDS, etc).

## **6.2 Les campagnes expérimentales**

La section en cours présente les travaux expérimentaux de géodétection réalisés dans le cadre du projet G4M. Ils ont pour but de tester le protocole d'acquisition mis en place et de construire une base de données et de connaissances multi-capteurs pour le développement et le test des algorithmes de détection automatique.

### **6.2.0.4 La campagne Savigny-sur-Orge**

L'objectif de cette campagne d'acquisition est la géolocalisation d'une canalisation métallique de gaz par EM et GPR. Un terrain d'étude sur la commune de Savigny-sur-Orge, est choisi en fonction de plusieurs critères à savoir : un sol homogène ne contenant pas d'argile, peu de canalisations enterrées dans la même zone et la possibilité d'utiliser au moins deux méthodes de détection sur la même zone.

### **6.2.0.5 La campagne Toulon-MADE**

La campagne d'acquisition a pour but de tester et d'évaluer les techniques de détection sur un terrain sécurisé avec accès restreint au public. Les tests réalisés au cours de cette campagne ont eu lieu sur le parking de la société MADE-SA à Toulon. Quelques canalisations sont présentes sur le terrain et la campagne avait pour but de tester le GPR, le GT et l'EM.

### **6.2.0.6 Les campagnes Crigen1 et Crigen2**

Une aire d'essais a été construite dans le cadre du projet G4M au sein du Crigen à Saint-Denis. Des canalisations et câbles avec différents diamètres y sont enterrés à plusieurs profondeurs dans des compositions du sol variables (argile, sable, terre, etc). L'avantage de cette aire est que les réseaux enterrés sont parfaitement connus et localisés, il est donc possible d'évaluer les outils.

Néanmoins, plusieurs problèmes majeurs ont été constatés lors de nos acquisitions : Le terrain est divisé en 6 zones (sable, argile, terre, etc.) Le GPR n'est efficace que dans les deux premières zones.



La détection par Eliot est basée sur le principe du suivi des tags pour tracer le réseau enterré. Sur l'air d'essais des tags RFID appartenant à des réseaux différents sont présents mais pas des tags du même réseau ce qui permettrait de le suivre. De ce fait, la technique Eliot ne peut pas être testée comme la procédure l'indique.

Les techniques EM et GT permettent de détecter un réseau enterré sur plusieurs centaines de mètres. il est recommandé de s'éloigner du point d'injection pour mieux géolocaliser. Or, sur l'aire d'essais les points d'injection sont à moins de 5 mètres des réseaux à détecter, de ce fait le signal se propage dans l'ensemble des réseaux enterrés ce qui rend la géodétection impossible avec le GT sur l'aire d'essais et l'EM difficilement utilisable.

La première campagne avait pour but de récolter des données GPR et GT, les données GT sont incohérentes de ce fait, les résultats obtenus sur ces données ne sont pas présentés dans le présent manuscrit.

La seconde campagne avait pour objectif de géolocaliser une canalisation métallique par branchement de l'EM et de détecter l'ensemble des réseaux avec le GPR. Une portion de l'aire d'essais a été sélectionnée de façon à limiter l'impact de l'environnement.

## 6.3 Résultats

### 6.3.1 Résultats de la géodétection sur le terrain Savigny-sur-Orge

La campagne d'acquisitions menée sur un terrain à Savigny-sur-Orge avait pour but de détecter une canalisation de gaz en acier en utilisant les techniques électromagnétique et géoradar. Une présentation détaillée du protocole d'acquisition de cette campagne est présenté dans l'annexe D. Les données GPR obtenues sont traitées par les systèmes de détection automatique d'hyperboles basés respectivement sur la méthode adaptative qui fournit des blobs en sortie et la méthode par curvelet qui fournit des hyperboles en sortie.

Le système prend en entrée les méta-données du GPR, la liste et les paramètres des Blobs et la liste des paramètres des hyperboles et fournit une représentation spatiale des acquisitions GPR en sortie. Le système sépare les données acquises en longitudinal des données acquises en transversal et en propose deux traitements séparés pour respecter le principe de détection des réseaux enterrés par GPR (*pour détecter un réseau enterré, les passages GPR ne doivent pas être parallèles au réseau en question*).

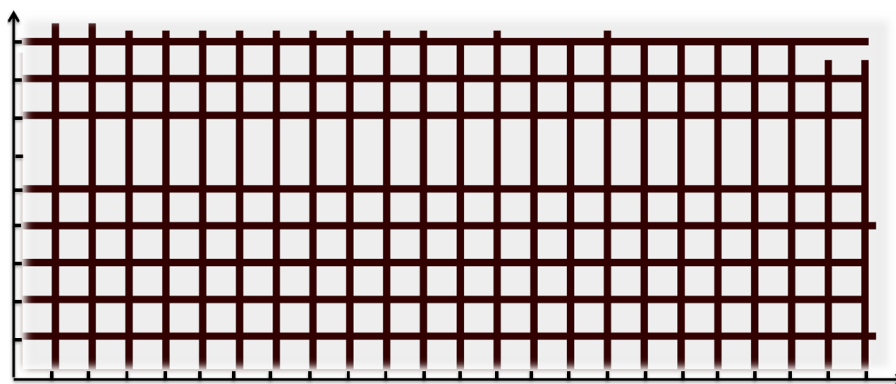


FIGURE 6.1 – Résultats de la représentation spatiale du terrain et des zones parcourues par le GPR.

Le traitement des données par le système passe par plusieurs étapes en fournissant plusieurs résultats. Dans un premier temps, le système met en place une représentation et une modélisation en 2D des passages GPR en longitudinal et en transversal sur le terrain d'étude comme illustré dans la figure 6.1. La canalisation recherchée suit l'axe des abscisses, de ce fait, nous nous intéressons uniquement aux résultats du traitement des passages GPR qui lui sont perpendiculaires.

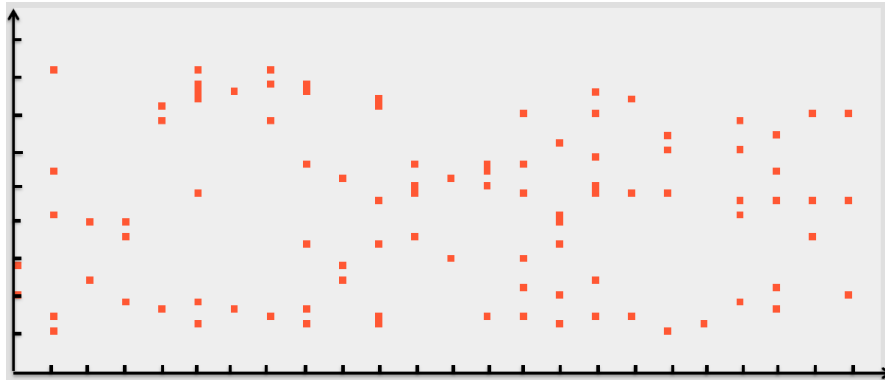


FIGURE 6.2 – Résultats de la représentation spatiale du terrain et des hyperboles détectées.

La représentation des hyperboles obtenues par la méthode par Curvelet est illustrée dans la figure 6.2. Le filtrage de ces hyperboles permet d'éliminer les fausses alarmes comme montré sur 6.3. Une hyperbole est considéré comme fausse alarme si elle obtient un faible score de fiabilité.

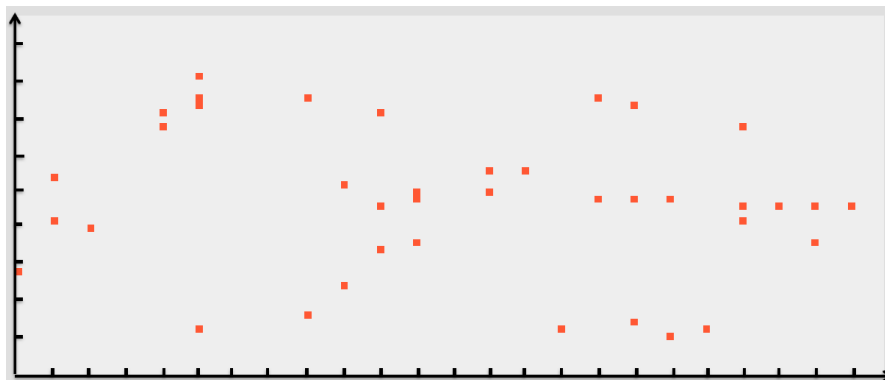


FIGURE 6.3 – Résultats de la représentation spatiale du terrain et des hyperboles filtrées.

Au même titre que les hyperboles, le système prend en entrées la liste des Blobs détectés par la méthode adaptative afin de permettre une fusion intra-capteur (GPR). Le système fournit une illustration des blobs détectés et des blobs retenus après l'étape de filtrage comme montré dans les figures 6.4 et 6.5.

En se basant sur les résultats de filtrage des hyperboles et des blobs, l'étape suivante consiste à rechercher des alignements. Cette procédure nécessite deux paramètres : l'angle de la recherche permettant d'élargir la zone de recherche et le nombre de points nécessaires pour constituer un alignement. Ces paramètres sont fixés en se basant sur des critères expérimentaux étudiés précédemment. L'angle d'alignement est réduit dans un premier temps au vu du nombre important de fausses-alarmes.

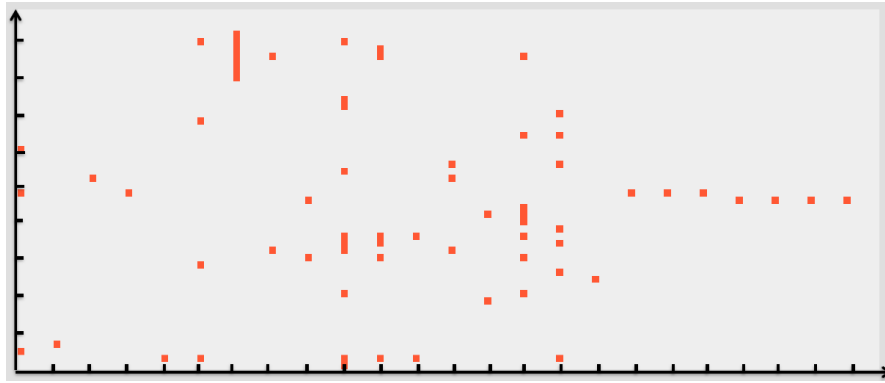


FIGURE 6.4 – Résultats de la représentation spatiale du terrain et des Blobs détectés.

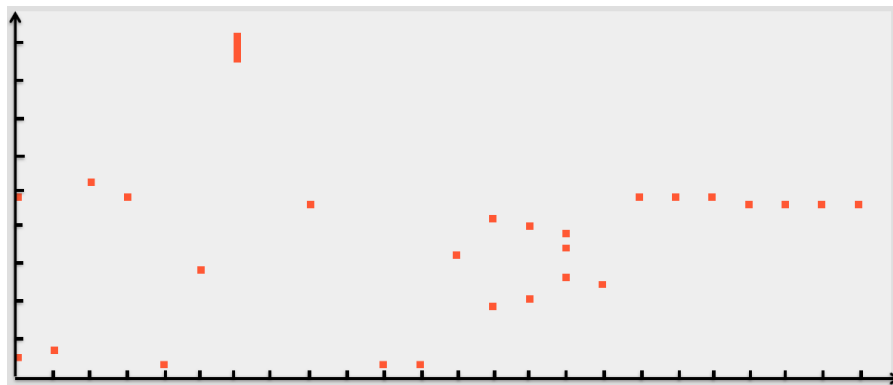


FIGURE 6.5 – Résultats de la représentation spatiale du terrain et des Blobs filtrés.

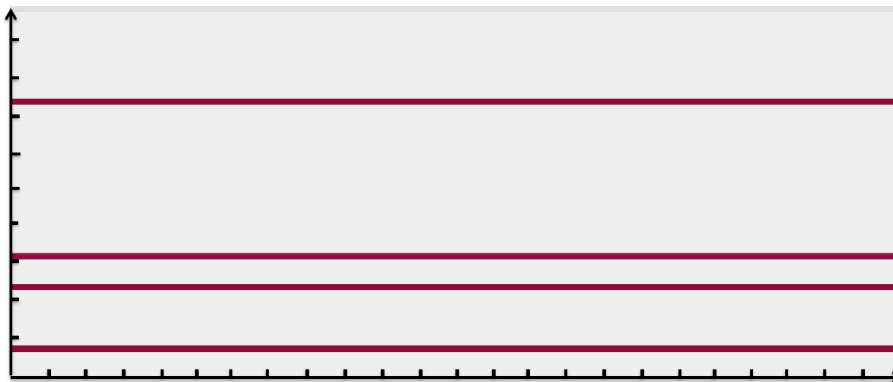


FIGURE 6.6 – Résultats de la recherche d'alignements en se basant sur les hyperboles filtrées.

Les résultats de recherche d'alignements en se basant sur les hyperboles et sur les blobs filtrés sont respectivement présentés dans les figures 6.6 et 6.7.

Les résultats de détection sont maintenant obtenus, leur confrontation avec la vérité terrain a montré que la technique a permis de détecter le seul réseau existant mais qu'en plus, d'autres réseaux inexistant ont été détectés par le système. Ces erreurs de détection sont liées au nombre important de fausses alarmes et à au manque d'hyperboles ponctuelles générées par le réseau enterré. Les hyperboles détectées par la méthode par Curvelet ne sont pas des données certaines au vu du nombre des fausses alarmes initialement détectées et la difficultés de les filtrer. La

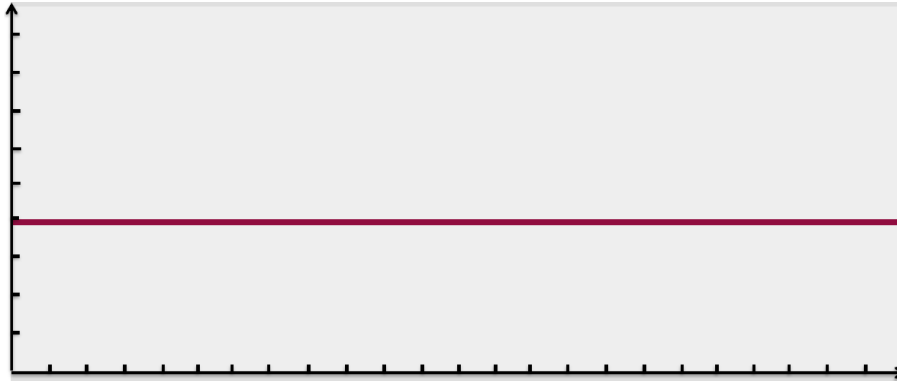


FIGURE 6.7 – Résultats de la recherche d’alignements en se basant sur les blobs filtrés.

méthode adaptative a quant à elle, permis de détecter uniquement le seul réseau présent sur le terrain.

Notre objectif est d’exploiter les deux types de données afin d’améliorer la fiabilité des résultats de détection finale. Pour cela, l’analyse des résultats obtenus a permis d’observer le comportement du système quant au choix de l’alignement. En effet le système force sur la recherche d’alignements perpendiculaires à l’axe de recherche en fonction de l’angle réduit lors de ces essais. Le lien entre l’ouverture de l’hyperbole et l’angle de la canalisation n’étant pas validé dans le cas des données réelles et dans le but de ne pas avantager certains types d’alignement et ne pas se restreindre à une catégorie d’alignements, ce paramètre est rendu muet dans ce qui suit.

La prochaine étape consiste à détecter des tracés de réseaux enterrés par une technique basée sur la recherche d’alignements en se basant sur la fusion des hyperboles et des blobs et sur l’amélioration des paramètres de recherche d’alignements. Les résultats de cette étape sont présentés dans la figure 6.8. Deux réseaux sont détectés : le premier correspond à la canalisation enterrée et le second est un faux résultat. Toutefois, l’analyse des données a montré la présence de plusieurs hyperboles (fausses alarmes) qui auraient pu générer ce réseau. Cette technique a donc permis de détecter deux tracés dont l’un correspond à la position approximative de la canalisation et le second généré par des fausses alarmes.

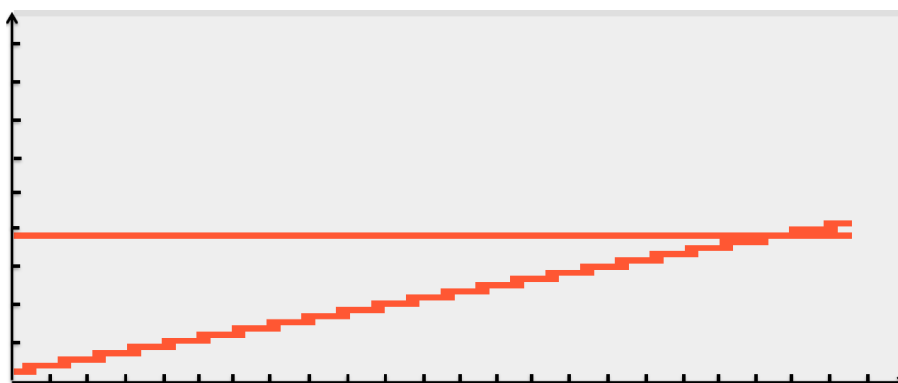


FIGURE 6.8 – Résultats de la détection de tracés par la technique de fusion Blobs-Hyperboles.

Afin d’améliorer ces résultats, nous testons une nouvelle approche basée sur l’estimation

d'existence d'un réseau enterré dans une région donnée. Inspirée des travaux réalisés sur le raisonnement spatial et la fusion des données GPR, le système estime la probabilité de l'existence d'un réseau enterré dans une région et la formalise sous forme de confiance attribuée à un point dans la représentation spatiale du terrain. La technique consiste à augmenter le niveau de confiance de chaque point qui pourrait appartenir à un alignement. Le résultat de cette méthode est illustré dans la figure 6.9.

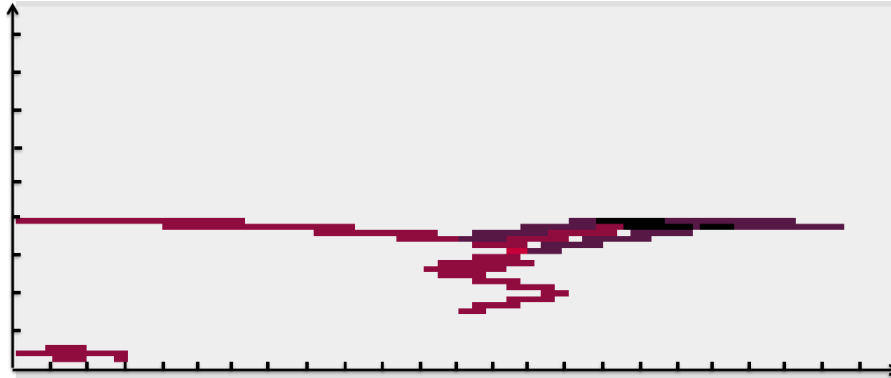


FIGURE 6.9 – Résultats de la technique basée sur l'estimation de la présence d'un réseau enterré par région.

### 6.3.1.1 Résultats de la détection automatique par EM

La détection par électromagnétique a été réalisée en mode actif par branchement du générateur à la protection cathodique de la canalisation métallique. La recherche de cette dernière, en mode actif, a permis de valider les points de détection présentés dans la figure 6.10. Le système de détection automatique par EM a permis de détecter la canalisation en attribuant un niveau de confiance élevé aux points de détection résultant du mode Actif. La canalisation détectée est présentée dans la figure 6.11.

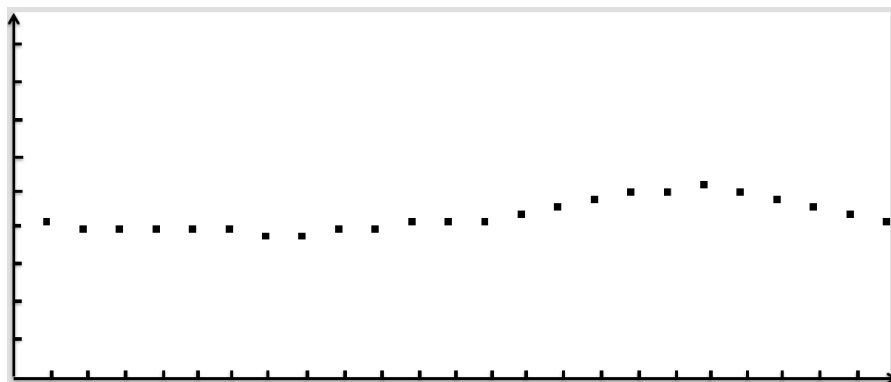


FIGURE 6.10 – Représentation des points de détection EM.

### 6.3.1.2 Résultats de la fusion multi-capteurs

La fusion des résultats obtenus par le GPR et l'EM a permis d'obtenir le tracé de la canalisation avec des niveaux de confiance sur ses portions exprimée en couleur. Le résultat final du

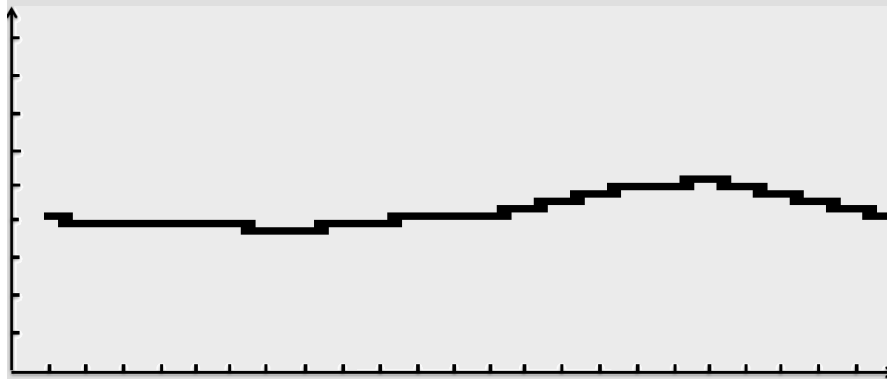


FIGURE 6.11 – Résultats de la détection automatique par EM.

Le système de détection automatique multi-capteurs est présenté dans la figure 6.12. La fiabilité du tracé obtenu est exprimée par la couleur du tracé avec un positionnement de la canalisation sur une zone totale de 40cm avec un niveau de confiance compris entre 80% et 100% sur 20cm et un second niveau compris entre 40% et 60% sur 20cm.

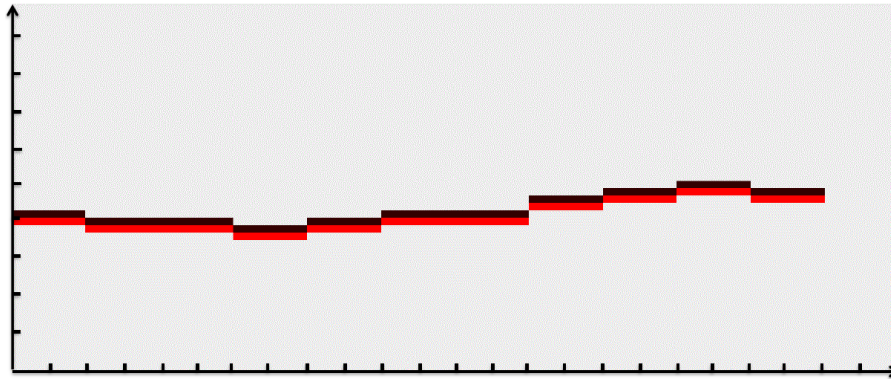


FIGURE 6.12 – La canalisation détectée par fusion multi-capteurs EM/GPR.

### 6.3.2 Résultats de la géodétection sur l'aire d'essai Crigen-Paris

L'étude de cas suivante traite les données acquises lors de la deuxième campagne d'acquisitions sur l'aire d'essais du Crigen à Paris. Après étude du terrain, une zone a été délimitée afin de réaliser les acquisitions et permettre une détection multi-capteurs EM et GPR.

Le terrain d'étude compte 12 réseaux enterrés dont deux paires de réseaux sont à la même position mais à des profondeurs différentes. Les réseaux présents sont de divers matériaux, ont des diamètres variables et sont enterrés à des profondeurs différentes comme indiqué dans la figure 6.13.

#### 6.3.2.1 Résultats de la détection automatique par GPR

En plus des connaissances acquises dans l'ontologie, le système de détection automatique par GPR prend en entrée l'ensemble des données suivantes :

- *D1* : Données et méta-données du GPR IDS.

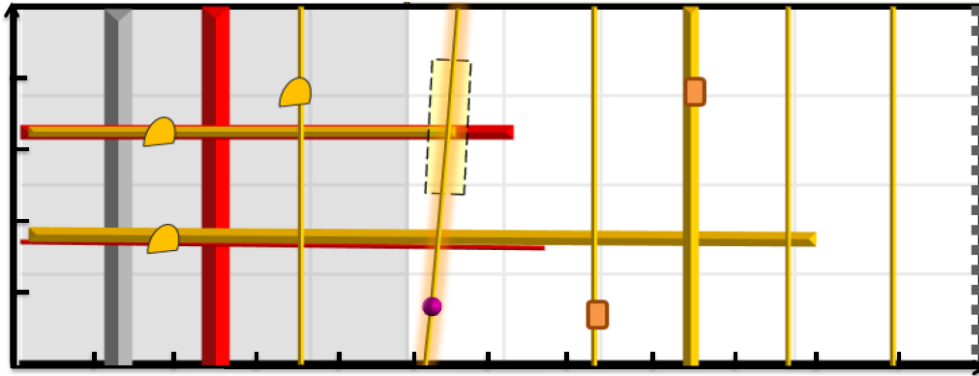


FIGURE 6.13 – Vérité terrain de l'aire d'essais du Crigen-Paris.

- $D2$  : Ensemble des blobs résultant du traitement des données GPR avec la méthode adaptative. Cet ensemble est séparé en deux sous-ensembles  $D2_T$  et  $D2_L$  correspondant aux passages transversaux et longitudinaux respectivement.
- $D3$  : Ensemble des hyperboles détectées par le traitement des données GPR avec la méthode adaptative. Cet ensemble est composé de deux sous ensembles  $D3_H$  et  $D3_L$  correspondant aux résultats des passages transversaux et longitudinaux respectivement.
- $P$  : Ensemble des paramètres nécessaires pour le traitement des données avec  $P_F$  un sous-ensemble des paramètres de filtrage obtenus sur la base de critères expérimentaux et  $P_{TR}$  un sous-ensemble des paramètres de seuillage et de traitements.

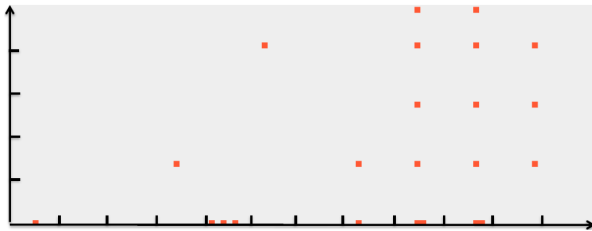


FIGURE 6.14 – Modélisation du terrain et représentation des données  $D2_L$ .

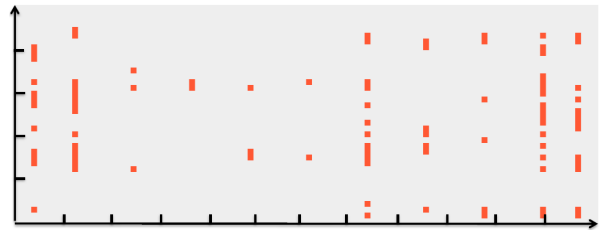


FIGURE 6.15 – Modélisation du terrain et représentation des données  $D2_T$ .

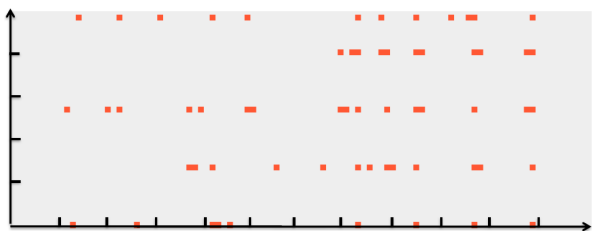


FIGURE 6.16 – Modélisation du terrain et représentation des données  $D3_L$ .

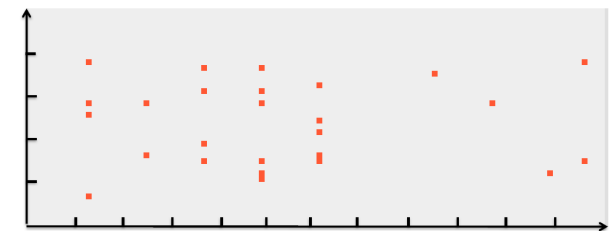


FIGURE 6.17 – Modélisation du terrain et représentation des données  $D3_T$ .

Après le chargement des données, la prochaine étape consiste à associer chaque donnée récoltée sur le terrain à sa position spatiale. Le résultat de la modélisation du terrain et de la représentation des données  $D2$  et  $D3$  sont présentées dans les figures 6.14, 6.15, 6.16 et 6.17.

A ce stade, les données  $D2$  et  $D3$  contiennent un nombre important de fausses alarmes. Pour éliminer le bruit de ces données, l'étape de filtrage est appliquée à chaque sous-ensemble et permet de réduire le nombre de fausses alarmes à partir des paramètres de filtrage  $P_F$ . Les résultats de cette étape sont présentés dans les figures 6.18, 6.19, 6.20 et 6.21.

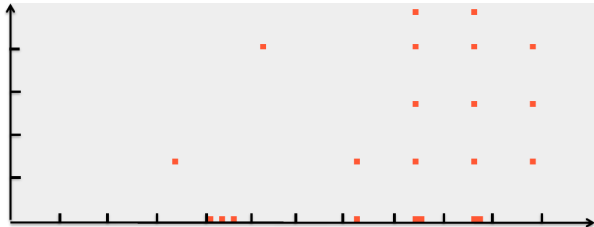


FIGURE 6.18 –  $D2'_L$  : Filtrage des données  $D2_L$ .

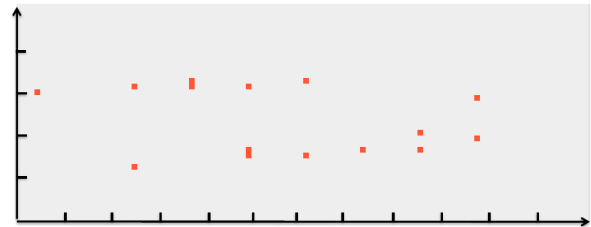


FIGURE 6.19 –  $D2'_T$  : Filtrage des données  $D2_T$ .

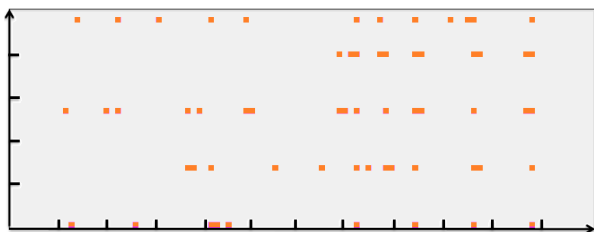


FIGURE 6.20 –  $D3'_L$  : Filtrage des données  $D3_L$ .

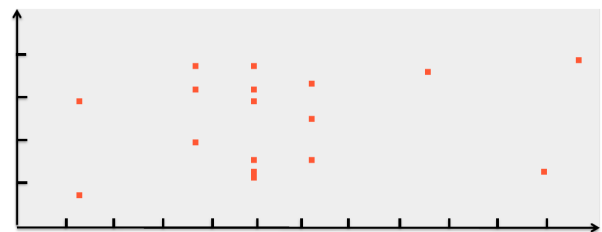


FIGURE 6.21 –  $D3'_T$  : Filtrage des données  $D3_T$ .

L'étape de filtrage permet d'obtenir les ensembles de données  $D2'_L$ ,  $D2'_T$ ,  $D3'_L$  et  $D3'_T$  qui seront utilisés pour la détection finale. En effet, pour assurer un niveau de fiabilité correct, il est important de garantir des données d'entrée de bonne qualité.

Pour détecter les tracés des réseaux enterrés, plusieurs méthodes de détection sont testées comme suit :

- $M1$  : Recherche d'alignements sur chacun des ensembles :  $D2'_L$ ,  $D2'_T$ ,  $D3'_L$  et  $D3'_T$ .
- $M2$  : Estimation de la probabilité de la présence d'un réseau enterré par région et par fusion Blobs/hyperboles sur les ensembles :  $D2'_L \cup D3'_L$ ,  $D2'_T \cup D3'_T$ .
- $M3$  : Recherche d'alignements par fusion Blobs/Hyperboles sur les ensembles :  $D2'_L \cup D3'_L$ ,  $D2'_T \cup D3'_T$ .

La méthode  $M1$  consiste à rechercher des alignements dans le nuage de points et à retourner une liste d'alignements dont le nombre est fixé par un seuil  $S_{NbAl}$  dans l'ensemble  $P_{TR}$ . Un ensemble de points est considéré comme un alignement s'il contient au moins  $S_{MinAl}$  point. Ce dernier est un seuil de l'ensemble  $P_{TR}$  fourni en entrée. Enfin, un score est attribué à chaque alignement et ces derniers sont triés en fonction de ce score afin de retenir les alignements les plus fiables qui pourraient représenter le tracé d'un réseau enterré.

La méthode  $M1$  a permis de détecter plusieurs tracés de réseaux enterrés sur chaque ensemble de données. Les résultats sont présentés ci-dessous :



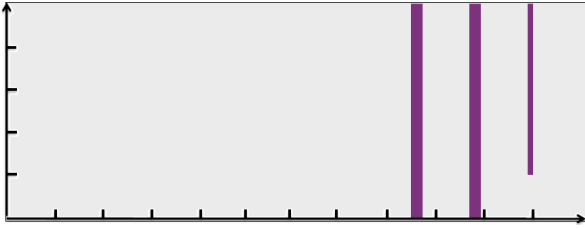


FIGURE 6.22 – Résultats de la détection d'alignements sur l'ensemble de données  $D2'_L$ .

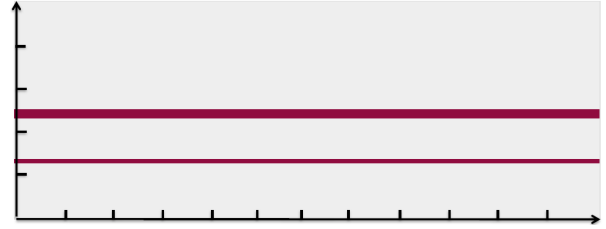


FIGURE 6.23 – Résultats de la détection d'alignements sur l'ensemble de données  $D2'_T$ .

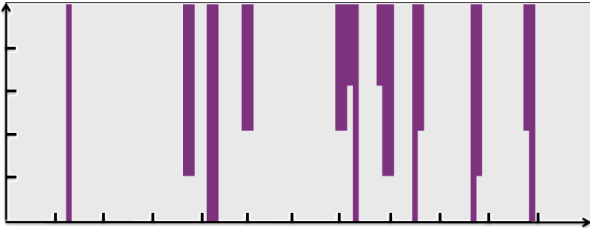


FIGURE 6.24 – Résultats de la détection d'alignements sur l'ensemble de données  $D3'_L$ .

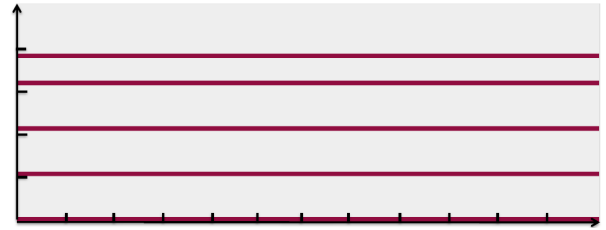


FIGURE 6.25 – Résultats de la détection d'alignements sur l'ensemble de données  $D3'_T$ .

|                       | Données Blobs (D2) | Données Hyperboles (D3) |
|-----------------------|--------------------|-------------------------|
| Nb Réseaux présents   | 10                 | 10                      |
| Nb Réseaux détectés   | 5                  | 15                      |
| Nb Bonnes détections  | 5                  | 8                       |
| Nb Fausses détections | 0                  | 7                       |
| Rappel                | 0.5                | 0.8                     |
| Précision             | 0.5                | 0.53                    |

L'analyse de ces résultats montre que la méthode  $M1$  est fiable à 100% sur le jeu de données  $D2$  néanmoins beaucoup de réseaux enterrés n'ont pas été détectés contrairement aux données  $D3$  où la détection de réseaux enterrés est plus importante avec un risque d'erreurs important.

La seconde approche testée est la méthode  $M2$  qui consiste à estimer la probabilité de la présence d'un réseau enterré dans un point sur le terrain. Dans un premier temps, chaque point se voit attribuer un score basé sur ses propriétés. Ensuite, Pour chaque point nous recherchons la possibilité qu'il appartienne à un alignement. Plus l'alignement auquel il appartient est important et plus son score augmente, plus le nombre d'alignements auxquels il appartient est important et plus son score devient encore plus important.

A partir des résultats de la méthode  $M2$  présentés dans les figures 6.27 et 6.26, une recherche d'alignements est effectuée afin de détecter le tracé de la canalisation. L'analyse des résultats de la méthode  $M2$  est illustré dans les figures 6.28 et 6.29.

Sur la figure 6.28 nous pouvons remarquer la détection de deux tracés dont l'un a un niveau de confiance plus élevé. En comparant avec le plan, il est possible de déduire que ces deux tracés correspondent aux canalisations enterrés. Sur le terrain nous pouvons remarquer que les

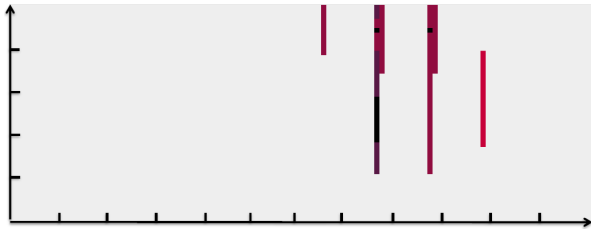


FIGURE 6.26 – Zones de détection avec des scores de confiance exprimés par des couleurs avec les données GPR obtenues en longitudinal.

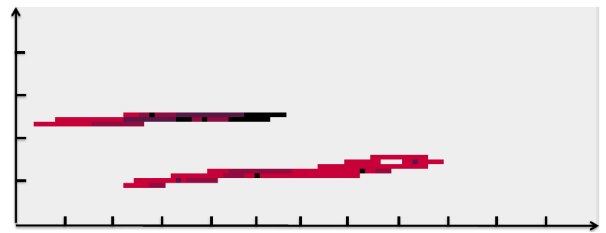


FIGURE 6.27 – Zones de détection avec des scores de confiance exprimés par des couleurs avec les données GPR obtenues en transversal.

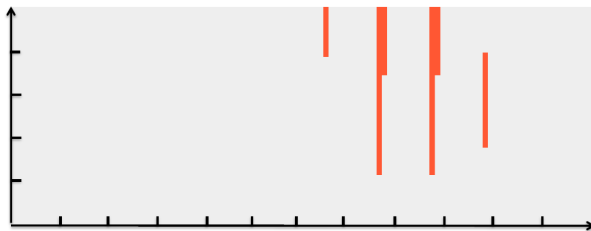


FIGURE 6.28 – Résultats de la méthode de détection *M2* en longitudinal.

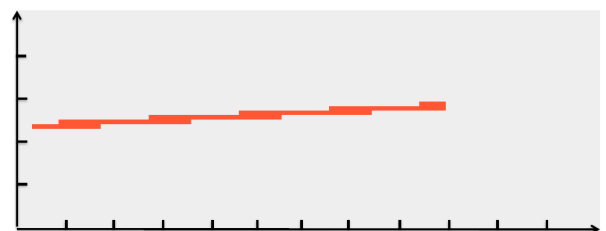


FIGURE 6.29 – Résultats de la méthode de détection *M2* en transversal.

canalisations sont discontinues. La méthode de détection *M2* est la seule à détecter l'interruption des canalisations, en effet les tracés détectés s'arrêtent à l'endroit où les canalisations s'arrêtent.

Finalement, la troisième méthode utilisée *M3* s'inspire des méthodes précédentes combinant la recherche d'alignements, la fusion des données Blobs/Hyperboles et la prise en compte des scores de confiance. Le but de cette technique est de détecter plus de réseaux enterrés tout en gardant un niveau de fausses alarmes minimisé. La combinaison des méthodes précédentes permettent de trouver un compromis.

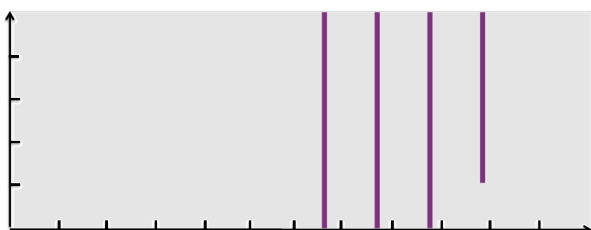


FIGURE 6.30 – Résultats de détection avec la méthode *M3* sur l'ensemble de données  $D2'_L \cup D3'_L$ .

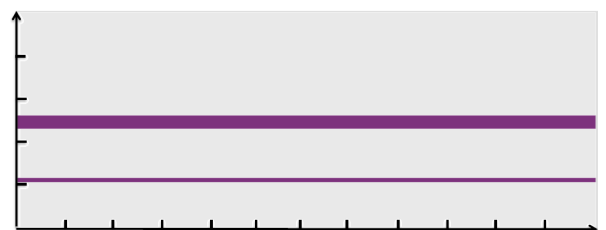


FIGURE 6.31 – Résultats de détection avec la méthode *M3* sur l'ensemble de données  $D2'_T \cup D3'_T$ .

Cette technique permet de concilier quantité et qualité. En effet, les résultats se sont légèrement améliorés avec six réseaux détectés sur dix avec un niveau de précision élevé et aucune fausse alarme.

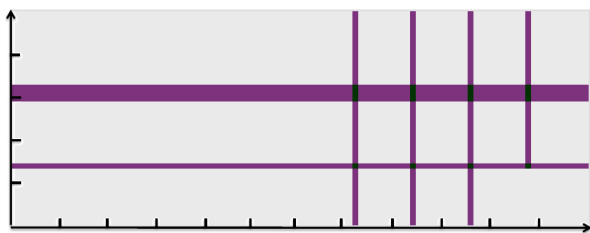


FIGURE 6.32 – Résultat final de la détection automatique par la technique GPR.

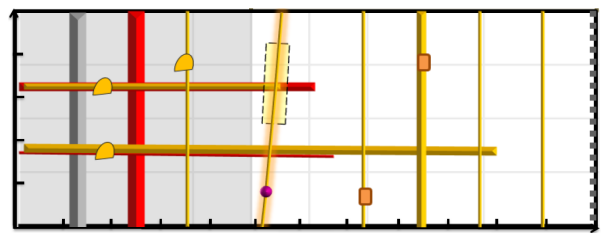


FIGURE 6.33 – Comparaison du résultat avec le plan du terrain d'étude.

### 6.3.2.2 Résultats de la détection automatique par EM

Le deuxième outil de détection utilisé au cours de cette étude est l'électromagnétique en mode actif ayant le niveau de confiance le plus élevé. En effet, la détection automatique par EM dépend du mode utilisé. La réalisation de cette procédure passe par plusieurs étapes : La première étape comprend la modélisation du terrain et la représentation des points potentiels de détection sélectionnés comme illustré dans la figure 6.34. La seconde étape consiste à rechercher le tracé de la canalisation sondée à partir des points sélectionnés précédemment. La détection automatique par EM a permis de détecter la canalisation avec un niveau de fiabilité important comme illustré dans la figure 6.35.

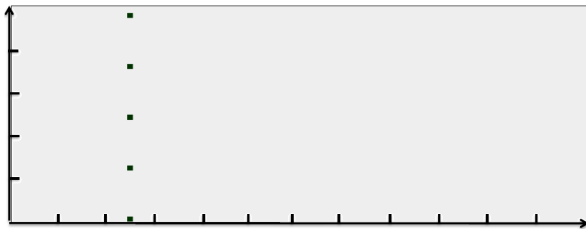


FIGURE 6.34 – Modélisation du terrain et représentation des données EM.

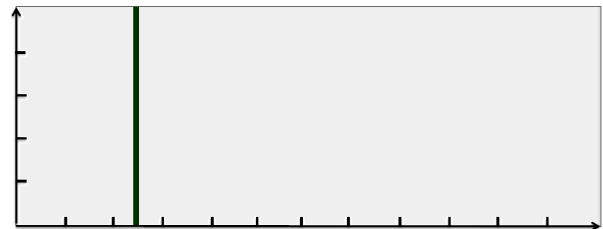


FIGURE 6.35 – Résultat de la détection par EM : tracé de la canalisation.

### 6.3.2.3 Résultats de la détection automatique par fusion multi-capteurs

Le processus de fusion multi-capteurs consiste à fusionner les résultats de détection mono-capteurs en prenant en compte la qualité des données de détection, les scores de chaque donnée et les niveaux de fiabilité associés à chaque technique. Un conflit peut arriver quand le même réseau est détecté par plusieurs capteurs mais qu'il est situé à des positions différentes. La fusion multi-capteurs peut affaiblir le niveau de confiance en conséquence du conflit.

Dans cette étude de cas, la canalisation détectée par l'EM n'a pas été détectée avec le GPR. Le résultat de la fusion multi-capteurs est présenté dans la figure 6.36.

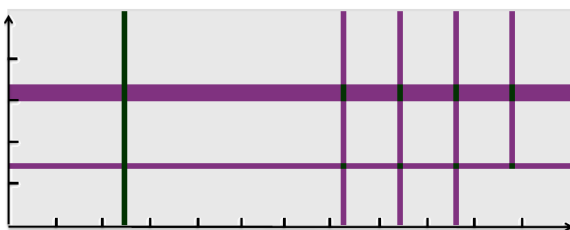


FIGURE 6.36 – Résultat de la détection automatique multi-capteurs.

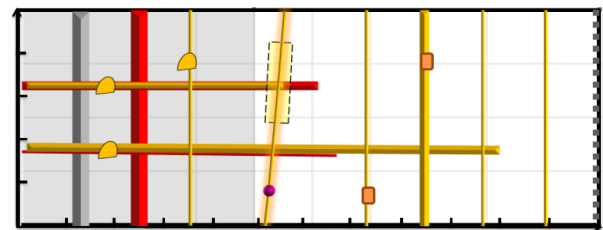


FIGURE 6.37 – Plan du terrain d'étude du Crigen avec 10 réseaux enterrés.

### 6.3.3 Résultats de la géodétection sur le terrain MADE-Toulon

La campagne d'essai réalisée sur ce terrain avait pour but de réaliser une détection multi-capteurs GT-GPR-EM. Les contraintes (câble électrique enterré dans un parking moto) n'ont pas

permis de réaliser la détection EM. De ce fait nous nous intéressons uniquement aux acquisitions par GT et par GPR.

Comme illustré dans la figure 6.38 la campagne GT avait pour but de détecter une canalisation de gaz en polyéthylène et la campagne GPR avait pour objectif de sonder tout le terrain à la recherche de l'ensemble des réseaux enterrés. Un réseau en polyéthylène d'eaux pluviales est notamment enterré sur le même terrain. Une canalisation faisant partie de ce réseau frôle la canalisation PE de gaz ce qui rend la distinction des deux réseaux difficile.

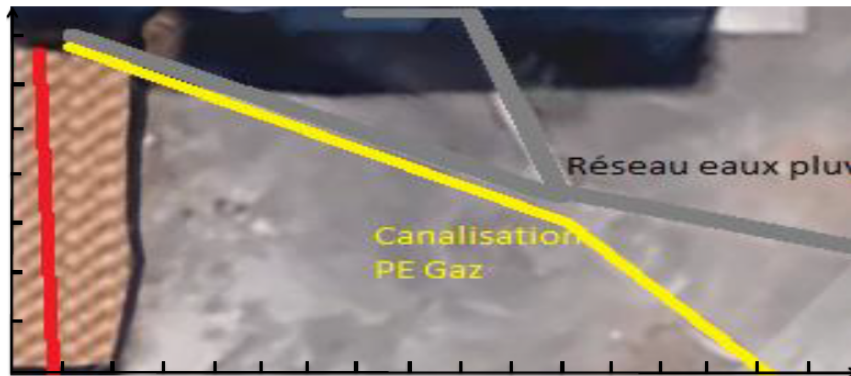


FIGURE 6.38 – Terrain d'études MADE-Toulon présentant deux types de sol. Trois réseaux y sont enterrés : une canalisation de gaz PE, une canalisation PE d'eaux pluviales et un câble électrique inaccessible pour la détection.

### 6.3.3.1 Détection automatique par GasTracker

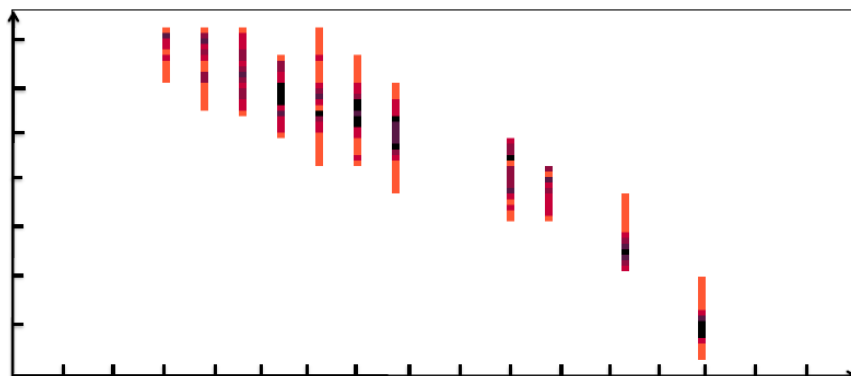


FIGURE 6.39 – Filtrage des résultats de la détection par GasTracker par branchement à la canalisation PE de Gaz .

La campagne d'acquisition GT consiste à réaliser plusieurs mesures dans un ensemble d'acquisitions parallèles à la canalisation dans le but de repérer le signal maximal qui pourrait correspondre à la position de la canalisation.

Le traitement automatique des données GT passe par plusieurs étapes comme suit : La première étape est la construction de la base de données puis le chargement des données par le système. La seconde étape est la modélisation du terrain à partir des connaissances et la représentation des données récoltées. La troisième étape est le filtrage des données et la recherche de motifs pour l'identification de la position du maximum du signal. La recherche du maximum

consiste à estimer un score pour chaque donnée récoltée. La figure 6.39 présente les résultats de cette étape où le score est exprimé par la couleur de la position sur le terrain.

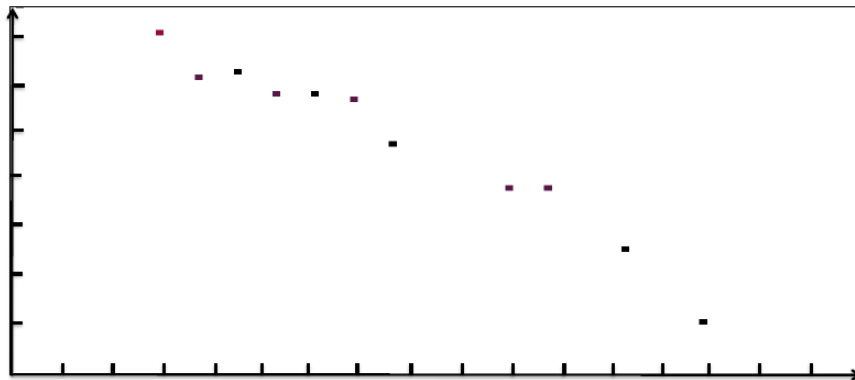


FIGURE 6.40 – Points potentiels de détection sélectionnés par l’algorithme de la détection automatique par GT.

La quatrième étape est la sélection des points potentiels de détection en se basant sur les scores calculés dans l’étape précédente et le signal détecté sur chaque position. Les points potentiels de détection constituent la base pour l’obtention du tracé de la canalisation. La cinquième étape est l’évaluation des points potentiels sélectionnés par l’étude de la cohérence des angles. Le but de cette étape est de s’assurer d’avoir sélectionné le point de détection le plus adéquat dans une acquisition. Si un point voisin correspond mieux que le point sélectionné, ce dernier est déclassé au profit de son voisin. Enfin, la validation des points de détection est effectuée. La figure 6.40 présente les points de détection retenus par le système lors de cette étude.

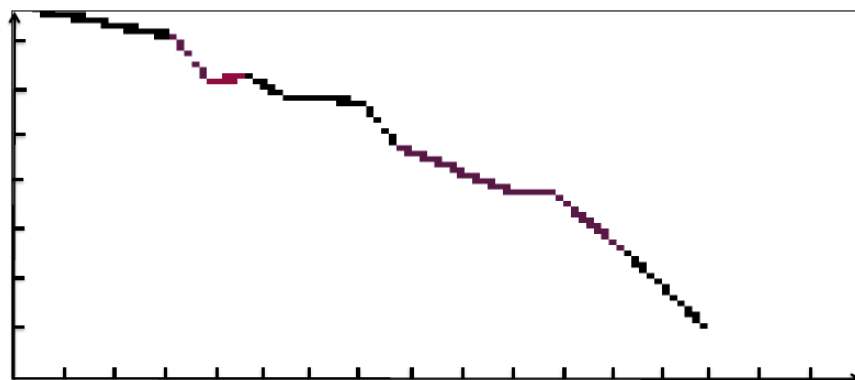


FIGURE 6.41 – Résultat de la détection automatique par GT : Tracé de la canalisation PE de gaz.

La sixième et dernière partie est la détection du tracé de la canalisation à partir des points de détection retenus précédemment. Des niveaux de confiance sont attribués aux portions du tracé en fonction des points de détection retenus, de leurs scores, du signal détecté et des anomalies du tracé. Le tracé de la canalisation détectée par le système de détection automatique par GT sur le terrain Made-Toulon est présenté dans la figure 6.41

L’analyse des résultats indique que le tracé obtenu correspond bien à la canalisation sur une grande partie du tracé détecté mais certaines portions de ce dernier présentent des anomalies. Néanmoins, le système leur attribue un niveau de confiance affaibli. L’origine de ces anomalies provient de la qualité des données obtenues et de la difficulté de retrouver le point potentiel de

détection réel car l'analyse manuelle des données n'a pas permis de le sélectionner. De plus, la proximité avec le point d'injection du signal pourrait être l'origine de la diffusion du signal dans le sous-sol. En effet, l'efficacité du GT n'est pas garantie si une distance importante n'est pas assurée entre le point d'injection et la zone de détection car le signal se propage vite dans le terrain et la détection peut être erronée.

### 6.3.3.2 Détection automatique par GPR

La campagne d'acquisitions GPR a permis de réaliser plusieurs passages GPR en longitudinal et en horizontal pour permettre de détecter les deux réseaux. Pour traiter les données acquises lors de cette campagne nous nous intéressons à deux paramètres pris en entrées pour le traitement automatique des radargrammes par la méthode adaptative. Deux paramètres qui sont restés fixes jusqu'à cette campagne et qui montrent leur variabilité en fonction des données. Les données acquises lors de cette campagne ont montré l'influence de ces paramètres qui méritent d'être exposés :

**Seuil de fausses alarmes autorisées :** c'est un paramètre d'entrée de la méthode adaptative qui fixe le nombre de blobs à retourner. Il a été convenu lors des expériences menées dans le cadre du projet G4M que la valeur de ce paramètre est fixée à 0.5.

**Seuil de détection :** c'est un paramètre d'entrée du système de détection automatique qui limite le nombre de réseaux à rechercher.

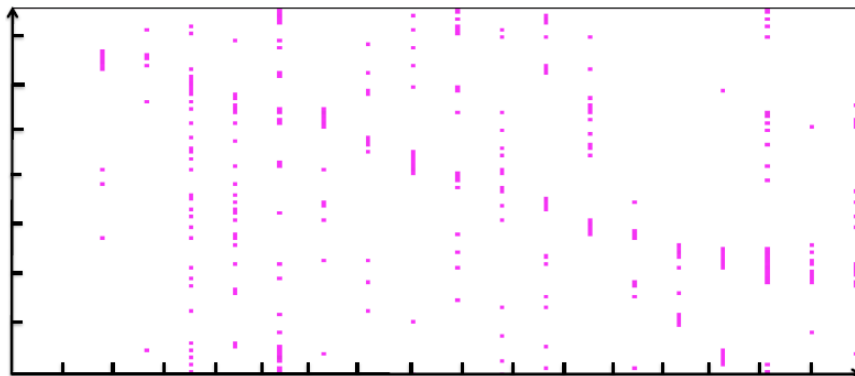


FIGURE 6.42 – Filtrage des résultats de la détection adaptative avec un seuil de fausses alarmes fixé à 0.5.

Après le filtrage des résultats de la méthode adaptative avec un seuil de fausses alarmes à 0.5, les blobs retenus sont présentés dans la figure 6.42. La détection automatique de réseaux enterrés sur ces données a permis d'obtenir les résultats de la figure 6.43. Sept réseaux droits sont détectés avec un seuil de détection à 400.

Le nombre de réseaux retournés est très important d'autant plus qu'il s'agit pour la plupart de faux réseaux. Il est donc important de réduire le seuil de détection. Avec la valeur 500, seulement deux réseaux sont détectés comme indiqué dans la figure 6.44.

Pour explorer ces données et ces paramètres, nous testons à nouveau la méthode adaptative avec d'autres valeurs du paramètre seuil de fausses alarmes. Un résultat intéressant obtenu avec un seuil de détection à 0.7 est présenté dans la figure 6.45 et les résultats de détection automatique de réseaux enterrés avec un seuil de détection à 60 sont présentés dans la figure 6.46.

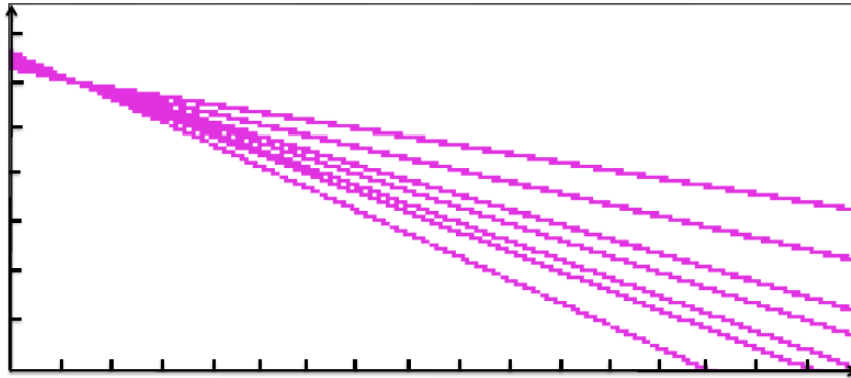


FIGURE 6.43 – Sept réseaux détectés avec seuil détection à 400.

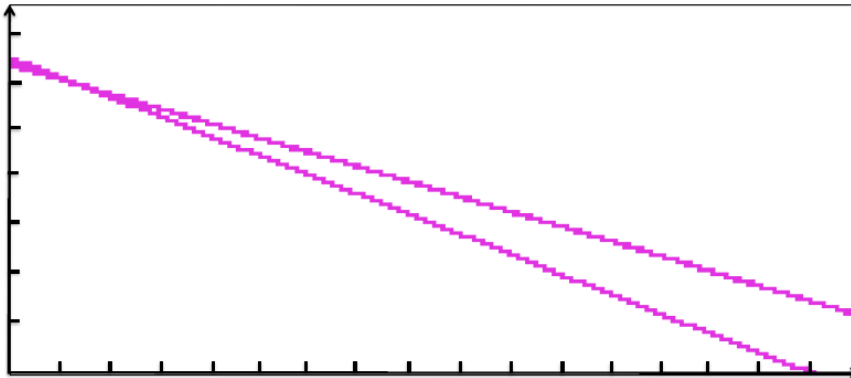


FIGURE 6.44 – Deux réseaux détectés avec seuil détection à 500.

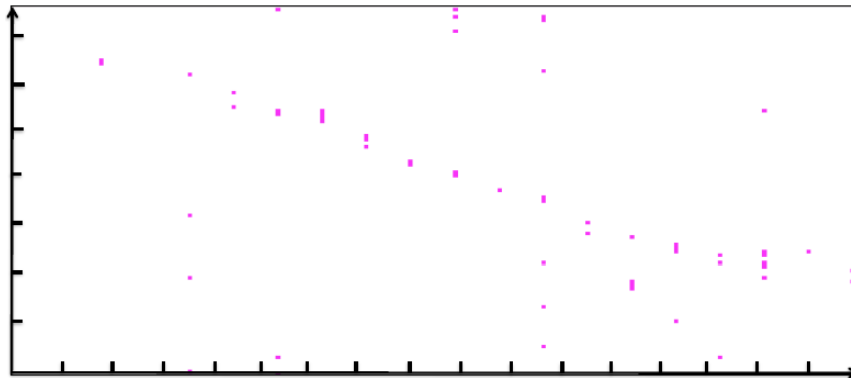


FIGURE 6.45 – Filtrage des résultats de la détection adaptative avec un seuil de fausses alarmes fixé à 0.7.

### 6.3.3.3 Détection automatique par fusion multi-capteurs

À présent, il s'agit de fusionner les résultats du GPR et de l'EM. Deux réseaux sont recherchés, l'un a été détecté par les deux capteurs et l'autre par le GPR uniquement.

La figure 6.47 présente le résultat de la fusion du GPR et du GT. Comme indiqué, les deux réseaux existants sont bien distingués par l'algorithme mais un seul tracé a été validé par l'algorithme. Cela est sûrement dû à un manque de confiance lié à la détection GPR. En effet, même si les points de détection ont été filtrés et retenus, ces derniers n'ont pas suffi pour conclure



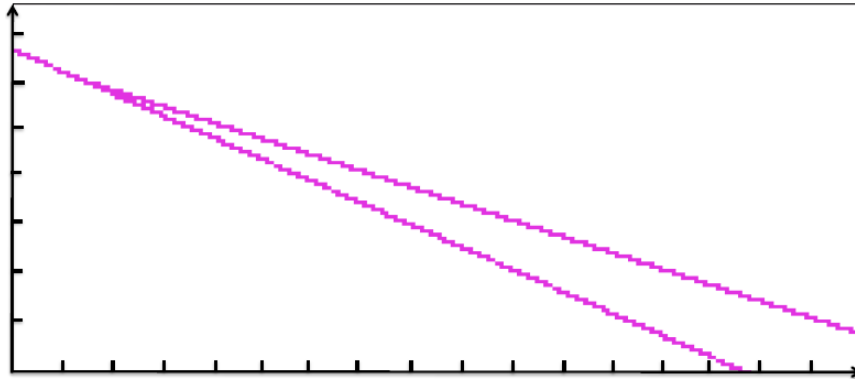


FIGURE 6.46 – Deux réseaux détectés avec seuil détection à 60.

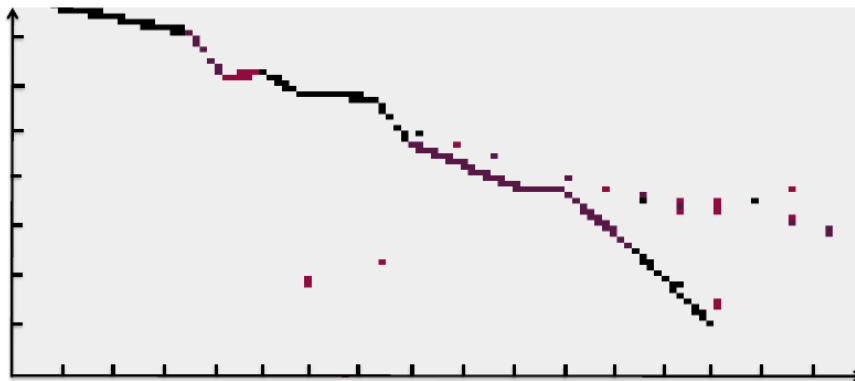


FIGURE 6.47 – Résultats de détection multi-capteurs GT/GPR.

à un tracé.

## 6.4 Synthèse

Les résultats présentés dans le présent chapitre ont prouvé qu'il était possible de mettre en place une méthode automatique capable de détecter les réseaux enterrés à partir des données multi-capteurs, des informations a priori et des connaissances contextuelles.

La détection automatique par GPR proposée est basée sur plusieurs approches. Elle a montré que chaque approche peut apporter un avantage en plus. La question qui se pose à présent est de trouver un compromis dans le choix d'une approche principale ou d'un modèle fusionnant plusieurs approches. Il reste toutefois un nombre important de paramètres à régler mais cette tâche ne peut être fructueuse qu'avec la construction d'une importante base de données afin d'évaluer les algorithmes et leurs résultats sur une importante quantité de données.

La détection automatique proposée dans le présent chapitre par EM a prouvé son efficacité lors des tests réalisés au cours de nos travaux. Elle permet de détecter le réseau enterré de manière efficace et fiable. Néanmoins, les campagnes d'acquisition réalisées nous ont permis de mener des tests sur le mode le plus fiable qui est le mode actif. De ce fait, il est important de tester le système sur d'autres données avec les deux autres modes d'utilisation de la technique pour pouvoir évaluer et valider l'approche implémentée.

La détection automatique par GT a montré son efficacité sur les deux jeux de données testés. De plus, la détection d'anomalies du tracé permet de réduire le niveau de confiance attribué aux portions concernées et ainsi avertir l'opérateur. L'approche de recherche des points potentiels de détection a réussi à mieux situer le tracé. Néanmoins elle reste sensible aux faiblesses de la technique comme la diffusion massive du signal dans le sous-sol à proximité du point d'injection.

Le manque de données a constitué un obstacle majeur pour l'optimisation, le test et l'évaluation des algorithmes implémentés durant cette thèse. De plus, il y a un ensemble de paramètres à fournir pour l'exécution des algorithmes qui ne sont pas maîtrisés par manque d'expertise. En effet, ces paramètres varient considérablement des données d'une campagne d'acquisition à une autre ; il est donc très difficile de les quantifier et de les généraliser en se basant uniquement sur un jeu de données par crainte de sur-apprendre sur ces dernières.

La fusion multi-capteurs permet de regrouper l'ensemble des réseaux détectés en utilisant plusieurs approches. Certaines approches sont plus innovantes que d'autres. De plus, toutes les approches n'ont pas pu être implémentées même si leur étude peut apporter une amélioration des résultats. Les données des campagnes d'acquisition ont permis de traiter plusieurs cas de figure : la fusion multi-capteurs GPR-EM et GPR-GT. Dans les deux cas, il était question de détecter un réseau préalablement connu par un détecteur discriminant puis de rechercher l'ensemble des réseaux présents sur le terrain avec le GPR.

Lors de ces essais, le croisement des données multi-capteurs a mis au point trois cas de fusion particuliers : (1) La fusion d'un réseau détecté par GPR et par EM : le même réseau est détecté à la fois par l'EM mais aussi par le GPR. Des conflits liés au positionnement du réseau et à la précision du tracé peuvent se produire dans ce genre de situation. (2) La fusion d'un réseau détecté par EM avec d'autres réseaux détectés par GPR : le GPR n'a pas détecté le réseau recherché par l'EM. Dans ce cas les résultats sont complémentaires. Le risque dans ce genre de situation est la détection décalée sur GPR par rapport au terrain qui donnerait l'impression d'avoir un second réseau. (3) La fusion d'un réseau détecté par GT et par GPR avec un autre réseau détecté uniquement par le GPR : il s'agit ici de fusionner deux réseaux détectés par le GPR dont l'un est détecté aussi avec le GT. Deux problèmes peuvent se poser dans une situation similaire, la discrimination des réseaux détectés par le GPR et la précision du réseau détecté aussi par le GT.

# Conclusion et Perspectives



# Conclusion et Perspectives

---

## 7.1 Conclusion

Au cours de cette thèse nous nous sommes intéressé à la problématique de la géodétection des réseaux enterrés. Tout au long de ce manuscrit, nous avons tenté d'identifier les difficultés de ce domaine et d'apporter des solutions pour améliorer les techniques de géodétection et mettre en place de nouvelles procédures et assurer la fiabilité et la précision des résultats obtenus. Pour commencer, nous avons étudié la méthodologie et les techniques de géodétection utilisées actuellement par l'opérateur. Cette étude a soulevé l'importance de la maîtrise de l'environnement et du contexte pour assurer la fiabilité des résultats de détection.

L'étude et l'audit de la méthodologie de géodétection actuelle a permis de relever des anomalies et des manquements qui sont corrigés par la nouvelle méthode que nous avons proposé. À travers un processus de plusieurs phases, son exécution permet de s'assurer qu'aucune tâche n'est négligée ou oubliée.

L'étude et l'évaluation des techniques de détection a été une tâche fastidieuse et a nécessité de mobiliser des moyens pour la réalisation de campagnes d'acquisition. Le test de ces outils sur le terrain nous a permis d'identifier des problèmes concrets rencontrés tous les jours sur le terrain par les opérateurs. Nous avons donc tenté d'apporter des solutions aux différents problèmes identifiés.

Le test et l'évaluation des techniques utilisées et des entrées/sorties de chacune a permis d'identifier leurs limites dans un premier temps pour les améliorer dans un second temps, en proposant de prendre en compte les informations contextuelles et les informations à priori pouvant les influencer. De plus, le traitement automatique des données issues de chacune des techniques de détection permet d'obtenir un résultat numérique sous forme de tracé représenté dans le terrain d'étude avec un niveau de confiance qui lui est attaché. La proposition de plusieurs systèmes de détection automatique mono-capteur pour chaque technique permet de traiter les données indépendamment tout en permettant la fusion multi-capteurs. Cette approche garantit le fonctionnement correct du système général quel que soit le nombre de techniques de détection utilisées.

Avant tout, l'objectif de cette thèse a été la preuve du concept "Géodétection multi-matériaux multi-métiers", c'est à dire, prouver qu'il est possible de mettre en place un système capable de détecter automatiquement divers réseaux en fusionnant les résultats de nombreuses techniques de détection à travers une chaîne de traitement complète allant des données acquises sur le terrain jusqu'au résultat unique et précis.

Pour ce faire, notre démarche avait pour principal but d'automatiser le processus de géodétection des réseaux enterrés en fusionnant les résultats issus de chacune des techniques intégrées puis d'afficher le tracé des réseaux résultants en 2D. Dans un premier temps nous avons mis en place un processus de détection automatique basé sur les données issues de chaque technique à part (GPR, EM et GT) et sur les connaissances contextuelles. Par ailleurs, la technique RFID n'étant pas une méthode de détection à part entière, nous n'avons pas proposé un processus de détection dédié.

Une des approches d'amélioration proposées dans cette thèse est la prise en compte d'informations a priori et des informations contextuelles. En effet, notre étude a permis d'identifier les informations a priori sur les réseaux recherchés pouvant guider l'opérateur lors de l'acquisition des données, aider le système afin d'optimiser la recherche des réseaux d'un coté et de l'autre coté, pour réduire les incertitudes et attacher un meilleur niveau de confiance aux détections finales. Les informations contextuelles quant à elles permettent d'estimer le niveau de fiabilité des données obtenues par chaque technique en fonction des conditions du terrain, du mode utilisé et des influences extérieures. Pour que ces informations soient prises en compte par le système, une approche de représentation de connaissances basée sur des ontologies est mise en place. De plus, des mécanismes de raisonnement ont été étudiés et deux approches sont explorées : le raisonnement par des règles SWRL qui a pu être intégré dans le système mais qui possède des limites et une approche de raisonnement basée sur la méréologie de Lesniewski implémentée en Coq mais qui n'a pas pu être testée sur des données réelles par manque de temps.

Une des difficultés majeures rencontrées au cours de cette thèse est le problème de géoréférencement des données pour mettre en application une approche de raisonnement spatial et rendre la détection automatique du tracé possible. En effet, les données acquises sur le terrain sont rarement sauvegardées et leur géoréférencement n'est jamais fait. De plus l'absence d'un GPS a été un frein majeur pour l'avancement de nos travaux. Pour y remédier, nous avons mis en place un protocole de géoréférencement manuel et une modélisation spatiale du terrain d'étude permettant d'associer à chaque donnée acquise une position spatiale. A travers ce protocole, le traitement automatique des données et le raisonnement spatial sont rendus possibles. Le raisonnement spatial a pour but d'identifier le tracé du réseau enterré à partir des points de détection par la recherche de segments cohérents et l'élimination des données bruitées.

Trois approches sont proposées dans ce manuscrit : une approche de raisonnement spatial en utilisant des règles spatiales sous forme de règles SWRL est mise en place dans un premier temps. Cette approche est vite abandonnée à cause du manque d'expressivité des règles SWRL et de la diminution rapide des performances sur les données réelles. La seconde approche de raisonnement spatial est basée sur l'extension des travaux de Tarski en Coq, elle a pour but de rechercher le tracé par la définition de plusieurs règles spatiales et par la modélisation des points de détection sous forme de sphères. L'approche est innovante et a permis d'avoir des résultats prometteurs sur les données simulées. La troisième approche est basée sur des principes de raisonnement spatial et est implémentée en Java, elle consiste à rechercher des segments et à éliminer les fausses alarmes en calculant divers niveaux de confiance. Intégrant plusieurs mécanismes de fusion basés sur la confiance, elle permet de détecter des tracés rapidement en associant des niveaux de confiance aux portions du tracé résultants. Cette dernière approche a été implémentée et intégrée dans le prototype G4M.

Le dernier problème emblématique de cette thèse est la fusion multi-capteurs. Les résultats de détection mono-capteur sont obtenus par la combinaison de plusieurs paramètres qui s'appuient

à leur tour sur plusieurs données, connaissances et informations. De ce fait, la fusion intervient à plusieurs niveaux dans le processus, ce qui explique l'utilisation de combinaisons linéaires simples.

L'apport principal de cette thèse est la preuve du concept G4M par l'étude et la preuve de la faisabilité d'une fusion multi-capteurs pour améliorer les résultats de géodétection. En effet, la proposition de plusieurs approches de fusion multi-capteurs et l'implémentation d'un système assurant l'exécution de la chaîne de traitement a permis d'améliorer les résultats de chaque capteur. Des difficultés liées à l'absence d'un GPS ont été rencontrées mais la proposition d'une méthode alternative pour la géolocalisation et géoréférencement des données a permis de contourner le problème.

Aujourd'hui nous n'avons pas résolu tous les problèmes de la géodétection mais nos travaux ont permis d'explorer en profondeur ce domaine, de bien identifier les verrous et les problèmes qui doivent être résolus en urgence et ceux qui doivent être réglés à moyen puis à long terme. Nos propositions ont permis d'apporter des solutions basiques dans un premier temps et des solutions plus avancées qui pourraient être mise en œuvre par la suite.

Nos travaux ont également permis de mettre en place un premier processus automatique multi-capteurs complet. Les résultats obtenus ont permis de relever le challenge G4M et ont ouvert un grand nombre de perspectives et de possibilité d'amélioration.

Le système que nous avons proposé a été implémenté dans le prototype G4M présenté ci-dessous. Les résultats de géodétection qu'il a obtenus sont très encourageants et c'est une grande avancée dans le monde de la géodétection. En implémentant un processus automatique multi-capteurs complet, ses résultats ont donc permis de relever le challenge G4M et ont ouvert un grand nombre de perspectives et de possibilité d'amélioration.



## 7.2 Perspectives

Durant cette thèse, le manque de données et d'expertise a constitué un frein majeur. Le protocole d'acquisition est compliqué et nous avons dû réaliser les acquisitions nous même pour constituer une réelle base de données. En effet, les travaux des trois thèses avaient pour objectif de constituer la première base de données et proposer les premiers traitements pour la preuve du concept G4M et ces objectifs ont été atteints. Cependant, pour évaluer et améliorer les solutions apportées, il est important de réaliser des tests pour récolter de nouvelles données et informations et enrichir les bases de données actuelles.

L'ensemble des travaux réalisés ont été faits en 2D  $(X, Y)$ , le  $Z$  a été négligé au cours de nos travaux. La raison est que nous n'avons pas pu atteindre un niveau de fiabilité des données élevées, la qualité des données n'a jamais atteint un niveau élevé pour permettre d'estimer la profondeur. Le seul moyen d'obtenir la profondeur serait à partir des données fournies par l'EM ou en estimant la profondeur des ondes envoyés par le GPR. Les données GPR Blobs et Hyperboles contiennent ces informations mais l'évaluation de ces dernières leur a attribué un niveau de confiance médiocre ce qui nous a poussé à laisser cette partie du travail comme perspective.

Les résultats obtenus au cours des travaux de cette thèse sont très prometteurs. Cependant, plusieurs limitations peuvent être pointées et constituer des pistes pour des travaux futurs. Les possibilités d'automatisation et l'amélioration de la géodétection sont nombreuses et variées. Il paraît tout d'abord indispensable de travailler sur la sauvegarde des données issues des capteurs et de l'identification des bons paramètres qui influent sur la qualité de la géodétection. La mise en place d'une telle approche doit être réalisée dans les techniques de détection par leur constructeur afin de fournir des bases de données enrichies sur lesquelles des travaux d'analyse et de traitement de données peuvent être fournis. De plus, l'amélioration de l'interprétation du signal issu des techniques de détection est une orientation majeure à explorer pour améliorer la géodétection. En effet, les techniques de détection actuelles ont un long chemin à faire devant elle en terme de qualité du signal. Aujourd'hui elles sont imprécises et dépendantes des paramètres environnementaux. Enfin, il est primordial de maîtriser l'ensemble des paramètres qui influent sur le signal et dont les résultats dépendent.

Le traitement des données issues du capteur basé sur les puces communicantes n'a pas pu être intégré dans ce premier prototype par manque de temps. Il faut donc prévoir de l'implémenter dans les futurs travaux

L'estimation de la profondeur est une difficulté majeure qui n'a pas pu être résolue au cours de cette thèse et qui ne dépend pas de notre volonté. En effet, la profondeur est une information fournie par l'EM en fonction du mode de détection utilisé ou par la détection automatique des hyperboles GPR. Le raisonnement sur l'ensemble de ces données permettra d'estimer la profondeur. Cependant, la profondeur fournie par les méthodes de détection automatique d'hyperbole est incohérente. De plus, le manque de données EM avec différents modes n'a pas permis de mettre un place une approche de calcul de la profondeur.

L'identification du tracé du réseau est une tâche qui nécessite d'être approfondie. En effet, plusieurs cas doivent être pris en compte comme l'identification des objets en fonction de l'angle, de la profondeur et du changement de direction (tuyau, canalisation, coude, baïonnette, etc).



# Bibliographie



# Bibliographie

---

- [1] Guillaume Terrasse, Jean-Marie Nicolas, Emmanuel Trouvé, and Emeline Drouet. Application of the curvelet transform for pipe detection in GPR images. In *IGARSS*, pages 4308–4311. IEEE, 2015. *Citée aux pages 6, 62, and 95.*
- [2] Q. Hoarau, Guillaume Ginolhac, Abdourrahmane M. Atto, and Jean-Marie Nicolas. Robust adaptive detection of buried pipes using GPR. *Signal Processing*, 132 :293–305, 2017. *Citée aux pages 6 and 95.*
- [3] Richard Dapoigny and Patrick Barlatier. A coq-based axiomatization of tarski’s mereogeometry. In *Proceedings of the 12th International Conference on Spatial Information Theory - Volume 9368*, COSIT 2015, pages 108–129, New York, NY, USA, 2015. Springer-Verlag New York, Inc. *Citée aux pages 9, 73, and 110.*
- [4] France. *Guide Technique relatif aux travaux à proximité des réseaux*. Annexe de la norme NF S70-003, Version 1 Juin 2012. *Citée aux pages 13, 20, 21, 160, 161, 162, 165, 166, 167, 168, and 169.*
- [5] France. *Travaux à proximité des réseaux enterrés et investigations complémentaires sans fouille*. INRS Institut National de Recherche et de Sécurité, Avril 2014. *Citée aux pages 13, 25, 159, 160, 161, 162, 168, and 169.*
- [6] FNEDRE. La géodétection des réseaux enterrés fnedre, 2017. [www.fnedre.org](http://www.fnedre.org). *Citée aux pages 13 and 15.*
- [7] J.P. Gyéjacquot. *Mise en oeuvre des réseaux techniques de distribution : Eau, électricité, gaz, chaleur, froid, télécommunications*. Guide des bonnes pratiques. Le Moniteur Editions, 2016. *Citée aux pages 16, 17, 18, 19, and 20.*
- [8] M. Dupeux. *Aide-mémoire de Science des matériaux*. Sciences de l’ingénieur. Dunod, 2004. *Citée à la page 17.*
- [9] J.L. Favre. *Sécurité des ouvrages, risques : modélisation de l’incertain, fiabilité, analyse des risques*. Technosup (Paris). Ellipses, 2004. *Citée à la page 17.*
- [10] R. Bayon. *VRD, voirie-réseaux divers, terrassements, espaces verts : aide-mémoire du concepteur*. Eyrolles, 1998. *Citée aux pages 18 and 19.*
- [11] JFM Conseils. *Détection des réseaux enterrés*. JFM Conseils, 2016. *Citée aux pages 21, 22, and 23.*
- [12] FNEDRE. *Techniques de détection de réseaux enterrés*. Fédération Nationale des Entreprises de Détection de Réseaux Enterrés. *Citée aux pages 21, 22, and 24.*
- [13] AFNOR. La norme nf s70-003-3 partie 3 : Géoréférencement des ouvrages. 2012. *Citée aux pages 22 and 23.*
- [14] STRATAGEM974. *Détection des réseaux enterrés par méthodes non-destructives*. STRATAGEM974. *Citée à la page 24.*
- [15] Pierre-Luc DALLAIRE. *Utilisation d’un géoradar afin de caractériser la stratigraphie de la tourne et estimer le carbone organique accumulé dans une tourbière boréale, région d’Eastmain, Baie James, Québec*. PhD thesis, Université du Québec à Montréal, Octobre 2010. *Citée à la page 26.*
- [16] Nerouz Boubaki. *Détection de cavités par deux méthodes géophysiques : radar de sol et mesures de résistivités électriques*. PhD thesis, Université Paris Sud, Juillet 2013. *Citée aux pages v and 26.*

- [17] Andrea Benedetto, Fabio Tosti, Luca Bianchini Ciampoli, and Fabrizio D’Amico. An overview of ground-penetrating radar signal processing techniques for road inspections. 05 2016. *Citée aux pages v and 27.*
- [18] Rafaël PEREZ. *Contribution à l’analyse théorique et expérimentale de radargrammes GPR. Performances des antennes : apports d’une configuration multistatique*. PhD thesis, Université Limoges, Octobre 2005. *Citée à la page 27.*
- [19] Albane SAINTENOY. *Radar de sol : imagerie du sous-sol et quantification de paramètres physiques*. PhD thesis, Université Paris Sud, Novembre 2014. *Citée aux pages 27 and 28.*
- [20] Dick Stenmark. The relationship between information and knowledge. In *In Proceedings of IRIS 24*, pages 11–14, 2001. *Citée à la page 33.*
- [21] Ana-Maria Olteanu Raimond. Fusion de connaissances imparfaites pour l’appariement de données géographiques : proposition d’une approche s’appuyant sur la théorie des fonctions de croyance. 01 2008. *Citée aux pages 34 and 35.*
- [22] Cyril De Runz. *Imperfection, time and space : modeling, analysis and visualization in an archaeological GIS*. Theses, Université de Reims - Champagne Ardenne, November 2008. *Citée aux pages 34 and 35.*
- [23] R Wadsworth PF Fisher, AJ Comber. Land use and land cover : contradiction or complement. *Re-presenting GIS*, pages 85–98, 2005. *Citée à la page 34.*
- [24] P. Everaere. Contribution à l’étude des opérateurs de fusion propositionnelle : manipulabilité et fusion disjonctive, 2006. *Citée aux pages 35 and 36.*
- [25] F. Laporterie. *Représentations hiérarchiques d’images avec des pyramides morphologiques : application à l’analyse et à la fusion spatio-temporelle de données en observation de la Terre*. 2002. *Citée à la page 35.*
- [26] Lucien Wald. Definitions and terms of reference in data fusion. In ISPRS, editor, *Joint EARSeL/ISPRS Workshop "fusion of sensor data, knowledge sources and algorithms for extraction and classification of topographic objects"*, volume 32, pages 2–6, Valladolid, Spain, June 1999. ISPRS. *Citée à la page 35.*
- [27] Sophie Bruge. *Multimodal data registration and fusion for cardiac resynchronisation therapy optimisation*. Theses, Université Rennes 1, March 2017. *Citée aux pages 35 and 36.*
- [28] Isabelle Bloch, Olivier Colliot, Oscar Camara, and Thierry Géraud. Fusion of spatial relationships for guiding recognition, example of brain structure recognition in 3d mri. *Pattern Recognition Letters*, 26 :449–457, 2005. *Citée à la page 36.*
- [29] Richard Dapoigny and Patrick Barlatier. Formal foundations for situation awareness based on dependent type theory. *Inf. Fusion*, 14(1) :87–107, January 2013. *Citée à la page 36.*
- [30] Thomas R. Gruber. A translation approach to portable ontology specifications. *Knowl. Acquis.*, 5(2) :199–220, June 1993. *Citée à la page 37.*
- [31] Willem Nico Borst and W.N. Borst. *Construction of Engineering Ontologies for Knowledge Sharing and Reuse*. PhD thesis, 9 1997. *Citée à la page 37.*
- [32] Amine Ahmed Benyahia. *Toward a methodology for the construction of a telemonitoring system : application to a platform dedicated to home monitoring of people with heart failure*. Theses, Université de Technologie de Belfort-Montbeliard, May 2015. *Citée aux pages 38 and 41.*
- [33] Mike Uschold and Michael Gruninger. Ontologies : Principles, methods and applications. *KNOWLEDGE ENGINEERING REVIEW*, 11 :93–136, 1996. *Citée à la page 38.*
- [34] Asuncion Gomez-Perez. Ontological engineering : A state of the art, 1999. *Citée aux pages 39 and 41.*

- [35] Bachimont Bruno. L'intelligence artificielle comme écriture dynamique : de la raison graphique à la raison computationnelle. 1999. *Citée aux pages 39 and 41.*
- [36] Mike Uschold and Martin King. Towards a methodology for building ontologies. In *In Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing, held in conjunction with IJCAI-95*, 1995. *Citée à la page 39.*
- [37] Arnaud Vandecasteele. *Expert knowledge ontological modeling for the analyse of abnormal behaviour : application for maritime surveillance*. Theses, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, October 2012. *Citée aux pages 39, 40, and 41.*
- [38] Nicola Guarino and Christopher Welty. Identity, unity, and individuality : Towards a formal toolkit for ontological analysis. 06 2000. *Citée à la page 39.*
- [39] B. Bachimont. Engagement sémantique et engagement ontologique : conception et réalisation d'ontologies en ingénierie des connaissances. *Ingénierie des Connaissances : Evolutions récentes et nouveaux défis*, 1 :1–16, 2000. *Citée à la page 39.*
- [40] Nathalie Hernandez. *Domain ontologies for context modeling in information retrieval*. Theses, Université Paul Sabatier - Toulouse III, December 2005. *Citée aux pages 39 and 40.*
- [41] Maria Aydee Sanchez Santana. *Ontology for traceability of medical imaging manipulation*. Theses, Université de Franche-Comté, October 2014. *Citée à la page 40.*
- [42] Riichiro Mizoguchi, Kouji Kozaki, Toshinobu Sano, and Yoshinobu Kitamura. Construction and deployment of a plant ontology. In *EKAW*, volume 1937 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 113–128. Springer, 2000. *Citée à la page 41.*
- [43] Alexander Maedche. *Ontology Learning for the Semantic Web*, volume 665 of *The International Series in Engineering and Computer Science*. Springer Verlag, 1 edition. Dieses Buch untersucht verschiedene Ansätze zur Automatisierung von Wissensprozessen für verschiedene Internetquellen. *Citée à la page 41.*
- [44] Thomas R. Gruber. A translation approach to portable ontology specifications. *KNOWLEDGE ACQUISITION*, 5 :199–220, 1993. *Citée à la page 41.*
- [45] Mike Uschold and Martin King. Towards a methodology for building ontologies. In *In Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing, held in conjunction with IJCAI-95*, 1995. *Citée à la page 41.*
- [46] Michael Grüninger and Mark S. Fox. Methodology for the design and evaluation of ontologies. In *In Proceedings of the Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing*, 1995. *Citée à la page 41.*
- [47] Oscar Corcho, Mariano Fernández-López, and Asunción Gómez-Pérez. Methodologies, tools and languages for building ontologies : Where is their meeting point? *Data Knowl. Eng.*, 46(1) :41–64, July 2003. *Citée à la page 41.*
- [48] Mariano Fernández-López and Asunción Gómez-Pérez. Overview and analysis of methodologies for building ontologies. *Knowl. Eng. Rev.*, 17(2) :129–156, June 2002. *Citée à la page 41.*
- [49] Douglas B. Lenat and R. V. Guha. *Building Large Knowledge-Based Systems ; Representation and Inference in the Cyc Project*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1st edition, 1989. *Citée à la page 41.*
- [50] Mari Carmen Suárez-Figueroa, Asunción Gómez-Pérez, and Mariano Fernández-López. *The NeOn Methodology for Ontology Engineering*, pages 9–34. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012. *Citée à la page 41.*

- [51] Brigitte Biébow, Sylvie Szulman, and Av Clément. TERMINAE : A Linguistics-Based Tool for the Building of a Domain Ontology. In Dieter Fensel and Rudi Studer, editors, *Knowledge Acquisition, Modeling and Management*, volume 1621 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 49–66. Springer Berlin Heidelberg, 1999. *Citée à la page 41.*
- [52] Konstantinos Kotis, George A. Vouros, and Jerónimo Padilla Alonso. Hcome : A tool-supported methodology for engineering living ontologies. In Christoph Bussler, Val Tannen, and Irimi Fundulaki, editors, *Semantic Web and Databases*, pages 155–166, Berlin, Heidelberg, 2005. Springer Berlin Heidelberg. *Citée à la page 41.*
- [53] Arnaud Vandecasteele and Aldo Napoli. Modélisation ontologique pour l’analyse de comportements de navires à risques. In *Colloque SAGEO 2013 - Spatial Analysis and Geomatics*, page 12 pages, Brest, France, September 2013. *Citée aux pages 42, 44, and 45.*
- [54] Bhavani Sridharan, Hepu Deng, and Brian Corbitt. An ontology-driven topic mapping approach to multi-level management of e-learning resources, 01 2009. *Citée aux pages v and 43.*
- [55] Wafa Meftah. *Ontological approach for modeling and reasoning about trajectories : taking into account the thematics, temporals and spatials aspects*. Theses, Université de La Rochelle, September 2013. *Citée à la page 45.*
- [56] Christian Bessière, Jérôme Euzenat, Robert Jeansoulin, Gérard Ligozat, and Sylviane Schwer. Raisonement spatial et temporel. In *6e journées nationales PRC-GDR intelligence artificielle*, pages 77–88, Grenoble, France, March 1997. Hermès. bessiere1997a. *Citée à la page 45.*
- [57] Juan Chen, Anthony G. Cohn, Dayou Liu, Shengsheng Wang, Jihong Ouyang, and Qianyuan Yu. A survey of qualitative spatial representations. *The Knowledge Engineering Review*, 30(1) :106–136, 2015. *Citée à la page 45.*
- [58] J. E. Tiles. Parts and places : the structures of spatial representation. *Mind*, 109(436) :856–863, 2000. *Citée à la page 45.*
- [59] Andrew Frank and Werner Kuhn. *Spatial Information Theory A Theoretical Basis for GIS : International Conference COSIT ’95 Semmering, Austria, September 21–23, 1995 Proceedings*. 01 1995. *Citée aux pages 45 and 47.*
- [60] Jordi Inglada and Julien Michel. Qualitative spatial reasoning for high-resolution remote sensing image analysis. *geoscience and remote sensing, ieee transactions*. 2009. *Citée à la page 45.*
- [61] Michael Spranger, Jakob Suchan, and Mehul Bhatt. Robust natural language processing - combining reasoning, cognitive semantics and construction grammar for spatial language. *CoRR*, abs/1607.05968, 2016. *Citée à la page 45.*
- [62] William G. Kennedy, Magdalena D. Bugajska, Matthew Marge, William Adams, Benjamin R. Fransen, Dennis Perzanowski, Alan C. Schultz, and J. Gregory Trafton. Spatial representation and reasoning for human-robot collaboration. In *AAAI*, 2007. *Citée à la page 45.*
- [63] Ralf Hartmut Güting. An introduction to spatial database systems. *The VLDB Journal*, 3(4) :357–399, October 1994. *Citée à la page 45.*
- [64] Eliseo Clementini, Paolino Di Felice, and Daniel Hernández. Qualitative representation of positional information. *Artif. Intell.*, 95(2) :317–356, September 1997. *Citée aux pages 45 and 47.*
- [65] Christian Freksa. Using orientation information for qualitative spatial reasoning. In *Proceedings of the International Conference GIS - From Space to Territory : Theories and*

- Methods of Spatio-Temporal Reasoning on Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space*, pages 162–178, London, UK, UK, 1992. Springer-Verlag. *Citée aux pages 45 and 47.*
- [66] Arnaud Vandecasteele and Aldo Napoli. Modélisation ontologique pour l’analyse de comportements de navires à risques. In *Colloque SAGEO 2013 - Spatial Analysis and GEOmatics*, page 12 pages, Brest, France, September 2013. *Citée aux pages v and 46.*
- [67] Reinhard Moratz. Representing relative direction as a binary relation of oriented points. In *Proceedings of the 2006 Conference on ECAI 2006 : 17th European Conference on Artificial Intelligence August 29 – September 1, 2006, Riva Del Garda, Italy*, pages 407–411, Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, 2006. IOS Press. *Citée à la page 46.*
- [68] Alexander Scivos and Bernhard Nebel. The finest of its class : The natural point-based ternary calculus for qualitative spatial reasoning., 01 2004. *Citée à la page 47.*
- [69] Jiming Liu. A method of spatial reasoning based on qualitative trigonometry. *Artificial Intelligence*, 98 :137–168, 1997. *Citée à la page 48.*
- [70] B Gottfried. Reasoning about intervals in two dimensions. 6 :5324 – 5332 vol.6, 11 2004. *Citée à la page 48.*
- [71] Björn Gottfried. Qualitative similarity measures - the case of two-dimensional outlines. *Computer Vision and Image Understanding*, 110 :117–133, 2008. *Citée à la page 48.*
- [72] A. J. Roy and J. G. Stell. Spatial relations between indeterminate regions. *INTERNATIONAL JOURNAL OF APPROXIMATE REASONING*, 27 :205–234, 2000. *Citée à la page 48.*
- [73] S. Li and B. Nebel. Qualitative spatial representation and reasoning : A hierarchical approach. *The Computer Journal*, 50(4) :391–402, July 2007. *Citée à la page 48.*
- [74] Jian Wang and Yi Su. Fast detection of gpr objects with cross correlation and hough transform. 2013. *Citée à la page 62.*
- [75] Alessandro Simi, Stefania Bracciali, and Guido Manacorda. Hough transform based automatic pipe detection for array gpr : Algorithm development and on-site tests. 2008 :1 – 6, 06 2008. *Citée à la page 62.*
- [76] Sven Birkenfeld. Automatic detection of reflexion hyperbolas in gpr data with neural networks. 12 2010. *Citée à la page 62.*
- [77] Y. Larvor. *Notions de méréogéométrie : description qualitative de propriétés géométriques du mouvement et de la forme d’objets tridimensionnels*. 2004. *Citée à la page 73.*
- [78] L. Vieu. *SEMANTIQUE DES RELATIONS SPATIALES ET INFERENCE SPATIO-TEMPORELLES : UNE CONTRIBUTION A L’ETUDE DES STRUCTURES FORMELLES DE L’ESPACE EN LANGAGE NATUREL*. 1991. *Citée à la page 73.*
- [79] Y. Larvor. *Notions de méréogéométrie : description qualitative de propriétés géométriques du mouvement et de la forme d’objets tridimensionnels*. 2004. *Citée aux pages 73 and 74.*
- [80] Rafal Gruszczynski and Andrzej Pietruszczak. Full development of tarski’s geometry of solids. 14 :481–540, 12 2008. *Citée à la page 78.*
- [81] Guillaume Terrasse. *Geodetection of buried utilities from radar imagery*. Theses, Télécom ParisTech, March 2017. *Citée à la page 95.*
- [82] Thomas R. Gruber. A translation approach to portable ontology specifications. *KNOWLEDGE ACQUISITION*, 5 :199–220, 1993. *Citée à la page 105.*
- [83] Dennis Taylor. Increasing the expressiveness of owl through procedural attachments. 2009. *Citée à la page 106.*

- [84] Dizza Beimel and Mor Peleg. Using owl and swrl to represent and reason with situation-based access control policies. *Data and Knowledge Engineering*, 70(6) :596 – 615, 2011. *Citée à la page 109.*
- [85] Daniel Elenius, David Martin, Reginald Ford, and Grit Denker. Reasoning about resources and hierarchical tasks using owl and swrl. In Abraham Bernstein, David R. Karger, Tom Heath, Lee Feigenbaum, Diana Maynard, Enrico Motta, and Krishnaprasad Thirunarayan, editors, *The Semantic Web - ISWC 2009*, pages 795–810, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer Berlin Heidelberg. *Citée à la page 109.*
- [86] J. R. Guard. L. henkin. a theory of propositional types. *fundamenta mathematicae*, vol. 52 (1963), pp. 323–344. (see errata, *fundamenta mathematicae*, vol. 53 no. 1 (1963), p. 119.). *Journal of Symbolic Logic*, 30(3) :385–385, 1965. *Citée à la page 110.*
- [87] Pierre Castéran and Yves Bertot. *Interactive theorem proving and program development. Coq’Art : The Calculus of inductive constructions*. Texts in Theoretical Computer Science. Springer Verlag, 2004. Traduction en chinois parue en 2010. Tsinghua University Press. ISBN 9787302208136. *Citée à la page 111.*
- [88] Barry Smith and Cornelius Rosse. The role of foundational relations in the alignment of biomedical ontologies. pages 444–449, 2004. *Citée à la page 111.*
- [89] Matthieu Sozeau and Nicolas Oury. First-class type classes. In Otmane Ait Mohamed, César Muñoz, and Sofiène Tahar, editors, *Theorem Proving in Higher Order Logics*, pages 278–293, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer Berlin Heidelberg. *Citée à la page 112.*
- [90] Bas Spitters and Eelis van der Weegen. Type classes for mathematics in type theory. *CoRR*, abs/1102.1323, 2011. *Citée à la page 112.*
- [91] Richard Dapoigny and Patrick Barlatier. Specifying well-formed part-whole relations in coq. In Nathalie Hernandez, Robert Jäschke, and Madalina Croitoru, editors, *Graph-Based Representation and Reasoning*, pages 159–173, Cham, 2014. Springer International Publishing. *Citée à la page 112.*
- [92] SECTEUR. *Nos métiers : Détection de câbles et de canalisations enterrés*. SECTEUR Ingénierie et topographie, 2017. *Citée à la page 159.*
- [93] France. *arrêté du 15 février 2012*. Ministère de la transition écologique et solidaire, 2017. *Citée aux pages 160, 161, and 162.*
- [94] France. Guichet unique, 2017. [www.reseaux-et-canalisation.ineris.fr](http://www.reseaux-et-canalisation.ineris.fr). *Citée à la page 161.*
- [95] AFNOR. *Projet de norme AFNOR NF S70-003 - Point sur la nouvelle réglementation : Travaux à proximité des réseaux*. AFNOR, 2017. *Citée à la page 161.*
- [96] Jean-Pierre BRAZZINI. *Détection/Localisation des réseaux : Présentation de la norme NF S70-003 partie2*. AFNOR, 2013. *Citée à la page 161.*
- [97] ALCEN Groupe. Connaissances des énergies, 2017. <http://www.connaissancedesenergies.org/>. *Citée aux pages 164 and 165.*
- [98] RTE. Réseau de transport d’électricité, 2017. <http://www.rte-france.com/fr>. *Citée aux pages viii and 164.*
- [99] CRE. Commission de régulation de l’énergie, 2017. <http://www.cre.fr>. *Citée aux pages viii, 164, 165, and 166.*
- [100] ADEME GrDF. *Le fonctionnement des réseaux de gaz naturel*. GrDF et ADEME, 2011. *Citée aux pages viii, 164, and 165.*
- [101] TRAPIL. Société des transports pétroliers par pipeline, 2017. <https://www.trapil.com>. *Citée à la page 164.*



# Annexes



# Géodétection des réseaux enterrés

---

## A.1 Introduction

Dans le but de la prévention des risques liés aux travaux à proximité des réseaux enterrés, le gouvernement a établi un plan d'action basé une refonte de la réglementation. Cette refonte est constituée d'une procédure obligatoire favorisant la communication et l'échange entre les maîtres d'ouvrage et les exploitants des réseaux. Un guichet unique de télé-service est mis en place dans le but de permettre aux maîtres d'ouvrage d'obtenir la liste des exploitants des réseaux présents à proximité du futur chantier [92].

## A.2 Cadre réglementaire

### Refonte réglementaire de 2012

La refonte réglementaire sur l'encadrement des travaux à proximité des réseaux enterrés est constituée principalement d'une nouvelle loi qui s'intitule "Sécurité des réseaux souterrains, aériens et subaquatiques de transport et distribution". Elle est adoptée en 2012 et vise à renforcer la sécurité en agissant sur plusieurs leviers comme suit[5] :

- Premièrement, elle vise à améliorer la communication et la collaboration des principaux acteurs intervenant sur les réseaux par la mise à disposition d'un télé-service (le guichet unique) facilitant l'accès aux informations sur les réseaux et les coordonnées des différents exploitants dans la zone couvrant le futur chantier.
- Deuxièmement, elle a pour but de renforcer le rôle du responsable de projet et son implication dans la préparation des travaux et lors les investigations complémentaires dont la géodétection des réseaux enterrés sur le chantier pour bien les identifier avant la réalisation des travaux. L'objectif étant de favoriser la communication être les différents acteurs.
- Troisièmement, elle vise à améliorer la précision de la cartographie des réseaux par la transmission de relevés topographiques précis par le responsable du projet et l'engagement des exploitants à faire progresser la précision et l'intégrité des informations sur le positionnement des réseaux existants.
- Dernièrement, elle introduit l'obligation de former le personnel intervenant sur les réseaux et les demandes d'autorisation d'intervention.

Ces mesures sont apportées par le nouveau dispositif réglementaire mis en place par le gouvernement français sous le nom de « Sécurité des réseaux souterrains, aériens et subaquatiques de transport et distribution » du titre V du livre V du code de l'environnement [5]. Il se décline en trois parties principales comme suit :

#### **A.2.0.4 A- Guichet unique**

La première partie de la réglementation porte sur la mise à disposition du guichet unique de téléservice et les modalités de son fonctionnement comme stipulé par le Décret n° 2010-1600 du 20 décembre 2010 modifié [5]. Ce guichet unique est un téléservice prévu à l'article L. 554-2 du code de l'environnement ayant pour but de réunir l'ensemble des acteurs intervenants sur les réseaux enterrés et leurs exploitants dans le but de collecter et de diffuser les informations sur les réseaux.

#### **A.2.0.5 B- Décret n° 2011-762 du 28 juin 2011**

La seconde partie comporte le Décret n° 2011-762 du 28 juin 2011 ayant pour but de définir les modalités de financement du guichet unique. Cette partie de la réglementation n'est pas traitée dans le présent manuscrit.

#### **A.2.0.6 C- Décret n° 2011-1241 du 5 octobre 2011 modifié et ses arrêtés d'application**

La troisième partie est relative à l'encadrement des travaux. Elle constitue le noyau de la refonte réglementaire et porte sur les modalités de préparation, d'organisation et d'exécution des travaux à proximité des réseaux enterrés. Elle est constituée d'un décret et de plusieurs arrêtés d'application comme indiqué ci-dessous[4][5] :

**A.2.0.6.1 a- Décret n° 2011-1241 du 5 octobre 2011 modifié** Ce texte est relatif à l'exécution de travaux à proximité de certains réseaux souterrains, aériens ou subaquatiques. Le décret est entré en vigueur à partir du 01 Juillet 2012 en obligeant les responsables de projet et les exécutants de travaux à adresser les demandes de travaux (DT) et d'intention de travaux (DICT) et de consulter obligatoirement le guichet unique pour obtenir les informations concernant les ouvrages dans le futur chantier ou à sa proximité.

**A.2.0.6.2 b- Arrêté du 15 février 2012 modifié** Appelé communément DT/DICT, ce texte est relatif à la préparation et l'organisation des travaux et prévoit les procédures de déclaration de projet de travaux (DT) et la déclaration d'intention de commencement des travaux (DICT) sur le guichet unique. Il est entré en vigueur le 01 Juillet 2012 et remplace progressivement les dispositions qui encadraient jusqu'au 30 Juin 2012 les travaux à proximité des réseaux enterrés [5] [93]. De plus, ce texte prévoit trois classes de précision cartographique (A, B et C) des ouvrages en services. Cette mesure impose aux exploitants de réseaux la mise en œuvre d'un processus d'amélioration continue des données cartographiques de leurs réseaux en service, reposant notamment sur l'exploitation des résultats des investigations complémentaires effectuées par les maîtres d'ouvrage de travaux [93].

**A.2.0.6.3 c- Arrêté du 28 juin 2012** Ce texte fixe une nouvelle norme obligatoire (la norme NF S70-003) permettant d'encadrer la préparation et l'exécution des travaux à proximité des réseaux [94].

### **La norme NF S70-003**

La norme NF S70-003 rendue obligatoire par l'arrêté du 28 juin 2012, vise à mieux encadrer la préparation et l'exécution des travaux à proximité des réseaux. Elle vient compléter la partie réglementaire présentée ci-haut et est constituées de quatre parties comme suit [5] :

#### **A.2.0.7 Partie 1 : « Prévention des dommages et de leurs conséquences »**

Pour prévenir des dommages sur les réseaux enterrés, la première partie de la norme (NF S70-003-1) établit la procédure concernant la préparation des travaux par les déclarations DT et DICT et le fonctionnement détaillé du guichet unique [5]. De plus, cette partie fournit des logigrammes détaillés définissant les rôles et les responsabilités des différents acteurs : exploitants de réseaux, les maîtres d'ouvrages, les entreprises et les autres prestataires [95].

#### **A.2.0.8 Partie 2 : « Détection des réseaux enterrés »**

La seconde partie communément appelée (NF S70-003-2), définit les modalités de détection sans fouille et de localisation des réseaux enterrés par les entreprises certifiées en utilisant des méthodes spécifiques [5][95]. L'objectif étant d'améliorer la cartographie et à terme, d'obtenir le géoréférencement de l'ensemble des réseaux [96].

#### **A.2.0.9 Partie 3 : « Géoréférencement »**

La partie 3 de la norme (NF S70-003-3) explicite les modes de référencement géographique des réseaux et les classes de précision [5][95].

#### **A.2.0.10 Partie 4 : « Clauses particulières dans les marchés de travaux à proximité des réseaux »**

Cette partie de la norme n'est pas étudié dans le présent manuscrit.

### **Les classes de précision cartographiques**

L'arrêté du 15 Février 2012 instaure trois classes de précision cartographique (A, B et C) des ouvrages en service. L'application de ces précisions est réalisée de manière progressive. En fait, tous les réseaux neufs ou modifiés doivent être conformes à la classe de meilleure précision dite A [4]. De plus, tout réseau déclaré sensible par son exploitant devra être géoréférencé en classe A avant le 01 janvier 2019 en zone urbaine et avant le 01 Janvier 2026 sur l'ensemble du territoire français [93]. Concernant les réseaux non sensibles ou aériens, une exception est faite

en fixant par arrêté un délai de géoréférencement variable en fonction de la zone géographique. Les classes de précision cartographique sont définies comme suit [93][4][5] :

#### **A.2.0.11 Classe de précision A**

Un réseau enterré ou une partie d'un réseau est classé A si la marge d'incertitude liée à la position indiquée ne dépasse pas 40 cm s'il est rigide et 50 cm s'il est flexible (hors les ouvrages souterrains de génie civil construits avant le 01 Janvier 2011).

#### **A.2.0.12 Classe de précision B**

Un réseau enterré ou une partie d'un réseau est classé B s'il n'est pas classé A et si l'incertitude liée à la position indiquée par son exploitant ne dépasse pas 1,5 m.

#### **A.2.0.13 Classe de précision C**

tout réseau ou partie de réseau non classé A ou B est classé en catégorie C, ce qui inclut l'ensemble des réseaux ayant une incertitude supérieure à 1,5 m ou qui ne sont pas cartographiés.

# Classification des réseaux enterrés

---

## Introduction

Les réseaux enterrés diffèrent selon leur nature, leur fonction, et les produits qu'ils transportent. L'installation d'un réseau enterré et le choix de sa configuration sont déterminés par trois éléments importants :

(1) le produit transporté est un élément décisif pour le choix de la nature du réseau et des matériaux le composant.

(2) La fonction du réseau enterré permet de concevoir son architecture et d'adapter les dimensions des parties du réseau en fonction du besoin. En effet, le transport d'un produit nécessitera une architecture simple et adaptée à un flux important et la distribution nécessitera une architecture plus dense avec des dimensions moins importantes.

(3) L'environnement : l'installation des réseaux doit prendre en compte son environnement comme les propriétés chimiques du sol, les installations environnantes notamment l'urbanisation.

Plusieurs classifications des réseaux existants ont été établies selon le besoin. Dans ce manuscrit nous nous intéressons à trois classifications de ces réseaux selon sa fonction, sa sensibilité à la sécurité et le produit qu'il transporte.

## Classification selon la fonction

Lors de la conception d'un réseau, la fonction qu'il assurera est un critère important à prendre en compte lors de sa mise en œuvre. En effet, chaque réseau est conçu de façon adaptée pour fonctionner correctement afin de répondre à un besoin particulier. Deux fonctions principales sont distinguées : le transport d'un produit d'un nœud principal vers un autre et la distribution du produit d'un nœud principal vers plusieurs destinations finales. De plus, la fonction du réseau nécessite des flux de transport et des dimensions du réseau adaptés pour optimiser le transport et rentabiliser les coûts. De ce fait, nous distinguons deux catégories de réseaux selon la fonction :

### B.0.1 Les réseaux de transport

Les réseaux de transport ont pour objectif d'acheminer un produit d'un point de production ou de stockage vers un nœud chargé de le distribuer aux nœuds finaux. L'objectif principal de ce

type de réseaux est de transporter une quantité importante du produit sur une longue distance ce qui nécessite des moyens et une structure du réseau adaptés. Les réseaux de transport les plus connus acheminent principalement l'énergie électrique, le gaz naturel et les hydrocarbures.

Le réseaux de transport d'électricité acheminent l'énergie électrique produites par les centres de productions vers les points de distribution des zones de consommation à travers de grandes lignes électriques à haute tension (HT) et très haute tension (THT)[97]. En France, le réseau de transport d'électricité est exploité par l'entreprise RTE sur un ensemble de près de 105000 Km de lignes électriques en HT et THT [97]. La figure B.2 présente le plan du réseau français de transport d'électricité.

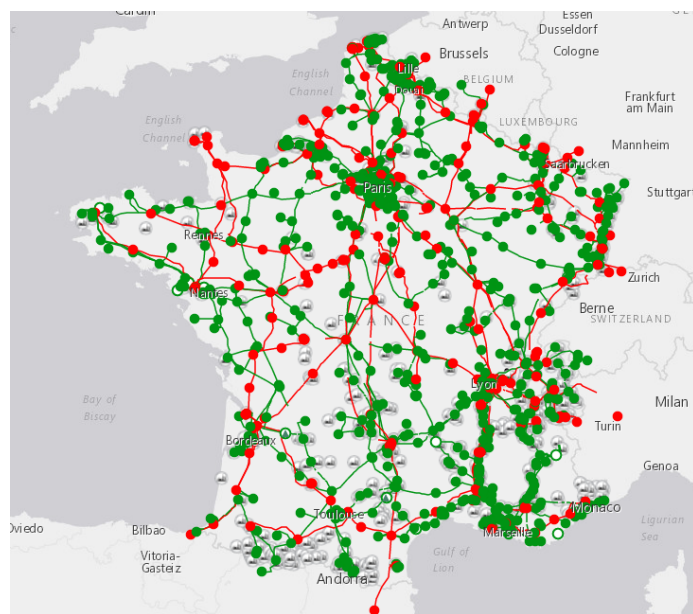


FIGURE B.1 – Carte du réseau de transport d'électricité existant et les ouvrages en projet ayant obtenus une déclaration d'utilité publique [98].

Les réseaux de transport de gaz naturel sont constitués de canalisations en acier ayant un diamètre important [99] et transportent le gaz naturel sous haute pression (40 à 70 Bar) des centres d'extraction et de traitement ou des points d'entrée sur le territoire vers des points intermédiaires chargés d'abaisser la pression et de distribuer aux clients finaux [100]. Le réseau de transport de gaz français est géré par les deux gestionnaires GRT et TIGF [99], son plan est présenté dans la figure B.2.

Le réseau français de transport d'hydrocarbures est constitué de 1375 Km de canalisations ayant un diamètre allant de 25 à 81 Cm. Il est géré par la société TRAPIL et est destiné au transport de divers hydrocarbures entre les points d'entrée en France, les stations de pompage et les terminaux de livraisons. Les hydrocarbures n'étant pas distribués, le transport se fait principalement entre les raffineries, les entrepôts d'expédition et les dépôts de réception[101].

TRAPIL exploite trois réseaux de pipelines multi-produits comme indiqué dans la figure B.3. Le premier réseau est Le Havre/Paris (LHP), dont elle est propriétaire. Le second réseau est la pipeline Méditerranée/Rhône (PMR) et le troisième réseau est un ensemble d'oléoducs de Défense Commune de l'OTAN (ODC) [101].



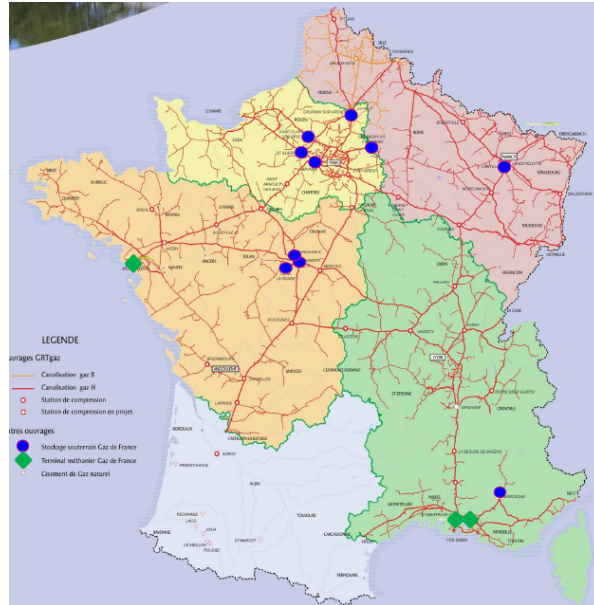


FIGURE B.2 – Plan du réseau de transport du gaz naturel en France [100].

## Les réseaux de distribution

Les réseaux de distribution ont pour rôle de distribuer le produit aux clients finaux à travers une structure très dense et une architecture adaptée. Dans le cas des réseaux de distribution d'électricité, l'énergie électrique est acheminée à travers les réseaux de transport par l'intermédiaire de transformateurs avant d'être distribuée aux consommateurs par le biais de lignes à moyenne tension (MT) et basse tension (BT) [97]. De façon équivalente, le gaz naturel passe du réseau de transport au réseau de distribution par le biais de postes de détentes qui abaissent la pression à moins de 25 Bar [100]. En France, 11 millions de consommateurs sont raccordés au réseau de distribution de gaz naturel, celui-ci est géré par 25 gestionnaires dont GrDF, Antargaz, SICAE, etc [99].

## Classification selon le produit transporté

La refonte réglementaire considère neuf (9) catégories de réseaux enterrés en fonction du produit transporté comme suit [4] :

### Les réseaux électriques

Les réseaux électriques transportent l'énergie électrique sous trois tensions différentes : basse tension (BT : tension strictement supérieure à 50 V et inférieure ou égale à 1000 V pour le courant alternatif et strictement supérieure à 120 V et inférieure ou égale à 1500 V pour le courant continu), la haute tension A (HTA : tension strictement supérieure à 1000 V et inférieure ou égale à 50000 V pour le courant alternatif et strictement supérieure à 1500 V et inférieure ou égale à 75000 V pour le courant continu) et la haute tension B (HTB : tension strictement supérieure à 50000 V pour le courant alternatif et strictement supérieure à 75000 V pour le courant continu) [4].

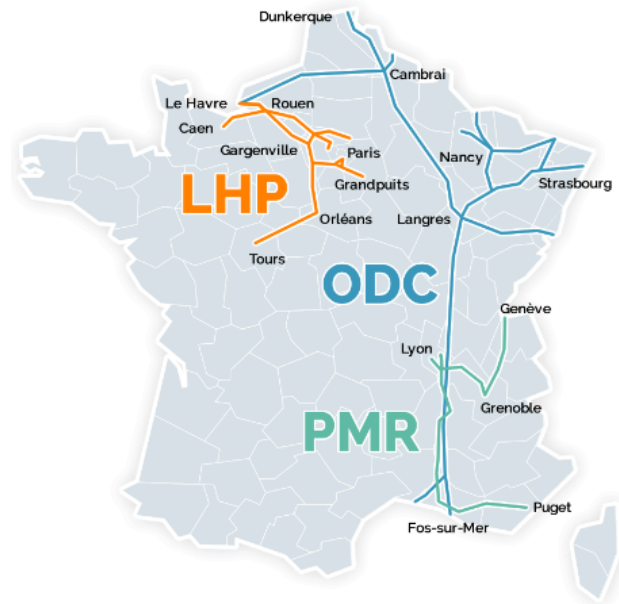


FIGURE B.3 – Plan du réseau français de transport des hydrocarbures [99].

Les câbles électriques quelque soit leur tension, sont enterrés à 70 centimètres de profondeur en moyenne. Un grillage avertisseur de couleur rouge est installé à une distance de 20 centimètres en dessus du câble pour l'identifier et prévenir de sa présence lors des travaux.

Quant au type du câble utilisé, ses matériaux sont sélectionnés en fonction de la tension. En effet, pour les réseaux basse tension et haute tension A, des câbles à isolation synthétique ou papier huilé sont utilisés avec ou sans cablette de mise à la terre du neutre pour les réseaux basse tension. Pour les réseaux haute tension B, des câbles à isolation synthétique ou papier imprégné de matière visqueuse sous pression d'huile ou de gaz ou des câbles trio-polaires sous tube acier avec protection cathodique [4].

Pour faciliter l'identification des réseaux électriques, divers affleurants sont installés sur le sol comme les jonctions, les chambres, les postes et les coffrets de branchement ou de fausse coupure. Outre l'indication de la présence des réseaux électriques, les affleurants peuvent contenir des informations importantes sur le réseau électrique comme sa profondeur, sa nature, son propriétaire et la date de son installation.

#### B.0.1.1 Les réseaux de signalisation et électriques TBT (très basse tension)

Non sensibles pour la sécurité car leurs niveaux de tension sont inférieurs à 50 V, pour travailler sur ces installations, les règles de la norme NF C18 510 sont applicables. [4]

#### Les ouvrages gaziers

les ouvrages gaziers sont des systèmes de canalisations transportant du gaz naturel sous pression dans le but de l'acheminer vers un point de distribution ou de le distribuer aux clients.

Dans les réseaux de transport, le gaz est transporté sous haute pression (supérieure à 16 bar, en général 67,7 ou 80 bar) dans des canalisations en acier enrobé de brai de houille (CMR), de bitume de pétrole, de polyéthylène, avec éventuellement une protection mécanique par feutre

synthétique, par lattes de bois ou de plastique, le diamètre de ces canalisations varie entre 25 mm et 1200 mm [4].

Les réseaux de distribution quant à eux, transportent le gaz sous moyenne pression C dans des canalisations en polyéthylène jusqu'à 8 bar ou en acier. Sous moyenne pression A ou B, le gaz est acheminé dans des canalisations en polyéthylène, en acier ou en cuivre. Enfin, sous basse pression, il est transporté dans des canalisations en polyéthylène, en acier, en fonte ductile, en tôle bitumée ou en plomb. Les diamètres extérieurs utilisés actuellement pour la distribution varient entre 20 et 125 mm, ils peuvent exceptionnellement atteindre 160 mm [4].

Les ouvrages gaziers peuvent être repérés à l'aide d'affleurants de couleur jaune comme les bornes, les balises, et les plaques de repérage, les bouches à clé, etc. La présence d'un grillage avertisseur de couleur jaune au-dessus de la canalisation n'est pas systématique. De plus, une grande majorité des canalisations de transport de gaz ne présentent pas de grillage avertisseur [4].

## **Les réseaux de chaleur**

Les réseaux de chaleur transportent la vapeur, l'eau surchauffée et l'eau chaude sous différentes pressions et à des températures variantes.

La vapeur est acheminée sous pression (de 5 bar à 25 bar) à une température entre 160 à 240 °C. L'eau surchauffée est quant à elle acheminée sous pression (12 à 24 bars) à une température entre 130 à 180 °C. Enfin, l'eau chaude est transportée sous pression (4 à 20 bars) à une température n'atteignant pas 110 °C. Pour transporter ce type de produit, des canalisations isolantes sont utilisées. Nous pouvons trouver des canalisations en acier avec une isolation reposant dans un caniveau fermé en béton ou dans une enveloppe métallique revêtue ou des canalisations pré-isolées avec une pousse de polyuréthane recouverte d'une enveloppe PEHD enterrée.

Le diamètre des canalisations utilisées varie en fonction de la pression et du diamètre entre 2,5mm à 15mm et sont enterrées à une profondeur d'au moins 40 à 50 cm [4].

## **Les réseaux de télécommunication**

Physiquement, cela correspond à l'ensemble des câbles en cuivre, des fibres optiques, ainsi que tous les équipements de raccordement ou de répartition [4].

Le réseau de télécommunication est alimenté en tension continue de 48V dans la majorité des cas. Cette tension peut-être portée à 110 V, voire 400 V dans le cadre de la télé-alimentation de certains équipements [4].

Les conduites sont très majoritairement en PVC, de diamètre 100, 80, 60, 45 et 28 mm. Elles sont regroupées par paquet de 2 à plusieurs dizaines de tuyaux [4].

## **Les réseaux d'adduction d'eau potable**

Un réseau d'eau potable est constitué d'un ensemble d'infrastructures destinées au transport et à la fourniture d'eau potable à la population. Les réseaux de distribution se composent de canalisations, normalement parallèles à la voirie et de branchements, normalement perpendiculaires à la voirie, qui partent des canalisations et alimentent les installations intérieures. La

plupart des réseaux de distribution d'eau potable fonctionnent avec des pressions comprises entre 2 bars et 10 bars. Les réseaux de transport ont des pressions encore plus élevées : de 3 à 20 bars, pouvant parfois aller jusqu'à 80 bars [4].

La plupart des canalisations d'eau potable en zone urbaine sont en fonte (fonte grise ou fonte ductile). Elles peuvent être également constituées par d'autres matériaux : acier protégé ou non protégé, béton avec ou sans armature et béton précontraint, polyéthylène (PEHD, PEBD), PVC, composites, plomb, amiante ciment. Les branchements sont usuellement en PEHD avec des bandes bleues. Ils peuvent également être en PVC, en fonte ou encore en acier en gros diamètres. Cependant, d'autres types de matériaux de branchements existent : plomb et PE basse densité noir.

Plusieurs risques afférents peuvent être identifiés. En effet, l'eau sous pression dans les canalisations peut projeter, parfois très violemment, des fragments de canalisation ou de robinetterie. En cas de rupture ou de manœuvre inappropriée, une grande quantité d'eau peut également inonder la zone du chantier et causer d'importants dégâts aux tiers. Jets puissants due à la pression, déstabilisation [4].

## **Les réseaux d'assainissement**

Les réseaux d'assainissement ont pour but de récolter auprès des usagers puis d'évacuer les eaux usées. Pour éviter les inondations et le débordement des centres d'épuration, les eaux ménagères provenant des habitations sont parfois séparées des eaux pluviales qui sont donc récoltées par deux types de réseaux : les réseaux d'assainissement séparatifs et les réseaux pluviales.

Si les deux eaux sont mélangées alors le réseau d'assainissement est dit unitaire. Étant donné que le milieu est acide, le choix du matériau des canalisations doit être fait minutieusement, de ce fait, nous pouvons retrouver des canalisations dans différents matériaux comme la fonte grise, la fonte ductile, le béton, le PVC, le grès, l'amiante ciment, ainsi que d'autres (PEHD, PRV) .

## **Les ouvrages chimiques et d'hydrocarbures**

Sous pression : quelques bars à une centaine de bars. Canalisations : diamètre nominaux allant de 50 à 1500 mm. Acier revêtu de brai de houille, bitume de pétrole, PE et autres polymères armés ou non, fibres minérales, avec éventuellement une protection mécanique par feutre synthétique, lattes de bois ou de plastiques [4].

## **Classification selon la sensibilité**

Les réseaux enterrés transportent des produits différents plus ou moins dangereux si leur manipulation ne respecte pas des règles spécifiques. Pour améliorer la sécurité liées aux réseaux enterrés, la norme NF S70-003-3 [5] a établi une classification des ouvrages appartenant aux réseaux en fonction de leur sensibilité à la sécurité des personnes (opérateurs et des riverains), la sécurité économique et la protection de l'environnement.

## Réseaux classés sensibles à la sécurité

Un réseau est classé sensible à la sécurité si son endommagement, son arrêt ou sa modification peut provoquer des dégâts économiques considérables, porter atteinte à la sécurité des riverains et des opérateurs ou si elle peut provoquer une pollution de l'environnement. Les réseaux classés sensibles à la sécurité par la norme NF S70-003-3 [5] sont :

(1) les réseaux de transport des hydrocarbures liquides ou liquéfiés, des produits chimiques liquides ou gazeux. En effet, le caractère chimique et polluant du produit constitue un danger pour la population et l'environnement.

(2) les réseaux de transport et de distribution des gaz combustibles, de vapeur d'eau, d'eau surchauffée, d'eau chaude, d'eau glacée et de tout fluide caloporteur ou frigorigène, et l'ensemble des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

Plusieurs risques sont liés à la haute pression en cas d'endommagement des réseaux de gaz comme la fuite avec bruit intense, pouvant s'enflammer, avec la projection des matériaux situés sur l'ouvrage, allant jusqu'au renversement des engins de terrassement selon l'importance de la fuite. Le dégagement de chaleur extrêmement important en cas d'inflammation est possible, risque de corrosion ou de rupture ultérieure en cas d'atteinte du métal non décelée ou non signalée à l'exploitant sans fuite immédiate de gaz [4].

(3) Les réseaux électriques et d'éclairage public visés par l'article R. 4534-107 du code du travail, ayant une tension supérieure à 50 volts en courant alternatif et supérieure à 120 volts en courant continu lisse sont classés comme étant sensibles à la sécurité. En effet, les risques d'origine électrique sont nombreux comme l'électrocution, brulure, éblouissement, déflagration résultant principalement de contacts ou d'amorçages avec un conducteur sous tension ou de mise en court-circuit. De ce fait, tout contact ou amorçage expose les personnes à un risque mortel quelle que soit la tension, et les courts circuits exposent les personnes à des brulures qui peuvent être fatales, à des éblouissements, à des effets de souffle ou à des traumatismes sonores [4].

(4) Les réseaux de transport de déchets par dispositif pneumatique sous pression ou par aspiration.

(5) Enfin, tout réseau non sensible pour la sécurité mais déclaré sensible par son exploitant l'est au nom de la norme.

## Réseaux non classés sensibles à la sécurité

Malgré les risques afférents à l'eau sous pression dans les canalisations comme la projection de fragments de canalisation ou de robinetterie, l'inondation, les jets puissants due à la pression et la déstabilisation, (1) les réseaux de prélèvement et de distribution d'eau destinée à la consommation humaine, à l'alimentation en eau industrielle ou à la protection contre les incendies, en pression ou à l'écoulement libre ne sont pas classés comme étant sensibles à la sécurité.

De plus, la norme NF S70-003-3 considère (2) les d'assainissement et les réseaux d'eau pluviale, ainsi que (3) les réseaux de communications électroniques, les réseaux électriques et d'éclairage public autres que ceux visés par l'article R. 4534-107 du code du travail comme étant insensibles à la sécurité [5][4].



# Présentation de la campagne d'acquisitions Toulon-MADE

---

## Expérimentation 1 : Aire d'essais 'Toulon-MADE'

### Présentation :

L'objectif de la campagne d'acquisitions est de construire un jeu de données issues de trois appareils de détection différents sur le même terrain en gardant trace de la position géographique de chaque donnée acquise. Ces acquisitions ont été faites sur un terrain choisi pour la diversité des réseaux qu'il contient et pour la possibilité d'utilisation de différents appareils de détection. Ce terrain d'étude se situe dans les extérieurs de la société MADE à Toulon (Figure 1) suite à la proposition de Philippe Picon.

### Matériels :

- Le GasTracker : fourni par MADE, le GasTracker a été utilisé pour détecter une canalisation PE enterrée pour des tests et contenant de l'air de 3 CM de diamètre enterrée à une profondeur inconnue. Les acquisitions GasTracker ont été faites en respectant le prototype G4M des cinq bases GasTracker en allant de la source et en cherchant un signal maximum dans l'histogramme obtenu.
- Le GPR IDS : fourni par le CRIGEN, les acquisitions GPR ont été faites en créant une grille couvrant tout le terrain d'étude avec les paramètres de bases du GPR.
- L'électromagnétique : fourni par MADE, il s'agit du RD8000 utilisé en mode Induction pour détecter un câble électrique enterré à une profondeur initialement inconnue.
- Deux décimètres : utilisés pour enregistrer les positions en X et Y de chaque donnée acquise.
- Le gabarit GasTracker : réalisé par Jean-Marie Nicolas pour la simulation du prototype G4M des 5 bases GasTracker.
- Un appareil Photo : permet d'enregistrer le journal et l'histogramme de chaque acquisition GasTracker.

### Étude du terrain :

Les acquisitions ont été menées sur un terrain choisi après l'étude des extérieurs et du parking (Fig. 1) de la société MADE. La nature du sol n'est pas homogène, nous pouvons distinguer plusieurs zones différentes (Fig. 2) :

- Zone 1 : parking motos couvert, en béton sur lequel plusieurs obstacles sont présents.
- Zone 2 : mini-terrain de pétanque en gravier blanc.
- Zone 3 : terre végétale en bout de terrain.
- Zone 4 : parking en asphalte dégradé et gravier avec plusieurs traces de tranchées.
- Zone 5 : Trottoir en béton armé.

Des réseaux fonctionnels existent sur ce site : Une partie du réseau électrique alimentant la société et une partie du réseau d'évacuation des eaux pluviales, une canalisation en polyéthylène a été installée sur le terrain pour les tests du GasTracker (Fig.3). Des affleurants sont présents sur le terrain (Fig. 5) appartenant aux différents réseaux existants. Une étude détaillée est présentée dans le tableau 1.



**Figure 1** : Extérieurs et parking de la société Made



**Figure 2** : Les différents types de sol des extérieurs de la société MADE



**Figure 3** : Réseaux enterrés sur le parking de la société Made



**Figure 4** : Le terrain d'étude choisi pour les acquisitions

Après l'étude de la nature du sol, des réseaux et des affleurants, nous choisissons une zone de forme rectangulaire de dimensions 24 M en longueur et 15 M en largeur qui couvre les trois réseaux enterrés, cette zone servira de terrain d'études pour nos acquisitions (Fig. 4).





Figure 5 : Les affleurants présents



Figure 6 :L'affleurant A1 – grille d'égout avec 3 sorties

| Affleurant | Type                                   | Description   | Sorties   |
|------------|--|---|---|
| A1         | Grille d'égout - eaux pluviales        | Connexion T de 3 canalisations<br>Connecté à A7 par la sortie S1<br>Connecté à A2 par la sortie S2<br>Voir figure 6 | S1 :<br>- Diamètre=12cm<br>- Profondeur=14cm<br>S2 :<br>- Diamètre=14cm<br>- Profondeur=15cm<br>S3 :<br>- Diamètre=26cm<br>- Profondeur=8cm |
| A2         | Grille d'égout - eaux pluviales        | Connecté à A1   | S1 :<br>- Diamètre=14cm<br>- Profondeur=22cm  |
| A3         | Affleurant Plaque Eau potable          | Pas de présence de réseau   |   |
| A4         | Entrée canalisation PE                 | Diamètre=3 cm<br>Connecté à A5<br>Fluide=Air/Gaz  |   |
| A5         | Entrée canalisation PE                 | Diamètre=3 cm<br>Connecté à A4<br>Fluide=Air/Gaz  |   |
| A6         | Grille d'égout - eaux pluviales        |   |   |
| A7         | Caniveau évacuation des eaux pluviales | Connecté à A1 par S1  | S1 :<br>- Diamètre=12cm<br>- Profondeur=5 cm<br>S2 :<br>- Diamètre=5 cm<br>- Profondeur=0cm   |
| A8         | Coffret électrique                     | Pas d'informations  |   |

## Protocoles d'acquisitions

L'objectif est d'acquérir des données multi-capteurs sur le même terrain. Pour ce faire, des protocoles d'acquisitions ont été mis en place pour assurer la transition d'une méthode à un autre tout en partageant les mêmes positions géographiques. Le GPR IDS permet de créer automatiquement une grille pour le suivi des acquisitions GPR, de ce fait, il sera utilisé en premier lieu lors de notre campagne d'essais pour réutiliser sa grille avec les autres outils.





Figure 8 : Acquisition Gas Tracker en utilisant le gabarit



Figure 9 : Histogramme obtenu

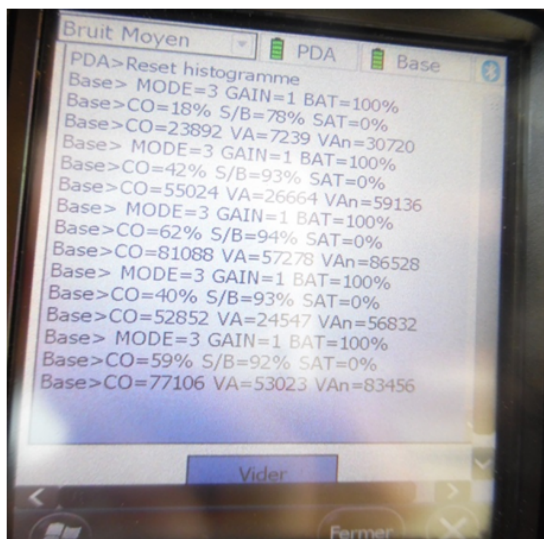


Figure 10 : Résumé d'une série de cinq acquisitions

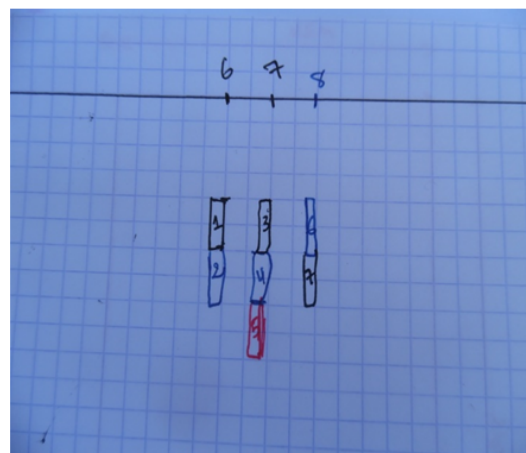


Figure 11 : Enregistrement de la position géographique de chaque série d'acquisitions Gas Tracker.

situation permet d'utiliser le RD8000 sur notre terrain d'étude en mode induction (calcul de la profondeur possible).



# Présentation de la campagne d'acquisitions Savigny-sur-Orge

---

## Expérimentation 4 : Terrain réel Savigny-sur-Orge - (GPR,EM,GT)

L'objectif de cette campagne d'acquisition est la géolocalisation d'une canalisation métallique de gaz par GPR et EM.

Un terrain d'étude est choisi par E. Rousset (Engie) et G.Venant (GRTgaz) en fonction de plusieurs critères à savoir : un sol homogène ne contenant pas d'argile, peu de canalisations enterrées dans la même zone et la possibilité d'utiliser au moins deux méthodes de détection sur la même zone.

Le chantier choisi sur la commune Savigny-sur-orge répond parfaitement à nos besoin et nous permet d'utiliser les techniques EM et GPR.

### Étude du terrain et de l'environnement

Le terrain d'étude correspond à la portion d'une route à Savigny-sur-Orge dont les composants de la surface ne sont pas homogènes. Une zone d'étude de forme rectangulaire dont la surface est de 12M\*5M et trois régions peuvent être distinguées, une région en asphalte/goudron, une région remblayée et un trottoir en asphalte comme indiqué dans la figure 2. Le sol peut être considéré comme étant sec. Une voie ferrée et une voie à grande circulation se trouvant à proximité du terrain d'étude peuvent générer des perturbations électromagnétiques.

Plusieurs affleurants appartenant à des réseaux différents sont observés sur la zone d'étude comme suit :

- A1 : Une borne de gaz (GRTgaz) indiquant la présence d'une canalisation haute pression à proximité.
- A2 : Quatre plaques métalliques télécom.
- A3 : Une plaque métallique sans identification.

Un plan de GRTgaz est fourni pour la réalisation de ces acquisitions. Une canalisation en acier et transportant du gaz est énumérée sur le plan (Figure 6 et Figure 7), un accès par la protection cathodique est possible par un affleurant extérieur à la zone d'étude.

### Protocole d'acquisitions

- Les acquisitions sont réalisées suivant le protocole mis en place dans le cadre du projet G4M :
- Analyse du terrain et vérification de la cohérence du plan fourni par GRTgaz.

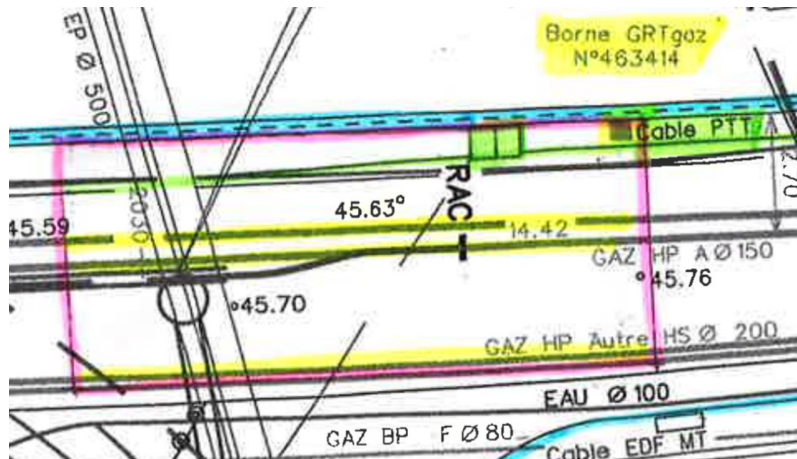


FIGURE D.1 – Plan des réseaux enterrés dans le terrain d'étude.

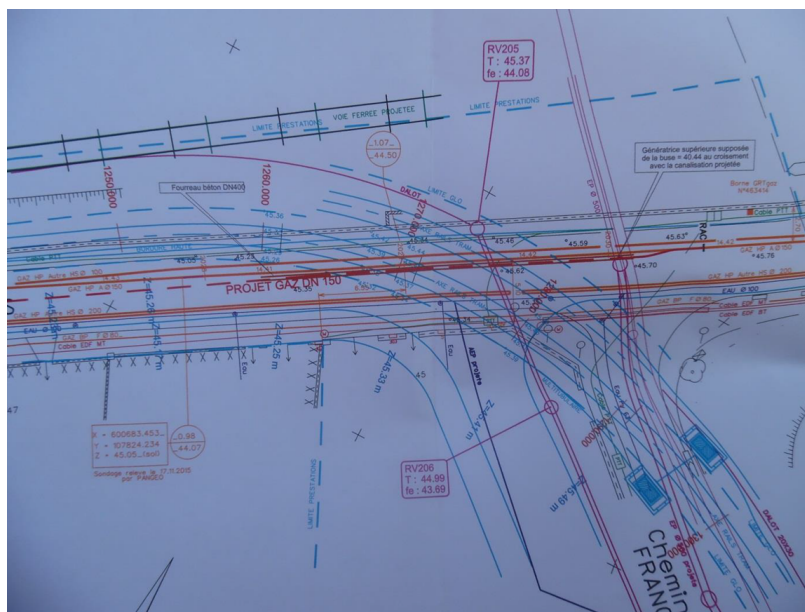


FIGURE D.2 – Plan topographique des réseaux enterrés dans le terrain d'étude.

- Récolte d'information sur le terrain : humidité, composants du sol et les éventuelles perturbations.
- Étude des affleurants.
- Sélection et quadrillage de la zone d'étude.
- Acquisitions GPR.
- Branchement et acquisitions avec le RD8000.

Une grille d'acquisition est créée par le GPR pour une surface 12M\*5M avec des passages espacé de 50cm. 36 radargrammes sont générés par les passages GPR en longitudinal et en transversal.

Le RD8000 a été utilisé par raccordement direct à la protection cathodique de la canalisation métallique de gaz. Un relevé du maximum est obtenu par des recherches avec un pas de 50cm permettant de relever 24 points potentiels de détection.

# Algorithme de la définition de l'ontologie en Coq

---

```

Require Import Relation_Definitions.
Require Import Coq.Program.Basics.
Require Export Coq.Classes.RelationClasses.
Require Import Coq.Classes.Equivalence.
Require Import Coq.Setoids.Setoid.

Tactic Notation "generalizes" hyp(X) :=
  generalize X ; clear X.
Tactic Notation "generalizes" hyp(X1) hyp(X2) :=
  generalizes X1 ; generalizes X2.
Tactic Notation "generalizes" hyp(X1) hyp(X2) hyp(X3) :=
  generalizes X1 X2 ; generalizes X3.
Tactic Notation "generalizes" hyp(X1) hyp(X2) hyp(X3) hyp(X4) :=
  generalizes X1 X2 X3 ; generalizes X4.

```

## *jauto*, a new automation tactics

*jauto* is better at intuition *eauto* because it can open existentials from the context. In the same time, *jauto* can be faster than intuition *eauto* because it does not destruct disjunctions from the context. The strategy of *jauto* can be summarized as follows :

- open all the existentials and conjunctions from the context
- call *esplit* and *split* on the existentials and conjunctions in the goal
- call *eauto*.

```

Class Antisymmetric {A :Type}(R : relation A) :=
  antisymmetry :  $\forall x y, R x y \rightarrow R y x \rightarrow x = y$ .
Class Commutative {k :Type}(operator : k  $\rightarrow$  k  $\rightarrow$  k) :=
  commutative :  $\forall x y, (operator x y) = (operator y x)$ .
Class Associative {k :Type}(operator : k  $\rightarrow$  k  $\rightarrow$  k) :=
  associative :  $\forall x y z, (operator (operator x y) z) = (operator x (operator y z))$ .
Class Absorptive {k :Type}(operator1 operator2 : k  $\rightarrow$  k  $\rightarrow$  k) :=
  absorptive :  $\forall x y, (operator1 x (operator2 x y)) = x$ .
Class Idempotent {k :Type}(operator : k  $\rightarrow$  k  $\rightarrow$  k) :=
  idempotent :  $\forall x, (operator x x) = x$ .

```

```

Class PWLattice (k : Type)(pw :relation k)(meet join :k→k→k) := {
  joinPred1 : ∀ x y : k, pw x (join x y) ∧ pw y (join x y);
  joinPred2 : ∀ x y z :k, pw x z ∧ pw y z → pw (join x y) z;
  meetPred1 : ∀ x y :k, pw (meet x y) x ∧ pw (meet x y) y;
  meetPred2 : ∀ x y z :k, pw z x ∧ pw z y → pw z (meet x y);
  meet_commutative :> Commutative meet;
  meet_associative :> Associative meet;
  meet_absorptive :> Absorptive meet join;
  meet_idempotent :> Idempotent meet;
  join_commutative :> Commutative join;
  join_associative :> Associative join;
  join_absorptive :> Absorptive join meet;
  join_idempotent :> Idempotent join}.

```

```

Class KDTL : Type := {
  kind :> Type;
  Part_of : relation kind;
  Proper_part_of : relation kind;
  Association : relation kind;
  Product : kind → kind → kind;
  Sum : kind → kind → kind;
  pwlatt : PWLattice kind Part_of Product Sum}.

```

Notation " $x \subseteq y$ " := (*Part\_of*  $x$   $y$ ) (at level 70). Notation " $x \subset y$ " := (*Proper\_part\_of*  $x$   $y$ ) (at level 70). Notation *inverse*  $R$  := (*flip* ( $R$  :relation  $-$ ) : relation  $-$ ).

Section *application*.

Context '{*Mereo* : KDTL}{*Thing* : kind}{*nul* : kind}.

```

Class PT : Type.
Parameter D1 : PT → kind. Coercion D1 : PT >-> kind.
Class PD : Type.
Parameter D2 : PD → PT. Coercion D2 : PD >-> PT.
Class ED : Type.
Parameter D3 : ED → PT. Coercion D3 : ED >-> PT.
Class AB : Type.
Parameter D4 : AB → PT. Coercion D4 : AB >-> PT.
Class Q : Type.
Parameter D5 : Q → PT. Coercion D5 : Q >-> PT.
Class RE : Type.
Parameter D6 : RE → AB. Coercion D6 : RE >-> AB.
Class TR : Type.
Parameter D7 : TR → RE. Coercion D7 : TR >-> RE.
Class PR : Type.
Parameter D8 : PR → RE. Coercion D8 : PR >-> RE.
Class S : Type.
Parameter D9 : S → PR. Coercion D9 : S >-> PR.
Class TI : Type.
Parameter D10 : TI → TR. Coercion D10 : TI >-> TR.
Class TP : Type.
Parameter D11 : TP → TR. Coercion D11 : TP >-> TR.
Class NPED : Type.

```



Parameter  $D12 : NPED \rightarrow ED$ . Coercion  $D12 : NPED \rightarrow ED$ .  
 Class  $NPOB : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D13 : NPOB \rightarrow NPED$ . Coercion  $D13 : NPOB \rightarrow NPED$ .  
 Class  $SOB : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D14 : SOB \rightarrow NPOB$ . Coercion  $D14 : SOB \rightarrow NPOB$ .  
 Class  $MOB : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D15 : MOB \rightarrow NPOB$ . Coercion  $D15 : MOB \rightarrow NPOB$ .  
 Class  $ASO : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D16 : ASO \rightarrow SOB$ . Coercion  $D16 : ASO \rightarrow SOB$ .  
 Class  $NASO : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D17 : NASO \rightarrow SOB$ . Coercion  $D17 : NASO \rightarrow SOB$ .  
 Class  $SAG : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D18 : SAG \rightarrow ASO$ . Coercion  $D18 : SAG \rightarrow ASO$ .  
 Class  $SC : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D19 : SC \rightarrow ASO$ . Coercion  $D19 : SC \rightarrow ASO$ .  
 Class  $TQ : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D20 : TQ \rightarrow Q$ . Coercion  $D20 : TQ \rightarrow Q$ .  
 Class  $PQ : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D21 : PQ \rightarrow Q$ . Coercion  $D21 : PQ \rightarrow Q$ .  
 Class  $AQ : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D22 : AQ \rightarrow Q$ . Coercion  $D22 : AQ \rightarrow Q$ .  
 Class  $STV : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D23 : STV \rightarrow PD$ . Coercion  $D23 : STV \rightarrow PD$ .  
 Class  $PRO : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D24 : PRO \rightarrow STV$ . Coercion  $D24 : PRO \rightarrow STV$ .  
 Class  $PED : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D25 : PED \rightarrow ED$ . Coercion  $D25 : PED \rightarrow ED$ .  
 Class  $POB : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D26 : POB \rightarrow PED$ . Coercion  $D26 : POB \rightarrow PED$ .  
 Class  $NAPO : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D27 : NAPO \rightarrow POB$ . Coercion  $D27 : NAPO \rightarrow POB$ .  
 Class  $APO : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D28 : APO \rightarrow POB$ . Coercion  $D28 : APO \rightarrow POB$ .  
  
 Class  $Balls : \text{Type}$ .  
 Parameter  $M1 : Balls \rightarrow S$ . Coercion  $M1 : Balls \rightarrow S$ .  
  
 Inductive  $Reliability : \text{Set} :=$   
   |  $low : Reliability$   
   |  $medium : Reliability$   
   |  $high : Reliability$ .  
  
 Inductive  $SensorType : \text{Set} :=$   
   |  $GPR : SensorType$   
   |  $electromagn : SensorType$   
   |  $GazTracker : SensorType$   
   |  $Rfid : SensorType$ .  
  
 Inductive  $NetworkType : \text{Set} :=$   
   |  $Gaz : NetworkType$   
   |  $Elec : NetworkType$   
   |  $Telecom : NetworkType$

| *WaterConv* : *NetworkType*.

Class *Network* : Type.  
Parameter *D29* : *Network* → *NAPO*. Coercion *D29* : *Network* >-> *NAPO*.  
Class *DistributionNetwork* : Type.  
Parameter *D30* : *DistributionNetwork* → *Network*. Coercion *D30* : *DistributionNetwork* >-> *Network*.

Class *UDN* : Type := {  
  *udn1* : *NetworkType*}.  
Parameter *D31* : *UDN* → *DistributionNetwork*.  
Coercion *D31* : *UDN* >-> *DistributionNetwork*.  
Class *GazUDN* : Type.  
Parameter *N1* : *GazUDN* → *UDN*. Coercion *N1* : *GazUDN* >-> *UDN*.  
Class *ElecUDN* : Type.  
Parameter *N2* : *ElecUDN* → *UDN*. Coercion *N2* : *ElecUDN* >-> *UDN*.  
Class *TelecomUDN* : Type.  
Parameter *N3* : *TelecomUDN* → *UDN*. Coercion *N3* : *TelecomUDN* >-> *UDN*.  
Class *WaterConvUDN* : Type.  
Parameter *N4* : *WaterConvUDN* → *UDN*. Coercion *N4* : *WaterConvUDN* >-> *UDN*.

Class *Sensor* : Type.  
Parameter *N5* : *Sensor* → *NAPO*. Coercion *N5* : *Sensor* >-> *NAPO*.

Inductive *Object* : Set := *Embedding* ( \_ \_ : nat).

Class *UDNNode* : Type := {  
  *udnGeom* :> *Balls* ;  
  *udnCoord* : *Object* ;  
  *udnSensorType* : *SensorType* ;  
  *udnReliab* : *Reliability*}.  
Parameter *c1* : *UDNNode* → *NAPO*. Coercion *c1* : *UDNNode* >-> *NAPO*.

Class *UDNLink* : Type.  
Parameter *c2* : *UDNLink* → *NAPO*. Coercion *c2* : *UDNLink* >-> *NAPO*.

Class *C\_UDN\_part1* (*x1* : *UDNNode*)(*x2* : *UDNLink*)(*x* : *UDN*) :=  
  *CUDNp1* :>  $x1 \subseteq x \wedge x2 \subseteq x$ .

Class *UDNEndNode* : Type.  
Parameter *c3* : *UDNEndNode* → *UDNNode*.  
Coercion *c3* : *UDNEndNode* >-> *UDNNode*.

Class *UDNInterconnectionNode* : Type.  
Parameter *D33* : *UDNInterconnectionNode* → *UDNNode*.  
Coercion *D33* : *UDNInterconnectionNode* >-> *UDNNode*.

Class *ManHole* : Type := {  
  *mh1* :> *Balls* ;  
  *mh2* : *Object* ;  
  *mh3* : *NetworkType* ;  
  }  
Parameter *D34* : *ManHole* → *UDNNode*.  
Coercion *D34* : *ManHole* >-> *UDNNode*.

Class *UDNBent90* : Type.  
Parameter *D35* : *UDNBent90* → *UDNInterconnectionNode*.

Coercion  $D35 : \text{UDNBent90} \rightarrow \text{UDNInterconnectionNode}$ .  
 Class  $\text{UDNBent45} : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D36 : \text{UDNBent45} \rightarrow \text{UDNInterconnectionNode}$ .  
 Coercion  $D36 : \text{UDNBent45} \rightarrow \text{UDNInterconnectionNode}$ .  
 Class  $\text{UDNBent30} : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D37 : \text{UDNBent30} \rightarrow \text{UDNInterconnectionNode}$ .  
 Coercion  $D37 : \text{UDNBent30} \rightarrow \text{UDNInterconnectionNode}$ .  
 Class  $\text{UDNBent22\_5} : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D38 : \text{UDNBent22\_5} \rightarrow \text{UDNInterconnectionNode}$ .  
 Coercion  $D38 : \text{UDNBent22\_5} \rightarrow \text{UDNInterconnectionNode}$ .  
 Class  $\text{UDNBent11\_25} : \text{Type}$ .  
 Parameter  $D39 : \text{UDNBent11\_25} \rightarrow \text{UDNInterconnectionNode}$ .  
 Coercion  $D39 : \text{UDNBent11\_25} \rightarrow \text{UDNInterconnectionNode}$ .

Definition  $\text{has\_part} : \text{relation } PT := \text{inverse Part\_of}$ .  
 Definition  $\text{Involved\_in } (a \ a' : PD) := \text{Association } a \ a'$ .  
 Definition  $\text{Attached\_to } (a : \text{UDNLink})(a' : \text{UDNNode}) := \text{Association } a \ a'$ .  
 Definition  $\text{Connected\_to } (a \ a' : \text{UDNNode}) := \text{Association } a \ a'$ .

Axiom  $r\_of\_part\_of : \text{Reflexive Part\_of}$ .  
 Axiom  $a\_of\_part\_of : \text{Asymmetric Part\_of}$ .  
 Axiom  $t\_of\_part\_of : \text{Transitive Part\_of}$ .  
 Axiom  $t\_of\_has\_part : \text{Transitive has\_part}$ .  
 Axiom  $s\_of\_connected\_to : \text{Symmetric Connected\_to}$ .  
 Axiom  $t\_of\_connected\_to : \text{Transitive Connected\_to}$ .  
 Axiom  $\text{proper\_part} : \forall (x \ y : \text{kind}), x \subset y \leftrightarrow x \subseteq y \wedge \neg y \subseteq x$ .

Axiom  $\text{Involved\_in\_sub\_PartWhole} : \text{subrelation Involved\_in Part\_of}$ .

Definition  $\text{Exterior\_to } (n1 \ n2 : \text{Balls}) : \text{Prop} := \forall n3 : \text{Balls}, (n3 \subseteq n1 \wedge n3 \subseteq n2) \rightarrow \text{False}$ .

Definition  $\text{Ext\_tangent\_to } (n1 \ n2 : \text{Balls}) := \text{Exterior\_to } n1 \ n2 \wedge \forall (x \ y : \text{Balls}), ((n1 \subseteq x \wedge n1 \subseteq y$

$\wedge \text{Exterior\_to } x \ n2 \wedge \text{Exterior\_to } y \ n2) \rightarrow$

$(x \subseteq y \vee y \subseteq x))$ .

Definition  $\text{Int\_tangent\_to } (n1 \ n2 : \text{Balls}) := n1 \subset n2 \wedge \forall (x \ y : \text{Balls}), ((n1 \subseteq x \wedge n1 \subseteq y$

$\wedge x \subseteq n2 \wedge y \subseteq n2) \rightarrow (x \subseteq y \vee y \subseteq x))$ .

Definition  $\text{Ext\_diam\_tangent\_to } (n1 \ n2 \ n3 : \text{Balls}) := \text{Ext\_tangent\_to } n2 \ n1 \wedge \text{Ext\_tangent\_to } n3 \ n1 \wedge \forall (x \ y : \text{Balls}),$

$(n2 \subseteq x \wedge \text{Exterior\_to } x \ n1 \wedge n3 \subseteq y$

$\wedge \text{Exterior\_to } y \ n1) \rightarrow \text{Exterior\_to } x \ y$ .

Definition  $\text{Int\_diam\_tangent\_to } (n1 \ n2 \ n3 : \text{Balls}) := \text{Int\_tangent\_to } n2 \ n1 \wedge \text{Int\_tangent\_to } n3 \ n1 \wedge \forall (x \ y : \text{Balls}), (\text{Exterior\_to } x \ n1$

$\wedge \text{Exterior\_to } y \ n1 \wedge \text{Exterior\_to } n2$

$x \wedge \text{Exterior\_to } n3 \ y) \rightarrow \text{Exterior\_to } x \ y$ .

Definition  $\text{Congruent\_to } (n1 \ n2 : \text{Balls}) := n1 \subseteq n2 \wedge n2 \subseteq n1$ .

Definition  $\text{Conc\_with } (n1 \ n2 : \text{Balls}) := \text{Congruent\_to } n1 \ n2 \vee$

$(n1 \subset n2 \wedge \forall (x \ y : \text{Balls}), (\text{Ext\_diam\_tangent\_to } n1 \ x \ y \wedge \text{Int\_tangent\_to } x \ n2 \wedge$

$\text{Int\_tangent\_to } y \ n2) \rightarrow \text{Int\_diam\_tangent\_to } n2 \ x \ y) \vee$

$(n2 \subset n1 \wedge \forall (x \ y : \text{Balls}), (\text{Ext\_diam\_tangent\_to } n2 \ x \ y \wedge \text{Int\_tangent\_to } x \ n1 \wedge$

$\text{Int\_tangent\_to } y \ n1) \rightarrow \text{Int\_diam\_tangent\_to } n1 \ x \ y)$ .

Definition *Line* ( $n1\ n2 : Balls$ ) := *Conc\_with*  $n1\ n2 \rightarrow False$ .

Definition *Between* ( $n1\ n2\ n3 : Balls$ ) := *Congruent\_to*  $n1\ n2 \vee$  *Congruent\_to*  $n1\ n3 \vee \forall (x\ y : Balls), (Ext\_diam\_tangent\_to\ x\ n1\ n2 \wedge$   
*Ext\\_diam\\_tangent\\_to\ n1\ x*  
 $y \wedge Ext\_diam\_tangent\_to\ y\ n1\ n3)$ .

Definition *SameSide\_of* ( $n1\ n2\ n3 : Balls$ ) := *Between*  $n2\ n1\ n3 \vee$  *Between*  $n1\ n2\ n3 \vee$   
*Conc\_with*  $n1\ n2$ .

Definition *Aligned\_with* ( $n1\ n2\ n3 : Balls$ ) :=  $\exists (m1 : Balls), (Conc\_with\ m1\ n1 \wedge (\exists (m2 : Balls),$   
*Conc\_with*  $m2\ n2 \wedge (\exists (m3 : Balls), Conc\_with\ m3\ n3 \wedge$   
*Ext\\_diam\\_tangent\\_to\ m1\ m2\ m3 \vee Ext\\_diam\\_tangent\\_to*  
 $m2\ m1\ m3 \vee Ext\_diam\_tangent\_to\ m3\ m1\ m2)))$ .

Definition *angle\_between* ( $n1\ n2\ n3 : Balls$ ) := *Line*  $n1\ n2 \wedge$  *Line*  $n2\ n3 \wedge \exists (m1\ m2$   
 $m3 : Balls), (Conc\_with\ m1\ n1 \wedge Conc\_with\ m2\ n2 \wedge Congruent\_to\ m1\ m2 \wedge$   
*Congruent\_to\ m2\ m3 \wedge Aligned\\_with\ m3\ n2*  
 $n3 \wedge Ext\_tangent\_to\ m2\ m3 \wedge SameSide\_of\ n1\ m1\ m2)$ .

Axiom *connected\_Nodes* :  $\forall (X\ Y : UDNNode), Line\ (@udnGeom\ X)(@udnGeom\ Y) \wedge ((@udn-$   
*Reliab\ X) = high) \wedge ((@udnReliab\ Y) = high) \rightarrow Connected\\_to\ X\ Y.*

Axiom *t\_of\_Exterior\_to* :  $\forall X\ Y\ Z, Exterior\_to\ X\ Y \wedge Exterior\_to\ Y\ Z \rightarrow Exterior\_to\ X\ Z$ .

Axiom *cv\_of\_between* :  $\forall (x\ y\ z\ z' : Balls), Between\ x\ y\ z \wedge Between\ z\ x\ z' \rightarrow Between\ x\ y\ z'$   
 $\wedge Between\ z\ y\ z'$ .

Axiom *trans\_of\_Aligned\_with* :  $\forall (x\ y\ z\ w : Balls), Aligned\_with\ x\ y\ z \wedge Aligned\_with\ y\ z\ w \rightarrow$   
*Aligned\_with*  $x\ y\ w$ .

Variables  $B1\ B2\ B3\ B4\ B5\ B6\ B7\ B8\ B9\ B10\ B11 : Balls$ .

Definition *o1* := *Embedding* 0 2.

Definition *o2* := *Embedding* 1 3.

Definition *o3* := *Embedding* 2 4.

Definition *o4* := *Embedding* 3 5.

Definition *o5* := *Embedding* 4 6.

Definition *o6* := *Embedding* 5 7.

Definition *o7* := *Embedding* 6 8.

Definition *o8* := *Embedding* 8 10.

Definition *o9* := *Embedding* 9 11.

Instance *Node1* : *ManHole* := {  
*mh1* :=  $B1$  ;  
*mh2* :=  $o1$  ;  
*mh3* := *Telecom* }.

Instance *Node2* : *UDNNode* := {  
*udnGeom* :=  $B2$  ;  
*udnCoord* :=  $o2$  ;  
*udnSensorType* := *GPR* ;  
*udnReliab* := *high* }.

Instance *Node3* : *UDNNode* := {  
*udnGeom* :=  $B3$  ;  
*udnCoord* :=  $o3$  ;  
*udnSensorType* := *GPR* ;  
*udnReliab* := *high* }.

```

Instance Node4 : UDNNode := {
  udnGeom := B4 ;
  udnCoord := o4 ;
  udnSensorType := GPR ;
  udnReliab := high}.
Instance Node5 : UDNNode := {
  udnGeom := B5 ;
  udnCoord := o5 ;
  udnSensorType := GPR ;
  udnReliab := high}.
Instance Node6 : UDNNode := {
  udnGeom := B6 ;
  udnCoord := o6 ;
  udnSensorType := GPR ;
  udnReliab := low}.
Instance Node7 : UDNNode := {
  udnGeom := B7 ;
  udnCoord := o7 ;
  udnSensorType := GPR ;
  udnReliab := high}.
Instance Node8 : UDNNode := {
  udnGeom := B8 ;
  udnCoord := o8 ;
  udnSensorType := GPR ;
  udnReliab := high}.
Instance Node9 : UDNNode := {
  udnGeom := B9 ;
  udnCoord := o9 ;
  udnSensorType := GPR ;
  udnReliab := high}.

Hypotheses (Et1 : Exterior_to (@mh1 Node1) (@udnGeom Node2))
  (l1 : Line (@mh1 Node1) (@udnGeom Node2))
  (Et2 : Exterior_to (@udnGeom Node2) (@udnGeom Node3))
  (l2 : Line (@udnGeom Node2) (@udnGeom Node3))
  (b1 : Between (@udnGeom Node2)(@mh1 Node1) (@udnGeom Node3))
  (Et3 : Exterior_to B3 B4)
  (l3 : Line B3 B4)
  (b2 : Between B3 B2 B4)
  (Et4 : Exterior_to B4 B5)
  (l4 : Line B4 B5)
  (b3 : Between B4 B3 B5)
  (Et5 : Exterior_to B5 B6)
  (l5 : Line B5 B6)
  (b4 : Between B5 B4 B6)
  (Et6 : Exterior_to B6 B7)
  (l6 : Line B6 B7)
  (b5 : Between B6 B5 B7)
  (Et7 : Exterior_to B7 B8)
  (l7 : Line B7 B8)

```



Lemma  $L_2$  : *Exterior\_to B1 B3.*

Lemma  $L_3$  : *Aligned\_with B1 B2 B4.*

Lemma  $L_4$  : *Connected\_to Node2 Node3.*

Lemma  $L_5$  : *Connected\_to Node5 Node6.*

End *application.*