

Thèse de doctorat en cotutelle**Entre****L'Université de Lille**

Laboratoire de Génie-Civil et de géo-Environnement

et**L'Université Cadi Ayad de Marrakech****Faculté Semlalia**

Laboratoire ingénierie des systèmes informatiques

Pour obtenir les grades de :

Docteur de l'Université de Lille en Génie Civil**&****Docteur l'Université Cadi Ayad de Marrakech en en informatique**

Présentée par :

Ahmed KADDIOUI**Titre : Utilisation de la réalité augmentée mobile dans la gestion des réseaux enterrés****Soutenue publiquement à Lille le 22 décembre 2021 devant le jury composé de :**

Pr. Hussein MROUEH	Université de Lille	Président
Pr. SHAHROUR Isam	Université de Lille	Directeur de thèse
Pr. Ahmed EL OIRRAK	Université faculté Semlalia Marrakech	Co-directeur de thèse
Pr. Sawsan SADEK	Université Libanaise	Rapporteur
Pr. Rachid EL AYACHI	Faculté des Sciences et Techniques – Béni Mellal	Rapporteur
Pr. Mostafa EL HACHLOUFI	FSJES, Ain Sbaa Casablanca	Examineur
Pr. Omar El Kharki	Faculté des sciences et techniques Tanger	Examineur
Dr. Quirin Hatem, Alia	ARCADIS	Examineur

À Bahria, ma mère, qui a consacré toute sa vie pour mon éducation.

Que Dieu vous donne longue vie et bonne santé.

À Abdellah, mon père, qui a fait de moi l'homme que je suis. Que

Dieu vous donne longue vie et bonne santé.

À mes deux sœurs Amina et Zineb

À mes deux chers Professeurs encadrant Isam SHAHROUR et
Ahmed EL OIRRAK dont tous les adjectifs mélioratifs du monde ne
suffisent pour décrire leurs nobles personnes

À mon oncle le Professeur Mohammed Najib qui n'a jamais cessé de
me donner des conseils qui illuminent mon chemin

À Monsieur le Professeur Ammar ALJER pour sa bonté, ces conseils
combien édifiants et sa générosité inégalée

À tous les membres de ma famille

À tous les membres du laboratoire LGCGE

À tous ceux qui ont œuvré de près ou de loin pour que j'en sois là
aujourd'hui

REMERCIEMENTS :

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de thèse, Professeur Isam SHAHROUR, sans lui ce travail n'aurait jamais pu aboutir. Je témoigne d'une grande gratitude, mes profonds respects et mon admiration pour sa noble personne. Merci énormément pour votre temps, votre attention pour vos précieux conseils.

J'adresse plus particulièrement mes sincères remerciements au Professeur Ahmed EL OIRRAK pour m'avoir encadré, pour sa disponibilité, ses encouragements et ses conseils combien précieux.

Je remercie le Professeur Hussien MROUEH qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse ainsi que l'ensemble des membres du jury : les professeurs Sawsan SADEK, Rachid EL AYACHI, Mostafa EL HACHLOUFI et Omar El Kharki et le Docteur Quirin Hatem Alia.

Merci d'avoir accepté de lire et d'évaluer mon travail de recherche. Merci pour vos remarques et vos conseils pertinents.

Je remercie l'ensemble des chercheurs, doctorants et collaborateurs du laboratoire LGCgE en France, en particulier les membres de l'équipe de recherche SunRise, et l'ensemble des membres du Laboratoire de l'ingénierie des systèmes informatique de la faculté Semlalia de Marrakech Au Maroc.

ABSTRACT:

This thesis is part of the Sunrise Smartcity Project.

It focuses on the management of underground networks such as water, electricity, wastewater, sanitation etc.

This work focuses as well on the use of augmented reality technology implemented on a smartphone to assist in the optimal management of underground networks.

The management of these networks is currently a delicate task because they are sometimes very old and do not have accurate data on their status and precise geolocation. Techniques used in their management and maintenance are sometimes costly, may cause security problems and interruption of vital supply services for society (interruption of water, electricity etc.).

We propose an innovative solution to solve certain shortcomings in the management of buried networks. In this framework we have implemented an hybrid augmented reality (mobile) system for the management of buried networks that combines the use of smartphone sensors and computer vision.

The thesis consists of three parts:

- The first part presents a synthesis of the state of the art of the research done to solve the problems related to the management of buried networks, the methods used and the problems that concern the use of augmented reality on a smartphone and its application for the management of underground networks.
- The second part presents the methodology used to design and implement a platform using augmented reality on a mobile device (Smartphone or tablet) for the management of buried networks.

- The third part deals with the application of the developed system for the management of the buried networks of “Cité Scientifique campus” of the University of Lille through operations of visualization of the existing buried networks, operations of installation of buried networks within the framework of the tasks of maintenance or extension and finally operations of surveying for underground networks.

Keywords : Buried networks, Augmented reality, Mobile Augmented reality, smart city, 3D GIS, real time, computer vision, scene recognition.

RESUME :

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du Projet Sunrise Smart city.

Elle se focalise sur la gestion des réseaux souterrains comme le réseau d'eau, électricité, eaux usées, assainissement etc.

Ce travail porte sur l'utilisation de la technologie de réalité augmentée sur un smartphone pour le management des réseaux enterrés.

La gestion de ces réseaux demeure actuellement une tâche délicate car ces réseaux sont parfois très anciens et ne disposent pas de données exactes sur leurs états et géolocalisations précises.

Les techniques utilisées dans les travaux de leurs gestions et maintenance sont parfois coûteuses, et causes des problèmes sécuritaires et interruption de distribution de services d'approvisionnement vitaux pour la société (interruption d'eau, électricité etc).

Nous proposons une solution innovante pour résoudre certaines lacunes dans la gestion des réseaux enterrés. Dans ce cadre nous avons implémenté un système de réalité augmentée mobile hybride pour la gestion des réseaux enterrés qui combine l'utilisation des capteurs du smartphone et la vision par ordinateur.

L'état de l'art des recherches effectuées pour résoudre les problèmes liés à la gestion des réseaux enterrés, les méthodes utilisées et les problèmes qui concernent l'utilisation de la réalité augmentée sur un Smartphone et son application pour la gestion des réseaux souterrains montrent qu'il existe des lacunes relatives à la précision de la localisation de l'appareil mobile utilisé, la latence dans la transmission des données entre l'appareil mobile et le serveur ainsi que la précision dans la projection des objets virtuels dans le monde réel.

Dans le but de combler ces lacunes une méthodologie a été adoptée. Elle consiste à concevoir et implémenter une plateforme utilisant la réalité augmentée hybride sur un appareil mobile (Smartphone ou tablette) pour la gestion des réseaux enterrés.

Le système développé pour la gestion des réseaux enterrés a été appliqué sur les réseaux enterrés du campus Cité scientifique de l'université de Lille à travers les opérations de visualisation des réseaux enterrés existants, les opérations de pose dans le cadre des tâches de maintenance ou extension et enfin les opérations d'arpentage de ces réseaux.

Mots clés : Réseaux enterrés, Réalité augmentée, Réalité augmentée mobile, ville intelligente, 3D SIG, temps réel, vision par ordinateur, reconnaissance de scène.

TABLES DES MATIERES :

Remerciements :	I
Abstract:	II
Résumé :	V
Table des matières.....	VIII
Liste des figures.....	XI
Liste des tableaux.....	XIII
Liste des abréviations.....	XIV
Introduction générale.....	20
1 Chapitre 1 « Réalité augmentée mobile pour la gestion des réseaux enterrés : « état de l'art »	26
1.1 Introduction	26
1.2 Défis de gestion des réseaux enterrés	27
1.2.1 Manque de données des réseaux urbains enterrés	27
1.1.1 Défauts dans les méthodes de numérisation et traitement des données	28
1.1.2 Difficultés d'accès et de communication des données	29
1.2 Méthodes non intrusives pour la détection et localisation des réseaux enterrés.....	30
1.2.1 Méthodes acoustiques	30
1.2.2 Méthodes électromagnétiques	31
1.3 La Réalité Augmentée Mobile.....	33
1.3.1 Les principes d'utilisation de la MAR	33
1.3.2 La Réalité Augmentée Mobile basée sur des capteurs (Sensor based)	35
1.3.3 La Réalité Augmentée Mobile basée sur la vision par ordinateur (computer vision based MAR)	36
1.3.4 La Réalité Augmentée Mobile hybride	38
1.3.5 Les défis liés à l'utilisation de la réalité augmentée mobile.....	38

1.3.6	Framework pour le développement des applications MAR.....	39
1.3.7	Choix du réseau de connexion	40
1.4	Performance des MAR	42
1.4.1	Parallélisme des processeurs multi-core	42
1.4.2	Traitement au niveau du processeur de la carte graphique (GPU).....	43
1.4.3	Efficacité du cache	44
1.4.4	Externalisation du calcul	45
1.4.5	Affichage local sur l'appareil mobile et traitement sur serveur (LRRC).....	45
1.4.6	Calcul et traitement de l'affichage au niveau du serveur (R3C)	45
1.4.7	Calcul approximatif.....	46
1.4.8	Efficacité énergétique.....	47
1.5	Application de la réalité augmentée mobile dans les réseaux enterrés.....	48
1.6	Conclusion	51
1.7	Références Bibliographiques utilisées dans ce chapitre	53
2	Chapitre 2 « Methodologie de recherche »	60
2.1	Introduction	61
2.2	Description de l'architecture du système.....	65
2.3	Flux de donnée entre les différentes couches	68
2.3.1	Traitement des données géospatiales pour la visualisation MAR.....	68
2.3.2	Traitement des données géospatiales à la couche de transformation	69
2.3.3	Déroulement des opérations de filtrage.....	70
2.3.4	Déroulement des opérations de transformation.....	70
2.3.5	Déroulement des opérations de visualisation compréhensibles	70
2.4	Déroulement de l'interaction.....	72
2.4.1	Sélection	72
2.4.2	La Manipulation	73

2.4.3	L'Opération de transformation.....	73
2.4.4	La Navigation.....	73
2.5	Conclusion.....	74
2.6	Références bibliographiques.....	75
3	Chapitre 3 : Réalisation d'une plateforme « Réalité Augmentée Mobile » pour la gestion les réseaux enterrés : Application sur le campus de la Cité Scientifique de l'Université de Lille ».	79
3.1	Introduction	79
3.2	Présentation la plateforme « Réalité Augmentée Mobile ».....	80
3.2.1	Définition de la réalité augmentée mobile	80
3.2.2	Présentation du campus de la cité scientifique.....	81
3.3	Les Spécificités du Smartphone	87
3.3.1	Définition	87
3.3.2	capteurs utilisés dans la plateforme RAM.....	88
3.4	Les Logiciels utilisés.....	90
3.4.1	Le Logiciel Unity	90
3.4.2	Le logiciel WIKITUDE SDK.....	91
3.4.3	Moteur de manipulation des caractéristiques (FME)	92
3.5	Présentation de la plateforme	94
3.5.1	La phase d'Analyse	94
3.5.2	cas d'utilisation (CU)	94S
3.5.3	Diagramme de séquences	101
3.5.3.1	Diagramme de séquence « Authentification »	101
3.5.3.2	Description des bases de données	105
3.5.3.3	Application sur le campus de cité scientifique.....	106
3.6	Conclusion	111
3.7	Références utilisées dans ce chapitre	112

4	Conclusion Générale	116
5	Références	119

LISTE DES FIGURES :

Figure 1 : Classification des systèmes MAR selon leurs modes de tracking.....	34
Figure 2: Composants d'une application (Sensor based MAR) (Chatzopoulos et al., 2017)	36
Figure 3: Marker based MAR (KADDIOUI et al.,2019).....	37
Figure 4: Nature feature based MAR (KADDIOUI et al.,2019).....	37
Figure 5: Architecture client-serveur du système	65
Figure 6: Flux de données entre les 3 couches du système	66
Figure 7: Campus cité scientifique	81
Figure 8: Réseaux d'eau et bornes d'incendie du campus cité scientifique (Farah 2016)	82
Figure 9: Réseau de chauffage du campus cité scientifique (Ayari 2014).....	83
Figure 10: Réseau électrique campus cité scientifique (Sakr 2017).....	85
Figure 11: Réseaux des eaux pluviales de la cité scientifique (Abou Rjeily 2016)	86
Figure 12: Réseaux des eaux usées de la cité scientifique (Abbas 2015)	87
Figure 13: capteurs du Smartphone	88
Figure 14: Différents cas de déplacement d'un smartphone.....	90
Figure 15: Architecture du SDK Wikitude.....	92
Figure 16: Architecture de serveur FME.....	93
Figure 17: Diagramme de séquence « Authentification ».....	102
Figure 18: : Diagramme de séquence « CRUD réseaux ».....	103
Figure 19: : Diagramme de séquence « Visualisation des réseaux »	104
Figure 20: : Diagramme de séquence « Extension réseaux »	105
Figure 21: Couleur du marquage selon la norme NF P 98-332	107
Figure 22: Visualisation des réseaux du campus cité scientifiques.....	108

Figure 23 : affichage des natures de réseaux	108
Figure 24: informations complémentaires d'un objet sélectionné	109
Figure 25: Visualisation des réseaux du campus cité scientifiques.....	109
Figure 27: Ajout d'un élément au réseau électrique	110

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1: Exemple de classification de systèmes MAR selon leurs modes de tracking.	35
Tableau 2: Comparaison de différents types de réseaux sans fils pour les applications MAR (Chatzopoulos et al., 2017)	42
Tableau 3: Cas d'utilisation « CRUD un compte » par l'administrateur	95
Tableau 4: Cas d'utilisation « CRUD réseau » par l'administrateur	96
Tableau 5: Cas d'utilisation « CRUD réseaux » par l'utilisateur	97
Tableau 6: Cas d'utilisation « Visualisation des réseaux »	98
Tableau 7: Cas d'utilisation « Relève d'information »	99
Tableau 8: Cas d'utilisation « Extension des réseaux »	100
Tableau 9: Représentation d'un diagramme de séquence	101

LISTE DES ABREVIATIONS :

2D :	Deux dimensions
3D :	Trois dimensions
4G :	Quatrième génération
API :	Application programming interface
ARC:	Application resilience caractérisation
BIM:	Building Information Modeling
CAO :	Conception assistée par ordinateur
CPU :	Central Processins Unit
CRUD :	Créer, Consulter, modifier et supprimer
EM :	Electromagnétique
ETL:	Extract, transforme and load
FME :	Feature Manipulation Engine
FPGA:	Field-programmable gate array
GLONASS :	Système de navigation satellitaire russe
GNSS :	Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites.
GPR :	Ground penetrating System

GPU :	Graphics Processing Unit
GT :	Gaz tracker
IBR :	Image-based Rendering
IOS :	iPhone Operating System
LRRC :	Local rendering remote computing
MIMO :	Multiple-Input Multiple-Output
OPPBT :	L'Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics
PE :	Matière plastique particulière
POI :	Point d'intérêt
PVC :	Matière plastique particulière
RA :	Réalité augmentée
RAM:	Réalité augmentée mobile
RFID:	Radio Frequency Identification
RTK:	Real-Time Kinematic
SIFT:	Scale-invariant feature transform
SIG:	Système d'information géographique

SURF:	Speeded Up Robust Features
UMTS:	Universal Mobile Telecommunications System
UWB:	Ultra-wideband
UX:	User experience
WLAN:	Wireless Local Area Network
WPAN:	Wireless Personal Area Network
WWAN:	Wireless Wide Area Network

**Titre : Utilisation de la réalité augmentée mobile pour la
gestion des réseaux enterrés**

INTRODUCTION GENERALE

Sujet de thèse et son importance :

Ce travail de thèse concerne le développement des outils modernes basés sur la technologie numérique pour la gestion des réseaux urbains enterrés. Actuellement, cette gestion pose de nombreux défis pour les villes et les entreprises qui interviennent sur ces réseaux pour des opérations d'inspection, de réparation, de maintenance, de rénovation ou d'extension.

Ce sujet est particulièrement important, car les réseaux urbains souterrains assurent des services vitaux pour les villes, tels que la distribution de l'eau potable et de l'électricité, le service de télécommunication et le service de collecte et de transport des eaux usées et pluviales.

En effet de nos jours, les villes existantes regorgent de réseaux qui sont souvent très anciens. Ceci engendre des problèmes liés particulièrement à la méconnaissance de leurs localisations. Lors des travaux en ville, plus particulièrement lorsqu'on est amené à creuser dans le sol, cette méconnaissance peut être à l'origine d'incidents dangereux et coûteux dans la mesure où elle peut causer des dégâts matériels, humains ou environnementaux ainsi que des interruptions de services vitaux pour la ville. Or, ces opérations sont indispensables pour répondre aux besoins des usagers. Toutefois, la détermination avec précision de la position des réseaux enterrés demeure une tâche délicate. Les méthodes classiques de détection et de localisation de ces réseaux manquent de précision et n'offrent pas la possibilité de visualisation de ces réseaux. Dans ce contexte, il s'avère judicieux d'utiliser des méthodes innovantes pour la détection et la localisation précise des canalisations et des câbles enterrés afin d'éviter ou au moins minimiser les risques d'incidents qui peuvent surgir lors de ces travaux.

Les récents développements dans le domaine de la « Réalité Augmentée » en général et de la Réalité Augmentée sur Mobile (MAR), accompagnés du développement des Smartphones présentent une grande opportunité, non seulement pour développer des applications mobiles

permettant de localiser et visualiser les réseaux souterrains afin de prévenir les incidents lors des travaux de maintenance ou de réparation, mais aussi pour offrir des services innovants pour la gestion de ces réseaux.

Défis de gestion des réseaux urbains enterrés

La gestion des réseaux souterrains est confrontée au manque de données de leurs localisation et états ainsi qu'aux difficultés de partage de données entre les acteurs concernés. En effet, dans la plupart des villes, une partie non négligeable des réseaux souterrains est très ancienne. Par conséquent, les villes ne disposent pas d'archives sur la localisation de ces réseaux et parfois même sur leur existence. Ce manque de données constitue l'une des principales causes des incidents lors des travaux en ville. A titre d'exemples, près de 274000 incidents impliquant des dommages aux réseaux enterrés ont été signalés aux États Unis et au Canada en raison du manque de données des réseaux enterrés (Booth et al., 2016) (DIRT, 2014). L'absence ou l'imprécision de ces données résulte dans l'utilisation de modèles imprécis qui peuvent avoir des répercussions négatives sur la gestion de ces réseaux.

Les données des réseaux souterrains urbains existent en formats PDF ou papier, qui ne sont pas facilement exploitables (House of Commons, 2014). Le traitement manuel de ces documents est lent et très coûteux. D'après (Booth et al., 2016), la productivité des services publics souterrains peut être augmentée de 15 % si les informations sur les réseaux enterrés souterrains sont numérisées. Une gestion manuelle des données des réseaux enterrés peut compromettre la qualité, l'échelle, les détails et surtout la précision des données de localisation de ces réseaux. Ceci pénalise la prise de décisions pour la gestion et la maintenance de ces réseaux. Les données manquantes peuvent provoquer des perturbations importantes, notamment des temps d'arrêt et des retards dans les travaux de maintenance, des dommages aux services publics, une menace omniprésente pour la vie humaine, des coûts supplémentaires et des dommages physiques et environnementaux.

Les données des réseaux souterrains sont hétérogènes en raison leur diversité, de la multitude d'acteurs et des techniques de collecte et d'enregistrement de ces données. A cela s'ajoute l'absence de cartographies complètes des emplacements des réseaux souterrains. Ces données sont conservées généralement dans des formats complexes de différentes plates-formes, ce qui entrave la fluidité de leur partage entre les parties prenantes.

En l'absence des données numérique, le temps nécessaire pour l'obtention de données sur les réseaux souterrains est souvent excessif. Une numérisation des données de ces réseaux avec une collaboration intersectorielle peut aider à réduire les couts de maintenance de ces réseaux (Great Britain and HM Treasury, 2013).

Dans cette recherche, on propose d'utiliser la technologie de Réalité Augmentée implémentée sur un appareil mobile pour la gestion des réseaux urbains enterrés. Cette technologie consiste à associer à la vue du monde réel des « informations augmentées » : texte, images, des vidéos, son, objets 3D, etc. Cette technologie combine les capacités des appareils mobiles intelligents et du Système d'information Géographique (SIG) qui permet de traiter, à très grandes échelles des bases des données urbaines, avec des informations géolocalisées et sémantiques. La Réalité Augmentée sur Smartphone (MAR) s'avère efficace pour créer, modifier et mettre à jour les données géospatiales des objets urbains. Elle permet aussi d'interagir avec des représentations graphiques 3D des données géospatiales augmentées dans la vue de l'utilisateur sur un Smartphone. L'un des principaux défis des visualisations MAR interactives de données provenant de systèmes d'information géographique (SIG) est l'établissement du lien adéquat et compréhensible entre la visualisation par la MAR et la base de données géographique permettant leurs modifications interactives.

Le BIM et le SIG 3D ont été utilisés pour la conception et les données spatiales pendant les phases de planification et de construction, ainsi que pour la gestion du cycle de vie de ce système (Huston et al., 2017). Les progrès récents dans les capteurs, les microsystemes

embarqués, l'Internet et les communications sans fil ont conduit à l'évolution d'une nouvelle génération de plates-formes informatiques distribuées et ont abouti à des systèmes innovants pour la représentation, l'interaction et l'acquisition de données.

Un système avancé basé sur la RA a été développé pour la visualisation des infrastructures souterraines. Il s'agit d'une tablette utilisée comme outil d'affichage à laquelle une unité de mesure inertielle est incorporée, ainsi qu'une antenne GPS pour la localisation et une caméra. Ce système permet de générer un relevé interactif des données géospatiales et d'utiliser la cinématique en temps réel pour résoudre le problème de localisation (Schall et al., 2013). L'utilisation de cibles physiques permet d'assurer l'orientation du dispositif avec une précision acceptable. La difficulté de cette technique est liée à la nécessité de déterminer les points cibles, ce qui est très complexe en milieu encombré comme celui de la ville. (Yang et al., 2019) a proposé un système de réalité augmentée qui permet de créer, lire, mettre à jour et supprimer des données d'une base de données géospatiales par le biais d'un système mobile qui est connectée à Internet au moyen d'une architecture client-serveur. La ville de Chicago a déployé un système pour la cartographie de la ville et l'évaluation des infrastructures souterraines (Ian Sherr, 2017). (Pereira et al., 2018) ont proposé l'intégration d'un système GPR avec un système de positionnement mobile AR. Ce système utilise les principes fondamentaux de la détection GPR et la technologie AR de Google Tango. Il peut effectuer un balayage circulaire GPR sur une distance de 50 m et attribuer des coordonnées géographiques précises aux éléments souterrains détectés.

D'autres groupes de recherche ont essayé de rendre les systèmes de RA plus compacts et mobiles, (Schall et al., 2013) ou (Kruijff et al., 2010). (Zhang et al., 2014) ont mis en œuvre des méthodes de visualisation basées sur des techniques de focalisation et de contexte, de filtrage et de stylisation (Booth et al., 2016) et (Kalkofen et al., 2009).

Pour permettre la visualisation compréhensible des données SIG, (Mendez et al., 2008) a introduit un pipeline de transformation qui permet la mise en correspondance de différentes stylisations avec les données SIG.

Contribution de ce travail de thèse :

Les méthodes évoquées ci-dessus fonctionnent généralement d'une manière unidirectionnelle. Elles fournissent des fonctions de visualisation passive. L'objectif principal de notre travail est d'assurer une gestion bidirectionnelle des données pour permettre des manipulations interactives et une visualisation compréhensible des données SIG. Ce travail vise à maintenir la cohérence entre la base de données SIG et les représentations géométriques 3D visualisées à l'aide de la réalité augmentée mobile. Ceci ouvre de nouvelles perspectives pour la gestion des réseaux enterrés à l'aide de la MAR-SIG tout en assurant une interaction de l'utilisateur avec le monde réel.

Le mémoire de thèse est composé de trois chapitres.

Le premier chapitre présente l'état de l'art de l'utilisation de la Réalité Augmentée mobile (MAR) pour la gestion des réseaux urbains souterrains. Il présente successivement les principaux défis de la gestion des réseaux urbains enterrés, les méthodes non intrusives pour la détection et localisation de ces réseaux enterrés, l'utilisation de tags RFID pour l'identification des éléments des réseaux enterrés, la Réalité Augmentée sur Mobile avec notamment le principe de fonctionnement de cette technologie, les défis de son utilisation et ses services potentiels dans la gestion des réseaux enterrés.

Le deuxième chapitre présente la méthodologie suivie pour la construction d'un système de Réalité Augmentée sur Smartphone. Il présente d'abord une synthèse de l'état de l'art avec un intérêt pour les défis de gestion de ces réseaux et les expériences acquises dans l'utilisation du système d'Information Géographique (SIG) et de la Réalité Augmentée dans la gestion de

des réseaux urbains enterrés. Ce chapitre présente une description de l'architecture du système RAM qui a été développé dans le cadre de cette thèse pour la gestion des réseaux enterrés. Ce système est basé sur trois couches : La couche de la base de données SIG, la couche de géométrie 3D, et la couche de transformation. Le chapitre présente aussi les opérations de traitement de données, notamment les opérations de filtrage, de transformation, et de visualisation.

Le troisième chapitre présente le fonctionnement de la plateforme « Réalité Augmentée Mobile » qui a été développée dans le cadre de cette thèse et son application aux réseaux enterrés du Campus de la Cité Scientifique. Ce chapitre présente d'abord le site d'application de cette technologie, à savoir le campus de la Cité Scientifique de l'Université de Lille, qui a servi de base pour un projet pilote « SunRise Smart City » de la ville intelligente (Ayari 2014, Abbas 2015, Shahrour et al. 2016a et 2016b, Afaneh 2016, Abou Rjeily 2016, Farah 2016, Sakr 2017, Farah et Shahrour 2017). Il présente d'abord une synthèse des données collectées sur les réseaux urbains du campus ainsi que leur intégration dans le SIG SunRise smart City. Ensuite, il décrit le fonctionnement de la plateforme « Réalité Augmentée sur Mobile » et son application pour les cas d'usage suivants :

- La visualisation des réseaux existants ;
- Les opérations d'arpentage de ces réseaux ;
- Les opérations de mise en place de nouveaux éléments des réseaux.

1 Chapitre 1 « Réalité augmentée mobile pour la gestion des réseaux enterrés : « état de l'art »

1.1 INTRODUCTION

Ce chapitre se focalise sur l'état de l'art de l'utilisation de la Réalité Augmentée Mobile (MAR) pour la gestion des réseaux urbains souterrains. Ce sujet est particulièrement important, car les réseaux urbains assurent des services vitaux pour les villes, tels que la distribution de l'eau potable et de l'électricité, le service de télécommunication et le service de collecte et de transport des eaux usées et pluviales etc. Néanmoins les travaux d'installation, extension, réparation, gestion ou maintenance de ces réseaux constituent une tâche très délicate et non maîtrisée.

De nos jours, les villes existantes regorgent de réseaux qui sont souvent très anciens. Ceci engendre des problèmes liés à la méconnaissance de leurs localisations. Lors des travaux en ville, plus particulièrement lorsqu'on est amené à creuser dans le sol, cette méconnaissance peut être à l'origine d'incidents dangereux et coûteux dans la mesure où ils peuvent causer des dégâts matériels, humains ou environnementaux ainsi que des interruptions de services vitaux pour la ville.

Les opérations d'inspection, maintenance, réparation et d'extension des réseaux souterrains sont indispensables pour répondre aux besoins quotidiens de la population urbaine. Toutefois, la détermination avec précision de la position des réseaux enterrés demeure une tâche difficile. En effet, les méthodes classiques de détection et localisation des réseaux souterrains manquent de précision. Dans ce contexte, il s'avère judicieux d'utiliser des méthodes non intrusives innovantes pour la détection et la localisation précise des canalisations et câbles enterrés afin d'éviter ou au moins minimiser les risques d'incidents qui peuvent surgir lors de ces interventions.

Les récents développements dans le domaine de la Réalité Augmentée en général et de la Réalité Augmentée Mobile (MAR), accompagnés du développement des Smartphones et tablettes, présentent une grande opportunité, non seulement pour développer des applications mobiles permettant de localiser et visualiser les réseaux souterrains afin de prévenir les incidents, mais aussi pour offrir des services innovants pour la gestion de ces réseaux.

Ce chapitre présente une synthèse de l'état de l'art des défis liés à la gestion des données des réseaux enterrés, les méthodes de détection et de localisation actuellement employées et l'utilisation de la Réalité Augmentée Mobile (MAR) dans la gestion de ces réseaux.

1.2 DEFIS DE GESTION DES RESEAUX ENTERRES

La gestion des réseaux urbains enterrés est une tâche très complexe. Ceci est dû à la qualité des données de ces réseaux, à leur faible partage entre les différents acteurs et aux contraintes liées aux méthodes de détection et localisation utilisées.

1.2.1 MANQUE DE DONNEES DES RESEAUX URBAINS ENTERRES

La gestion des réseaux souterrains est confrontée aux obstacles liés à la mauvaise qualité ou l'absence de données de ces réseaux ainsi qu'aux difficultés de leur partage entre les parties prenantes.

Dans la plupart des villes, une partie non négligeable des réseaux souterrains sont très anciens. Les villes ne disposent pas d'archives sur la localisation de ces réseaux et parfois sur leur existence. Les informations disponibles sont souvent non dématérialisées. Ce manque de données sur les réseaux enterrés constitue l'une des principales causes des incidents lors des travaux en ville. Par exemple, rien qu'aux États-Unis et au Canada, 273599 incidents impliquant des dommages aux réseaux d'approvisionnement souterrains ont été enregistrés en raison de manque de données sur les réseaux (DIRT, 2014). Ce manque d'informations sur l'état des

réseaux souterrains empêche la prédiction de la nature et des moments quand des incidents pourraient surgir ainsi que leurs impacts sur d'autres réseaux avoisinants.

Les réseaux souterrains peuvent se détériorer en raison d'une combinaison de leurs propres conditions et des conditions environnantes. Par exemple, les tuyaux peuvent être sensibles aux fissures, aux trous et aux joints inefficaces dus à leur matériau de fabrication, de leur âge, de leur construction et de la géologie environnante. L'absence ou l'imprécision des données des réseaux enterrés conduit également à la création de modèles imprécis et se répercute négativement sur la fiabilité des prises de décisions. Quand il y a une nécessité de remplacer les réseaux souterrains vieillissants, les modèles créés à partir d'une meilleure analyse des données peuvent aider à une meilleure prise de décision. En retour, ceci aide les entreprises à hiérarchiser leurs investissements. Ainsi, les réseaux souterrains pourraient fonctionner plus efficacement tout en optimisant les coûts engagés et ceux payés par les clients.

1.1.1 Défauts dans les méthodes de numérisation et traitement des données

De nos jours, les données des réseaux souterrains urbains ne sont pas numérisées intégralement. Ils existent en formats PDF ou papier, qui ne sont pas facilement exploitables (House of Commons, 2014). En conséquence, le traitement manuel des documents papier est lent et très coûteux. La productivité dans le secteur des services publics souterrains peut être augmentée de 15 % si les informations souterraines seraient numérisées (Booth et al., 2016).

Les méthodes de numérisation utilisées lorsque les enregistrements dessinés à la main sont convertis au format numérique entraînent des pertes de données historiques importantes. En effet, généralement un processus manuel pour la capture des données est souvent utilisé. Cette manière de faire peut compromettre la qualité, l'échelle, les détails et surtout la précision des données de localisation des réseaux. Ceci pénalise ainsi la prise de décisions judicieuses pour la gestion et de la maintenance de ces réseaux. Les données manquantes

des réseaux enterrés pourraient provoquer des perturbations importantes, notamment des temps d'arrêt et des retards dans les travaux de maintenance, des dommages aux services publics, une menace omniprésente pour la vie humaine, des coûts supplémentaires et des dommages physiques et environnementaux.

1.1.2 Difficultés d'accès et de communication des données

La gestion des données par les collectivités est complexe. Les données dont disposent les services publics sont hétérogènes en raison des différentes méthodes de collecte et d'enregistrement, des logiciels utilisés, et des changements organisationnels majeurs depuis la construction des réseaux enterrés. De plus, il y a absence de cartographies complètes des emplacements des réseaux souterrains qui soient entièrement précises. Ces données sont conservées généralement dans des formats complexes de différentes plates-formes, ce qui entrave la fluidité de leur partage entre les parties prenantes.

De plus, à cause de l'absence de cartographies complètes des emplacements des réseaux souterrains au niveau national qui soient entièrement précises. Généralement, des plans en deux dimensions des emplacements des réseaux souterrains existent et sont partagés entre les collectivités locales et les parties prenantes. Toutefois, ces données ne contiennent pas suffisamment d'informations détaillées. En effet, dans certains cas, les données peuvent exister, mais une incohérence peut apparaître à cause de la diversité des fournisseurs de données. Cette variation peut entraîner de nombreux problèmes de divergence.

Le manque de compréhension et de connaissances approfondies des réseaux souterrains les rend difficiles à gérer et à répondre aux exigences réglementaires. Par conséquent, Il est très difficile d'obtenir une vue intégrale des réseaux souterrains d'une zone d'intérêt, y compris les données de troisième dimension et les réseaux privés. Par conséquent des conflits avec d'autres réseaux appartenant à d'autres propriétaires surgissent.

Par ailleurs, le temps demandé pour l'obtention de données des réseaux souterrains s'avère excessif. Il est difficile d'obtenir les données des réseaux selon les frontières électorales afin d'avoir une visibilité complète sur leurs étendus. Les retards dans la collecte des données et d'informations pertinentes peuvent entraîner des blocages dans les approbations de travaux nécessaires à leurs maintenances. Ainsi, Prévoir une plus grande collaboration intersectorielle avec les parties prenantes des services publics souterrains peut aider à réduire les couts de maintenance de ces réseaux (Great Britain and HM Treasury, 2013).

1.2 Méthodes non intrusives pour la détection et localisation des réseaux enterrés

Les méthodes classiques de détection et localisation des réseaux enterrés sont coûteuses et entraînent des risques et des perturbations. Les gouvernements cherchent des approches alternatives pour résoudre les inconvénients des méthodes de détections et localisation intrusives (Zaneldin et al., 2020). L'objectif attendu est de résoudre le problème de la détection des réseaux souterrains à travers la détermination des localisations précises de ces réseaux quelque soient leurs matériaux, fonctions, densité, les produits transportés ou la nature du sol (Hafsi et al., 2017).

Dans cette section, je m'intéresse aux méthodes de détection non intrusives pour la détection des réseaux souterrains à savoir la méthode acoustique et la méthode électromagnétique (Abdelnour et al., 2018).

1.2.1 Méthodes acoustiques

La méthode acoustique utilise des signaux sonores pour la détection des canalisations enterrées. Un générateur émet un signal acoustique, soit sur la canalisation à localiser ou dans le fluide qui y coule, ce qui provoque des vibrations perceptibles à l'aide d'un accéléromètre. Les vibrations sont détectées à la surface du sol grâce à un récepteur (Hafsi et al., 2017).

Le suivi des points de réception permet de déterminer le tracé de cette canalisation. Néanmoins, cette méthode ne permet de détecter que les canalisations non métalliques où le signal aura été injecté. L'appareil de détection s'utilise en terrain correctement compacté. Il est inefficace en terrain peu compact ou sous trottoir en béton. La présence d'un fourreau, d'autres obstacles ou d'une circulation peut perturber la qualité du signal. Cette méthode n'est utilisée généralement que pour les branchements et conduites en matière plastique (PVC et PE). Les branchements de petites longueurs sont difficilement localisables à cause du brouillage sur le premier mètre. Cette méthode n'indique pas la profondeur de la canalisation. Aussi, elle ne permet pas de détecter l'ensemble des réseaux sur un lieu donné. Sa précision de localisation est de l'ordre de 20 cm (OPPBT, 2013). Cette faible précision peut causer des dégâts pour les canalisations avoisinantes en cas d'excavation.

1.2.2 Méthodes électromagnétiques

La détection par la méthode électromagnétique repose sur le principe de capter le champ magnétique induit dans une canalisation métallique par un courant électrique. Elle se compose de deux types de détection à savoir la détection passive et la détection active.

- **La technique de détection passive :**

Cette technique permet le repérage des réseaux enterrés qui sont fabriqués avec une matière capable de transporter un champ électromagnétique, à savoir les réseaux de téléphone, d'électricité, de fibre optique posée avec un câble conducteur type Plynox ou certains réseaux de gaz ou d'eau lorsqu'ils sont en acier, en cuivre, en plomb et que leur longueur est suffisante pour se « charger » d'une onde électromagnétique. Toutefois, cette technique ne permet ni la détection ni la localisation des canalisations non métalliques ou en béton (OPPBT, 2013).

- **La détection active :**

Cette méthode consiste à mesurer le champ électromagnétique induit dans le matériau par un champ créé à l'aide d'une bobine. Ce champ peut être émis au contact d'une canalisation ou à distance sans connaissance préalable des canalisations existantes. Elle peut être utilisée pour détecter les câbles électriques et les canalisations métalliques ; les canalisations en plastique sont exclues du champ d'application de ce type des méthodes (OPPBT, 2013).

- a) La détection par radar géophysique ou géologique**

La méthode hybride (Hafsi et al., 2017) combine la détection automatique basée sur la représentation des connaissances dans les ontologies et le raisonnement sur ces connaissances pour calculer les niveaux de confiance et améliorer les traitements des données provenant de trois types d'entrées : les métadonnées GPR et données traitées automatiquement, les métadonnées électromagnétiques et les informations préalables sur le sol, l'environnement et la carte fournie. Toutefois, cette méthode ne traite pas l'agrégation multi-capteurs de données hétérogènes fournies par plusieurs capteurs comme GPR, électromagnétique « EM », Gaz tracker « GT » et la détection par RFID « ELIOT ».

- b) L'utilisation des tags RFID**

Les systèmes RFID sont considérés comme technique alternative rentable et moins compliquée pour marquer et détecter les réseaux enterrés (Lucianaz et al., 2015). Les principaux défis de cette utilisation sont l'alimentation des capteurs et les difficultés de transmission dus à l'atténuation des signaux électromagnétiques par le sol. Pour surmonter ce problème, certains auteurs ont utilisé des tags RFID actifs (BenSaleh et al., 2013). Il s'agit d'une étiquette harmonique passive pour la localisation des réseaux enterrés pour la localisation des réseaux souterrains (Abdelnour et al., 2018). La conception de tag est basée sur une antenne patch à double polarisation à bande ultra haute fréquence (UHF). L'un de ses dépôts est

connecté à un doubleur de fréquence basé sur une diode Schottky qui génère la deuxième harmonique, qui est transmise à l'aide d'un patch polarisé linéaire accordé à cette fréquence. Cette solution reste peu efficace car elle nécessite de doter toutes les canalisations d'étiquettes RFID. Aussi, la profondeur de détection est limitée à 1.2 m.

1.3 La Réalité Augmentée Mobile

Le développement des fonctionnalités et capacités des appareils mobiles, tels que les smartphones, les tablettes et lunettes de réalité augmentée, combinées à l'accès Internet omniprésent et aux avancées dans les domaines des réseaux informatiques, de la vision par ordinateur et du « cloud computing » ont consolidé l'utilisation de la réalité augmentée mobile (MAR) dans plusieurs domaines. Bien que les appareils mobiles soient plus limités en termes de calcul par rapport aux ordinateurs traditionnels, ils disposent néanmoins d'un ensemble de capteurs qui peuvent être utilisés pour développer des applications MAR plus sophistiquées qui peuvent être assistées par serveurs distants. Cette technologie peut présenter une solution efficace pour la détection, localisation précise et visualisation des réseaux enterrés.

Cette section passe en revue les principes d'utilisation de la MAR et les défis à relever.

1.3.1 Les principes d'utilisation de la MAR

La Réalité Augmentée (RA) est une technologie qui offre une façon innovante d'interagir avec le monde réel. Dans le cas de la réalité augmentée visuelle, celle-ci crée une version modifiée de notre réalité, enrichie d'informations numériques (ou virtuelles) qui sont superposées et fusionnent avec les informations de la scène, de l'environnement de l'utilisateur et affichée sur l'écran d'un ordinateur de bureau ou d'un appareil mobile.

La Réalité Augmentée peut être aussi auditive. Dans ce cas, on utilise des casques modifiés ou des écouteurs équipés de microphones pour mélanger, en temps réel, le son de notre environnement avec le son généré par ordinateur (Grubert et Grasset, 2013). (Craig, 2013)

considère que tout système présentant les caractéristiques suivantes peut être considéré comme un système de Réalité Augmentée Mobile :

- Combine des objets réels et virtuels dans un environnement réel ;
- Situe et aligne les objets réels et virtuels les uns par rapport aux autres (registration and tracking) ;
- Exécute et/ou affiche la vue augmentée sur un appareil mobile.
- Interactif en temps réel ;

Selon le mode d'enregistrement (registration) et de suivi d'objet, la MAR peut être classée en réalité augmentée mobile basée sur les capteurs (sensor based mobile Augmented reality), basée sur la vision par ordinateur (computer vision based mobile Augmented reality) ou hybride en combinant les deux précédentes (Figure 1) et (Tableau 1) (Grubert et Grasset, 2013).

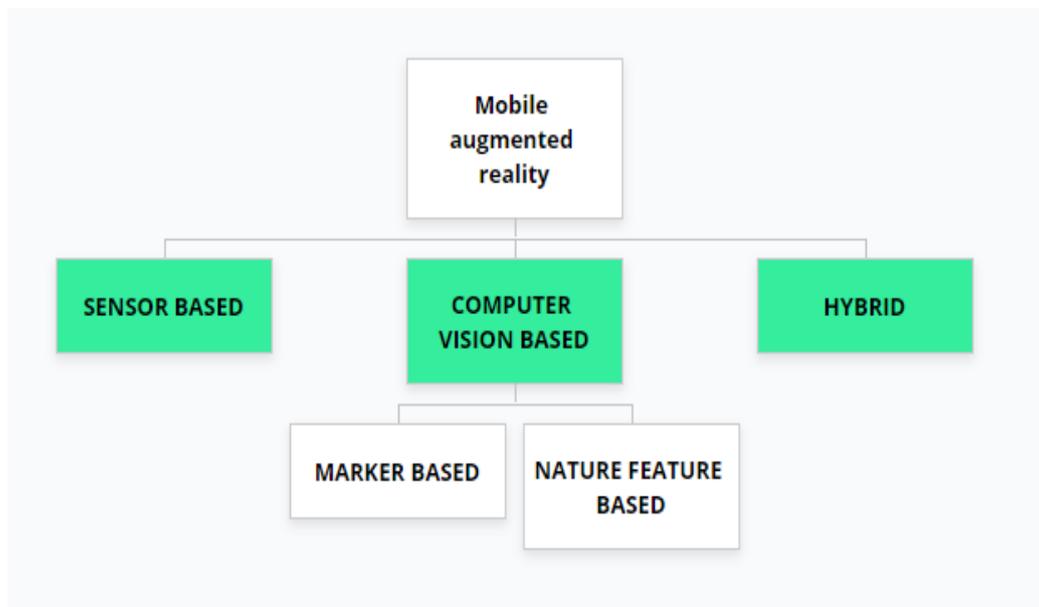


Figure 1 : Classification des systèmes MAR selon leurs modes de tracking

Tableau 1: Exemple de classification de systèmes MAR selon leurs modes de tracking

Système	Software platform	Tracking	Classification
Ingress	Android et iOS	GPS et digital compass	Sensor based
MapLens	Android	Nature feature tracking	Computer vision based
Virtual LEGO	UMAR	Visual marker tracking	Computer vision based
InfoSPOT	KHARMA	Sensors, geo-reference et visual markers	Hybride

1.3.2 La Réalité Augmentée Mobile basée sur des capteurs (Sensor based)

Ce système utilise le capteur de localisation GPS d'un appareil mobile ainsi que le capteur d'orientation (Figure 1.2). La combinaison des deux capteurs de localisation et d'orientation permet d'obtenir la position globale de l'utilisateur dans le monde physique. Le capteur de localisation est principalement pris en charge par un récepteur GNSS (Global Navigation Satellite System). L'un des récepteurs GNSS les plus populaires est le GPS (maintenu par les États-Unis), qui est présent sur la plupart des smartphones. D'autres systèmes sont actuellement (ou seront bientôt) déployés, tels que GLONASS (Russie), Galileo (Europe, 2020), ou Compass (Chine, 2020). Il existe plusieurs capteurs d'orientation sur les Smartphones, tels que les accéléromètres, les magnétomètres et les gyroscopes. La position et l'orientation mesurées fournissent des informations de suivi (tracking), qui sont utilisées pour situer et placer des objets virtuels sur la scène physique. La position signalée par le module GPS peut être à la fois inexacte et mise à jour plus lentement que les déplacements de l'utilisateur. Il peut en résulter un décalage, c'est-à-dire que lorsqu'on effectue un mouvement rapide, les éléments virtuels semblent flotter. L'un des types d'applications de la réalité augmentée (RA) les plus

populaires avec les systèmes à base de capteurs sont les navigateurs de Réalité Augmentée, qui visualisent les points d'intérêt (POI), c'est-à-dire des informations graphiques simples sur les objets réels du monde physique qui entourent l'utilisateur.

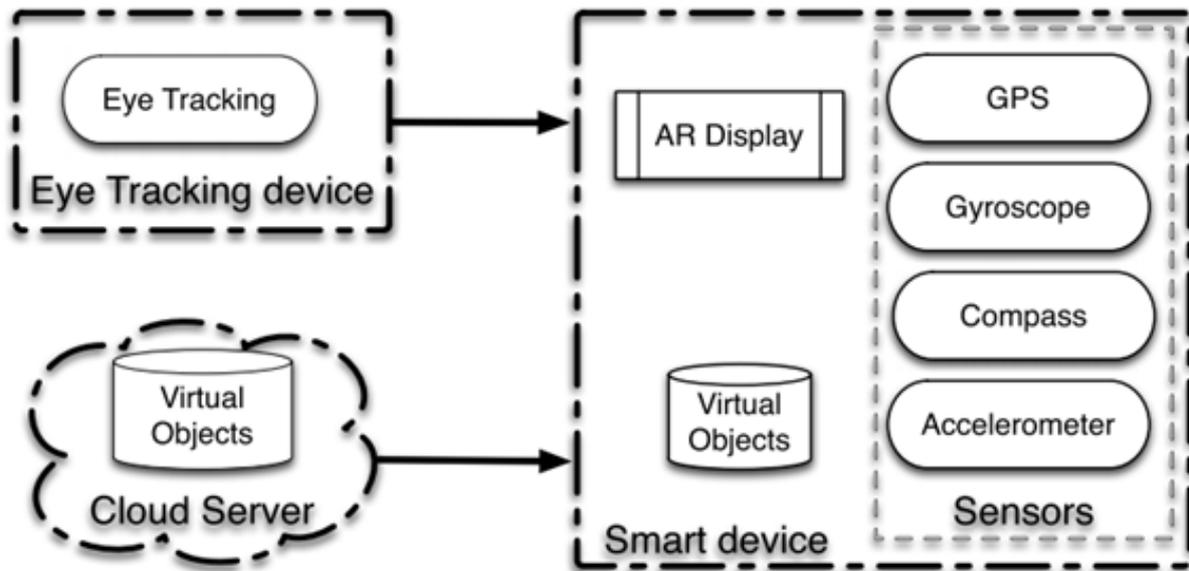


Figure 2: Composants d'une application (Sensor based MAR) (Chatzopoulos et al., 2017)

1.3.3 La Réalité Augmentée Mobile basée sur la vision par ordinateur (computer vision based MAR)

Cette technologie exploite la puissance de l'appareil photo intégrée à des fins autres que la capture et l'affichage des images du monde physique. Elle fonctionne généralement avec des algorithmes de traitement d'images et de vision par ordinateur qui analysent les images pour détecter les objets visibles par la caméra. Cette analyse peut fournir des informations sur la position des différents objets qui figurent dans une image, de l'utilisateur et contribuer ainsi à la superposition des objets sur la scène réelle et leurs suivis également. Cette technologie permet justement de reconnaître différents types de contenu pictural planaire, tels qu'un marqueur spécifique (MAR marker based) (figure 3) ou contenu naturel (MAR marker-less based) (figure 4) (Grubert et Grasset, 2013).

De nombreuses bibliothèques peuvent être utilisées pour faciliter l'implémentation de cette technologie (Chatzopoulos et al., 2017).

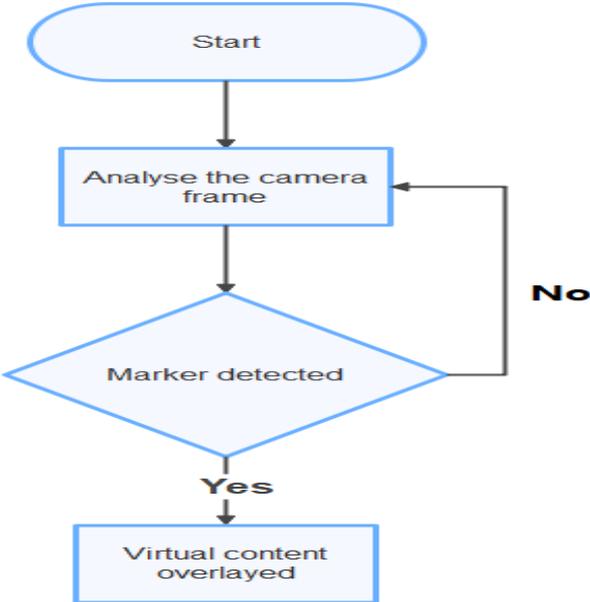


Figure 3: Marker based MAR (KADDIOUI et al.,2019)

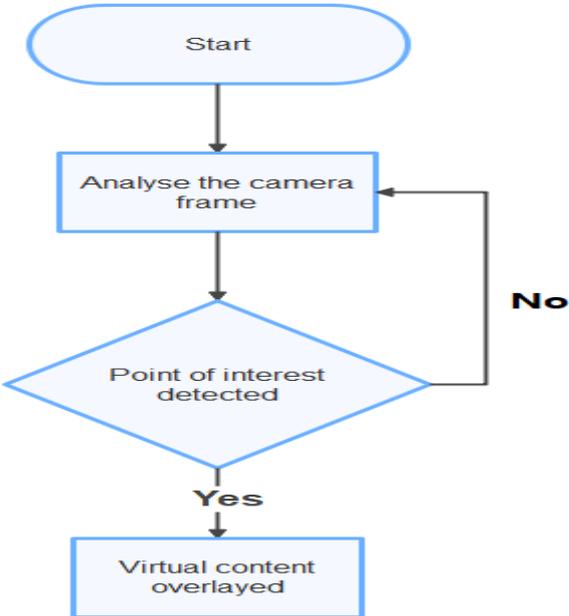


Figure 4: Nature feature based MAR (KADDIOUI et al.,2019)

1.3.4 La Réalité Augmentée Mobile hybride

Cette technologie tente de surmonter les limitations des méthodes précédentes. Elle combine la MAR basée sur les capteurs avec l'utilisation de la technologie de vision par ordinateur (Langlotz et al., 2012). Dans cette optique, (Shi et al., 2015) ont proposé un système de navigation basé sur la réalité augmentée mobile (MAR) pour la localisation individuelle. Il comporte trois modules : la localisation de l'appareil mobile ; la détection de marqueurs, l'affichage des objets 3D et de guidage de localisation. Les résultats expérimentaux montrent que le système proposé est à la fois efficient et efficace pour aider les personnes à localiser leur position. Il améliore l'expérience des utilisateurs en leur offrant un affichage et un partage des informations dynamiques, tridimensionnels et plus intuitifs.

1.3.5 Les défis liés à l'utilisation de la réalité augmentée mobile

Les besoins croissants des utilisations des applications MAR nécessitent la création d'applications plus attrayantes, plus sophistiquées et plus innovantes. Les avancées technologiques ne peuvent pas suivre le rythme de ces besoins. Par conséquent, les développeurs d'applications MAR se trouvent contraints d'adapter les solutions existantes à la MAR comme la « computation outsourcing ». Cependant, il existe d'autres obstacles, telles que les capacités limitées des batteries des appareils mobiles et le délai de communication entre ces derniers et les serveurs.

a) Les contraintes technologiques

L'implémentation des applications MAR est principalement basée sur plusieurs technologies. De nombreux problèmes tels que la qualité de service du réseau et les limites d'affichage restent encore non résolues. Certaines contraintes sont dues à la combinaison de multiples technologies (Chatzopoulos et al., 2017).

b) L'efficacité énergétique

Les batteries des appareils mobiles sont conçues pour assurer leur fonctionnement dans des conditions d'utilisations normales telles que les gestions des appels téléphoniques, la capture d'images et l'accès à Internet, etc. à de petits intervalles. Cependant, les applications MAR nécessitent une coopération de longue durée entre les outils de capture d'images, la réception du signal du GPS et la connexion Internet (Chatzopoulos et al., 2017). Ces tâches consomment beaucoup d'énergie même lorsqu'elles fonctionnent seules. En effet, lorsqu'elles sont exécutées séquentiellement ou simultanément, elles épuisent rapidement la batterie. Ainsi, pour que les applications MAR puissent être déployées dans des appareils mobiles comme les Smartphones, l'amélioration des batteries s'avère indispensable. L'informatique approximative peut être une solution pour traiter les problèmes d'applications gourmandes en énergie en réduisant la précision des calculs lourds. Néanmoins, ce processus, s'il n'est pas mené correctement, peut compromettre les performances de l'application et la qualité de l'expérience de l'utilisateur (Han et al., 2013).

1.3.6 Framework pour le développement des applications MAR

Bien que les progrès soient rapides dans les domaines du délestage de calcul « computation offloading » (Messaoudi, 2019), du traitement coopératif « cooperative computing » et plus généralement des technologies assistées par réseau, de nombreuses applications MAR sont conçues pour être autonomes afin de ne pas avoir à gérer les contraintes de leurs environnements. L'accent est mis sur l'autonomie afin de cartographier des environnements inconnus et d'améliorer l'expérience de l'utilisateur (UX). Toutefois, cette décision introduit une complexité et des limites. Par exemple, de nombreux systèmes utilisent des fonctions visuelles pour éviter l'utilisation des marqueurs visuels déployés, mais des lacunes supplémentaires en termes de calcul et une faible robustesse font que ce cas de figure reste moins applicable pour la plupart des cas d'utilisations. En suivant cette approche, la

plupart des développeurs d'applications MAR ré-implémentent les fonctionnalités de base qui sont requises par leurs applications. Il est fastidieux de construire un système MAR à partir de zéro « from scratch ». De nombreux framework ont été développés pour aider les développeurs à se concentrer sur des applications de haut niveau autres que les implémentations de bas niveau. Actuellement, il existe plusieurs bibliothèques tels que Wikitude, ARToolKit, Vuforia conçues pour faciliter le développement des MAR, néanmoins, un outil universel pour des environnements totalement non préparés n'est toujours pas conçu (Chatzopoulos et al., 2017).

1.3.7 Choix du réseau de connexion

Les réseaux sans fil sont largement utilisés pour la communication et la transmission de données dans les applications MAR. De nombreux systèmes ont été construits sur une architecture client-serveur en tirant parti des réseaux sans fil pour la communication de données (Jain et al., 2015). Les appareils mobiles ont diverses interfaces réseau et peuvent être connectés à un serveur distant soit via un réseau cellulaire ou en utilisant le WiFi. (Chen et al., 2015) Proposent d'améliorer même l'efficacité du réseau en effectuant un suivi local des objets, ce qui permet de n'en envoyer qu'une quantité limitée de données au serveur.

Trois grands réseaux sans fil sont utilisés dans les applications MAR (Tableau 2) :

- Le **Wireless Wide Area Network** (WWAN) est adapté aux applications à grande mobilité. Des implémentations massives du WWAN basées sur différentes technologies, dont le 3G UMTS et 4G LTE existent déjà. Le Réseau de génération supérieure a généralement une bande passante beaucoup plus large et une latence plus courte que le réseau de basse génération. De nombreuses applications MAR (Kruijff et al., 2010), (Wu et al., 2011) ont utilisé le WWAN pour la transition des données et les communications. L'un des problèmes du WWAN est le coût élevé de ses infrastructures. En outre, les réseaux fournis par les différents fournisseurs sont incompatibles et les utilisateurs sont généralement obligés de procéder à des réglages manuels du réseau.

- Le **Wireless Local Area Network** (WLAN) fonctionne dans un cadre plus restreint mais avec une latence plus faible. Wi-Fi et le réseau Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) sont les deux réseaux locaux sans fil (WLAN) typiques. Le WLAN convient aux applications s'exécutant à l'intérieur des bâtiments (Wang et al., 2011).
- Le **Wireless Personal Area Network** (WPAN) est conçu pour interconnecter des appareils, tels que les Smartphones, les PDA et les ordinateurs. Il existe de nombreuses implémentations du WPAN, notamment Bluetooth, ZigBee et UWB. Bluetooth et ZigBee sont généralement utilisés pour le suivi de position et la transmission de données, tandis que l'UWB est principalement utilisé pour le suivi. Le WPAN présente de nombreux avantages, telle que la faible consommation d'énergie et une large bande passante. Toutefois, il n'est pas adapté aux applications de localisation à grande échelle. Le tableau 1 présente une comparaison de plusieurs réseaux sans fil utilisés dans les applications MAR. Toutes ces technologies ont leurs inconvénients. Nous pouvons tirer parti des avantages des différents réseaux pour améliorer les performances si plusieurs réseaux sans fil se chevauchent. Cependant, cela nécessite de passer manuellement d'un réseau à l'autre (Chatzopoulos et al., 2017).

Tableau 2: Comparaison de différents types de réseaux sans fils pour les applications MAR (Chatzopoulos et al., 2017)

Type	Technology	Covrage	Bandwith (bps)	Latency (ms)	Power (mw)
WWAN	LTE	5 km ~ 100 km	5 ~ 50 M	low	~ 500
WLAN	<ul style="list-style-type: none"> • Wi-Fi • MIMO 		<ul style="list-style-type: none"> • 11M~ 54M • 300M 	Low medium	~ 100 unknown
WPAN	UWB Bluetooth ZigBee	10m ~100m ~ 10m ~ 75m	20M ~1G 1M~3M 20K ~250 k	Low Medium low	20 ~1000 1 ~ 2.5 1 ~100

1.4 Performance des MAR

Les applications MAR sont complexes et demandent des performances matérielles et logicielles importantes. Ces dernières années, nous de grands efforts pour améliorer les performances des applications mobiles ont été réalisées. Ces améliorations concernent le développement des méthodes, techniques, matériels, logiciels et des outils d’affichage nécessaires pour leurs implémentations et mise en œuvre.

1.4.1 Parallélisme des processeurs multi-core

La plupart des Smartphones modernes sont dotés de processeurs multi-core. Ces processeurs consomment moins d’énergie qu’un processeur central avec un débit similaire car chaque core fonctionne à une fréquence et une tension d’horloge très faibles. La plupart des MAR exécutent plusieurs tâches de base, notamment l’accès aux caméras, le suivi des poses, la communication en réseau et l’affichage. L’exécution de ces tâches consomme beaucoup d’énergie et augmente le temps d’exécution. (Herling et al., 2010) ont utilisé des processeurs

multi-core sur les téléphones mobiles pour accélérer le SURF en traitant chaque de façon indépendante chaque caractéristique détectée et en affectant différentes caractéristiques à l'aide de threads différents. (Takacs et al., 2011) ont séparé la détection et le suivi dans différents threads pour la mise en parallèle. (Baek et al., 2013) ont opté pour la parallélisations des exécutions des tâches sur le CPU et GPU pour assurer l'accélération de l'exécution.

1.4.2 Traitement au niveau du processeur de la carte graphique (GPU)

La plupart des appareils mobiles sont maintenant équipés d'une unité de traitement graphique mobile (GPU). Il existe de nombreux GPU mobiles, notamment le Qualcomm Snapdragon SoC avec le GPU Adreno 225, le TI OMAP5 SoC avec le PowerVR SGX 544 et le Nvidia Tegra 3 SoC avec la GeForce ULP. Le GPU mobile évolue vers un pipeline de rendu programmable. Afin de faciliter la programmation des GPU mobiles, le groupe Khronos propose une interface de programmation graphique de bas niveau appelée OpenGL ES. Elle prend en charge les opérations (per vertex) et (per pixel) en utilisant les shaders de sommet et de pixel (ou fragment), qui sont des Snippet de code de programme de type C qui s'exécutent sur les GPU. Cependant, il est compliqué de programmer les shaders car nous devons faire correspondre les algorithmes et les structures de données aux opérations graphiques et aux types de données (Chatzopoulos et al., 2017). Pour remédier à ce problème, le groupe Khronos propose des API de haut niveau appelées OpenCL. Ce groupe a également publié le profil intégré d'OpenCL pour les appareils mobiles.

Le suivi d'objets (object tracking) est le plus coûteux en termes de calcul. De nombreux travaux ont opté pour l'accélération de suivi et la reconnaissance des caractéristiques avec le GPU sur les Smartphones. (Kayombya, 2010) a exploité le GPU mobile pour accélérer l'extraction des fonctions SIFT avec OpenGL ES 2.0. (Hofmann, 2012) a implémenté SURF sur un CPU et un GPU hybride avec OpenGL ES 2.0. (Min et al., 2016) ont développé une application IOS permettant de mesurer des déplacements dynamiques absolus et de les traiter en temps réel en

utilisant le CPU et GPU du Smartphone. (Baek et al., 2013) proposent un schéma de traitement parallèle utilisant le CPU et le GPU pour les applications MAR. Le schéma de processus des techniques d'extraction des caractéristiques est affecté au CPU pour des raisons de performance et de rapidité, tandis que la description des caractéristiques est affectée au GPU. (Chatzopoulos et al., 2017) propose un schéma innovant surpassant les schémas CPU et les schémas CPU-GPU séquentiels pour scénarios de MAR.

1.4.3 Efficacité du cache

De nombreux smartphones disposent de minuscules caches sur puce autour du CPU et du GPU pour réduire la latence de l'accès à la mémoire externe. Par exemple, les GPU de la série Nvidia Tegra disposent d'un cache de sommet pour la recherche de sommet et d'un cache de pixel et de texture pour le pixel shader. Les caches sont connectés à un cache L2 via le bus système. La mémoire est conçue pour être petite afin de réduire la consommation d'énergie des appareils mobiles. De nombreux systèmes utilisent les technologies de multi-threading pour masquer la latence de la mémoire. (Arnau et al., 2012) ont découplé l'accès aux pixels et aux textures des opérations sur les fragments. Cette architecture permet de récupérer les données plus tôt qu'elles ne seraient utilisées afin de cacher la latence du cache lorsqu'il est utilisé. (Hofmann, 2012) a utilisé la technologie mipmap pour l'échantillonnage de Haar. Cette méthode aide à augmenter l'efficacité significative du cache, car elle réduit les opérations de récupération de texture de 64 à 1. L'optimisation du cache est généralement une solution ad-hoc pour un problème spécifique. Par exemple, (Kwang-Ting Cheng and Yi-Chu Wang, 2011) ont montré que lorsque la dimension du problème augmente, les données doivent être stockées dans une mémoire off-ship car la mémoire du cache du GPU n'est pas assez grande. Leur méthode s'adapte uniquement aux problèmes de petites dimensions. Aussi ses performances dépendent à la fois du matériel disponible et du problème à résoudre.

Un avantage secondaire de l'économie de cache est de réduire les accès au bus et d'alléger le trafic de la bande passante. (Imagination Technology, 2016) a présenté le GPU PowerVR SGX5xx pour planifier les opérations à partir d'un pool de fragments lorsqu'un fragment attend une demande de texture. Cette méthode est efficace mais pas économe en termes d'énergie.

1.4.4 Externalisation du calcul

Grace aux progrès de la bande passante, de la faible latence et de l'omniprésence du réseau sans fil dans les villes, il est possible d'externaliser le calcul intensif à distance sur un serveur.

1.4.5 Affichage local sur l'appareil mobile et traitement sur serveur (LRRC)

Les tâches de calcul sont sous-traitées par un serveur distant pour l'accélération et les résultats sont récupérés par le client pour l'affichage (le rendu) et les processus ultérieurs. (Gu et al., 2011) ont effectué la détection de marqueurs sur le serveur et traitement du rendu graphique sur le client mobile. Les vidéos capturées en direct ont été compressées au format YUV420 pour réduire la transmission de données. Cette méthode de rendu est basée sur l'image (IBR) pour afficher des modèles complexes sur les appareils mobiles. Il s'agit d'un algorithme de ray-tracing intensif pour obtenir une image en profondeur de la géométrie sur le serveur. L'image de profondeur contenait le rendu des données telles que la matrice de visualisation, les tampons de couleur et de profondeur, qui sont renvoyés aux appareils mobiles pour l'affichage. Aussi, les descripteurs SIFT et SURF ont été utilisés pour la détection et la reconnaissance sur le serveur tandis que le rendu s'effectuait sur le Smartphone (Chatzopoulos et al., 2017).

1.4.6 Calcul et traitement de l'affichage au niveau du serveur (R3C)

La méthode de traitement (R3C) externalise les tâches de calcul et de traitement de l'affichage. Le smartphone (coté client) est utilisé comme interface utilisateur et pour l'affichage. Cette méthode a été utilisée pour le suivi des marqueurs et le rendu des images

capturées au niveau du serveur. Ensuite les images étaient renvoyées au côté client pour l'affichage (Chatzopoulos et al., 2017).

Grace au développement rapide des technologies de réseaux sans fil et d'informatique en nuage, des travaux ont importé des technologies de calcul et de rendre les tâches dans le nuage pour améliorer les performances. (Lu et al., 2011) ont externalisé l'ensemble des tâches sur le cloud. Les entrées (user input) de l'utilisateur sont projetées dans le cloud et l'affichage est compressé et renvoyé vers le Smartphone.

Le LRRC et le R3C souffrent de problèmes communs. La performance est tributaire des caractéristiques du réseau, notamment la largeur de bande passante et la latence. La compression des données réduit la charge du trafic sur la bande passante dans une certaine mesure au prix de calculs supplémentaires ce qui augmente la latence (Chatzopoulos et al., 2017).

1.4.7 Calcul approximatif

Le calcul approximatif désigne un système qui peut faire un compromis entre la précision et l'efficacité. (Xu et al., 2016) et (Mittal, 2016) décrivent les raisons qui motivent l'usage du calcul approximatif et explorent les techniques d'approximation au niveau matériel et logiciel. Ce compromis peut aider à approcher la vitesse en temps réel dans des tâches de calcul très complexes telles que le traitement et la détection d'images, la localisation GPS et le traitement des données des capteurs. (Moreau et al., 2015) proposent une approche matérielle du calcul approximatif sous la forme d'un réseau neuronal flexible basé sur des réseaux logiques programmable FPGA pour les programmes d'approximation. Leur approche matérielle montre des vitesses plus élevées et de meilleures économies d'énergie pour les applications qui utilisent les réseaux de neurones comme accélérateurs. (Chippa et al., 2013) décrivent un framework pour faciliter la caractérisation de la résilience des applications (ARC) afin de rapprocher le calcul approximatif de l'adoption générale, de sorte que les futurs utilisateurs de cette technique

puissent analyser et caractériser la résilience de leurs applications. (Vassiliadis et al., 2016) proposent un cadre pour l'exécution sous contrainte énergétique avec une qualité contrôlée de perte. Un modèle de programmation simple qui permet aux développeurs de structurer le calcul des différentes tâches et d'en exprimer l'importance relative pour la qualité du résultat final.

1.4.8 Efficacité énergétique

Les applications MAR sont gourmandes en énergie pour fonctionner, ce qui réduit l'autonomie de la batterie du Smartphone. La consommation d'énergie peut être abordée à différents niveaux à savoir : la plate-forme matérielle (type de Smartphone) ; les capteurs utilisés ; les réseaux ; les algorithmes de suivi et l'interaction avec l'utilisateur. (Vallina-Rodriguez et al., 2013) indiquent que l'efficacité énergétique peut être atteinte au niveau matériel et logiciels. Or les constructeurs de Smartphones ne considèrent pas l'efficacité énergétique comme objectif de performance des Smartphones. Un compromis entre l'UX, l'optimisation de l'économie d'énergie doit être pris en considération dans la conception des applications mobile (Tseng et al., 2014). (Chatzopoulos et al., 2017) affirment qu'un processeur à un mono-core améliore les performances de calcul avec une augmentation exponentielle de la consommation d'énergie, alors que le processeur multi-core améliore les performances au prix d'une l'augmentation linéaire de la consommation d'énergie. Cette augmentation est attribuée au fait que chaque noyau (core) fonctionne à basse fréquence et à basse tension lorsque la charge de travail est attribuée à plusieurs cores. Les applications MAR peuvent bénéficier d'économies d'énergie en tirant parti CPU multi-cœurs pour l'accélération des performances. La consommation d'énergie est également proportionnelle à l'accès à la mémoire. C'est un moyen efficace de réduire la consommation d'énergie en limitant l'accès à la mémoire et le trafic de la bande passante. (Arnau et al., 2012) ont découplé l'accès à la mémoire de l'accès aux fragments pour obtenir une économie d'énergie de 34%. Le déchargement des calculs (offloading computation) améliore également de manière conditionnelle l'efficacité énergétique. (Kumar et

al., 2010) ont proposé un modèle pour d'évaluer la consommation d'énergie en utilisant des méthodes de déchargement de calculs. Ceci indique que l'amélioration de la consommation d'énergie dépend du calcul, de la largeur de bande passante et du volume de données à transmettre par sur réseau. Le système bénéficie également de l'efficacité énergétique si une grande partie des calculs est exécutée sur un serveur en limitant le volume des données à transmettre. (Kosta et al., 2012) ont proposé un framework pour aider les développeurs à faire migrer les applications mobiles au cloud. Comme les MAR demandent typiquement des calculs intensifs et que la largeur de bande passante des réseaux augmente en permanence, les applications de MAR obtiendront un avantage énergétique du déchargement des calculs.

Les processeurs des Smartphones sont généralement conçus en mettant l'accent sur une consommation d'énergie plus faible plutôt que sur la performance (Kwang-Ting Cheng and Yi-Chu Wang, 2011). Dans certaines conditions, la promotion des performances améliore également l'efficacité énergétique, alors que dans d'autres cas elle augmente la consommation d'énergie. Si on améliore les performances avec une réduction des opérations comme la diminution du volume de données et l'accès à la mémoire, on peut diminuer la consommation d'énergie. Si nous améliorons les performances en utilisant un matériel plus puissant, l'énergie consommée augmente (Hofmann, 2012).

1.5 Application de la réalité augmentée mobile dans les réseaux enterrés

De nombreuses tâches de génie civil tel que la gestion des réseaux enterrés nécessitent d'accéder à des données géospaciales sur le terrain et de référencer les informations stockées. Aussi, avant de commencer une excavation pour un projet de construction, il est obligatoire de procéder à un travail de recherche pour identifier l'emplacement des réseaux souterrains. La réalité augmentée mobile constitue un outil prometteur pour l'exécution de cette tâche.

La réalité augmentée mobile (MAR) consiste à superposer de manière interactive un contenu graphique 3D directement sur une vue du monde réel.

Cette section passe en revue les différentes utilisations de la MAR dans la gestion des réseaux enterrés.

Dans le projet Smart VIDENTE, (Schall et al., 2013) ont examiné l'utilisation de la technologie numérique et le couplage des données des services réseaux enterrés existants avec les techniques digitales et méthodes de la réalité augmentée. Ce projet vise la création de modèles souterrains 3D intégrés en utilisant la reconnaissance automatique pour plusieurs tâches de modélisation. L'objectif principal de ces tentatives est de faciliter la visualisation "par rayons X" des réseaux souterrains pour éviter les collisions, assurer un monitoring ou aider les travailleurs. Ce travail expérimental vise également l'amélioration de la précision, la facilité d'utilisation et la fiabilité de cette technologie.

La gestion du cycle de vie des réseaux souterrains, depuis la conception, la construction et la maintenance, est généralement réalisée en utilisant des techniques et de formats de données différents (Demirci et al., 2012). La conception relève du domaine de la modélisation des informations du bâtiment (BIM) et de la conception assistée par ordinateur (CAO). En général, on utilise la modélisation en 2D. Comme la maintenance peut modifier la conception initiale, les outils de CAO ne sont pas adaptés à la gestion complète des réseaux souterrains. Par conséquent, il faut un système intégré qui offre des capacités de stockage, de visualisation et d'analyse associées aux systèmes d'information géographique (SIG). Récemment, le BIM et le SIG 3D ont été utilisés pour la conception et les données spatiales pendant les phases de planification et de construction ainsi que pour la gestion du cycle de vie du système (Huston et al., 2017).

La technologie SIG est un élément important de ce projet. Elle est utilisée pour réaliser la représentation des réseaux souterrains. Le SIG est un outil puissant pour la gestion et la visualisation des données géospaciales. Des mécanismes d'enregistrement 3D basés sur le SIG peuvent être utilisés pour les systèmes de MAR à l'extérieur des bâtiments (Huang et al. 2016).

La directive Européenne **INSPIRE** vise le développement d'infrastructures de données géospatiales intégrées pour unifier les bases de données nationales qui sont géographiquement et sémantiquement dispersées.

Les progrès dans le domaine des capteurs, des microsystèmes embarqués, de l'internet et des communications sans fil ont conduit à l'évolution d'une nouvelle génération de plates-formes informatiques distribuées et ont abouti à des systèmes innovants pour la représentation, l'interaction et l'acquisition de données. La MAR, en tant que technologie émergente, elle permet de superposer du contenu virtuel de manière transparente sur le monde réel. Elle présente ainsi un grand potentiel dans le domaine de la gestion des réseaux souterrains (Ahmed et al., 2016). (Schall et al., 2013) ont développé un système avancé basé sur la RA pour la visualisation des infrastructures souterraines. Il s'agit d'un système composé d'une tablette dont la tâche principale est l'affichage sur son écran, une unité de mesure inertielle incorporée, ainsi qu'une antenne GPS et un appareil photo. Les capteurs incorporés dans la "tablette" rendent l'appareil encombrant. Ce système MAR permet une planification et un relevé interactifs des données géospatiales. Il utilise la cinématique temps réel RTK pour résoudre le problème de localisation. L'utilisation de cibles physiques permet d'orienter l'appareil avec une précision à l'ordre de quelques centimètres. La difficulté de cette technique est liée à la nécessité de déterminer les points d'intérêts (POI), une tâche complexe dans les villes denses. (Yang et al., 2019) propose un système de MAR pour créer, lire, mettre à jour et supprimer des données d'une base de données géospatiales par le biais d'une interface mobile connectée à Internet au moyen d'une architecture client-serveur. Ce système peut être déployé en utilisant uniquement des données sur les infrastructures souterraines au format CAO. Certains projets ont utilisé le radar à pénétration de sol (GPR) pour la détection non destructive à distance pour l'imagerie des infrastructures souterraines et l'évaluation de l'état des conduites enterrées (Xia et al., 2012). (Pereira et al., 2018) ont proposé l'intégration du système GPR avec le système de

positionnement MAR. Ce système utilise les principes fondamentaux de la détection GPR et la technologie AR de Google Tango. Il peut effectuer un balayage GPR circulaire sur une distance de 50 m et attribuer une coordonnée géographique précise aux éléments souterrains détectés.

Récemment, (Stylianidis et al., 2020) ont mis en œuvre un système (LARA) composé d'une tablette et une antenne pour la correction de la position. Ce système fournit un outil pour la visualisation directe d'objets cachés à l'aide de la RA dans le cadre d'une application MAR basée sur la localisation. Il utilise des technologies dans le domaine du positionnement et des capteurs, des bases de données géographiques, la réalité augmentée et le système d'information géographique (SIG 3D) pour aider les utilisateurs à visualiser le sous-sol tout en affichant la complexité des modèles 3D des réseaux. Cette visualisation est réalisée en utilisant un paradigme de réalité mixte, où l'utilisateur peut voir en même temps son environnement et les réseaux enterrés affichés à leur emplacement en 3D.

1.6 Conclusion

La synthèse de l'état de l'art montre que les méthodes utilisées pour la détection, localisation et visualisation des réseaux enterrés n'apportent pas de solutions optimales pour la gestion de ces réseaux. Ces méthodes sont coûteuses en termes de temps et d'argent et sujets à des incidents matériels et humains. La réalité augmentée utilisant un appareil mobile « Smartphone ou tablette » peut apporter une réponse pertinente aux problèmes rencontrés dans la gestion des réseaux enterrés.

Il ressort de la littérature que l'utilisation de la MAR est confrontée aux contraintes imposées par les constructeurs des appareils mobiles et aux limites des réseaux de communication.

Malgré le grand effort des chercheurs pour améliorer la détection et la localisation des réseaux enterrés, à ce jour, on ne dispose pas d'un système intégré permettant la détection et la

localisation précise des réseaux enterrés tout en assurant une latence acceptable et une bonne interaction utilisateur-environnement. Le présent travail se donne comme objectif d'apporter des éléments de réponse à cette question à travers l'établissement d'une méthodologie pour la conception, l'implémentation et l'évaluation de l'usage de la MAR pour la détection et localisation et la visualisation des réseaux enterrés.

1.7 Références Bibliographiques utilisées dans ce chapitre

- Ahmed, A., Zhang, Y., Burns, D., Huston, D., Xia, T., 2016. Design of UWB Antenna for Air-Coupled Impulse Ground-Penetrating Radar. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 13, 92–96.
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2498404>
- Arnau, J.-M., Parcerisa, J.-M., Xekalakis, P., 2012. Boosting mobile GPU performance with a decoupled access/execute fragment processor 10.
<https://doi.org/10.1109/ISCA.2012.6237008>
- Baek, A.-R., Lee, K., Choi, H., 2013. CPU and GPU parallel processing for mobile Augmented Reality, in: 2013 6th International Congress on Image and Signal Processing (CISP). Presented at the 2013 6th International Congress on Image and Signal Processing (CISP), IEEE, Hangzhou, China, pp. 133–137.
<https://doi.org/10.1109/CISP.2013.6743972>
- BenSaleh, M.S., Qasim, S.M., Obeid, A.M., Garcia-Ortiz, A., 2013. A review on wireless sensor network for water pipeline monitoring applications, in: 2013 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS). Presented at the 2013 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS), IEEE, San Diego, CA, USA, pp. 128–131.
<https://doi.org/10.1109/CTS.2013.6567217>
- Chatzopoulos, D., Bermejo, C., Huang, Z., Hui, P., 2017. Mobile Augmented Reality Survey: From Where We Are to Where We Go. *IEEE Access* 5, 6917–6950.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2698164>

- Chen, T.Y.-H., Ravindranath, L., Deng, S., Bahl, P., Balakrishnan, H., 2015. Glimpse: Continuous, Real-Time Object Recognition on Mobile Devices, in: Proceedings of the 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems - SenSys '15. Presented at the the 13th ACM Conference, ACM Press, Seoul, South Korea, pp. 155–168.
<https://doi.org/10.1145/2809695.2809711>
- Chippa, V.K., Chakradhar, S.T., Roy, K., Raghunathan, A., 2013. Analysis and characterization of inherent application resilience for approximate computing, in: Proceedings of the 50th Annual Design Automation Conference on - DAC '13. Presented at the the 50th Annual Design Automation Conference, ACM Press, Austin, Texas, p. 1.
<https://doi.org/10.1145/2463209.2488873>
- Demirci, S., Yigit, E., Eskidemir, I.H., Ozdemir, C., 2012. Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method. NDT E Int. 47, 35–42.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.12.008>
- Hafsi, M., Bolon, P., Dapoigny, R., 2017. Detection and localization of underground networks by fusion of electromagnetic signal and GPR images, in: Nagahara, H., Umeda, K., Yamashita, A. (Eds.), . Presented at the The International Conference on Quality Control by Artificial Vision 2017, Tokyo, Japan, p. 1033803.
<https://doi.org/10.1117/12.2266946>
- Han, J., Orshansky, M., 2013. Approximate computing: An emerging paradigm for energy-efficient design, in: 2013 18TH IEEE EUROPEAN TEST SYMPOSIUM (ETS). Presented at the 2013 18th IEEE European Test Symposium (ETS), IEEE, Avignon, France, pp. 1–6.

<https://doi.org/10.1109/ETS.2013.6569370>

- Herling, J., Broll, W., 2010. An adaptive training-free feature tracker for mobile phones, in: Proceedings of the 17th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology - VRST '10. Presented at the the 17th ACM Symposium, ACM Press, Hong Kong, p. 35.

<https://doi.org/10.1145/1889863.1889868>

- Huston, D., Xia, T., Zhang, Y., Fan, T., Orfeo, D., Razinger, J., 2017. Urban underground infrastructure mapping and assessment, in: Lynch, J.P. (Ed.), . Presented at the SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, Portland, Oregon, United States, p. 101680M.

<https://doi.org/10.1117/12.2263530>

- Jain, P., Manweiler, J., Roy Choudhury, R., 2015. OverLay: Practical Mobile Augmented Reality, in: Proceedings of the 13th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services - MobiSys '15. Presented at the the 13th Annual International Conference, ACM Press, Florence, Italy, pp. 331–344.

<https://doi.org/10.1145/2742647.2742666>

- Kosta, S., Aucinas, A., Pan Hui, Mortier, R., Xinwen Zhang, 2012. ThinkAir: Dynamic resource allocation and parallel execution in the cloud for mobile code offloading, in: 2012 Proceedings IEEE INFOCOM. Presented at the IEEE INFOCOM 2012 - IEEE Conference on Computer Communications, IEEE, Orlando, FL, USA, pp. 945–953.

<https://doi.org/10.1109/INFCOM.2012.6195845>

- Kumar, K., Yung-Hsiang Lu, 2010. Cloud Computing for Mobile Users: Can Offloading Computation Save Energy? Computer 43, 51–56.

<https://doi.org/10.1109/MC.2010.98>

- Kwang-Ting Cheng, Yi-Chu Wang, 2011. Using mobile GPU for general-purpose computing – a case study of face recognition on smartphones, in: Proceedings of 2011 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test. Presented at the 2011 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT 2011), IEEE, Hsinchu, pp. 1–4.
<https://doi.org/10.1109/VDAT.2011.5783575>
- Lu, Y., Li, S., Shen, H., 2011. Virtualized Screen: A Third Element for Cloud–Mobile Convergence. IEEE Multimed. 18, 4–11.
<https://doi.org/10.1109/MMUL.2011.33>
- Lucianaz, C., Greco, G., Bertoldo, S., Allegretti, M., 2015. Real time outdoor localization of buried RFID tags through statistical methods, in: 2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). Presented at the 2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), IEEE, Torino, Italy, pp. 1152–1154.
<https://doi.org/10.1109/ICEAA.2015.7297299>
- Mendez, E., Schall, G., Havemann, S., Fellner, D., Schmalstieg, D., Junghanns, S., 2008. Generating Semantic 3D Models of Underground Infrastructure. IEEE Comput. Graph. Appl. 28, 48–57.
<https://doi.org/10.1109/MCG.2008.53>
- Messaoudi, F., 2019. User equipment based-computation offloading for real-time applications in the context of Cloud and edge networks P203.
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02268196>
- Min, J.-H., Gelo, N.J., Jo, H., 2016. Real-time image processing for non-contact monitoring of dynamic displacements using smartphone technologies, in: Lynch, J.P. (Ed.). Presented at the SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive

Evaluation and Health Monitoring, Las Vegas, Nevada, United States, p. 98031B.

<https://doi.org/10.1117/12.2219418>

- Mittal, S., 2016. A Survey of Techniques for Approximate Computing. *ACM Comput. Surv.* 48, 1–33.
<https://doi.org/10.1145/2893356>
- Moreau, T., Wyse, M., Nelson, J., Sampson, A., Esmailzadeh, H., Ceze, L., Oskin, M., 2015. SNNAP: Approximate computing on programmable SoCs via neural acceleration, in: 2015 IEEE 21st International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA). Presented at the 2015 IEEE 21st International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA), IEEE, Burlingame, CA, USA, pp. 603–614.
<https://doi.org/10.1109/HPCA.2015.7056066>
- Pereira, M., Burns, D., Orfeo, D., Farrel, R., Hutson, D., Xia, T., 2018. New GPR System Integration with Augmented Reality Based Positioning, in: Proceedings of the 2018 on Great Lakes Symposium on VLSI - GLSVLSI '18. Presented at the the 2018, ACM Press, Chicago, IL, USA, pp. 341–346.
<https://doi.org/10.1145/3194554.3194623>
- Schall, G., Zollmann, S., Reitmayr, G., 2013. Smart Vidente: advances in mobile augmented reality for interactive visualization of underground infrastructure. *Pers. Ubiquitous Comput.* 17, 1533–1549.
<https://doi.org/10.1007/s00779-012-0599-x>
- Shi, Z., Wang, H., Wei, W., Zheng, X., Zhao, M., Zhao, J., 2015. A Novel Individual Location Recommendation System Based on Mobile Augmented Reality, in: 2015 International Conference on Identification, Information, and Knowledge in the Internet of Things (IIKI). Presented at the 2015 International Conference on Identification,

Information, and Knowledge in the Internet of Things (IIKI), IEEE, Beijing, China, pp. 215–218.

<https://doi.org/10.1109/IIKI.2015.53>

- Stylianidis, E., Valari, E., Pagani, A., Carrillo, I., Kounoudes, A., Michail, K., Smagas, K., 2020. Augmented Reality Geovisualisation for Underground Utilities. PFG – J. Photogramm. Remote Sens. Geoinformation Sci. 88, 173–185.

<https://doi.org/10.1007/s41064-020-00108-x>

- Takacs, G., El Choubassi, M., Wu, Y., Kozintsev, I., 2011. 3D mobile augmented reality in urban scenes, in: 2011 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Presented at the 2011 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), IEEE, Barcelona, Spain, pp. 1–4.

<https://doi.org/10.1109/ICME.2011.6012101>

- Vallina-Rodriguez, N., Crowcroft, J., 2013. Energy Management Techniques in Modern Mobile Handsets. IEEE Commun. Surv. Tutor. 15, 179–198.

<https://doi.org/10.1109/SURV.2012.021312.00045>

- Vassiliadis, V., Chalios, C., Parasyris, K., Antonopoulos, C.D., Lalis, S., Bellas, N., Vandierendonck, H., Nikolopoulos, D.S., 2016. Exploiting Significance of Computations for Energy-Constrained Approximate Computing. Int. J. Parallel Program. 44, 1078–1098.

<https://doi.org/10.1007/s10766-016-0409-6>

- Wang, R., Zhao, F., Luo, H., Lu, B., Lu, T., 2011. Fusion of Wi-Fi and bluetooth for indoor localization, in: Proceedings of the 1st International Workshop on Mobile Location-Based Service - MLBS '11. Presented at the the 1st international workshop, ACM Press, Beijing, China, p. 63.

<https://doi.org/10.1145/2025876.2025889>

- Y. Wu, M. E. Choubassi and I. Kozintsev, "Augmenting 3D urban environment using mobile devices," *2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2011, pp. 241-242,
<https://doi.org/10.1109/ISMAR.2011.6092396>.
- Xu, Q., Mytkowicz, T., Kim, N.S., 2016. Approximate Computing: A Survey. *IEEE Des. Test* 33, 8–22.
<https://doi.org/10.1109/MDAT.2015.2505723>
- Yang, K., Brown, T., Sung, K., 2019. AR Object Manipulation on Depth-Sensing Handheld Devices. *Appl. Sci.* 9, 2597.
<https://doi.org/10.3390/app9132597>
- Zanelain, E., Al Khatib, O., Ahmed, W., 2020. Investigating the use of no-dig technologies for underground utilities in developing countries. *Innov. Infrastruct. Solut.* 5.
<https://doi.org/10.1007/s41062-020-0265-5>
- Zhang, Y., Venkatachalam, A.S., Huston, D., Xia, T., 2014. Advanced signal processing method for ground penetrating radar feature detection and enhancement, in: Wu, H.F., Yu, T.-Y., Gyekenyesi, A.L., Shull, P.J. (Eds.), . Presented at the SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, San Diego, California, USA, p. 906318.
<https://doi.org/10.1117/12.2046338>

CHAPITRE 2 « METHODOLOGIE DE RECHERCHE »

2 Chapitre 2 : Méthodologie

Ce chapitre présente la méthodologie suivie pour la construction d'un système de Réalité Augmentée hybride sur Smartphone. Il présente d'abord une synthèse de l'état de l'art avec un intérêt pour les enjeux de gestion des réseaux urbains, l'utilisation du système d'Information Géographique (SIG) et de la Réalité Augmentée dans la gestion de ces réseaux avec quelques exemples de déploiement. Ensuite le chapitre présente une description de l'architecture du système proposé, qui combine trois couches : La couche de la base de données SIG, la couche de géométrie 3D et la couche de transformation. Finalement, le chapitre présente les opérations de traitement de données, notamment les opérations de filtrage, de transformation, et de visualisation.

2.1 Introduction

La gestion des réseaux souterrains est une tâche fastidieuse. Les dommages causés à ces réseaux lors des travaux d'extension, maintenance ou réparation sont considérés comme un problème majeur en milieu urbain. En effet, en l'absence des outils de localisation et de visualisation des réseaux enterrés, des dommages peuvent être causés pour ces réseaux avec des conséquences graves sur l'environnement adjacent, l'interruption des services urbains et des perturbations aux usagers.

La bonne gestion de ces réseaux nécessite l'accès à leurs données géospatiales, avec la possibilité de les visualiser lors des travaux de maintenance ou de rénovation. Il est aussi très utile de disposer des outils qui permettent la mise à jour automatique des données lors des travaux d'interventions sur ces réseaux ou de déposer en temps réel des rapports d'intervention ou d'inspection.

Dans ce travail de thèse, on propose d'utiliser la technologie de la Réalité Augmentée sur mobile pour assister les villes et les entreprises dans la gestion de ces réseaux. Cette technologie

consiste à compléter la vue du monde physique par des « informations augmentées » : texte, images, des vidéos, son, objets 3D, etc. La prolifération des appareils mobiles intelligents ayant des grandes capacités de traitement, combinées à la possibilité de visualiser et d'interagir avec d'autres systèmes d'information tels que le Système d'information Géographique (SIG) ont permis de créer de nouveaux types d'applications mobiles.

L'utilisation de la Réalité Augmentée (RA) implémentée sur un Smartphone (MAR) est un outil utile efficace pour créer, modifier et mettre à jour les données géo-spatiales représentant ces réseaux. La RA permet aussi d'interagir avec des représentations graphiques 3D des données géo-spatiales augmentées dans la vue de l'utilisateur sur un Smartphone. L'un des principaux défis des visualisations MAR interactives de données provenant de systèmes d'information géographique (SIG) est l'établissement du lien adéquat et compréhensible entre la visualisation par la MAR et la base de données géographique permettant leurs modifications interactives.

Les chercheurs ont abordé différents sujets liés aux technologies de gestion des réseaux de distribution enterrés.

La gestion du cycle de vie de ces réseaux, en ce qui concerne la conception, la construction, extension, entretien et maintenance, est généralement réalisée à l'aide de différentes techniques et de différents formats de données (Demirci et al., 2012). La conception relève du domaine de la modélisation des informations du bâtiment (BIM) et de la conception assistée par ordinateur (CAO). En général, seule la modélisation 2D est utilisée. La maintenance peut altérer la conception initiale. Les outils de CAO se sont avérés non adaptés à la gestion complète des réseaux de distributions souterrains. Par conséquent, un système intégré qui offre des capacités de stockage, de visualisation et d'analyse associées aux systèmes d'information géographique (SIG) est nécessaire.

Récemment, le BIM et le SIG 3D ont été utilisés pour la conception et les données spatiales pendant les phases de planification et de construction, ainsi que pour la gestion du cycle de vie de ce système (Huston et al., 2017). Les progrès récents dans les capteurs, les microsystèmes embarqués, l'Internet et les communications sans fil ont conduit à l'évolution d'une nouvelle génération de plates-formes informatiques distribuées et ont abouti à des systèmes innovants pour la représentation, l'interaction et l'acquisition de données.

Un système avancé basé sur la RA a été développé pour la visualisation des infrastructures souterraines. Il s'agit d'une tablette utilisée comme outil d'affichage à laquelle une unité de mesure inertielle est incorporée, ainsi qu'une antenne GPS pour la localisation et une caméra. Les capteurs incorporés dans le dispositif "tablette" le rendent encombrant. Ce système de RA permet une planification et un relevé interactifs des données géo-spatiales et d'utiliser la cinématique en temps réel RTK pour résoudre le problème de localisation (Schall et al., 2013). L'utilisation de cibles physiques permet d'orienter l'orientation du dispositif avec une précision acceptable. La difficulté de cette technique est liée à la nécessité de déterminer les points cibles, ce qui est très complexe en milieu encombré comme celui de la ville (Yang et al., 2019).

(Yang et al., 2019) Propose un système de RA qui permet de créer, lire, mettre à jour et supprimer des données d'une base de données géo-spatiales par le biais d'un système mobile qui est connectée à Internet au moyen d'une architecture client-serveur. Ce système peut être déployé facilement en utilisant uniquement des données souterraines au format CAD.

La ville de Chicago a déployé un système pour la cartographie de la ville et l'évaluation des infrastructures souterraines (Zhang et al., 2014) et (Ian Sherr, 2017).

Certaines entreprises de services publics utilisent le Ground-penetrating (GPR) comme technique de détection non destructive à distance pour l'imagerie des infrastructures l'imagerie

des infrastructures souterraines et l'évaluation de l'état des canalisations enterrées (Zhang et al., 2014), (Zhang et al., 2015) et (Pereira et al., 2018).

(Pereira et al., 2018) a proposé également l'intégration d'un système GPR avec un système de positionnement mobile AR. Ce système utilise les principes fondamentaux de la détection GPR et la technologie AR de Google Tango. Il peut effectuer un balayage circulaire GPR sur une distance de 50 m et attribuer des coordonnées géographiques précises aux éléments souterrains détectés. D'autres groupes de recherche avaient essayé de rendre les systèmes de RA plus compacts et mobiles, comme le système Vesp'R (Kruijff et al., 2010).

Outre les techniques d'enregistrement et la conception du matériel, un aspect important de la présentation de données complexes en RA est constitué par les méthodes de visualisation qui facilitent la compréhension des informations présentées. (Zhang et al., 2014) ont abordé cette question en mettant en œuvre des techniques de visualisation compréhensibles basées sur des techniques de focalisation et de contexte, de filtrage et de stylisation.

Pour permettre la visualisation compréhensible des données SIG, (Mendez et al., 2008) ont introduit un pipeline de transformation qui permet la mise en correspondance de différentes stylisations avec les données SIG.

Ces méthodes ne fonctionnent que de manière unidirectionnelle. En effet, elles ne peuvent fournir que des fonctions de visualisation passive. L'objectif principal de notre travail est d'assurer une gestion bidirectionnelle des données pour permettre des manipulations interactives et une visualisation compréhensible des données SIG en même temps.

L'approche utilisée dans ce travail vise à maintenir la cohérence entre la base de données SIG et les représentations géométriques 3D visualisées à l'aide de la réalité augmentée mobile. Elle ouvre de nouvelles perspectives pour la gestion des réseaux enterrés à l'aide de la MAR-SIG tout en assurant une interaction avec le monde réel.

Ce chapitre sera consacré à la méthodologie de recherche. Il présentera l'architecture et la conception d'un nouveau système de gestion des réseaux enterrés à l'aide de la Mobile Réalité Augmentée (MRA) basé sur la localisation (Location based mobile augmented reality) à l'aide d'un smartphone ou tablette. Il s'agit d'un système hybride qui assure une localisation précise, à l'ordre des quelques centimètres et la visualisation des réseaux enterrés tout en assurant l'interaction avec ce système.

On commencera par une description générale de l'architecture cette plateforme. Ensuite, nous présentons ses modules et leurs interactions.

2.2 Description de l'architecture du système

Le système de RAM proposé présente de nouvelles caractéristiques. Il combine des technologies émergentes pour développer un dispositif de Réalité Augmentée utilisant un Smartphone ou tablette pour aider la gestion des réseaux enterrés tout en utilisant une architecture client-serveur. La figure 5 illustre cette architecture. Elle comprend une base de données, qui est connecté à un système d'administration et à une application RA sur smartphone.

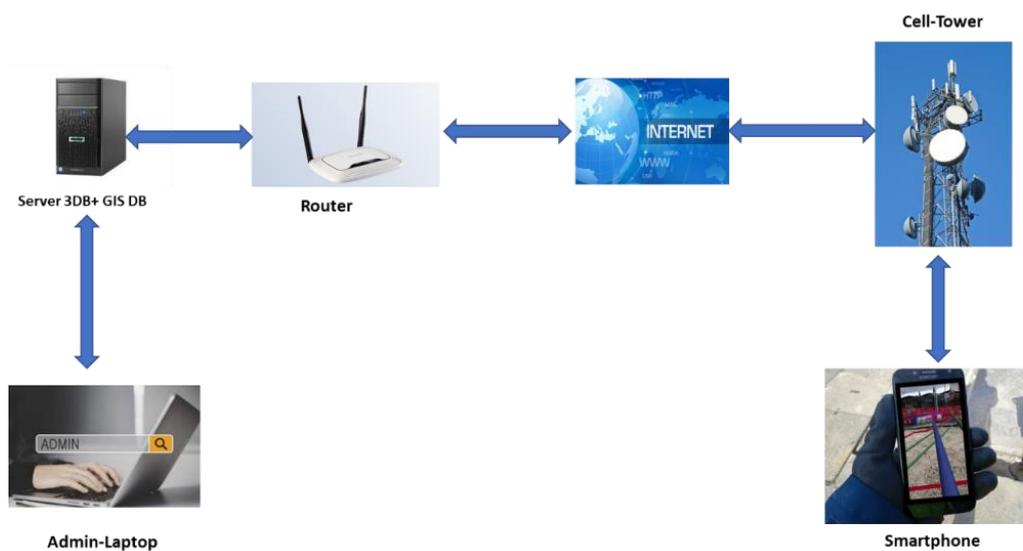


Figure 5: Architecture client-serveur du système

Afin d'assurer des modifications interactives des données géospatiales dans la vue MAR tout en gardant la cohérence avec la base de données SIG, nous avons conçu trois couches différentes de données dans notre architecture figure 6:

- La première couche représente la base de données SIG.
- La deuxième couche représente la géométrie 3D.
- La couche de transformation.

La première couche représente de la base de données SIG. Elle se compose des ensembles de caractéristiques décrivant un objet du monde réel à l'aide un ensemble d'attributs. Les attributs sont stockés sous forme de paires clé-valeur et fournissent une description de diverses propriétés de cet objet, telles que le type, le propriétaire ou nature etc.

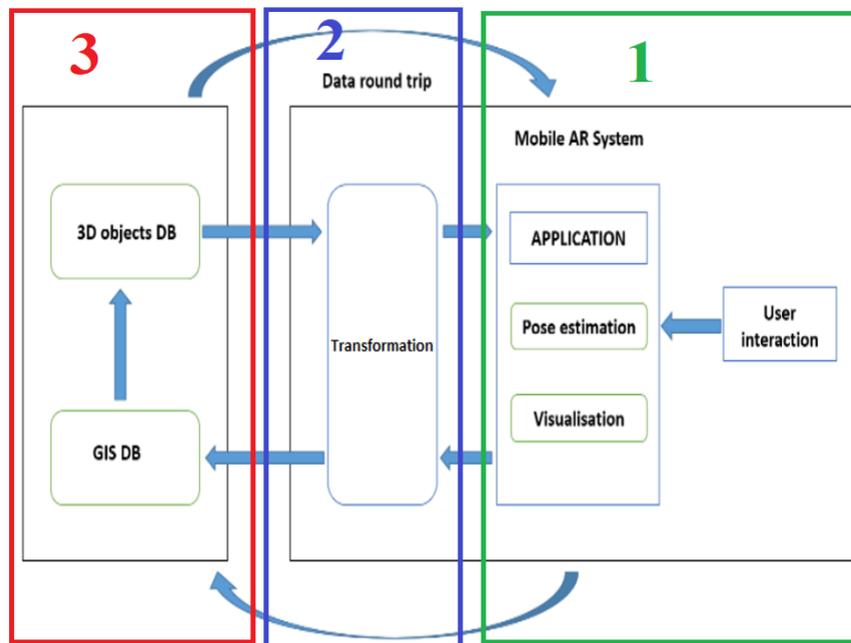


Figure 6: Flux de données entre les 3 couches du système

La deuxième couche de géométrie 3D est constituée d'un ensemble de représentations géométriques 3D d'objets du monde réel, tels que des cercles extrudés, des rectangles, des polygones, cylindres et des modèles 3D arbitraires ; représentant des tuyaux, des excavations, des regards ou des lampes etc.

Pour assurer la cohérence entre ces deux couches de données, nous ajoutons une troisième couche qui sert de couche de transmission entre les deux. Nous appelons cette couche supplémentaire couche de transformation, car elle prend en charge la conversion bidirectionnelle des données entre la couche de géométrie 3D et celle de la base de données SIG. Chaque élément de la base de données SIG est stocké en tant qu'objet graphique de scène ayant un ensemble d'attributs. Dans notre système, les modifications interactives sont effectuées au niveau de cette troisième couche et se transmettent automatiquement aux deux autres couches.

Les manipulations appliquées à la couche de transmission permettent de manipuler directement les données des objets et évite que ces manipulations ne soient appliquées qu'à des objets 3D spécifiques. Par exemple, la manipulation de la représentation d'une excavation d'une canalisation n'a aucun sens sans modifier les caractéristiques de l'élément linéaire représentant cette canalisation. De plus, la couche de transmission a toujours accès à l'information sémantique d'une caractéristique au niveau de la base de données SIG, ce qui est important puisque les méthodes d'interactions peuvent dépendre du type d'objet.

Nous avons conçu un pipeline de transformation bidirectionnel qui crée automatiquement la couche de transmission et la couche de géométrie 3D à partir des données géospatiales et met à jour la base de données SIG avec les manipulations appliquées dans la vue MAR au niveau du Smartphone ou tablette.

Le pipeline fonctionne comme suit :

- La conversion des données SIG en couche de transmission et en géométries 3D spécifiques.
- Les techniques d'interaction telles que la sélection, la manipulation et la navigation permettent à l'utilisateur de manipuler les différentes caractéristiques.
- Les connexions de données entre les 3 couches de données garantissent la cohérence des données tout en interagissant avec les données.

Afin d'éviter les coûts d'administration, seules les caractéristiques modifiées seront réécrites dans la base de données SIG grâce à un enregistrement par traçage.

2.3 Flux de donnée entre les différentes couches

2.3.1 Traitement des données géospatiales pour la visualisation MAR

La visualisation et la manipulation à l'aide de la MAR en temps réel d'objets géospatiaux nécessitent un modèle de données spécifiques. Les caractéristiques abstraites des lignes et des points doivent être traitées pour créer une géométrie 3D représentant davantage la forme réelle de la ligne de points relevée. Des géométries supplémentaires doivent être créées automatiquement sur la base des attributs des caractéristiques pour améliorer la compréhension des informations présentées dans la visualisation MAR. Par exemple, les tubes virtuels devraient aider à comprendre la disposition spatiale des réseaux de distribution du sous-sol. Toutes ces géométries doivent être interactives et modifiables, de sorte qu'une manipulation interactive permette de mettre à jour les caractéristiques au niveau de la couche SIG.

Pour réaliser ces opérations, nous avons développé un pipeline de transformation bidirectionnel qui réalise la conversion des caractéristiques SIG en données 3D compréhensibles et inversement (Figure 6). Une opération de transformation réalisée à l'aide de l'outil (FME) extrait et traduit les données géospatiales dans un format commun plus simple

pour le client de la MAR. Ceci se fait en listant un ensemble d'éléments et leurs géométries. Le système MAR filtre ensuite les caractéristiques en fonction de propriétés spécifiques et applique des transformations pour générer des données 3D à partir de celles-ci. Les structures de données 3D sont fonctionnellement dérivées des données géospatiales et restent à jour lorsque celles-ci changent. Les interactions opèrent directement sur les données des caractéristiques SIG en synchronisant la visualisation 3D et les caractéristiques.

2.3.2 Traitement des données géospatiales à la couche de transformation

Pour extraire les données nécessaires de la base de données géospatiales, nous utilisons l'outil commercial FME qui est une collection intégrée d'outils pour la transformation et la traduction de données spatiales. FME est un utilitaire SIG qui aide les utilisateurs à convertir des données entre divers formats de données et à traiter la géométrie et les attributs des données. L'utilisateur sélectionne de manière interactive des objets qui présente un intérêt pour lui dans le SIG, qui sont ensuite exportés vers un format de fichier basé sur GML3.

Un fichier GML représente une collection de caractéristiques dont chacune décrit un objet du monde réel. Les données géométriques en 2D sont converties en représentation 3D en utilisant (i) un modèle numérique d'élévation (MNE) et (ii) les profondeurs de pose connues des objets souterrains dans la base de données SIG. Enfin, le fichier GML est converti en un format de graphe de scène représentant les données de la couche de transformation. Pour chaque élément, un objet de graphe de scène est créé avec les attributs sémantiques et les propriétés géométriques de l'élément. Cet objet sera visualisé sur l'écran du smartphone. Le mappage des filtres et des opérations de transformation est implémenté dans l'application. Il permet non seulement de configurer les méthodes de visualisation pour des données spécifiques, mais aussi un filtrage des informations présentées.

2.3.3 Déroulement des opérations de filtrage

L'étape de filtrage recherche des balises spécifiques dans les attributs sémantiques des caractéristiques dans la couche de transformation et extrait les caractéristiques correspondantes. Par exemple, les caractéristiques peuvent être filtrées par un identifiant unique, un nom de classe, un alias de classe ou un type. La correspondance est mise en œuvre au moyen d'expressions régulières testées par rapport aux valeurs de chaîne des attributs. Les caractéristiques extraites par filtrage peuvent ensuite être traitées par un transformateur assigné.

2.3.4 Déroulement des opérations de transformation

Chaque opération de transformation dépend du type de transformation et des paramètres de transformation. Le type de transformation attribue l'opération géométrique sous-jacente permettant de dériver la géométrie 3D, par exemple la conversion d'un élément linéaire en un cylindre représentant un tuyau. Les paramètres de transformation configurent les spécifications de visualisation telles que la couleur, la largeur, le rayon, la hauteur, les textures et les modèles 3D des objets. L'utilisateur sélectionne la représentation appropriée pendant l'exécution et la géométrie créée est finalement rendu par l'application de MAR. La transformation est généralement effectuée au moment du démarrage de l'application et prend quelques secondes pour des milliers d'éléments.

2.3.5 Déroulement des opérations de visualisation compréhensibles

Le concept de filtrage et de transformation nous permet de créer différents objets géométriques à partir des mêmes données sémantiques. Ceci est important car la visualisation compréhensible des infrastructures souterraines sur le terrain pose plusieurs défis :

(i) L'interprétation sémantique

La géométrie et l'apparence des objets visualisés doivent s'adapter aux exigences des utilisateurs en permettant la juxtaposition des objets 3D virtuels sur leurs correspondants réel « emplacement exacte ».

(ii) Perception de la profondeur :

La perception de la profondeur est importante pour améliorer la compréhension de l'information visualisée. Elle peut être réalisée en fournissant des indices de profondeur supplémentaires.

La perception de la profondeur représente un grand défi pour la visualisation MAR des réseaux souterrains. L'utilisation de simples superpositions pour visualiser les objets souterrains via une MAR peut entraîner des problèmes de perception, comme l'impression que les objets souterrains flottent au-dessus du sol. Pour éviter ces problèmes, il est essentiel de décider quelles parties de la scène physique doivent être conservées et quelles parties doivent être remplacées par des informations virtuelles ou quels types d'indices de profondeur virtuels supplémentaires peuvent être fournis (Zollmann et al. 2012).

Une visualisation compréhensible doit fournir aux utilisateurs les indices perceptuels nécessaires pour comprendre la relation de profondeur entre les informations cachées et la scène physique. La gestion flexible des données nous permet de relever ces deux défis en utilisant le pipeline de filtrage-transformation pour créer des objets géométriques facilement interprétables et des indices de profondeur supplémentaires. Alors que nous soutenons l'interprétation sémantique en utilisant différents codes de couleur et des représentations géométriques adéquates (par exemple, des cylindres pour les canalisations), les problèmes de perception de la profondeur sont abordés en créant des coupes, des ombres de référence projetant les contours des tuyaux sur la surface, ou des lignes de connexion visualisant la connexion entre l'objet et le sol. L'avantage de notre méthode de séparation du niveau des données SIG et du niveau de la

géométrie compréhensible avec la couche de transformation est que nous pouvons créer autant d'objets de visualisation différents que nécessaire pour une application. Il n'y a pas d'effort supplémentaire pour la mise à jour des différents objets géométriques, puisque les modifications sont automatiquement appliquées au niveau de la couche de transformation. Les connexions de données entre le niveau de données 3D et la couche de transformation sont implémentées de champ la cohérence des données.

2.4 Déroulement de l'interaction

Le pipeline de transformation bidirectionnel permet la transmission interactive des données SIG dans une application de MAR et donc la manipulation interactive des données géospatiales. La visualisation directe de la RA permet d'aligner et de modifier les données géospatiales avec un retour visuel immédiat. Nous avons divisé les techniques d'interaction en tâches de sélection, de manipulation et de navigation.

2.4.1 La sélection

La sélection d'entités SIG est le point de départ de l'accès à l'information, de la manipulation et de l'arpentage. Alors que la sélection d'entités composées d'un point caractéristique est sans ambiguïté, pour les entités composées de plusieurs points caractéristiques, l'utilisateur peut vouloir sélectionner tous les points caractéristiques correspondants ou seulement un sous-ensemble. Par exemple, pour l'arpentage, il peut être utile de sélectionner un seul sommet pour le manipuler, alors que pour les tâches de planification, il peut être utile de sélectionner et de manipuler tous les sommets correspondants en une seule fois, par exemple pour déplacer un tuyau complet. Par conséquent, nous proposons deux options de sélection : La sélection basée sur l'objet pour sélectionner un objet complet et la sélection basée sur les points caractéristiques pour sélectionner des points caractéristiques uniques. Pour la sélection basée sur l'objet, nous calculons l'objet qui contient le point d'intersection et ajoutons tous les points caractéristiques correspondants à la sélection. Pour la sélection basée sur les points caractéristiques, nous

calculons le point caractéristique de l'objet d'intersection le plus proche du point d'intersection. Après avoir sélectionné les points caractéristiques, il est possible d'accéder aux informations relatives à ces caractéristiques ou de les manipuler.

2.4.2 La Manipulation

La manipulation des données est importante car les objets tels que construits doivent être relevés, les objets déjà documentés nécessitent d'être mis à jour, les données planifiées doivent être ajustées après vérification par rapport à la situation réelle ou doivent être ajustées après avoir été relevées. Le mappage des filtres et des opérations de transformation est implémenté dans l'application et permet non seulement de configurer les méthodes de visualisation pour des données spécifiques, mais aussi un filtrage des informations présentées.

2.4.3 L'Opération de transformation

Chaque opération de transformation dépend du type des paramètres. Le type de transformation attribue l'opération géométrique sous-jacente permettant de dériver la géométrie 3D, par exemple la conversion d'une caractéristique linéaire en un cylindre représentant un tuyau. Les paramètres de transformation configurent les spécifications de visualisation telles que la couleur, la largeur, le rayon, la hauteur, les textures et les modèles 3D des objets. L'utilisateur sélectionne la représentation appropriée pendant l'exécution et la géométrie créée par le filtrage et la transformation est finalement rendue par l'application de MAR. La transformation est généralement effectuée pendant le démarrage de l'application et prend quelques secondes pour des milliers d'éléments.

2.4.4 La Navigation

La navigation dans la MAR diffère de la navigation dans les environnements virtuels. Habituellement, les utilisateurs se déplacent physiquement dans le monde réel et actualisent leur point de vue en fonction de leurs mouvements. Cependant, dans notre application, si un objet est exceptionnellement grand. Les points de départ et d'arrivée peuvent ne pas être visibles

de la même vue de caméra. Pour surmonter ce problème, nous utilisons une méthode appelée multi-vues qui permet de capturer des vues de caméra et leurs poses et de basculer entre ces vues stockées. L'utilisateur peut accéder à ces vues multiples pour visualiser et modifier des objets à distance.

2.5 Conclusion

La gestion des réseaux souterrains constitue une préoccupation urbaine majeure. Elle est confrontée à des difficultés majeures, notamment la complexité de ces réseaux, leur forte densité en zone urbaine et leur vulnérabilité face à l'environnement et aux travaux sur la voirie. Cette vulnérabilité peut conduire à des incidents graves qui peuvent endommager ces réseaux ainsi que leur environnement, et à l'arrêt des services fournis par ces réseaux. Il est donc primordial de disposer des outils innovants qui permettent de visualiser ces réseaux lors des interventions et de réduire ainsi le risque de les endommager.

Ce travail propose d'utiliser la réalité augmentée implémentée sur un Smartphone (MAR) pour la visualisation en 3D des réseaux souterrains dans leurs environnements réels.

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'architecture du système proposé et montré comment ce système permet d'améliorer les flux de données tels que la planification des réseaux enterrés sur site, la capture de données et le relevé de données géospatiales. Les tâches d'arpentage bénéficient de la visualisation immédiate des géométries de prévisualisation et de la correction ou de l'arpentage des objets géospatiaux en montrant les caractéristiques connues et capturées dans le contexte de la MAR.

Le chapitre suivant présente le fonctionnement de ce système et son application sur le site de la Cité Scientifique.

2.6 Références bibliographiques

- Demirci, S., Yigit, E., Eskidmir, I.H., Ozdemir, C., 2012. Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method. *NDT & E International* 47, 35–42.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.12.008>
- Schall, G., Zollmann, S. & Reitmayr, G. Smart Vidente: advances in mobile augmented reality for interactive visualization of underground infrastructure. *Pers Ubiquit Comput* 17, 1533–1549 (2013).
<https://doi.org/10.1007/s00779-012-0599-x>
- Huston, D., Xia, T., Zhang, Y., Fan, T., Orfeo, D., Razinger, J., 2017. Urban underground infrastructure mapping and assessment, in: Lynch, J.P. (Ed.). Presented at the SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, Portland, Oregon, United States, p. 101680M.
<https://doi.org/10.1117/12.2263530>
- Ian Sherr . « Chicago maps its underground maze»
<https://www.cnet.com/news/chicago-maps-its-underground-maze-rahm-emanuel/>
[Aug. 11, 2017](#)
- Kruijff, E., Mendez, E., Veas, E., Gruenewald, T., 2010. On-Site Monitoring of Environmental Processes using Mobile Augmented Reality (HYDROSYS) 7.
https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl%3A20681/datastream/PDF/Kruijff-2010-On-site_monitoring_of_environmental_processes-%28published_version%29.pdf

- Pereira, M., Burns, D., Orfeo, D., Farrel, R., Hutson, D., Xia, T., 2018. New GPR System Integration with Augmented Reality Based Positioning, in: Proceedings of the 2018 on Great Lakes Symposium on VLSI - GLSVLSI '18. Presented at the the 2018, ACM Press, Chicago, IL, USA, pp. 341–346.
<https://doi.org/10.1145/3194554.3194623>
- Schall, G., Zollmann, S., Reitmayr, G., 2013. Smart Vidente: advances in mobile augmented reality for interactive visualization of underground infrastructure. *Personal and Ubiquitous Computing* 17, 1533–1549.
<https://doi.org/10.1007/s00779-012-0599-x>
- T. Xia, X. Xu, A. Vekatachalam and D. Huston, "Development of a high speed UWB GPR for rebar detection," *2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, 2012, pp. 66-70,
<https://doi.org/10.1109/ICGPR.2012.6254834>.
- Yang, B., 2019. Developing a Mobile Mapping System for 3D GIS and Smart City Planning. *Sustainability* 11, 3713.
<https://doi.org/10.3390/su11133713>
- Yu Zhang, Anbu Selvam Venkatachalam, Dryver Huston, and Tian Xia "Advanced signal processing method for ground penetrating radar feature detection and enhancement", *Proc. SPIE 9063, Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2014*, 906318 (9 March 2014);
<https://doi.org/10.1117/12.2046338>
- Yu Zhang, Anbu S. Venkatachalam, and Tian Xia "Ground-penetrating radar railroad ballast inspection with an unsupervised algorithm to boost the region of interest detection efficiency," *Journal of Applied Remote Sensing* 9(1), 095058 (24 July 2015).

<https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.095058>

- Zhang, Y., Venkatachalam, A.S., Huston, D., Xia, T., 2014. Advanced signal processing method for ground penetrating radar feature detection and enhancement, in: Wu, H.F., Yu, T.-Y., Gyekenyesi, A.L., Shull, P.J. (Eds.). Presented at the SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, San Diego, California, USA, p. 906318.

<https://doi.org/10.1117/12.2046338>

- Zollmann, S., Schall, G., Junghanns, S., Reitmayr, G., 2012. Comprehensible and Interactive Visualizations of GIS Data in Augmented Reality, in: Bebis, G., Boyle, R., Parvin, B., Koracin, D., Fowlkes, C., Wang, S., Choi, M.-H., Mantler, S., Schulze, J., Acevedo, D., Mueller, K., Papka, M. (Eds.), *Advances in Visual Computing*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 675–685.

https://doi.org/10.1007/978-3-642-33179-4_64

- S. Zollmann, D. Kalkofen, E. Mendez and G. Reitmayr, "Image-based ghostings for single layer occlusions in augmented reality," *2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2010, pp. 19-26,

<https://doi.org/10.1109/ISMAR.2010.5643546>

**Chapitre 3 : Réalisation d'une plateforme « Réalité Augmentée
Mobile » pour la gestion les réseaux enterrés : Application sur
le campus de la Cité Scientifique de l'Université de Lille ».**

3 Chapitre 3

3.1 Introduction

Ce chapitre présente le fonctionnement de la plateforme « Réalité Augmentée Mobile » qui a été développée dans le cadre de cette thèse pour la gestion des réseaux enterrés et son application sur les réseaux enterrés du Campus de la Cité Scientifique. Ce travail fait partie du projet pilote de ville intelligente « SunRise Smart City », qui vise la construction d'un démonstrateur à grande échelle de la ville intelligente sur le Campus de la Cité Scientifique (Ayari 2014, Abbas 2015, Shahrouf et al. 2016a et 2016b, Afaneh 2016, Abou Rjeily 2016, Farah 2016, Sakr 2017, Farah et Shahrouf 2017).

Le travail a comporté dans un premier temps la collecte des données sur l'ensemble des réseaux urbains (eau potable, assainissement, électricité, éclairage public et chauffage urbain) et leur intégration dans un système d'information géographique (SIG). A ce jour les données de patrimoine ainsi que les données sur la maintenance de ces réseaux sont intégrées dans le SIG de SunRise avec la possibilité de visualiser les données géolocalisées et leurs attribues, de croiser les données des réseaux et de faire des analyses géostatistiques de ces données.

Dans un second temps, les réseaux urbains ont été instrumentés pour le suivi des paramètres pertinents qui permettent de suivre le fonctionnement de ces réseaux et d'améliorer leur fonctionnement.

Ce travail constitue la 3^{ème} phase du projet SunRise qui vise à utiliser la Réalité Augmentée Mobile pour la gestion des réseaux enterrés à travers des opérations de visualisation en 3D des éléments de ces réseaux ainsi que la mise à jour de leur base des données suite à une intervention.

Ce chapitre expose le travail réalisé dans ce cadre. Il présente d'abord l'architecture des réseaux urbains de la Cité Scientifique. Ensuite, il décrit le fonctionnement de la plateforme « Réalité Augmentée sur Mobile » et son application aux cas suivants :

- La visualisation des réseaux existants ;
- Les opérations d'arpentage de ces réseaux ;
- Les opérations de mise en place de nouveaux éléments des réseaux.

3.2 Présentation la plateforme « Réalité Augmentée Mobile »

3.2.1 Définition de la réalité augmentée mobile

La réalité augmentée mobile RAM donne une vue en temps réel, directe ou indirecte de l'environnement physique du « monde réel », qui peut être augmentée par des entrées sensorielles générées par ordinateur telles que le son, la vidéo, les graphiques ou les données GPS et boussole etc (Milgram et al., 1994). Les informations sensorielles superposées peuvent être constructives (c'est-à-dire additives à l'environnement réel) ou destructives (c'est-à-dire masquant l'environnement réel). La RAM est une expérience interactive de l'environnement physique dont les objets sont améliorés par des informations perceptives générées par ordinateur (Williams et al., 2017). La RAM comprend cinq types qui se répartissent en deux catégories : la RAM basée sur les marqueurs qui utilise la caméra et des repères visuels et la RAM sans marqueur qui utilise des données de position telles que les données de capteurs du Smartphone comme le GPS, le gyroscope et la boussole (Kaddioui et al.,2019). Nous proposons une solution de RAM hybride qui combine les caractéristiques de ces deux catégories afin de répondre aux exigences de la MAR (Lannes, 2012) à savoir :

- La précision dans la géolocalisation ;
- Le suivi d'objectif ;
- La pose précise des objets 3D (canalisations virtuelles) sur le monde réel

- L'interaction de l'utilisateur avec cette plateforme MAR

3.2.2 Présentation du campus de la cité scientifique

Le campus cité scientifique de l'université de Lille est situé à Villeneuve d'Ascq dans le nord de la France. Ce campus représente une petite ville d'environ 25 000 habitants. Il a été construit entre 1964 et 1966. Plus tard, certains bâtiments ont été rénovés et d'autres ont été construits. Il comprend 145 bâtiments pour une surface totale de construction de 325 000 m² (Figure 7). Les bâtiments sont utilisés pour la recherche, l'enseignement, l'administration, les résidences des étudiants et les activités de divertissement. Le campus est desservi par 100 km de réseaux urbains : chauffage urbain et voirie, eau potable, réseau électrique, éclairage public, eaux pluviales, assainissement...



Figure 7: Campus cité scientifique

3.2.2.1 Réseau d'eau potable

Le réseau d'eau potable a été construit en 1964. Il se compose de canalisations, de 49 bouches d'incendie et 250 vannes d'isolement. La longueur du réseau d'eau dans le campus est égale à 15 km. Elle est subdivisée en 13 km pour le campus (Secteur privé) et 2 km pour le secteur public (propriétaire Eaux Du Nord). Ce réseau est représenté dans le SIG SunRise sous forme de couches séparées, comme le montre la figure 8. Les lignes représentent les tuyaux et les formes jaunes et rouges représentent les hydrants. Chaque couche possède des attributs sur le réseau d'eau à savoir : le diamètre, la longueur, le matériau des tuyaux, les coordonnées des bornes d'incendie, le propriétaire etc.

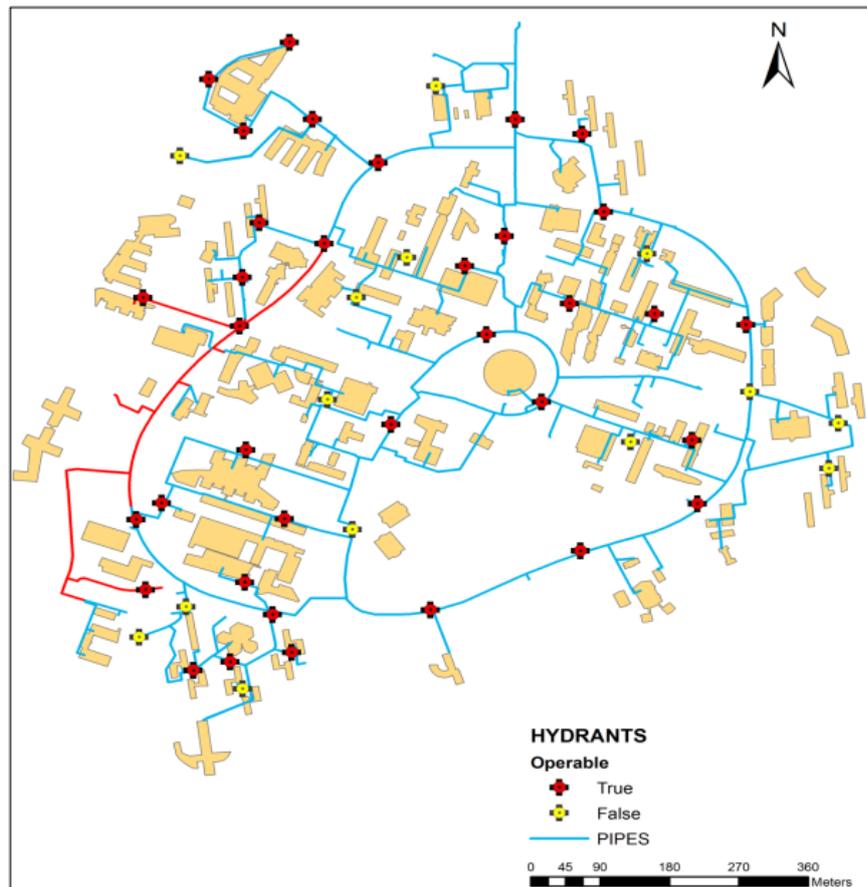


Figure 8: Réseaux d'eau et bornes d'incendie du campus cité scientifique (Farah 2016)

3.2.2.2 Le réseau de chauffage

Le réseau de chauffage a été construit en 1967 et rénové en 2002. Il comprend les canalisations et les équipements nécessaires au transport du fluide de chauffage. En effet, il transfère la chaleur de la chaufferie vers les différents bâtiments du campus. Ce réseau chauffe la majorité des bâtiments du campus, à l'exception de certains bâtiments ayant un chauffage individuel. Il fournit également l'eau chaude sanitaire. Il est divisé en réseaux primaire et secondaire avec 57 sous-stations.

Le réseau primaire a une longueur d'environ 5 km. Il est constitué de deux tubes (aller et retour). Il se déploie depuis l'usine de production jusqu'au point de livraison.

Le réseau secondaire est estimé à environ 3,7 km de long. Ces canalisations ont les mêmes caractéristiques que celles du réseau primaire. Chaque réseau est représenté sous la forme d'une couche dans le SIG SunRise, comme le montre la figure 9, les lignes rouges représentent le réseau primaire et les lignes violettes représentent le réseau secondaire.

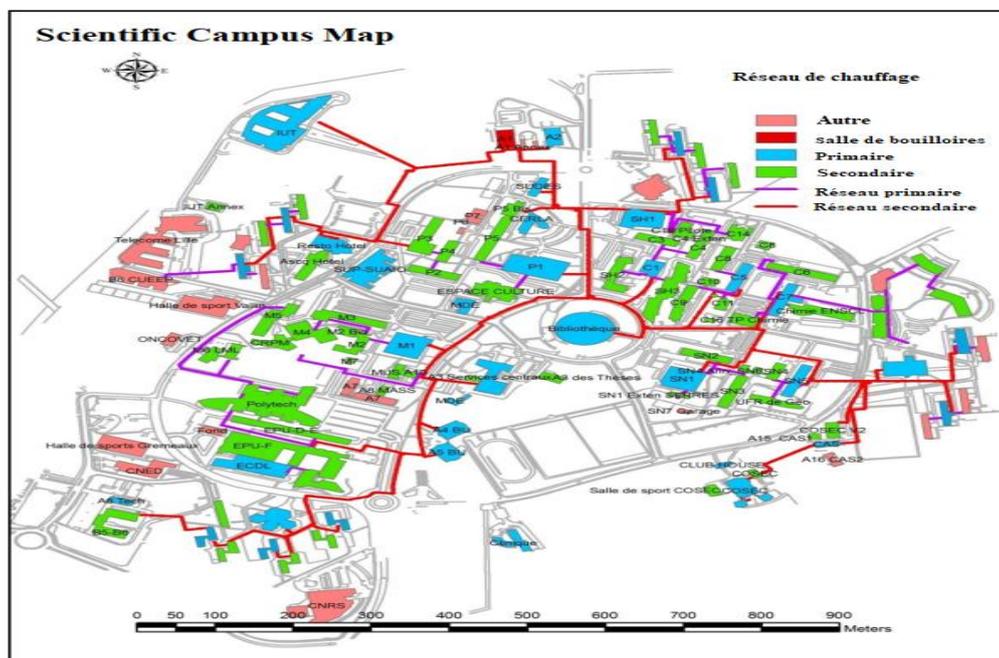


Figure 9: Réseau de chauffage du campus cité scientifique (Ayari 2014)

3.2.2.3 Le réseau électrique

Le système électrique assure la distribution de l'électricité pour tous les bâtiments et installations du campus. Il est composé de :

- Une station d'alimentation
- Sous-stations
- Un réseau Basse Tension (HT)
- Un réseau haute tension (HT)
- Une infrastructure de comptage avancée

Le poste d'alimentation du campus est situé dans le bâtiment A2, au nord du campus ; la Société française d'électricité l'alimente en 20 kV. Le réseau haute tension à 20 kV transmet ensuite l'énergie électrique vers les autres sous-stations. Les sous-stations comprennent des transformateurs, qui transforment le courant haute tension en courant basse tension (220 ou 440 V) pour alimenter les bâtiments et les installations par le biais du réseau basse tension (BT).

Le réseau haute tension comprend une sous-station principale (bâtiment A2 - poste d'alimentation) et 19 autres sous-stations.

Le réseau basse tension désigne le réseau de distribution (réseau secondaire) qui alimente les bâtiments après que la transformation de l'énergie électrique de la haute tension à la basse tension a eu lieu dans les sous-stations.

Une couche séparée dans le SIG SunRise représente chacun de ces composants. La figure 10 montre toutes les couches ensemble.

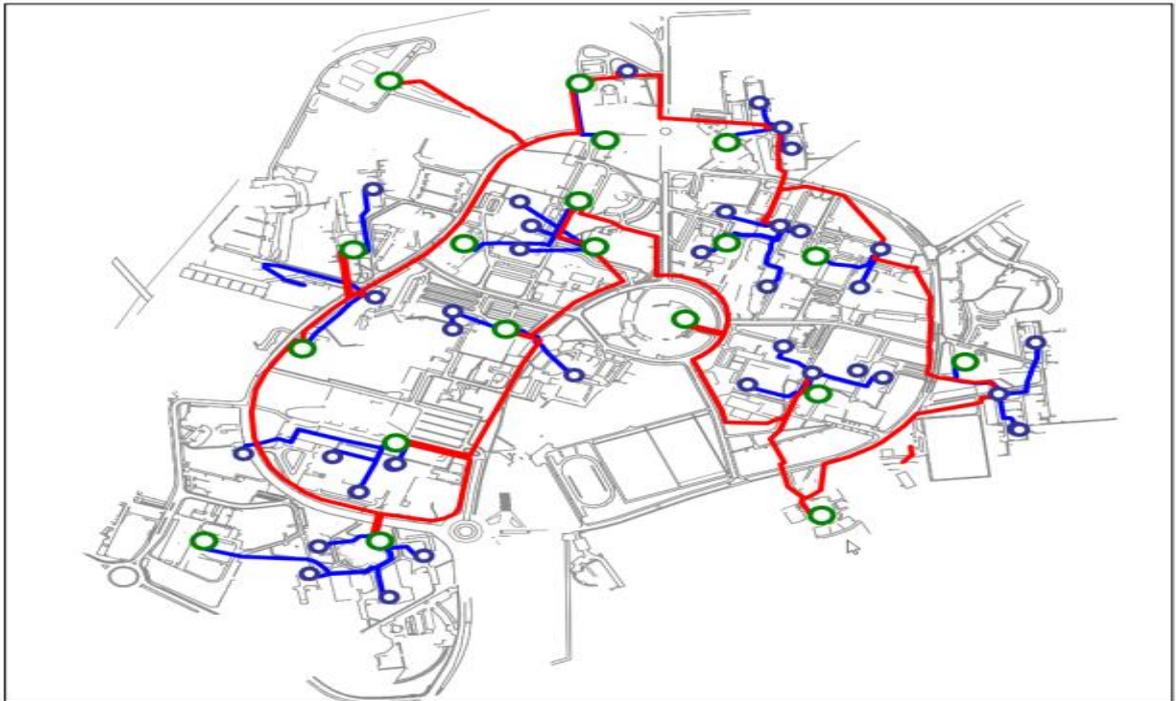


Figure 10: Réseau électrique campus cité scientifique (Sakr 2017)

3.2.2.4 Le réseau d'assainissement

Le réseau d'assainissement du campus universitaire est constitué de deux systèmes distincts. Le système d'eaux pluviales, qui collecte les eaux de ruissellement, et le système des eaux usées, qui collecte les eaux usées des bâtiments. Les deux systèmes rejettent leur contenu dans le réseau public géré par la Métropole Européenne de Lille.

Le réseau des eaux pluviales est composé de 31 km de canalisations dont le diamètre varie de 15 à 1200 cm. Ce réseau est composé de :

- Un réseau primaire, d'une longueur d'environ 7 km, géré par Lille Métropole.
- Un réseau secondaire, d'une longueur d'environ 24 km, géré par l'Université de Lille.

Chaque réseau a été présenté dans une couche séparée comme des lignes dans le système d'information géographique de SunRise (figure 11).

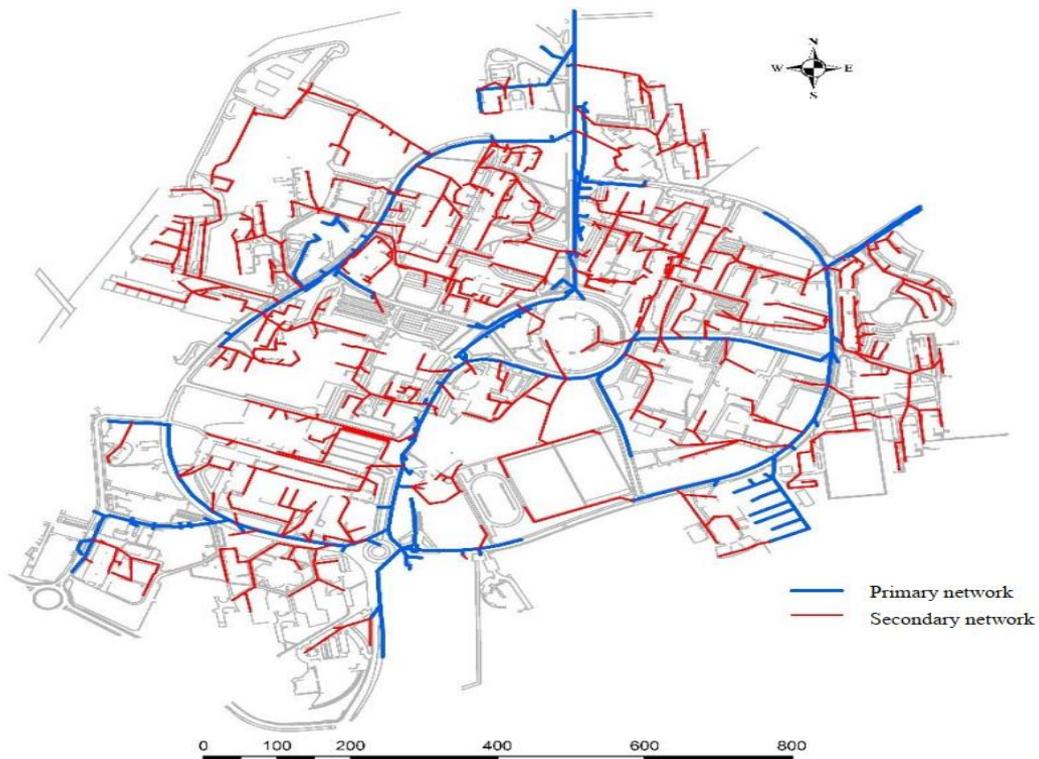


Figure 11: Réseaux des eaux pluviales de la cité scientifique (Abou Rjeily 2016)

Le réseau des eaux usées est composé de deux sous-réseaux :

- Un réseau primaire, sa longueur est d'environ 4 km géré par la Métropole Lille. Ce réseau transporte les eaux usées du campus vers le réseau public d'assainissement.
- Un réseau secondaire, d'une longueur d'environ 12 km, géré par l'université.

La figure 12 montre les deux réseaux en couches séparées et représentées par des lignes dans le système d'information géographique.

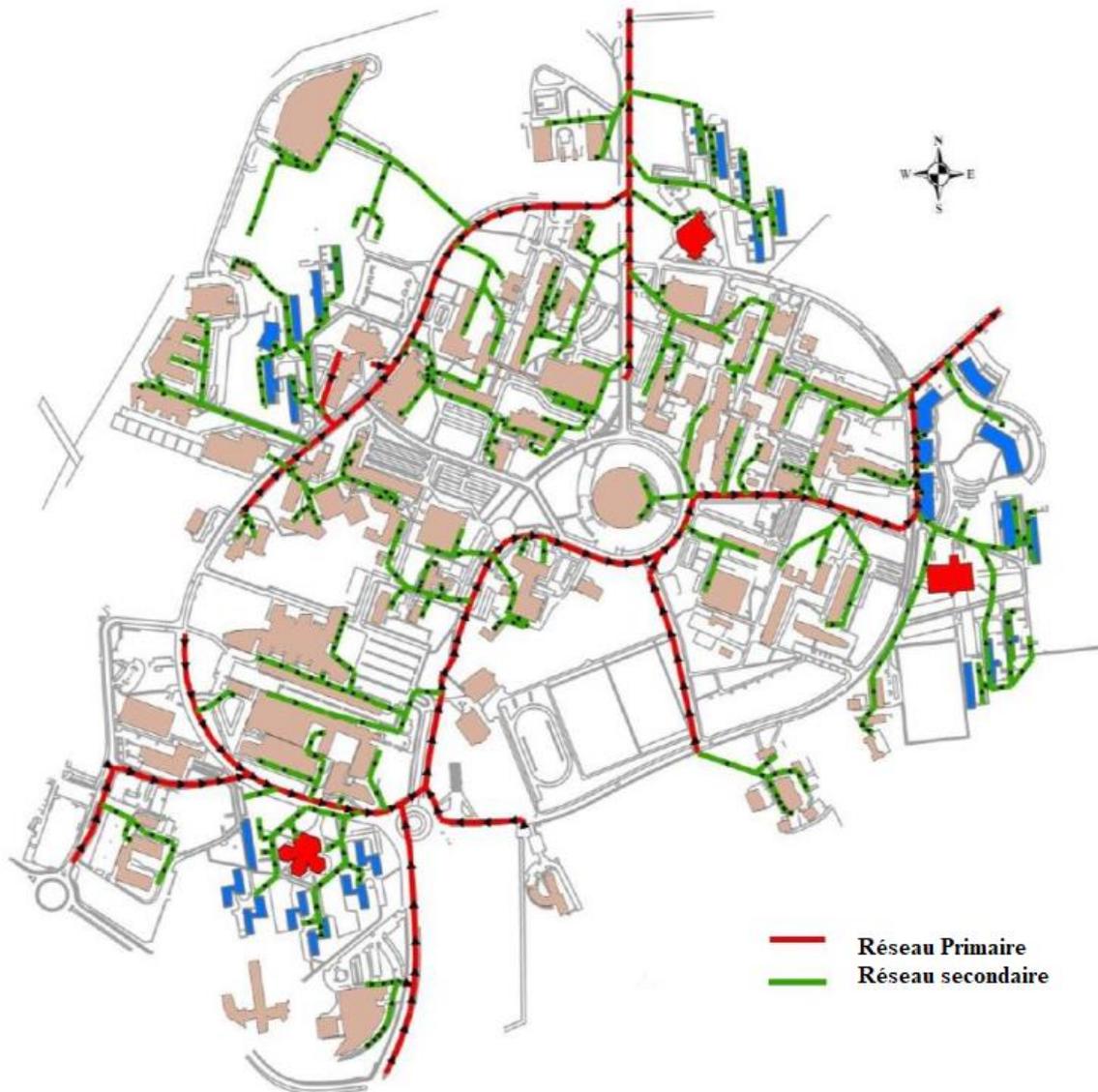


Figure 12: Réseaux des eaux usées de la cité scientifique (Abbas 2015)

3.3 Les Spécificités du Smartphone

3.3.1 Définition

Un smartphone, appelé aussi téléphone intelligent ou téléphone multifonction, est un appareil mobile disposant d'un écran tactile, d'un appareil photo numérique et certaines fonctions d'un ordinateur portable.

L'affichage et la saisie des données se fait sur écran tactile. Étant un appareil similaire à un ordinateur, il est doté d'un système d'exploitation (Android, IOS, Windows) spécialement conçu pour téléphones mobiles grâce auquel, il peut exécuter divers logiciels et applications. Il fournit des fonctionnalités en plus de celles des téléphones mobiles classiques comme la lecture et l'enregistrement de vidéos, le calendrier, la navigation sur internet, la gestion des mails et messages textes. Les smartphones se développent continuellement. Ils sont dotés de plus en plus de capteurs, processeurs et cartes graphiques puissants qui ont permis d'ouvrir un champ vaste et varié d'implémentation des applications mobiles telle que la réalité augmentée mobile.

3.3.2 Capteurs utilisés dans la plateforme RAM

La figure 13 donne un schéma des capteurs sur smartphone, qui sont utilisés dans la plateforme « Réalité Augmentée sur Smartphone ». On utilise sept capteurs, à savoir un accéléromètre, un gyromètre, un magnétomètre, un capteur de lumière, un podomètre, un GPS, et un baromètre. On donne ci-dessous une description de ces capteurs.



Figure 13: capteurs du Smartphone

❖ ***Accéléromètre :***

Ce capteur détecte ses changements de vitesse, l'accélération sur différents axes et les mouvements de translation. Le smartphone en contient trois. Ils servent à détecter l'orientation de l'écran, la force de gravité ainsi que le basculement du mode paysage au mode portrait. Il donne aussi la direction du déplacement de l'appareil.

❖ ***Gyromètre :***

Il détecte l'accélération de la rotation autour d'un axe, il mesure les changements dans l'orientation (mouvements angulaires) ou les changements de vitesse et de rotation.

❖ ***Magnétomètre :***

Il mesure les champs magnétiques. Il possède 3 capteurs avec 3 axes qui permettent au smartphone de connaître son orientation. Ce capteur, étant associé au Gyromètre, il permet de mesurer l'ensemble des mouvements effectués.

❖ ***Capteur de lumière :***

Ce capteur détecte la luminosité ambiante et permet à l'écran d'ajuster son éclairage lorsque le mode "ajustement automatique" est sélectionné.

❖ ***Podomètre :***

Le podomètre calcule le nombre de pas effectués pendant une durée déterminée et la distance parcourue.

❖ ***Global Positioning System (GPS) :***

Le GPS sert à géo-localiser le smartphone en fournissant sa position géographique exacte. Il est indispensable pour connaître l'itinéraire à suivre pour se rendre à un endroit qu'on ne connaît pas en utilisant Google Maps ou OpenStreetMap par exemple.

❖ *Baromètre :*

Le baromètre vient compléter la fonction GPS en rajoutant des données supplémentaires tel que la latitude, la longitude et l'altitude.

Étant donné le smartphone est manipulé par son utilisateur, Il peut effectuer trois mouvements de translation de déplacement d'un point à un autre (Figure 14)

- Longitudinal : décrit le mouvement du smartphone qui avance ou recule
- Transversal : désigne mouvement du smartphone lorsqu'il bouge de droite à gauche ou de gauche à droite.
- Verticale : désigne le mouvement du smartphone quand qu'il monte ou descend.



Figure 14: Différents cas de déplacement d'un smartphone

3.4 Les Logiciels utilisés

La plateforme utilise les logiciels suivants : Unity, Wikitude SDK et Feature Manipulation Engine (FME). On donne ci-dessous une description de ces logiciels.

3.4.1 Le Logiciel Unity

Le logiciel Unity est un moteur de jeu multiplateforme (smartphone, ordinateur, consoles de jeux vidéo et Web) développé par Unity Technologies. Il est l'un des plus répandus dans

l'industrie du jeu vidéo, aussi bien pour les grands studios que pour les indépendants du fait de sa rapidité aux prototypages. Il a la particularité de proposer une licence gratuite avec quelques limitations de technologie avancée au niveau de l'éditeur, mais sans limitation au niveau du moteur.

Il est capable supporter de nombreux formats 3D (Blender, Maya, Cinema 4D, Cheetah3D, des ressources variées : (des textures Photoshop, PNG, audios, vidéos) qu'il optimise par l'utilisation de filtres définis dans sa documentation officielle.

Unity possède une palette large de déploiement car il est compatible avec les API graphiques Direct3D6, OpenGL6, Vulkan13, VR et AR. Il est considéré comme logiciel de modélisation 3D à l'instar de Blender : il intègre donc une partie graphique et une partie programmation pour la création des projets.

3.4.2 Le logiciel WIKITUDE SDK

Wikitude est un fournisseur de technologie de Réalité Augmentée (RA) mobile. Il se concentre sur la fourniture d'expériences de réalité augmentée basées sur la localisation via l'application Wikitude World Browser. Le SDK Wikitude (figure 15) est un environnement de développement utilisant des technologies de reconnaissance et de suivi d'images et de géolocalisation. Ce SDK comprend la reconnaissance et le suivi d'images, le rendu de modèles 3D, la superposition vidéo et la RA basée sur la localisation. En 2017, Wikitude a lancé sa technologie SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) qui permet la reconnaissance et le suivi d'objets, ainsi que le suivi instantané sans marqueur. Le SDK multiplateforme est disponible pour les systèmes d'exploitation Android, iOS et Windows, et est également optimisé pour plusieurs appareils de lunettes intelligents.

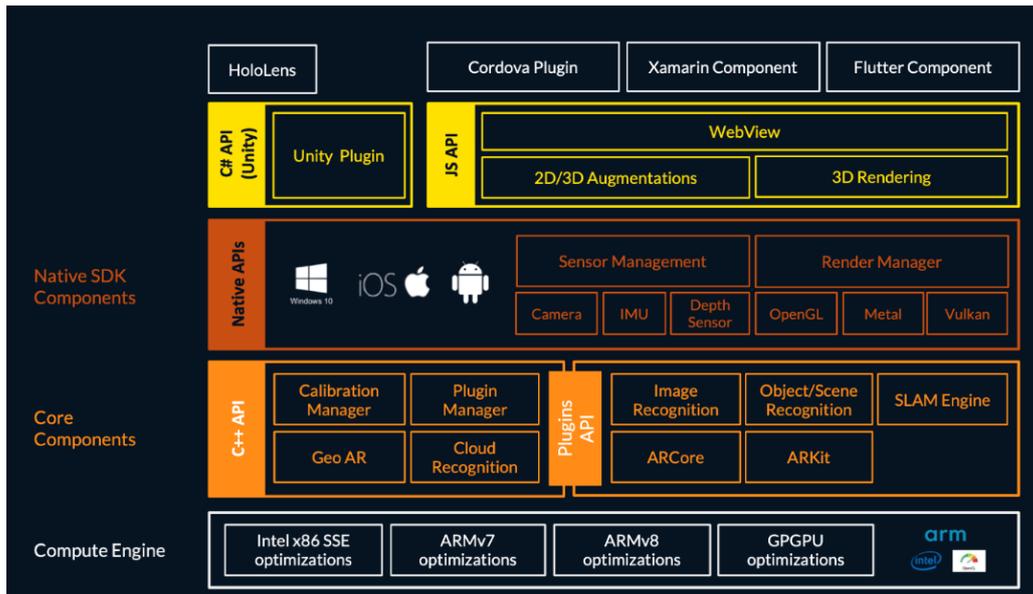


Figure 15: Architecture du SDK Wikitude

3.4.3 Moteur de manipulation des caractéristiques (FME)

C'est un outil de traitement des données conçu pour manipuler des informations géographiques. Il est très efficace pour traiter des données de toute nature avec une interface ergonomique. FME est un logiciel de type ETL qui permet de réaliser des opérations d'extraction, de transformation, et de chargement. Il a été développé par la société canadienne SAFE Software, qui est spécialisée en donnée géographique vectorielle et image. L'architecture du système est illustrée dans la figure 16

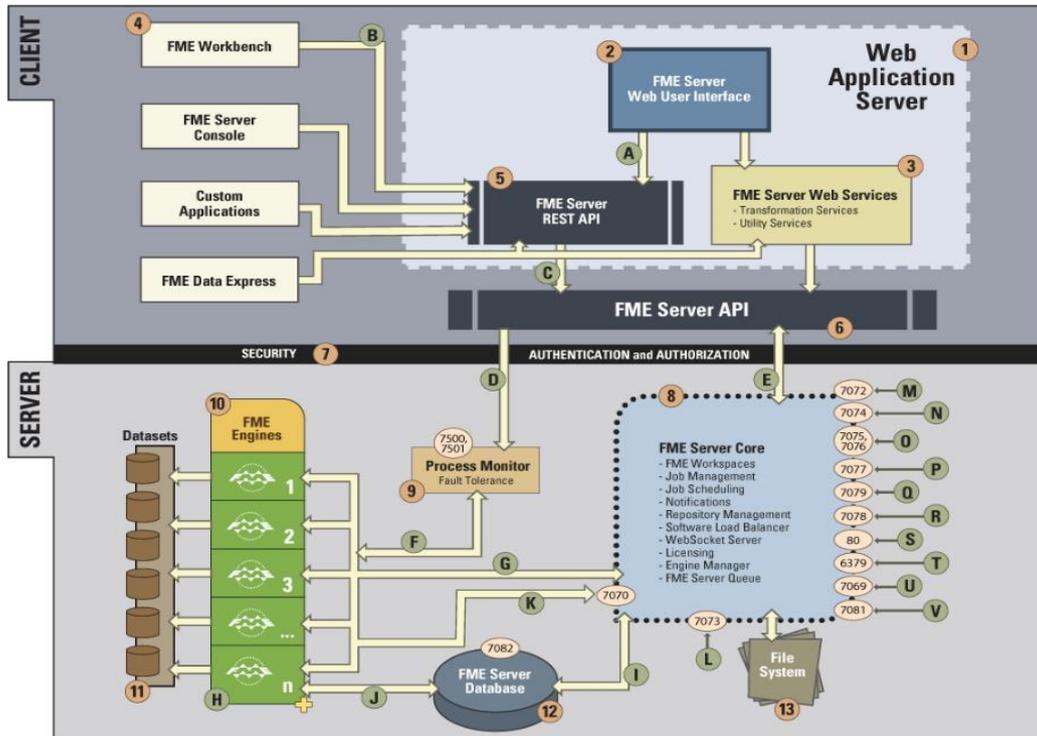


Figure 16: Architecture de serveur FME

FME (alias Feature Manipulation Engine) prend en charge des centaines de formats et d'applications ainsi que des outils de transformation, permettant aux utilisateurs de créer et d'automatiser des workflows d'intégration personnalisés.

C'est un outil qui permet de :

1. Connecter les sources de données (opération d'extraction de données) et spécifiez les emplacements de sortie à l'aide de l'outil FME Desktop ;
2. Ajouter des transformateurs si nécessaire pour personnaliser le flux de travail. (Dans notre cas transmissions dans les deux sens entre les couches 1 et 3) ;
3. Exécuter des workflows localement ou publiez des workflows sur FME Server ou FME Cloud ;
4. Définir des calendriers ou créez des workflows d'automatisation basés sur des événements pour un traitement en temps réel.

3.5 Présentation de la plateforme

Cette section présente la réalisation d'une plateforme de Réalité Augmentée Mobile pour la gestion des réseaux enterrés. Le développement est réalisé pour un Smartphone Android.

3.5.1 La phase d'Analyse

La phase d'analyse a pour objectif de bien identifier les besoins et exigences de l'utilisateur. Il s'agit de préciser des spécifications pour la conception d'une solution adéquate. L'analyse doit préciser les scénarios d'utilisation ainsi que l'architecture du système et sa maintenance.

3.5.2 Cas d'utilisation (CU)

L'objectif de l'étude des cas d'utilisation est de représenter les différents cas de figures d'interaction entre l'utilisateur et le système. Il représente la structure des grandes fonctionnalités d'interactions des utilisateurs avec le système. Il donne une vue claire du système dans son environnement extérieur et définit avec précision la relation entre l'utilisateur et les éléments mis en œuvre par le système.

3.5.2.1 Description des cas d'utilisation (CU)

Un cas d'utilisation (CU) permet de mettre en évidence les relations fonctionnelles entre les acteurs et le système concerné. Il fait intervenir deux notions :

- **La « précondition »** : Il définit les conditions qui doivent être satisfaites pour que le cas d'utilisation (CU) soit réalisé puisse démarrer.
- **La « post-condition » définit** ce qui doit être exécuté lorsque le CU se termine avec succès, qu'il s'agisse d'un scénario nominal ou alternatif.

3.5.2.2 Cas d'utilisation « CRUD un compte »

Ce cas d'utilisation concerne la gestion des profils usagers. Le Tableau 3 illustre les opérations gérées dans cette opération : de création, consultation, modification et suppression de compte

par l'administrateur des acteurs qui peuvent avoir accès à ce service. A la sortie de cette opération, la base de données est mise à jour.

Tableau 3: Cas d'utilisation « CRUD un compte » par l'administrateur

<p>Identification</p> <p>Nom du cas d'utilisation : CRUD compte.</p> <p>But : création, consultation, modification et suppression de compte</p> <p>Acteurs : administrateur, utilisateur</p>
<p>Séquencement</p> <p>L'administrateur démarre le système et crée un compte utilisateur avec certains privilèges ou le consulte, le modifie ou la suppression.</p> <p>Précondition : Aucune.</p> <p>Enchainements nominaux :</p> <ul style="list-style-type: none">- L'administrateur démarre le système- L'utilisateur lance l'application dans son smartphone ;- L'application demande de remplir un formulaire d'authentification ;- L'utilisateur saisit les informations de connexion ;-L'application se lance ; <p>Enchainements alternatifs :</p> <ul style="list-style-type: none">- Données saisies non valides ;- Authentification réussie.
<p>Post-condition :</p> <p>Mise à jour de la base de données.</p>

3.5.2.3 Cas d'utilisation « CRUD réseaux » par l'administrateur

Ce cas d'utilisation concerne la gestion des réseaux à travers les opérations de création, consultation, modification et suppression de réseaux. Le Tableau 4 donne le détail des opérations effectuées. A la fin de cette opération, la base de données est mise à jour.

Tableau 4: Cas d'utilisation « CRUD réseau » par l'administrateur

<p>Création, consultation, modification ou suppression</p> <p>Nom du cas d'utilisation : CRUD réseau.</p> <p>But : création, consultation, modification et suppression de réseau</p> <p>Acteurs : administrateur.</p>
<p>Séquencement</p> <p>L'administrateur démarre le système et crée un réseau le consulte, le modifie ou la suppression.</p> <p>Précondition : Aucune.</p> <p>Enchainements nominaux :</p> <ul style="list-style-type: none">- L'administrateur démarre le système <p>Enchainements alternatifs :</p> <ul style="list-style-type: none">- CRUD réseau ;
<p>Post-conditions :</p> <p>Mise à jour de la base de données.</p>

3.5.2.4 Cas d'utilisation « CRUD réseaux » par l'utilisateur

Le cas d'utilisation concerne la gestion des réseaux par l'utilisateur. Le Tableau 5 donne le détail des opérations que l'utilisateur peut effectuer en termes de création, consultation, modification et suppression de réseaux. Le Tableau 3.2 donne le détail des opérations effectuées. A la sortie de cette opération, la base de données est mise à jour.

Tableau 5: Cas d'utilisation « CRUD réseaux » par l'utilisateur

<p>Création, consultation, modification ou suppression</p> <p>Nom du cas d'utilisation : CRUD réseau.</p> <p>But : création, consultation, modification et suppression de réseau</p> <p>Acteurs : utilisateur.</p>
<p>Séquencement</p> <p>L'administrateur démarre le système, crée un réseau, le consulte, le modifie ou la suppression.</p> <p>Précondition : Aucune.</p> <p>Enchainements nominaux :</p> <ul style="list-style-type: none">- L'administrateur démarre le système- L'utilisateur lance l'application ; <p>Enchainements alternatifs :</p> <ul style="list-style-type: none">- CRUD réseau (selon les privilèges accordés par l'administrateur) ;
<p>Post-conditions :</p> <p>Mise à jour de la base de données.</p>

3.5.2.5 Cas d'utilisation « Visualisation »

Ce cas d'utilisation concerne la visualisation par l'administrateur des réseaux enterrés (Tableau 6). A la sortie de cette opération, la base de données GIS est mise à jour.

Tableau 6: Cas d'utilisation « Visualisation des réseaux »

<p>Nom du cas d'utilisation : Visualiser réseaux</p> <p>But : Visualisation des réseaux</p> <p>Acteurs : administrateur, utilisateur</p>
<p>Séquencement</p> <p>L'administrateur démarre le système et visualise les réseaux existants.</p> <p>Précondition : Aucune.</p> <p>Enchainements nominaux :</p> <ul style="list-style-type: none">- L'administrateur démarre le système- L'utilisateur lance l'application ; <p>Enchainements alternatifs :</p> <ul style="list-style-type: none">- Visualiser les réseaux existants
<p>Post-conditions :</p> <p>Mise à jour de la base de données.</p>

3.5.2.6 Cas d'utilisation « Relève des données des réseaux »

Ce cas d'utilisation est effectué par l'administrateur. Il peut aussi être effectué par l'utilisateur. Il permet de relever les données des réseaux (Tableau 7). A la fin de cette opération, la base des données est mise à jour.

Tableau 7: Cas d'utilisation « Relève d'information »

<p>Nom du cas d'utilisation : Relève les données des réseaux existants</p> <p>But : Relève les données des réseaux existants</p> <p>Acteurs : administrateur, utilisateur.</p>
<p>Séquencement</p> <p>L'administrateur démarre le système et données des réseaux existants.</p> <p>Précondition : Aucune.</p> <p>Enchainements nominaux :</p> <ul style="list-style-type: none">- L'administrateur démarre le système- L'utilisateur lance l'application ;- L'application enregistre les données des réseaux. <p>Enchainements alternatifs :</p> <ul style="list-style-type: none">- Relève les données des réseaux existants des réseaux existants
<p>Post-conditions :</p> <p>Mise à jour de la base de données.</p>

3.5.2.7 Cas d'utilisation « Extension des réseaux »

Ce cas d'utilisation a pour but de superposer les canalisations virtuelles dans leurs emplacements lors des opérations d'extension des réseaux (Tableau 8). Il peut être effectué par l'administrateur ou l'utilisateur. A la fin de cette opération, la base des données est mise à jour.

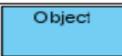
Tableau 8: Cas d'utilisation « Extension des réseaux »

<p>Nom du cas d'utilisation : Extension des réseaux</p> <p>But : superposer les canalisations virtuelles dans leurs emplacements lors des opérations d'extension des réseaux</p> <p>Acteurs : administrateur, utilisateur.</p>
<p>Séquencement</p> <p>L'administrateur démarre le système et données des réseaux existants.</p> <p>Précondition : Aucune.</p> <p>Enchainements nominaux :</p> <ul style="list-style-type: none">- L'administrateur démarre le système- L'utilisateur lance l'application ;- L'application enregistre les données des réseaux. <p>Enchainements alternatifs :</p> <ul style="list-style-type: none">- Relève les données des réseaux existants des réseaux existants
<p>Post-conditions :</p> <p>Mise à jour de la base de données.</p>

3.5.3 Diagramme de séquences

Le diagramme de séquence permet de représenter les interactions entre différents objets du système, selon des séquences temporelles en se basant sur la chronologie des envois de messages (Tableau 9).

Tableau 10: Représentation d'un diagramme de séquence

	Acteur	Les acteurs peuvent communiquer avec des objets, ainsi ils peuvent eux aussi être énumérés en colonne. Un acteur est modélisé en utilisant le symbole habituel: Stickman.
	Objet	Les objets sont des entités appartenant au système (instance d'une classe) ou se trouvant à ses limites (acteurs)
	Ligne de vie	Elle est représentée par une ligne verticale en dessous des objets, représente la période de temps durant laquelle l'objet "existe".
	Message récursif	L'envoi de messages récursifs se représente par un dédoublement de la bande d'activation
	Message	Les objets communiquent en échangeant des messages représentés sous forme de flèches, ils sont étiquetés par le nom de l'opération ou du signal invoqué.
	Message de retour	Représenté par une flèche discontinue, c'est la réponse au message envoyé.

3.5.3.1 Diagramme de séquence « Authentification »

L'authentification est un moyen de s'assurer de l'identité de l'utilisateur lorsqu'il essaye de se connecter. Ceci consiste à assurer la confidentialité des données, elle se base sur la vérification du login et du mot de passe. Ces informations sont préétablies dans la base de données. Lors de l'authentification de l'utilisateur, deux cas de figure peuvent se présenter : informations correctes ou incorrectes. Si ces informations sont correctes, alors le système accorde l'accès à l'interface appropriée suivant les privilèges accordées par l'administrateur. En revanche, si l'utilisateur saisit des informations étonnées, le système affiche un message d'erreur et retourne à la page d'authentification.

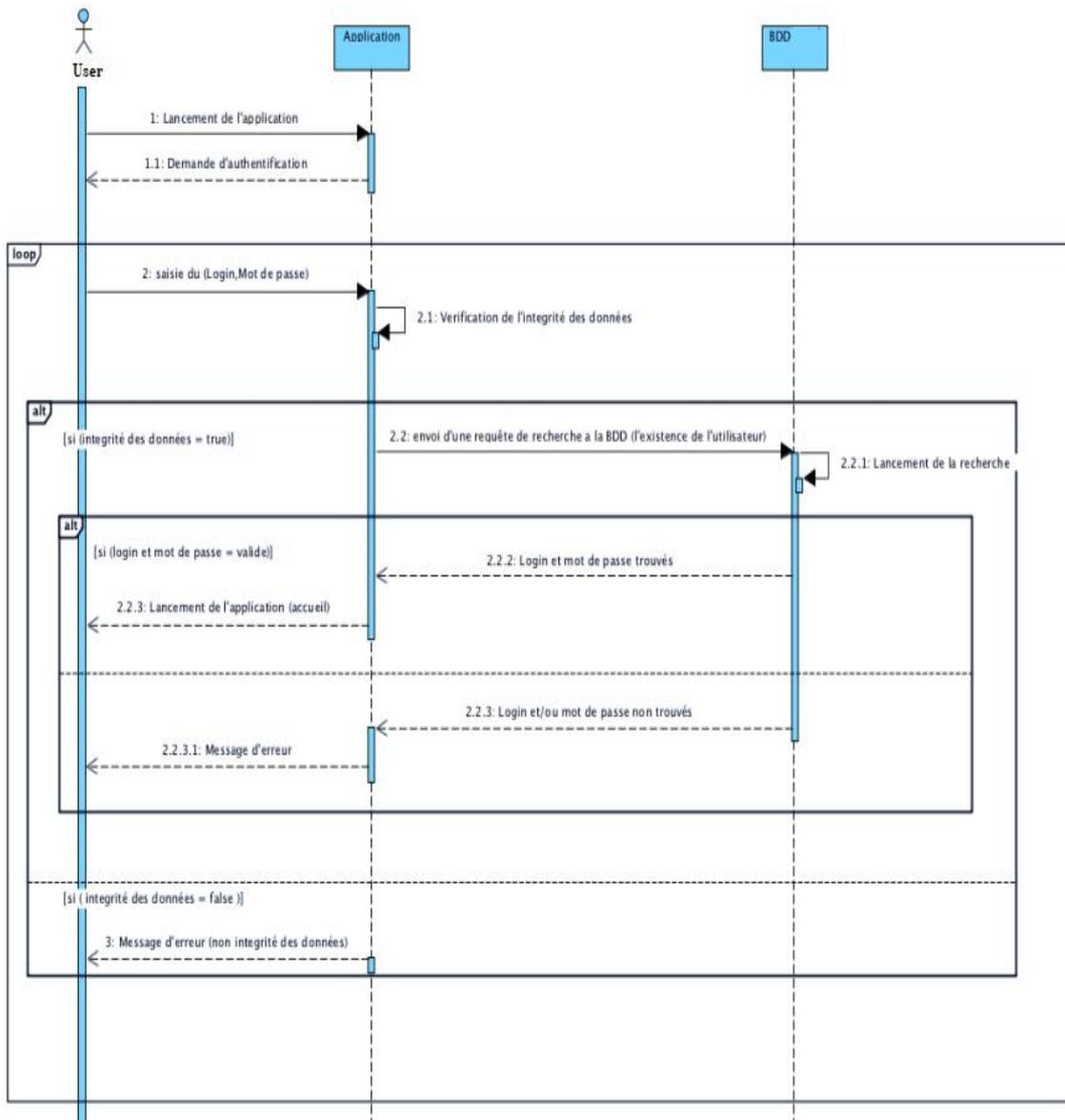


Figure 17: Diagramme de séquence « Authentification »

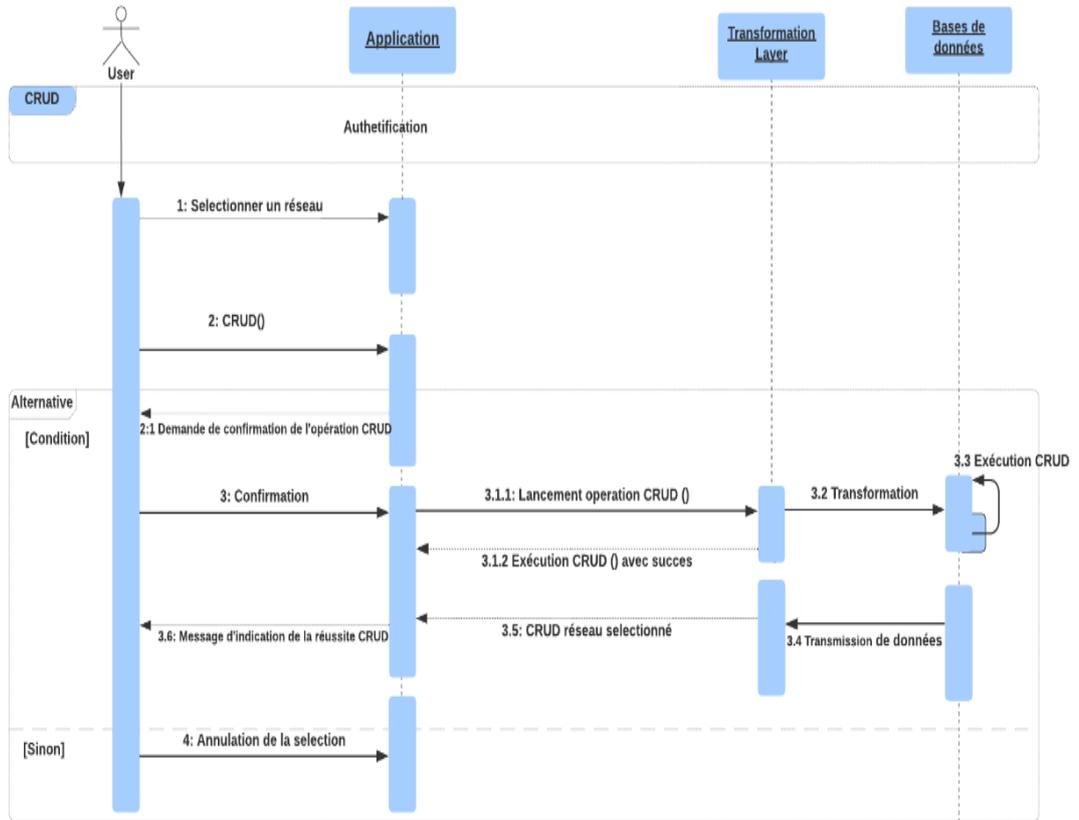


Figure 18: : Diagramme de séquence « CRUD réseaux »

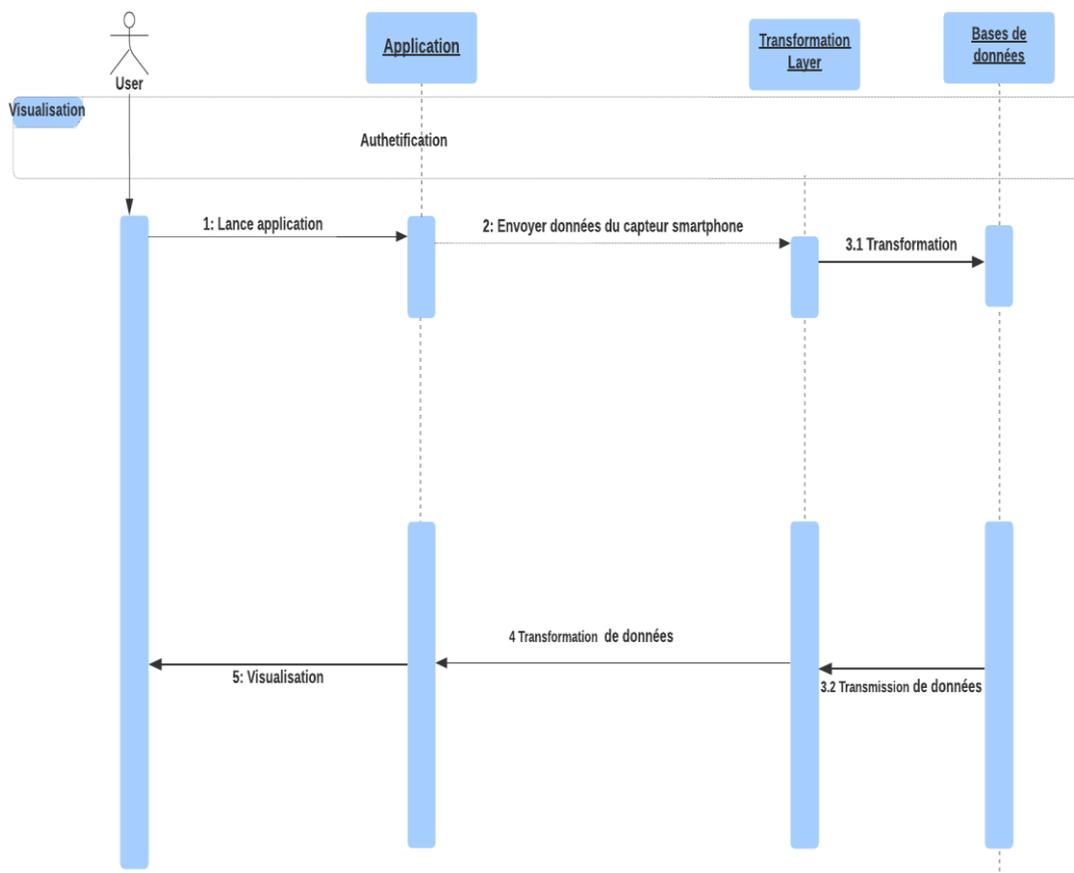


Figure 19: : Diagramme de séquence « Visualisation des réseaux »

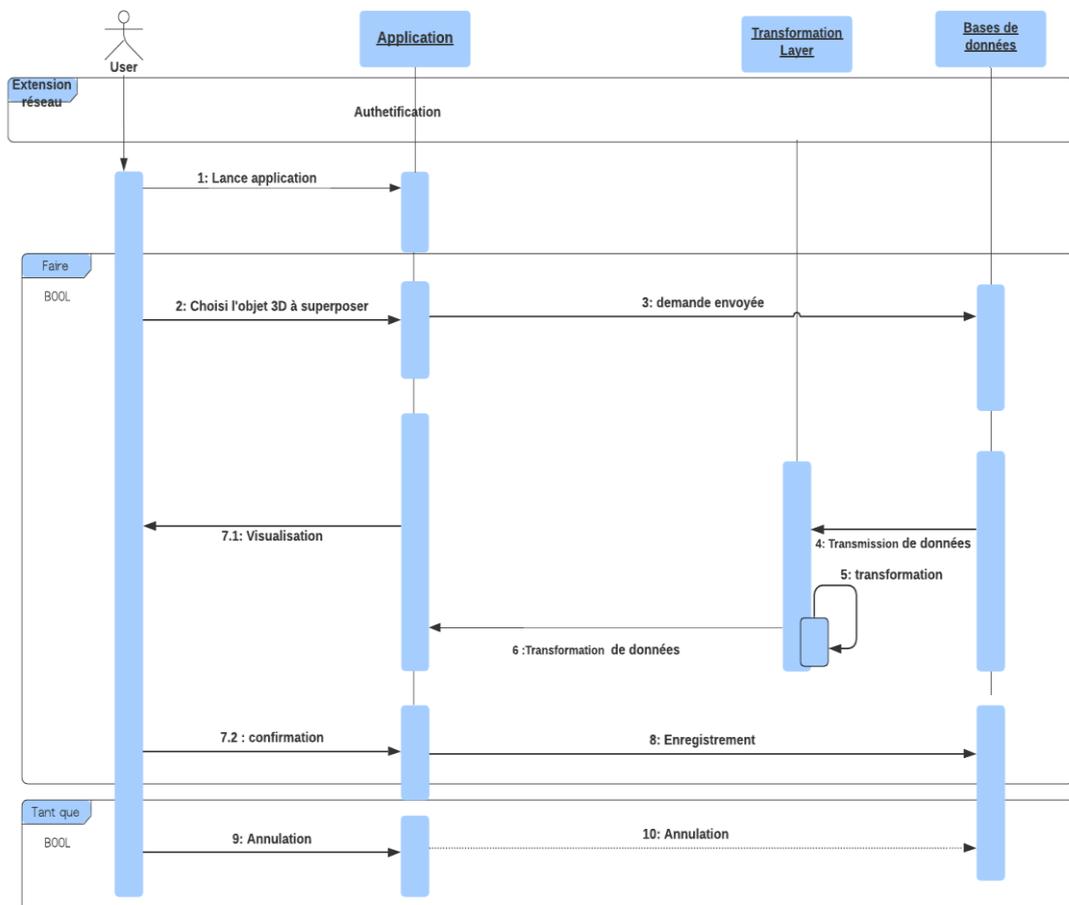


Figure 20: : Diagramme de séquence « Extension réseaux »

3.5.4 Description des bases de données

Le modèle de données supportant cette plateforme a été implémenté sur le système de gestion de base de données PostgreSQL avec son module PostGIS. Le client ne conserve que la portion de la scène générée par le moteur WIKITUDE, qui est visualisée à chaque instant. Le côté serveur maintient une base de données spatiale PostGIS et une base de données sémantique GIS contenant les informations sur les réseaux souterrains du campus cité scientifique. La conception de ces deux bases de données permet de maintenir les entités séparées pour les informations sémantiques et géométriques. Ce modèle de données garantit

que de nouveaux objets peuvent être ajoutées au système en utilisant le même noyau de données géométriques.

3.5.5 Application sur le campus de cité scientifique

❖ Choix des couleurs des réseaux enterrés

En France, le marquage piquetage des réseaux enterrés doit être conforme à la norme **NF P 98-332**. En effet, les codes couleur imposés dans cette norme concernent non seulement le marquage, le piquetage ainsi que les distances à respecter entre ces réseaux enterrés mais aussi le voisinage entre les végétaux et les réseaux.

Ce guide vous permet d'identifier la nature de chaque réseau enterré selon la couleur de marquage utilisée selon la norme NF P 98-332 (figure 21) :

- Un marquage en rouge définit tout réseau d'électricité BT, HTA ou HTB et éclairage ainsi que les réseaux enterrés pour les feux tricolores et la signalisation routière ;
- La couleur jaune indique tous les réseaux enterrés qui sont de nature pétrolière, comme le transport et la distribution de gaz combustible et des hydrocarbures ;
- La couleur orange est utilisée pour identifier les réseaux souterrains de produits chimiques ;
- La couleur bleue est spécifique aux réseaux enterrés d'eau potable ;
- La couleur marron est la couleur de marquage pour les réseaux d'assainissement et pluvial ;
- Le coloris violet est réservé aux réseaux souterrains pour le chauffage et la climatisation ;
- La couleur verte indique les réseaux de télécommunications et les réseaux de feux tricolores et de signalisation routière TBT ;
- Le blanc est la couleur de marquage indiquer les zones de travaux ;

- La couleur en rose pour identifier une zone d'emprise multi-réseaux.

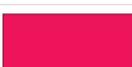
NATURE DES RÉSEAUX	COULEUR DU MARQUAGE	
Electricité BT, HTA ou HTB, éclairage ; Feux tricolores et Signalisation routière		Rouge
Gaz combustible (transport ou distribution) et Hydrocarbures		Jaune
Produits chimiques		Orange
Eau potable		Bleu
Assainissement et Pluvial		Marron
Chauffage et climatisation		Violet
Télécommunications ; Feux tricolores et Signalisation routière TBT		Vert
Zone de travaux		Blanc
Zone d'emprise multi-réseaux		Rose

Figure 21: Couleur du marquage selon la norme NF P 98-332

La plateforme développée permet de visualiser les réseaux enterrés du campus Cité scientifique à l'aide de la technologie la réalité augmentée mobile. Les expériences au niveau du campus ont été réalisées à l'aide du smartphone HUAWEI P30 Pro fonctionnant avec le système d'exploitation EMUI 9.1 (Basé sur Android 9).

Cette plateforme offre de nombreuses possibilités. Elle permet de visualiser les réseaux souterrains dans un rayon de 50 m. Au fur et à mesure que l'utilisateur « smartphone » se déplace les réseaux affichés sont mis simultanément à jour. (Figure 22).



Figure 22: Visualisation des réseaux du campus cité scientifiques

Lorsqu'il clique sur le bouton info les noms des canalisations s'affichent (Figure 23). En sélectionnant un objet affiché sur l'écran du smartphone, il peut afficher également les informations complémentaires concernant cet objet (Figure 24).

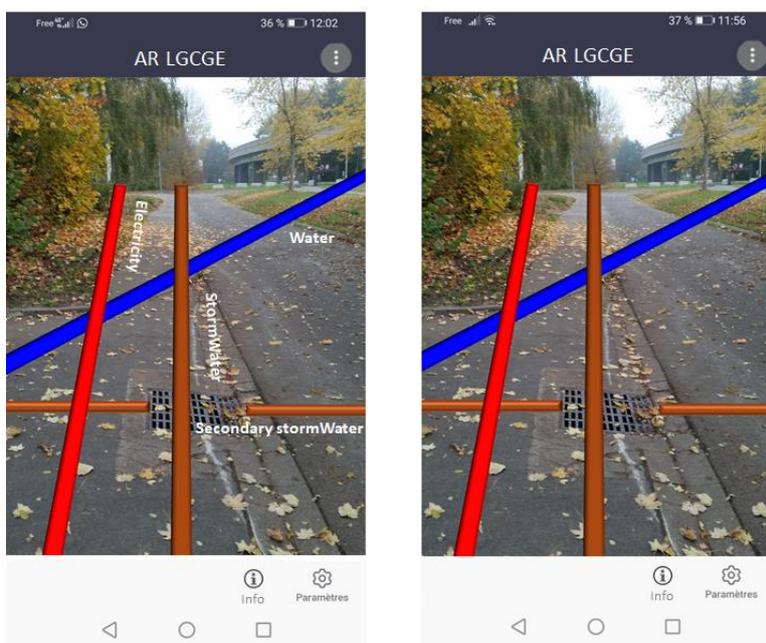


Figure 23 : affichage des natures de réseaux

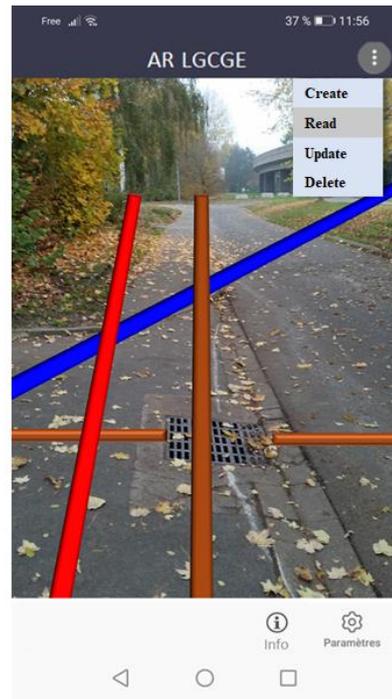


Figure 24: informations complémentaires d'un objet sélectionné

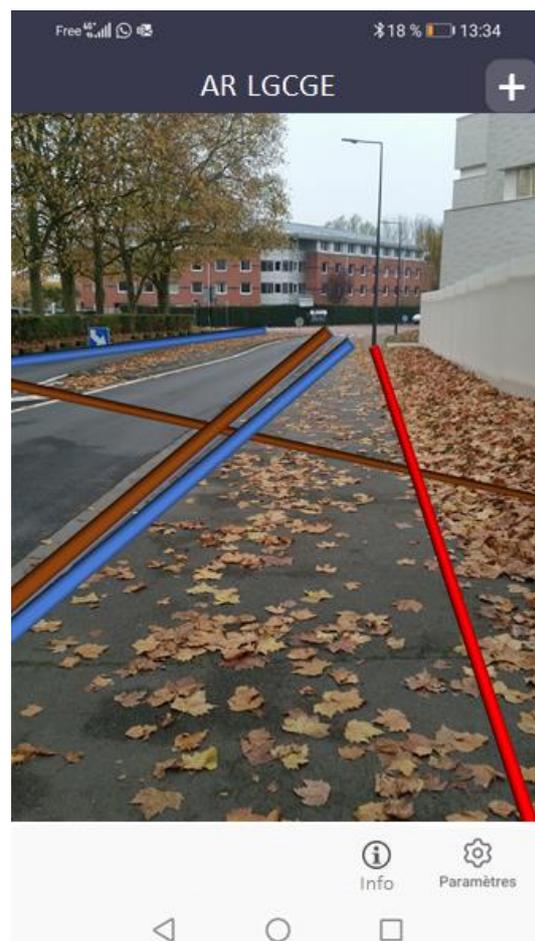


Figure 25: Visualisation des réseaux du campus cité scientifiques

Elle permet d'afficher les informations des réseaux souterrains dans le cadre des opérations de maintenance ou de relevé des données (figure 23). De plus on peut effectuer les opérations CRUD sur ces réseaux à l'aide de cette plateforme. Par exemple, l'utilisateur appui sur update puis l'objet 3d de la pipe du réseau électrique est ajouté car il est déjà configuré par l'administrateur au niveau du serveur (figure 24).

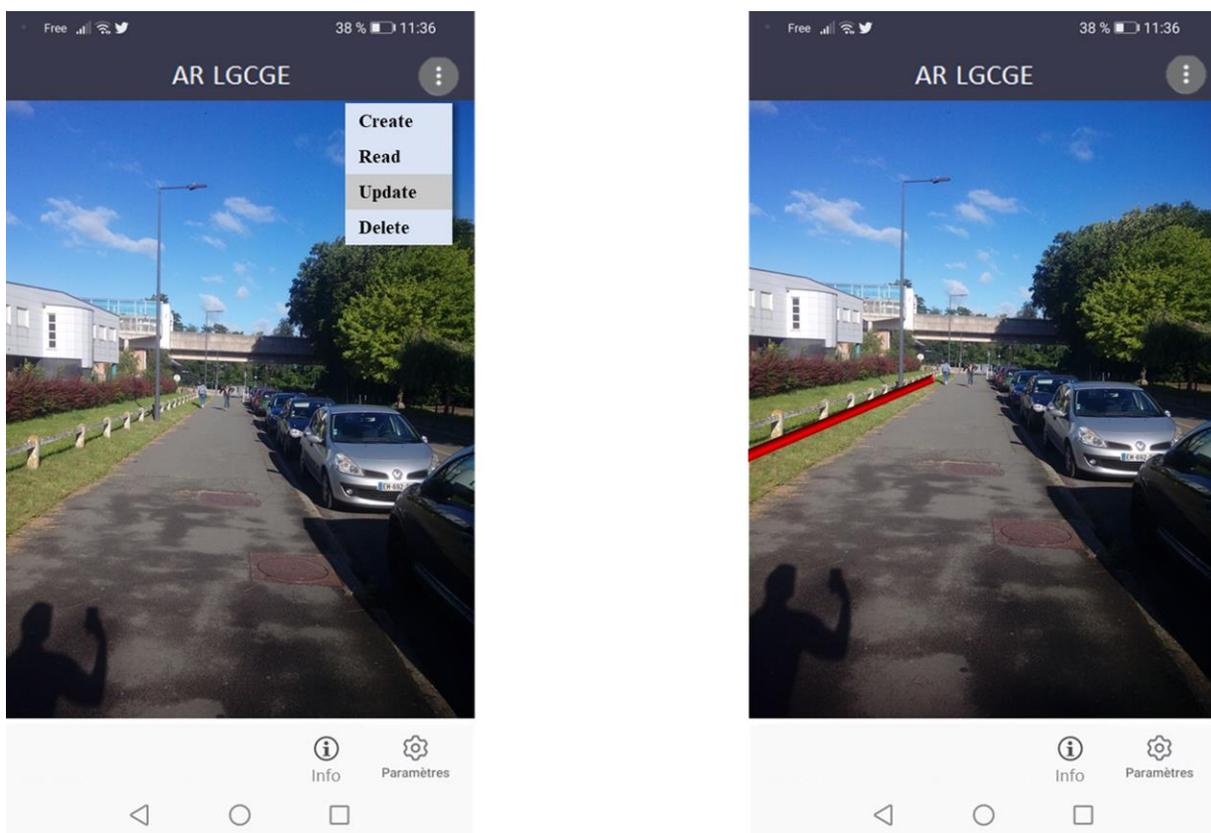


Figure 26: Ajout d'un élément au réseau électrique

3.6 Conclusion

La plateforme développée utilisant la technologie de réalité augmentée implémentée sur un Smartphone est un outil efficace dans la gestion des réseaux enterrés. Elle permet en plus de visualisation des réseaux souterrains, de relever leurs informations et effectuer les opérations d'ajout, modification ou suppression. Suites aux expériences effectuées, il apparaît clairement l'interprétation sémantique des données GIS des réseaux souterrains à l'aide de la réalité augmentée sur un Smartphone est possible si la géométrie et l'apparence des objets visualisés s'adaptent aux exigences des utilisateurs et des domaines d'application en utilisant principalement des couleurs et des formes adéquates ou des modèles géométriques significatifs.

Pour ce qui est de la perception de la profondeur : Un arrangement compréhensible d'objets virtuels et réels dans l'augmentation doit être pris en considération pour améliorer la compréhension des informations visualisées à travers des objets virtuels. Ceci peut être obtenue en fournissant des indices sur leurs profondeurs supplémentaires et en évitant l'encombrement des objets visualisés.

3.7 Références utilisées dans ce chapitre

- Kalkofen, D., Mendez, E., Schmalstieg, D.: Comprehensible visualization for Augmented Reality. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics* 15, 193–204 (2009).
- Abou Rjeily Y. (2016) Management and sustainability of urban drainage systems within smart cities. Thèse Soutenue le 10/12/2016, Université de Lille.
- Afaneh A. (2016) GIS – based urban information system for Sustainable and Smart Cities : application to "SunRise – Smart City" demonstrator. Thèse Soutenue le 3/11/2016, Université de Lille.
- Ayari B. (2014) Analyse du système de chauffage urbain dans une perspective de transformation en un réseau intelligent : application au démonstrateur SUNRISE "Ville intelligente et durable. Thèse Soutenue le 10/12/2014, Université de Lille.
- Dryver Huston, Tian Xia, Yu Zhang, Taian Fan, Dan Orfeo, and Jonathan Razingier. 2017. Urban underground infrastructure mapping and assessment. April (2017), 101680M.
- Farah E. (2016) « Detection of water leakage using innovative smart water system : application to SunRise Smart City demonstrator » Thèse Soutenue le 02-11-2016, Université de Lille.
- Farah, E. & I. Shahrour (2017) Leakage Detection Using Smart Water System: Combination of Water Balance and Automated Minimum Night Flow. *Water Resources Management*, 31, 4821-4833.

- Kaddioui, A., Shahrour, I., El Oirrak, A., 2019. Uses of Augmented reality for urban utilities management. MATEC Web Conf. 295, 02009. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929502009P>.
- Kalkofen, D., Mendez, E., Schmalstieg, D.: Comprehensible visualization for Augmented Reality. IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics 15, 193–204 (2009)
- Lannes (fevrier, 2012) Les défis de la réalité augmenté dans les prochaines générations d'interfaces utilisateur <https://www.pierre-lannes.fr/les-defis-de-la-realite-augmentee-dans-les-prochaines-generations-dinterfaces-utilisateur/>
- E. Mendez, G. Schall, S. Havemann, D. Fellner, D. Schmalstieg and S. Junghanns, "Generating Semantic 3D Models of Underground Infrastructure," in IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 28, no. 3, pp. 48-57, May-June 2008, <https://doi.org/10.1109/MCG.2008.53>.
- P. Milgram and F. Kishino, "A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays," IEICE Trans. Information Systems, vol. E77- D, no. 12, 1994, pp. 1321-1329.
- Sakr. D (2017) Smart Grid deployment and use in a large-scale demonstrator of the Smart and Sustainable City (SunRise) : comprehensive analysis of the electrical consumption. Thèse Soutenue le 20/07/2017, Université de Lille.
- Shahrour I, Oras ABBAS, Amani ABDALLAH, Yves ABOU RJEILY, Ahmad AFANEH, Amar ALJER, Baleigh AYARI, Elias FARRAH, Danial SAKR, Fayez AL MASRI (2016 b) "Lessons from a Large-Scale Demonstrator of the Smart and Sustainable City", Book "Happy city - how to plan and create the best livable area for the people", Editors: Halina Brdulak, Anna Brdulak, Springer Verlag, 2016.
- Shahrour I., Oras Abbas, Amani Abdallah, Yves Abourjeily et Elias Farah (2016a) "SunRise Smart Water : Démonstrateur à grande échelle des réseaux d'eau intelligents"

Ouvrage «Territoires en Transition : Mettre l'intelligence numérique au coeur des services publics», Edition ASTEE, pp. 145-150, 2016.

- Williams, D (2017, December) "The Lengthy History of Augmented Reality". Huffington Post. https://www.huffpost.com/entry/the-history-of-augmented-_b_9955048

Conclusion Générale

4 CONCLUSION GENERALE

Ce travail de thèse avait pour objectif le développement des outils modernes performants basés sur la technologie numérique pour la gestion des réseaux urbains enterrés. L'importance de ce sujet réside d'abord dans la nécessité d'assurer la continuité des services assurés par les réseaux urbains, notamment les services d'eau, d'énergie et de télécommunication. Car une interruption dans ses services peut causer des dommages significatifs aux citoyens et objets urbains, notamment les infrastructures et les services associés. L'importance des réseaux urbains réside actuellement dans les coûts très élevés d'investissement et d'exploitation de ces réseaux, il est donc important de moderniser leur gestion pour réduire les couts de fonctionnement et optimiser les couts d'investissement. En fin, ces réseaux sont caractérisés par une grande complexité, à cause de la multitude et hétérogénéité de leurs composantes, le manque d'information sur ces réseaux et leur forte interaction, car un incident sur un réseau peut causer une chaine d'incidents graves sure les autres réseaux. L'absence des données et des outils de localisation précise des réseaux urbains peuvent être à l'origine d'incidents dangereux et couteux lors des travaux en ville. Ceci nécessite une détermination avec précision de la position des réseaux enterrés. Dans ce contexte, il est nécessaire de développer des méthodes innovantes pour la localisation précise des canalisations et des câbles enterrées afin d'éviter les incidents liés aux travaux en ville.

Ce constat est général pour toutes les villes, en particulier pour les villes ayant des ressources humaines et financières imitées. Le travail de thèse s'intéresse à deux aspects particuliers de la gestion des réseaux urbains à travers le développement des outils qui permettent (i) de visualiser en temps réels les réseaux enterrés avec des informations augmentées qui répondent aux besoins d'intervention des villes et des entreprises sure ces

réseaux, et (ii) mettre à jour les données des réseaux enterrés lors des interventions en générant des rapports d'intervention.

L'analyse des cas d'utilisation et des pratiques d'intervention sur les réseaux ont permis d'établir un cahier de charges pour la mise en place d'un système innovant pour la gestion des réseaux enterrés qui doit (i) être connecté à un système d'information géographique sur les réseaux urbains (SIG) avec une possibilité de lecture, mais aussi d'actualisation des données, (ii) la visualisation des réseaux urbains avec des informations augmentées lors d'intervention sur ces réseaux afin d'éviter tout incident lié aux interventions, (iii) la possibilité d'utiliser cette technologie sur smartphone or tablette, ce qui permet une utilisation aisée et non coûteuse de ce système, (iv) la possibilité mettre à jour les données des réseaux urbains enterrés et de déposer et diffuser en temps réel les rapports d'intervention et enfin (v) d'envoyer des alertes aux personnes et autorités concernées en cas d'anomalies sévères.

L'analyse de l'état de l'art sur la technologie numérique nous a amené à choisir la technologie « Réalité Augmentée sur Mobile (MAR) ». La combinaison de cette technologie avec le système d'information géographique permet de répondre aux clauses 1 à 4 du cahier de charges. La clause 5 du cahier de nécessite le développement des outils supplémentaires basées sur l'Intelligence Artificielle pour détecter les anomalies physiques ou de fonctionnement sur les réseaux. Ceci constitue une perspective importante de ce travail.

L'analyse de l'état de l'art a montré l'existence de plusieurs travaux réalisés dans le domaine de l'utilisation de la Réalité Augmentée dans la gestion des réseaux urbains enterrés. Or ces méthodes fonctionnent généralement d'une manière unidirectionnelle. Elles fournissent des fonctions de visualisation passive. L'objectif principal de ce travail de thèse est de développer des outils de gestion bidirectionnelle des données sur les réseaux pour permettre des manipulations interactives et une visualisation compréhensible des données SIG en même temps. Ce travail vise à maintenir la cohérence entre la base de données SIG et les

représentations géométriques 3D visualisées à l'aide de la réalité augmentée mobile. Ceci ouvre de nouvelles perspectives pour la gestion des réseaux enterrés à l'aide de la MAR-SIG tout en assurant une interaction avec le monde réel.

Le travail de thèse a comporté le développement effectif d'un système de Réalité Augmentée sur Smartphone. Ce système est basé sur trois couches : La couche de la base de données SIG, la couche de géométrie 3D, et la couche de transformation. Le système offre les cas d'usage suivants : (i) la visualisation des réseaux existants, (ii) les opérations de relevé de ces réseaux, et (iii) les opérations de pose de nouveaux éléments des réseaux.

Les services que fournit ce système ont été illustrés à travers son application sur le campus de la Cité Scientifique de l'Université de Lille. Le travail a été réalisé dans le cadre du projet pilote « SunRise Smart City » de la ville intelligente. Le système SIG du projet SunRise comporte déjà les données détaillées sur les réseaux de distribution d'eau, d'assainissement, de chauffage urbain et d'électricité. La réalisation de ce système donne ainsi la possibilité d'accéder aux données de ces réseaux via la technologie « Réalité Augmentée sur Smartphone ».

Les tests réalisés ont montré que cette technologie « Réalité Augmentée sur Smartphone » est outil puissant. Elle peut être rapidement généralisée sur l'ensemble des réseaux urbains offrant ainsi un outil puissant pour une gestion optimale et sécurisée de ces réseaux.

Comme indiqué ci-dessus, il faudra associer dans l'avenir la technologie « Réalité Augmentée sur Smartphone » aux techniques d'Intelligence Artificielle pour faire un meilleur usage des données massives sur les réseaux urbains, analyser leurs interactions et détecter rapidement les anomalies physiques ou de fonctionnement de ces réseaux.

5 REFERENCES

- Kalkofen, D., Mendez, E., Schmalstieg, D.: Comprehensible visualization for Augmented Reality. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics* 15, 193–204 (2009)
- (Mendez et al., 2008) Mendez, E., Schall, G., Havemann, S., Fellner, D., Schmalstieg, D., Junghanns, S.: Generating semantic 3D models of underground infrastructure. *IEEE Comput. Graph. Appl.* 28, 48–57 (2008)
- Abbas O. (2015) Systèmes intelligents pour une gestion durable des réseaux d'assainissement, Thèse Soutenue le 15/12/2015, Université de Lille.
- Abou Rjeily Y. (2016) Management and sustainability of urban drainage systems within smart cities. Thèse Soutenue le 10/12/2016, Université de Lille.
- Afaneh A. (2016) GIS – based urban information system for Sustainable and Smart Cities : application to "SunRise – Smart City" demonstrator. Thèse Soutenue le 3/11/2016, Université de Lille.
- Ahmed, A., Zhang, Y., Burns, D., Huston, D., Xia, T., 2016. Design of UWB Antenna for Air-Coupled Impulse Ground-Penetrating Radar. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 13, 92–96. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2498404>
- Arnau, J.-M., Parcerisa, J.-M., Xekalakis, P., 2012. Boosting mobile GPU performance with a decoupled access/execute fragment processor 10. <https://doi.org/10.1109/ISCA.2012.6237008>
- Ayari B. (2014) Analyse du système de chauffage urbain dans une perspective de transformation en un réseau intelligent : application au démonstrateur SUNRISE "Ville intelligente et durable. Thèse Soutenue le 10/12/2014, Université de Lille.
- Baek, A.-R., Lee, K., Choi, H., 2013. CPU and GPU parallel processing for mobile Augmented Reality, in: 2013 6th International Congress on Image and Signal Processing (CISP). Presented at the 2013 6th International Congress on Image and

Signal Processing (CISP), IEEE, Hangzhou, China, pp. 133–137.

<https://doi.org/10.1109/CISP.2013.6743972>

- BenSaleh, M.S., Qasim, S.M., Obeid, A.M., Garcia-Ortiz, A., 2013. A review on wireless sensor network for water pipeline monitoring applications, in: 2013 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS). Presented at the 2013 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS), IEEE, San Diego, CA, USA, pp. 128–131. <https://doi.org/10.1109/CTS.2013.6567217>
- Booth, A., Mohr, N., Peters, P., 2016. New opportunities and challenges 9.
- Booth, A., Mohr, N., Peters, P., 2016. New opportunities and challenges 9.
- Chatzopoulos, D., Bermejo, C., Huang, Z., Hui, P., 2017. Mobile Augmented Reality Survey: From Where We Are to Where We Go. IEEE Access 5, 6917–6950. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2698164>
- Chen, T.Y.-H., Ravindranath, L., Deng, S., Bahl, P., Balakrishnan, H., 2015. Glimpse: Continuous, Real-Time Object Recognition on Mobile Devices, in: Proceedings of the 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems - SenSys '15. Presented at the the 13th ACM Conference, ACM Press, Seoul, South Korea, pp. 155–168. <https://doi.org/10.1145/2809695.2809711>
- Chippa, V.K., Chakradhar, S.T., Roy, K., Raghunathan, A., 2013. Analysis and characterization of inherent application resilience for approximate computing, in: Proceedings of the 50th Annual Design Automation Conference on - DAC '13. Presented at the the 50th Annual Design Automation Conference, ACM Press, Austin, Texas, p. 1. <https://doi.org/10.1145/2463209.2488873>

- Demirci, S., Yigit, E., Eskidmir, I.H., Ozdemir, C., 2012. Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method. *NDT & E International* 47, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.12.008>
- Demirci, S., Yigit, E., Eskidmir, I.H., Ozdemir, C., 2012. Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method. *NDT E Int.* 47, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.12.008>
- Dryver Huston, Tian Xia, Yu Zhang, Taian Fan, Dan Orfeo, and Jonathan Razingier. 2017. Urban underground infrastructure mapping and assessment. April (2017), 101680M.
- Farah E. (2016) « Detection of water leakage using innovative smart water system : application to SunRise Smart City demonstrator » Thèse Soutenue le 02-11-2016, Université de Lille.
- Farah, E. & I. Shahrour (2017) Leakage Detection Using Smart Water System: Combination of Water Balance and Automated Minimum Night Flow. *Water Resources Management*, 31, 4821-4833.
- G. Schall, S. Zollmann, et G. Reitmayr, « Smart Vidente: advances in mobile augmented reality for interactive visualization of underground infrastructure », *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 17, no 7, p. 1533 1549, oct. 2013.
- Great Britain, HM Treasury, 2013. National infrastructure plan 2013. HM Government, London.
- Hafsi, M., Bolon, P., Dapoigny, R., 2017. Detection and localization of underground networks by fusion of electromagnetic signal and GPR images, in: Nagahara, H., Umeda, K., Yamashita, A. (Eds.), . Presented at the The International Conference on Quality Control by Artificial Vision 2017, Tokyo, Japan, p. 1033803. <https://doi.org/10.1117/12.2266946>

- Han, J., Orshansky, M., 2013. Approximate computing: An emerging paradigm for energy-efficient design, in: 2013 18TH IEEE EUROPEAN TEST SYMPOSIUM (ETS). Presented at the 2013 18th IEEE European Test Symposium (ETS), IEEE, Avignon, France, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ETS.2013.6569370>
- Herling, J., Broll, W., 2010. An adaptive training-free feature tracker for mobile phones, in: Proceedings of the 17th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology - VRST '10. Presented at the the 17th ACM Symposium, ACM Press, Hong Kong, p. 35. <https://doi.org/10.1145/1889863.1889868>
- Huston, D., Xia, T., Zhang, Y., Fan, T., Orfeo, D., Razinger, J., 2017. Urban underground infrastructure mapping and assessment, in: Lynch, J.P. (Ed.), . Presented at the SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, Portland, Oregon, United States, p. 101680M. <https://doi.org/10.1117/12.2263530>
- Huston, D., Xia, T., Zhang, Y., Fan, T., Orfeo, D., Razinger, J., 2017. Urban underground infrastructure mapping and assessment, in: Lynch, J.P. (Ed.), . Presented at the SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, Portland, Oregon, United States, p. 101680M. <https://doi.org/10.1117/12.2263530>
- Ian Sherr . « Chicago maps its underground maze» <https://www.cnet.com/news/chicago-maps-its-underground-maze-rahm-emanuel/>.
Aug. 11, 2017
- Jain, P., Manweiler, J., Roy Choudhury, R., 2015. OverLay: Practical Mobile Augmented Reality, in: Proceedings of the 13th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services - MobiSys '15. Presented at the the 13th

Annual International Conference, ACM Press, Florence, Italy, pp. 331–344.

<https://doi.org/10.1145/2742647.2742666>

- Kaddioui, A., Shahrour, I., El Oirrak, A., 2019. Uses of Augmented reality for urban utilities management. MATEC Web Conf. 295, 02009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929502009P>.
- Kosta, S., Aucinas, A., Pan Hui, Mortier, R., Xinwen Zhang, 2012. ThinkAir: Dynamic resource allocation and parallel execution in the cloud for mobile code offloading, in: 2012 Proceedings IEEE INFOCOM. Presented at the IEEE INFOCOM 2012 - IEEE Conference on Computer Communications, IEEE, Orlando, FL, USA, pp. 945–953. <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2012.6195845>
- Kruijff, E., Mendez, E., Veas, E., Gruenewald, T., 2010. On-Site Monitoring of Environmental Processes using Mobile Augmented Reality (HYDROSYS) 7.
- Kruijff, E., Mendez, E., Veas, E., Gruenewald, T., 2010. On-Site Monitoring of Environmental Processes using Mobile Augmented Reality (HYDROSYS) 7.
- Kumar, K., Yung-Hsiang Lu, 2010. Cloud Computing for Mobile Users: Can Offloading Computation Save Energy? Computer 43, 51–56. <https://doi.org/10.1109/MC.2010.98>
- Kwang-Ting Cheng, Yi-Chu Wang, 2011. Using mobile GPU for general-purpose computing – a case study of face recognition on smartphones, in: Proceedings of 2011 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test. Presented at the 2011 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT 2011), IEEE, Hsinchu, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/VDAT.2011.5783575>
- Lannes (fevrier, 2012) Les défis de la réalité augmenté dans les prochaines générations d’interfaces utilisateur

- <https://www.pierre-lannes.fr/les-defis-de-la-realite-augmentee-dans-les-prochaines-generations-dinterfaces-utilisateur/>
- Lu, Y., Li, S., Shen, H., 2011. Virtualized Screen: A Third Element for Cloud–Mobile Convergence. *IEEE Multimed.* 18, 4–11. <https://doi.org/10.1109/MMUL.2011.33>
- Lucianaz, C., Greco, G., Bertoldo, S., Allegretti, M., 2015. Real time outdoor localization of buried RFID tags through statistical methods, in: 2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). Presented at the 2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), IEEE, Torino, Italy, pp. 1152–1154. <https://doi.org/10.1109/ICEAA.2015.7297299>
- M. Pereira, D. Burns, D. Orfeo, R. Farrel, D. Hutson, et T. Xia, « New GPR System Integration with Augmented Reality Based Positioning », in Proceedings of the 2018 on Great Lakes Symposium on VLSI - GLSVLSI '18, Chicago, IL, USA, 2018, p. 341 346.
- Mendez, E., Schall, G., Havemann, S., Fellner, D., Schmalstieg, D., Junghanns, S., 2008. Generating Semantic 3D Models of Underground Infrastructure. *IEEE Comput. Graph. Appl.* 28, 48–57. <https://doi.org/10.1109/MCG.2008.53>
- Messaoudi, F., 2019. User equipment based-computation offloading for real-time applications in the context of Cloud and edge networks 203.
- Min, J.-H., Gelo, N.J., Jo, H., 2016. Real-time image processing for non-contact monitoring of dynamic displacements using smartphone technologies, in: Lynch, J.P. (Ed.). Presented at the SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, Las Vegas, Nevada, United States, p. 98031B. <https://doi.org/10.1117/12.2219418>
- Mittal, S., 2016. A Survey of Techniques for Approximate Computing. *ACM Comput. Surv.* 48, 1–33. <https://doi.org/10.1145/2893356>

- Moreau, T., Wyse, M., Nelson, J., Sampson, A., Esmailzadeh, H., Ceze, L., Oskin, M., 2015. SNNAP: Approximate computing on programmable SoCs via neural acceleration, in: 2015 IEEE 21st International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA). Presented at the 2015 IEEE 21st International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA), IEEE, Burlingame, CA, USA, pp. 603–614. <https://doi.org/10.1109/HPCA.2015.7056066>
- P. Milgram and F. Kishino, “A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays,” IEICE Trans. Information Systems, vol. E77- D, no. 12, 1994, pp. 1321-1329.
- Pereira, M., Burns, D., Orfeo, D., Farrel, R., Hutson, D., Xia, T., 2018. New GPR System Integration with Augmented Reality Based Positioning, in: Proceedings of the 2018 on Great Lakes Symposium on VLSI - GLSVLSI '18. Presented at the the 2018, ACM Press, Chicago, IL, USA, pp. 341–346. <https://doi.org/10.1145/3194554.3194623>
- Pereira, M., Burns, D., Orfeo, D., Farrel, R., Hutson, D., Xia, T., 2018. New GPR System Integration with Augmented Reality Based Positioning, in: Proceedings of the 2018 on Great Lakes Symposium on VLSI - GLSVLSI '18. Presented at the the 2018, ACM Press, Chicago, IL, USA, pp. 341–346. <https://doi.org/10.1145/3194554.3194623>
- Sakr. D (2017) Smart Grid deployment and use in a large-scale demonstrator of the Smart and Sustainable City (SunRise) : comprehensive analysis of the electrical consumption. Thèse Soutenue le 20/07/2017, Université de Lille.
- Schall, G., Zollmann, S., Reitmayr, G., 2013. Smart Vidente: advances in mobile augmented reality for interactive visualization of underground infrastructure. Pers. Ubiquitous Comput. 17, 1533–1549. <https://doi.org/10.1007/s00779-012-0599-x>
- Shahrour I, Oras ABBAS, Amani ABDALLAH, Yves ABOU RJEILY, Ahmad AFANEH, Amar ALJER, Baleigh AYARI, Elias FARRAH, Danial SAKR, Fayez AL MASRI (2016 b) “Lessons from a Large Scale Demonstrator of the Smart and

Sustainable City”, Book “Happy city - how to plan and create the best livable area for the people”, Editors: Halina Brdulak, Anna Brdulak, Springer Verlag, 2016.

- Shahrour I., Oras Abbas, Amani Abdallah, Yves Abourjeily et Elias Farah (2016a) “SunRise Smart Water : Démonstrateur à grande échelle des réseaux d’eau intelligents” Ouvrage «Territoires en Transition : Mettre l’intelligence numérique au coeur des services publics”, Edition ASTEE, pp. 145-150, 2016.
- Shi, Z., Wang, H., Wei, W., Zheng, X., Zhao, M., Zhao, J., 2015. A Novel Individual Location Recommendation System Based on Mobile Augmented Reality, in: 2015 International Conference on Identification, Information, and Knowledge in the Internet of Things (IIKI). Presented at the 2015 International Conference on Identification, Information, and Knowledge in the Internet of Things (IIKI), IEEE, Beijing, China, pp. 215–218. <https://doi.org/10.1109/IIKI.2015.53>
- Stylianidis, E., Valari, E., Pagani, A., Carrillo, I., Kounoudes, A., Michail, K., Smagas, K., 2020. Augmented Reality Geovisualisation for Underground Utilities. PFG – J. Photogramm. Remote Sens. Geoinformation Sci. 88, 173–185. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00108-x>
- Takacs, G., El Choubassi, M., Wu, Y., Kozintsev, I., 2011. 3D mobile augmented reality in urban scenes, in: 2011 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Presented at the 2011 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), IEEE, Barcelona, Spain, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICME.2011.6012101>
- Tian Xia, Xianlei Xu, Anbu Vekatachalam, and Dryver Huston. 2012. Development of a High Speed UWB GPR for Rebar Detection. In 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR).

- Vallina-Rodriguez, N., Crowcroft, J., 2013. Energy Management Techniques in Modern Mobile Handsets. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 15, 179–198. <https://doi.org/10.1109/SURV.2012.021312.00045>
- Vassiliadis, V., Chalios, C., Parasyris, K., Antonopoulos, C.D., Lalis, S., Bellas, N., Vandierendonck, H., Nikolopoulos, D.S., 2016. Exploiting Significance of Computations for Energy-Constrained Approximate Computing. *Int. J. Parallel Program.* 44, 1078–1098. <https://doi.org/10.1007/s10766-016-0409-6>
- Wang, R., Zhao, F., Luo, H., Lu, B., Lu, T., 2011. Fusion of Wi-Fi and bluetooth for indoor localization, in: *Proceedings of the 1st International Workshop on Mobile Location-Based Service - MLBS '11*. Presented at the the 1st international workshop, ACM Press, Beijing, China, p. 63. <https://doi.org/10.1145/2025876.2025889>
- Williams, D (2017, December) "The Lengthy History of Augmented Reality". *Huffington Post.* https://www.huffpost.com/entry/the-history-of-augmented-b_9955048
- Xu, Q., Mytkowicz, T., Kim, N.S., 2016. Approximate Computing: A Survey. *IEEE Des. Test* 33, 8–22. <https://doi.org/10.1109/MDAT.2015.2505723>
- Yang, B., 2019. Developing a Mobile Mapping System for 3D GIS and Smart City Planning. *Sustainability* 11, 3713. <https://doi.org/10.3390/su11133713>
- Yang, K., Brown, T., Sung, K., 2019. AR Object Manipulation on Depth-Sensing Handheld Devices. *Appl. Sci.* 9, 2597. <https://doi.org/10.3390/app9132597>
- Yu Zhang, Anbu S Venkatachalam, and Tian Xia. 2015. Ground-penetrating radar railroad ballast inspection with an unsupervised algorithm to boost the region of interest detection efficiency. *Journal of Applied Remote Sensing* 9, 1 (2015), 095058.
- Yu Zhang, Anbu Selvam Venkatachalam, Dryver Huston, and Tian Xia. 2014. Advanced signal processing method for ground penetrating radar feature detection and

enhancement. In *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2014*, Vol. 9063.

- Zanelidin, E., Al Khatib, O., Ahmed, W., 2020. Investigating the use of no-dig technologies for underground utilities in developing countries. *Innov. Infrastruct. Solut.* <https://doi.org/10.1007/s41062-020-0265-5>
- Zhang, Y., Venkatachalam, A.S., Huston, D., Xia, T., 2014. Advanced signal processing method for ground penetrating radar feature detection and enhancement, in: Wu, H.F., Yu, T.-Y., Gyekenyesi, A.L., Shull, P.J. (Eds.), . Presented at the SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, San Diego, California, USA, p. 906318.
<https://doi.org/10.1117/12.2046338>
- Zhang, Y., Venkatachalam, A.S., Huston, D., Xia, T., 2014. Advanced signal processing method for ground penetrating radar feature detection and enhancement, in: Wu, H.F., Yu, T.-Y., Gyekenyesi, A.L., Shull, P.J. (Eds.). Presented at the SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, San Diego, California, USA, p. 906318.
<https://doi.org/10.1117/12.2046338>
- Zollmann, S., Kalkofen, D., Mendez, E., Reitmayr, G.: Image-based ghostings for single layer occlusions in augmented reality. In: *Proc. ISMAR 2010*, pp. 19–26 (2010).
- Zollmann, S., Schall, G., Junghanns, S., Reitmayr, G., 2012. Comprehensible and Interactive Visualizations of GIS Data in Augmented Reality, in: Bebis, G., Boyle, R., Parvin, B., Koracin, D., Fowlkes, C., Wang, S., Choi, M.-H., Mantler, S., Schulze, J., Acevedo, D., Mueller, K., Papka, M. (Eds.), *Advances in Visual Computing*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 675–685.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-33179-4_64