



**HAL**  
open science

# Méthodes pour la géolocalisation du piéton sur site - vers une médiation numérique avec les données urbaines

Myriam Servières

## ► To cite this version:

Myriam Servières. Méthodes pour la géolocalisation du piéton sur site - vers une médiation numérique avec les données urbaines. Vision par ordinateur et reconnaissance de formes [cs.CV]. Université de Nantes, 2019. tel-02366620v2

**HAL Id: tel-02366620**

**<https://hal.science/tel-02366620v2>**

Submitted on 15 Jun 2020

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0  
International License

UNIVERSITÉ DE NANTES - ÉCOLE CENTRALE DE NANTES  
AAU-CRENAU - IRSTV

# MÉMOIRE

présenté en première version en vue d'obtenir  
l'habilitation à diriger des recherches  
spécialité « Architecture et Études Urbaines »

par

Myriam Servières

## MÉTHODES POUR LA GÉOLOCALISATION DU PIÉTON SUR SITE - VERS UNE MÉDIATION NUMÉRIQUE AVEC LES DONNÉES URBAINES

Demande d'habilitation soutenue le 19/06/2019 devant le jury composé  
de :

M <sup>me</sup>	SIDONIE CHRISTOPHE	Directrice de recherche IGN	Rapporteur
M.	MARC GELGON	Professeur des universités Université de Nantes	Examineur
M.	GILLES GESQUIÈRE	Professeur des universités Université Lyon 2	Rapporteur
M <sup>me</sup>	LUCE MORIN	Professeur des universités INSA Rennes	Présidente du jury
M <sup>me</sup>	VALÉRIE RENAUDIN	Directrice de recherche IFSTTAR	Examinatrice
M.	PASCAL VASSEUR	Professeur des universités Université de Rouen	Rapporteur



*À Achille et Oscar*



# REMERCIEMENTS

Ce manuscrit est un résumé de ces treize dernières années de recherche et doit beaucoup à un grand nombre de personnes avec qui j'ai eu l'occasion de travailler. Il va m'être difficile de citer tout le monde mais je voudrais commencer par remercier les membres de mon jury qui ont accepté d'évaluer ce travail : Pascal Vasseur, Gilles Gesquière, Sidonie Christophe, Luce Morin et Marc Gelgon. J'aimerais mentionner particulièrement Valérie Renaudin qui m'a encouragée à écrire cette HDR et m'a soutenue tout au long de sa rédaction.

J'aimerais remercier :

- Jean-Pierre Guédon, Nicolas Normand et Yves Bizais qui ont fait que après ma thèse, j'ai souhaité continuer dans le domaine académique,
- l'ensemble des membres actuels et passés de l'équipe CRENAU du laboratoire AAU, en particulier Daniel Siret et Ignacio Requegna et évidemment les informaticiens avec qui je co-signe tous les articles présentés ici : Vincent Tourre, Jean-Yves Martin, Guillaume Moreau, Thomas Leduc et Jean-Marie Normand,
- l'ensemble des doctorants que j'ai eu l'occasion de co-encadrer et que je co-encadre qui viennent d'horizons diverses, tous avec des personnalités enrichissantes et passionnées : Hideaki Uchiyama, Nicolas Bioret, Chams-Eddine Zaki, Ruijun Liu, Bahtiyor Zohidov, Hengyang Wei, Bernard Semaan, Nicolas Antigny, Gwendoline L'Her et Gabriel Giraldo,
- mes collègues du département informatique et mathématiques grâce à qui j'ai pu m'adapter à beaucoup de situations compliquées,
- les collègues avec qui j'ai pu collaborer à l'international mais aussi à une échelle nationale ou plus locale dans l'IRSTV (Hideo Saito, Hideaki Uchiyama, Barbara Piga, Roland Billen, Gilles Gesquière, Luce Morin, Muriel Pressigout, Hervé Andrieu)

Enfin, et parce que je suis aussi une enseignante, j'aimerais remercier les élèves qui se sont succédés toutes ces années car ils participent au fait que deux journées ne se ressemblent jamais.

Rien n'aurait été possible sans le soutien de ma famille. Un immense merci à mon conjoint et à mes enfants d'avoir supporté tous ces soirs et week-ends de travail.

# TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES FIGURES	ix
1 INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 UN PARCOURS TRANSDISCIPLINAIRE . . . . .	1
1.2 POSITIONNEMENT DES RECHERCHES ET ORGANISATION DU MANUSCRIT . . . . .	2
2 CURRICULUM VITÆ	5
2.1 ÉTAT CIVIL . . . . .	5
2.2 CURSUS SCIENTIFIQUE . . . . .	6
2.2.1 Titres et diplômes . . . . .	6
2.2.2 Parcours professionnel . . . . .	6
2.3 ENSEIGNEMENTS ET RESPONSABILITÉS ADMINISTRATIVES . . . . .	6
2.3.1 Un lien entre enseignement et recherche . . . . .	6
2.3.2 Responsabilités pédagogiques . . . . .	7
2.3.3 Implications dans l'établissement . . . . .	7
2.4 ENCADREMENT DOCTORAL ET SCIENTIFIQUE . . . . .	7
2.4.1 Thèses doctorales co-encadrées soutenues . . . . .	7
2.4.2 Thèses doctorales co-encadrées en cours . . . . .	8
2.4.3 Thèses de Master encadrées . . . . .	8
2.4.4 Stages ingénieurs ou de fin d'études encadrés à caractère de recherche . . . . .	9
2.5 RAYONNEMENT SCIENTIFIQUE . . . . .	9
2.5.1 Distinction . . . . .	9
2.5.2 Organisation de conférences . . . . .	10
2.5.3 Organisation de <i>workshops</i> et atelier . . . . .	10
2.5.4 Participation à des comités de lecture, comités de programme . . . . .	10
2.5.5 Invitations . . . . .	11
2.5.6 Collaborations internationales et nationales . . . . .	11
2.5.7 Responsabilités scientifiques . . . . .	12
2.5.8 Participation à des jurys de thèses . . . . .	13
2.5.9 Participation à des comités de suivi de thèses . . . . .	13
2.5.10 Participation à des jurys de recrutements . . . . .	14
2.5.11 Participation à des projets de recherche . . . . .	14
2.5.12 Expertise de projets scientifiques et techniques . . . . .	14
2.6 PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES . . . . .	14
2.6.1 Articles de journaux avec comités de lecture et actes . . . . .	14
2.6.2 Chapitres d'ouvrages . . . . .	15

2.6.3	Articles de congrès internationaux avec comité de lecture et actes . . . . .	16
2.6.4	Articles de congrès nationaux avec comité de lecture et actes	21
2.6.5	Communications dans un congrès . . . . .	22
2.6.6	Posters . . . . .	22
2.6.7	Communications orales invitées . . . . .	23
2.6.8	Thèse et DEA . . . . .	23
2.6.9	Rapport de recherche . . . . .	23
2.6.10	Démonstration . . . . .	23
2.6.11	Divers . . . . .	23
<b>3</b>	<b>CONTEXTE ET ENJEUX</b>	<b>25</b>
3.1	VERS UN DOUBLE NUMÉRIQUE DE LA VILLE GÉRÉ DANS UN SIG	26
3.1.1	Une augmentation et une diversification des données spatiales . . . . .	26
3.1.2	Le SIG, un système de gestion de la donnée spatiale . . .	27
3.1.3	Une possible mise à jour des SIG <i>via</i> des images urbaines	29
3.2	VERS UNE MÉDIATION SUR SITE . . . . .	29
3.2.1	Mobilité informationnelle et spatiale, une évolution des pratiques . . . . .	29
3.2.2	Une modification de l’ambiance urbaine . . . . .	30
3.3	LA RÉALITÉ AUGMENTÉE COMME OUTIL DE MÉDIATION . . . .	30
3.3.1	Caractéristiques de la Réalité Augmentée . . . . .	31
3.3.2	Vers une RA sur site . . . . .	31
3.3.3	Des applications et usages de la RA liés à l’espace bâti et aux données spatiales 3D . . . . .	36
3.4	ORGANISATION TEMPORELLE DES TRAVAUX . . . . .	38
<b>4</b>	<b>MODÉLISATION DE DONNÉES SPATIO-TEMPORELLES MULTITHÉMATIQUES</b>	<b>41</b>
4.1	UNE TYPOLOGIE DE DONNÉES MULTIPLES AVEC DES MODÉLISATIONS SPÉCIFIQUES . . . . .	42
4.2	UNE MODÉLISATION SPATIO-TEMPORELLE MULTI-ÉCHELLE . . .	43
4.2.1	Modélisation des changements : les <i>occurents</i> et <i>continnants</i>	43
4.2.2	Implémentation en minimisant la perte de sémantique . .	44
4.2.3	Un exemple d’application . . . . .	48
4.3	UN MODÈLE COMMUN POUR DES DONNÉES DE SIMULATIONS ET LEURS ÉVOLUTIONS TEMPORELLES . . . . .	49
4.4	CONCLUSION . . . . .	52
<b>5</b>	<b>GÉOLOCALISATION À L’AIDE D’IMAGES ET DE DONNÉES SPATIALES</b>	<b>53</b>
5.1	MOTIVATIONS POUR UNE GÉOLOCALISATION SUR SITE À PARTIR D’IMAGES ET DE DONNÉES SPATIALES . . . . .	53
5.1.1	Une nécessité à calculer la pose d’une prise de vue sur site	53
5.1.2	Des informations GNSS et IMMU insuffisantes . . . . .	54
5.1.3	Des données SIG imprécises . . . . .	55
5.1.4	Positionnement et suivi du piéton . . . . .	55
5.2	CALCUL DE POSE SUR SITE . . . . .	56
5.2.1	Localisation basée image . . . . .	56
5.2.2	Géolocalisation par images en s’appuyant sur un SIG 2D	58



5.2.3	Géolocalisation par images en s'appuyant sur un SIG 2,5D	63
5.3	CALCUL DE POSE ET SUIVI DU DÉPLACEMENT SUR SITE . . . . .	70
5.3.1	Localisation par fusion de données image et inertielle . .	70
5.3.2	Suivi du déplacement . . . . .	77
5.4	CONCLUSION . . . . .	79
6	USAGES DE LA GÉOLOCALISATION ET DU CALCUL DE POSE	81
6.1	POUR L'ENRICHISSEMENT ET LA QUALIFICATION DE DONNÉES SPATIALES . . . . .	81
6.1.1	Indexation de bases de données d'images urbaines . . . .	81
6.1.2	Enrichissement une base de données spatiale 2D . . . . .	84
6.1.3	Caractérisation de données existantes . . . . .	86
6.2	COMME OUTIL COMPLÉMENTAIRE AUX MÉTHODES DE SUIVI DU DÉPLACEMENT PIÉTON . . . . .	87
6.3	APPARITION DE NOUVELLES PRATIQUES . . . . .	90
6.4	CONCLUSION . . . . .	92
7	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE	93
	BIBLIOGRAPHIE	97

# LISTE DES FIGURES

3.1	Avancées des dispositifs techniques permettant de faire de la RA mobile (d'après [AGG <sup>+</sup> 15] et complété). . . . .	33
3.2	Organisation temporelle des travaux. . . . .	39
4.1	Hiérarchie des types spatiaux et temporels de MADS [extrait de [Parg7]]. . . . .	43
4.2	Relations entre les évènements et les états [traduit de [GW05]]	44
4.3	Exemples de transformations du modèle conceptuel MADS en Java [extrait de [ZZS <sup>+</sup> 11]]. . . . .	45
4.4	Exemples de Transformations du Modèle conceptuel MADS en Java [extrait de [ZSM11b]]. . . . .	46
4.5	Correspondance entre les types spatiaux de MADS et les classes JTS [extrait de [ZSM11b]]. . . . .	47
4.6	Modèle conceptuel pour l'analyse les déplacements piétons dans les zones urbaines vis à vis de l'influence de facteur micro-climatiques [extrait de [ZZS <sup>+</sup> 11]]. . . . .	48
4.7	Représentation UML des classes de bases du modèle proposé [extrait de [LTS <sup>+</sup> 16]]. . . . .	50
4.8	Exemple d'une application avec deux scénarios et donc deux <i>City Context</i> [extrait de [LTS <sup>+</sup> 16]]. . . . .	51
4.9	Exemple d'une classe <i>Building</i> et de trois extensions héritant de <i>CityObject</i> et <i>CityObjectExtension</i> [extrait de [LTS <sup>+</sup> 16]]. . .	51
5.1	Traces GNSS sur un chemin de 2.9 km. La trace du récepteur GPS (ULISS) est représentée en rouge et celle du GNSS différentiel (DGNSS) en vert [extrait de [ASR17b]]. . . . .	55
5.2	Comparaisons photos et LoD 3 correspondant. . . . .	56
5.3	SIG3D faux [extrait de [SL15]]. . . . .	56
5.4	Exemples de données SIG. . . . .	57
5.5	Résumé de l'algorithme de localisation. [extrait de [YUS <sup>+</sup> 09]].	58
5.6	Exemple de résultats demise en correspondance image / panoramique. . . . .	58
5.7	Repères utilisés pour faire le calcul de pose à partir d'une image de façades et d'un SIG 2D. [adapté de [BMS09b]]. . .	60
5.8	Exemple d'une zone de la couche « bâti » du SIG avant(gauche) et après (droite) préparation [extrait de [BMS08b]]. . . . .	61
5.9	Exemple d'image et de poses résultats . . . . .	62
5.10	Vue générale de la méthode de calcul de pose par extraction de ligne de ciel [extrait de [ZMP <sup>+</sup> 13]]. . . . .	64

5.11	Ligne de ciel extraite (vert) en utilisant un seuillage adaptatif [extrait de [ZPS <sup>+</sup> 12]]. . . . .	65
5.12	Création de 4 images contiguës à partir de la position connue de la caméra dans le SIG [extrait de [ZPS <sup>+</sup> 12]]. . . .	65
5.13	A est la ligne de ciel originale ( $\beta = 12,71^\circ$ , $\gamma = -0,74^\circ$ ) et B est la ligne de ciel corrigée ( $\beta = 0^\circ$ , $\gamma = 0^\circ$ ) [extrait de [ZMP <sup>+</sup> 13]].	66
5.14	A est la ligne de ciel partielle extraite de l'image, B est la ligne de ciel panoramique générée à partir des données SIG et C est la courbe de similarité croisée [extrait de [ZPS <sup>+</sup> 12]].	66
5.15	Exemple de résultat d'affichage des données SIG 2,5D après application de la méthode de localisation à l'aide de lignes de ciel [extrait de [ZMP <sup>+</sup> 13]]. . . . .	67
5.16	Exemple d'images de deux tests. . . . .	69
5.17	Exemple de borne [extrait de [ASR16]]. . . . .	71
5.18	Bloc diagramme de la méthode de couplage vision/inertiel [extrait de [ASR18b]]. . . . .	71
5.19	Capteur ULISS et caméra Garmin fixés ensemble [extrait de [ASR18a]]. . . . .	72
5.20	Repères associés à la caméra et à ULISS [extrait de [ASR18b]].	72
5.21	Référentiels objet (terminal de station de vélo), image et caméra. [extrait de [ASR18b]]. . . . .	73
5.22	Référentiels objets et navigation (NED) [extrait de [ASR18b]].	73
5.23	Synchronisation entre les mesures de vision et les mesures IMMU [extrait de [ASR18b]]. . . . .	76
5.24	Diagramme de la solution globale pour l'estimation continue et qualifiée de la pose [extrait de [ASR18a]]. . . . .	77
5.25	Matériels d'acquisition (ULISS + Garmin), PERSY et récepteur GNSS externe pour acquisition d'une vérité terrain et point de référence au sol [extrait de [ASR18a]]. . . . .	79
5.26	Points de référence (en blanc), trajet de référence DGNS (en rouge), trajet de référence PERSY (en vert) et trajet estimée avec la méthode de fusion proposée (en bleu) pour une acquisition [extrait de [ASR18a]]. . . . .	80
6.1	Exemple de détection de contour d'un immeuble [extrait de [SSMC17]]. . . . .	83
6.2	Carte des poses possibles calculées à partir de l'extraction d'informations géométriques de l'image figure 6.1 et de la carte OSM réduite [extrait de [SSMC17]]. . . . .	83
6.3	Exemple de localisation d'une image [extrait de [SSMC17]].	84
6.4	Processus de mise à jour du SIG [extrait de [LSM12a]]. . . .	85
6.5	Ajout dans un SIG 2D de l'empreinte au sol d'un bâtiment manquant [extrait de [LSM12b]]. . . . .	86
6.6	Mise à jour d'un SIG 2D avec la hauteur des bâtiments [extrait de [LSM12a]]. . . . .	86
6.7	Méthode de caractérisation de données spatiales 3D sur site [extrait de [ASR18b]]. . . . .	87
6.8	Projection et correction par l'utilisateur d'un modèle 3D spatial de la zone d'intérêt. Ici l'erreur est d'environ 2 m en translation. [extrait de [ASR17a]]. . . . .	88

6.9	Diagramme des étapes de la méthode de navigation à l'estime assistée [extrait de [ASR17b]]. . . . .	88
6.10	Traces des chemins obtenus par navigation à l'estime. . . . .	90
6.11	Erreurs de positionnement le long du parcours piéton de 2,9 km et position des points caractéristiques sur ce parcours [extrait de [ASR18b]]. . . . .	90
7.1	Bornes vélo (rouge) et stations de bus et tram (bleu) sur la ville de Nantes (source <a href="https://data.nantesmetropole.fr">https://data.nantesmetropole.fr</a> données exportées le 05/07/18). . . . .	94



# INTRODUCTION GÉNÉRALE



## 1.1 UN PARCOURS TRANSDISCIPLINAIRE

Ce mémoire fait la synthèse de mes recherches ces 12 dernières années mais ne donne pas à voir la totalité de mon parcours.

J'ai réalisé ma première expérience de recherche à l'université de Cranfield au Royaume-Uni pendant mon stage ingénieur. Ce premier travail, sur l'analyse de données de capteurs pour la protection des eaux usées des stations d'épuration, a donné lieu à une première publication [BGSSo3]. Cela m'a incitée à continuer dans cette voie et j'ai suivi en parallèle de ma dernière année d'école d'ingénieur un DEA d'informatique appliquée. Mon travail de mémoire a porté sur l'étude d'une méthode de tatouage fractale et de sa robustesse à la désynchronisation.

Ce parcours m'a permis d'être recrutée en thèse dans l'équipe Image et Vidéo-Communication du laboratoire IRCCyN (actuellement équipe IPI du laboratoire LS2N). Pendant cette thèse, soutenue en décembre 2005, j'ai travaillé sur la reconstruction tomographique Mojette où j'ai utilisé la morphologie mathématique et la géométrie discrète pour mettre au point de nouveaux algorithmes de reconstruction tomographique discrète pour l'imagerie médicale.

Après une année d'ATER où j'ai poursuivi mes travaux de thèse, j'ai changé de thématique à l'occasion de mon recrutement comme maître de conférences à l'École Centrale Nantes en septembre 2006. A cette occasion, j'ai rejoint la partie informatique du laboratoire CERMA qui n'était alors constituée que de 3 permanents. Le CERMA est devenu l'équipe CRENAU du laboratoire Ambiances Architectures Urbanités (AAU) en 2014.

Le laboratoire AAU est en soit un laboratoire pluridisciplinaire regroupant des compétences en architecture, aménagement urbain, sociologie, anthropologie, physique et informatique. Nous sommes actuellement 6 informaticiens permanents dans l'équipe CRENAU de AAU.

Depuis septembre 2006, j'ai travaillé sur la prise en compte des ambiances architecturales et urbaines d'un point de vue informatique. La représentation des ambiances urbaines s'appuie sur des données tangibles qu'il faut pouvoir modéliser, stocker, représenter et manipuler dans un outil dédié (Système d'Information Géographique).

## 1.2 POSITIONNEMENT DES RECHERCHES ET ORGANISATION DU MANUSCRIT

Le but de ma recherche ces 12 dernières années a été de mettre au point un système de médiation numérique avec des données urbaines pour un piéton immergé dans la ville. Ce que j'entends par « médiation numérique » est le fait d'utiliser un média au sens étymologique (du latin *medium* milieu, intermédiaire), un moyen ou un lien basé sur des technologies numériques pour concevoir, analyser, représenter l'espace urbain et accéder à des informations sur cet espace urbain. Comme décrit dans les parties suivantes, je considère la Réalité Augmentée (RA) comme un outil permettant cette médiation. La RA s'appuie sur le réel et ajoute une information numérique avec laquelle l'utilisateur peut interagir. En effet, la mise en place d'un système de médiation sur site avec cette modalité de représentation de l'information permet à la fois la présence de l'utilisateur dans l'environnement réel urbain et sa connexion à un double numérique de la ville dans un ici et maintenant « assisté par ordinateur » qui va permettre l'action.

Mes recherches se situent à l'intersection de la *géomatique* et de la *vision par ordinateur*.

La *géomatique* est définie par l'office québécois de la langue française comme « une discipline ayant pour objet la gestion des données géographiques et qui fait appel aux sciences et aux technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion » [qdllf]. Le terme géomatique est formé à partir du préfixe *géo-* et du mot *informatique*.

La *vision par ordinateur*, ou *computer vision*, est le « domaine dans lequel on étudie et on met au point des techniques permettant à un système informatique ou à un système d'intelligence artificielle d'analyser et de comprendre les données visuelles obtenues à l'aide de caméras ou d'autres dispositifs électroniques »<sup>1</sup>.

Ce manuscrit commencera par un chapitre présentant mon *curriculum vitæ* ainsi que mes activités de recherches et de formations.

Le contexte scientifique dans lequel ces travaux ont été menés et les enjeux qui sont soulevés sont introduits chapitre 3.

Pour arriver à un outil de médiation sur site en RA avec des données géolocalisées, l'élément critique est la localisation du piéton et plus précisément le calcul de pose (position et orientation) de la caméra qu'il transporte. Ainsi, l'axe principal de mon travail est la géolocalisation sur site à l'aide de données spatiales de différentes dimensions. Cette géolocalisation peut être vue comme une boucle de rétroaction avec les données spatialisées. Les données spatialisées de la ville, principalement géométriques, sont une donnée d'entrée essentielle pour obtenir une géolocalisation et une fois cette géolocalisation obtenue, d'autres données issues d'extractions d'informations à partir d'images captées sur site vont enrichir ces bases de données spatiales.

Le but de mon travail de géolocalisation est d'avoir une information de localisation suffisamment fine pour pouvoir faire de l'affichage d'infor-

1. [http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=8374005](http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8374005)

mations en réalité augmenté (RA). Cette géolocalisation à l'aide d'images et de données spatiales est présentée chapitre 5.

Pour pouvoir modéliser, stocker ces données spatiales et garder trace de leurs modifications, je me suis intéressée à une phase amont qui nécessite la mise en place de modèles de données en travaillant à la création de modèles de données urbains.

J'ai enfin abordé quelques usages de la géolocalisation et du calcul de pose pour l'enrichissement et la qualification de données spatiales mais aussi pour aider à la navigation à l'estime du piéton. Je termine par une autre conséquence de la géolocalisation sur site qui engendre de nouvelles pratiques de participation.

Ces deux aspects de ma recherche ont été moins développés et sont présentés dans deux plus courts chapitres, respectivement chapitre 4 et chapitre 6.

Un dernier chapitre conclut ce mémoire en présentant mes perspectives de recherches vers une médiation numérique avec des données urbaines pour le piéton.





# CURRICULUM VITÆ

# 2

## SOMMAIRE

2.1	ÉTAT CIVIL . . . . .	5
2.2	CURSUS SCIENTIFIQUE . . . . .	6
2.3	ENSEIGNEMENTS ET RESPONSABILITÉS ADMINISTRATIVES . . . . .	6
2.4	ENCADREMENT DOCTORAL ET SCIENTIFIQUE . . . . .	7
2.5	RAYONNEMENT SCIENTIFIQUE . . . . .	9
2.6	PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES . . . . .	14

## 2.1 ÉTAT CIVIL

### **Myriam Servières**

Née le 14 Août 1978 à Carcassonne,  
Pacsée, 1 enfant  
de nationalité française.



Adresse professionnelle : Département info-math  
École Centrale Nantes  
1 rue de la Noë  
44321 Nantes Cedex 3  
France

Équipe CRENAU - Laboratoire AAU  
École Nationale d'Architecture de Nantes  
8 quai François Mitterrand  
44200 Nantes

Téléphone professionnel : 02 40 37 16 29

Courriel : [myriam.servieres@ec-nantes.fr](mailto:myriam.servieres@ec-nantes.fr)

Langues parlées : français, anglais, espagnol

## 2.2 CURSUS SCIENTIFIQUE

### 2.2.1 Titres et diplômes

- 2005 : Thèse de doctorat en informatique appliquée à l'Université de Nantes - Sujet « Reconstruction Tomographique Mojette », équipe IVC, laboratoire IRCCyN.
- 2002 : Diplôme d'études approfondies (DEA) en informatique appliquée à l'École Centrale Nantes.
- 2002 : Diplôme d'ingénieur l'École Centrale Nantes, option informatique.

### 2.2.2 Parcours professionnel

- 01/09/2006 - présent : Maître de conférences en informatique à l'École Centrale Nantes.
- 01/09/2005 - 31/08/2006 : Attaché temporaire d'enseignement et de recherche à l'École Centrale Nantes.

## 2.3 ENSEIGNEMENTS ET RESPONSABILITÉS ADMINISTRATIVES

J'enseigne l'informatique, d'abord principalement en tronc commun de Centrale Nantes (niveau L3) et dans l'option informatique (niveau M1-M2). Mon engagement dans les tâches d'enseignement a toujours été fort depuis le début de ma carrière.

### 2.3.1 Un lien entre enseignement et recherche

Depuis 2014 et une réforme de la 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> année à Centrale Nantes j'ai créé et je coordonne une option disciplinaire « Ville Numérique : géomatique et urbanisme » (450h réparties en 12 cours et un projet). Cette option travaille à représenter la ville pour la comprendre à travers l'utilisation des données urbaines.

Une partie des cours est faite à l'école d'architecture par des collègues du laboratoire AAU pour acculturer les élèves aux problématiques de la ville et de l'urbanisme, en particulier dans les cours de problématiques urbaines contemporaines, modèles urbains, représentations de la ville et politiques urbaines. Les autres cours sont plus techniques et permettent de créer des modèles de données, de les implémenter dans une base de données spatiales, de manipuler des données spatiales dans des systèmes d'informations géographiques, de programmer les traitements nécessaires et de visualiser les résultats sous formes de cartes (2D ou 3D) pour aller vers une prise de décision.

Cette option me permet de faire le lien avec mes activités de recherche au sein de AAU et de faire intervenir des collègues chercheurs en pédagogie. Elle rassemble environ une quinzaine d'étudiants par an depuis sa création.

### 2.3.2 Responsabilités pédagogiques

**Depuis sept. 2014** : coordination de l'option « Ville Numérique ». J'assume la responsabilité de l'option et de 4 cours (SIG, Modèles de données, Image et Programmation) ainsi que le suivi des étudiants en stages.

**Depuis sept. 2006** : création et responsabilité du cours de « Génie Logiciel » (32h) en option informatique (pour environ 42 étudiants chaque année) reconduit chaque année.

**Depuis sept. 2014** : responsables des projets courts du 1<sup>er</sup> semestre en option informatique (gestion de 21 sujets pour les 42 élèves).

**De sept. 2006 jusqu'en juin 2014** : responsabilité du cours de « Qualité Logicielle » (18,75h) en 3<sup>eme</sup> année option informatique, filière systèmes d'informations (pour environ 15 étudiants chaque année).

**De sept. 2006 jusqu'en juin 2014** : création et responsabilité d'un cours électif d'« Image : Analyse et Synthèse » (32h) en 2<sup>eme</sup> année (pour environ 40 étudiants chaque année).

**Depuis sept. 2009** : co-responsable puis responsable en 2011 du cours d'Algorithmique et Programmation de Centrale Pékin (32h) en 1<sup>ere</sup> année du cycle ingénieur.

### 2.3.3 Implications dans l'établissement

**De sept. 2006 jusqu'en juin 2016** : tuteur pédagogique des élèves français partants en double diplôme au Royaume- Uni, en Italie, en Chine et au Japon (suivi d'environ 20 élèves par an).

**De juin 2009 à juillet 2011** : responsable de la mobilité sortante (coordination de tous les tuteurs pédagogiques des élèves français partant en double-diplôme à l'étranger).

**En 2010-2011** : administration locale partielle pour l'École Centrale Nantes du programme *Erasmus Mundus* TANDEM avec la Chine en particulier la sélection des candidats.

**En 2010 et 2011** : correspondante de Centrale Pékin pour l'École Centrale Nantes.

**Depuis sept. 2006** : tuteur pédagogique d'une quinzaine d'élèves par an, d'abord des doubles diplômés étrangers puis des groupes d'élèves français.

## 2.4 ENCADREMENT DOCTORAL ET SCIENTIFIQUE

J'ai co-encadré 7 thèses soutenues et je co-encadre actuellement 3 thèses en cours. J'ai encadré ou co-encadré 6 mémoires de master.

### 2.4.1 Thèses doctorales co-encadrées soutenues

— Nicolas Antigny :

Estimation continue de la pose d'un équipement tenu en main par fusion des données visio-inertielles pour les applications de navigation piétonne en milieu urbain - 2015-2018, taux d'encadrement 50%  
- directrice de thèse Valérie Renaudin

- Henyang Wei :  
Study of camera pose estimation in urban environments using skyline in a visual servoing framework - 2014-2017 - taux d'encadrement 20% - directrice de thèse Luce Morin
- Bahtiyor Zohidov :  
Retrieval of rainfall fields in urban area using tomographic processing from microwave communication links - 2012-2016, taux d'encadrement 30% - directeur de thèse Hervé Andrieu 40% - co-encadrement Nicolas Normand 30%,
- Ruijun Liu :  
3D-GIS from image and map constraints in an AR context - 2009-2012, taux d'encadrement 50 % - directeur de thèse Guillaume Moreau 50%,
- Chams-Eddine Zaki :  
Modélisation spatio-temporelle multi-échelle dans un SIG - 2007-2011, taux d'encadrement 40% - directeur de thèse Gérard Hégron 20% - co-encadrement Guillaume Moreau 40%,
- Hideaki Uchiyama :  
Texture-Free Keypoint Matching and its Applications - 2007-2010, taux d'encadrement 30% - Directeur de thèse Hideo Saito 40% - co-encadrement Guillaume Moreau 30%,
- Nicolas Bioret :  
Géolocalisation par images en s'appuyant sur un Système d'Information Géographique - 2007-2010, taux d'encadrement 50% - Directeur de thèse Guillaume Moreau 50%.

#### 2.4.2 Thèses doctorales co-encadrées en cours

- Gabriel Giraldo :  
Caractérisation et restitution multidisciplinaire des ambiances d'un lieu - Directeurs D. Siret, G. Moreau, taux d'encadrement 30% (débutée 01/11/2017)
- Gwendoline L'Her :  
La notion de « citoyen-capteur » comme acteur d'un urbanisme collaboratif - Directeur D. Siret, taux d'encadrement 50% (01/01/2015 - soutenance prévue avril 2019),
- Bernard Seeman :  
Indexation intelligente de bases de données d'images et de vidéos urbaines - Directeurs G. Moreau et B. Chebaro (co-tutelle), taux d'encadrement 50% pour la partie française (01/10/2014 - soutenance prévue 14 décembre 2018).

#### 2.4.3 Thèses de Master encadrées

- Gabriel Giraldo : A-spot - caractérisation et restitution multidisciplinaire des ambiances d'un lieu - 01/03/2016 - 05/10/2016, taux d'encadrement 25%,

- Irene Vegetti et Cecilia Chirani : Mapping Ambiance : a synopsis of theories and practices in an interdisciplinary perspective - collaboration avec B. Piga (Polimi) - 10/2015 - 07/2016,
- Audrey Bedel : Les outils numériques mobiles pour l'analyse *in situ* en aménagement urbain - 03/03/2014 - 30/09/2014, Master STEU (Sciences et techniques des environnements urbains), taux d'encadrement 50%,
- Xi Zhou : Étude des usages prospectifs d'outils mobiles pour l'architecture et l'urbanisme - 04/03/2013 - 20/09/2013, Master STEU, taux d'encadrement 100%,
- Shupeng Zhu : Skyline based video-GIS registration method for future mobile device application - 14/03/2012 - 27/09/2012, Master STEU, taux d'encadrement 25%,
- Siju Wu : Design of a touch-based interface and a visual query language for Geographic Information System - 29/03/12 - 24/09/2012, Master Automatique et systèmes de production, taux d'encadrement 50%.

#### 2.4.4 Stages ingénieurs ou de fin d'études encadrés à caractère de recherche

Tous ces stages ont eu lieu dans le cadre de collaborations soutenues par l'IRSTV (Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville).

- Alexis Dupuis : Évaluation des performances du SLAM basé vision dans un contexte de géolocalisation grand public - 03/04/18 - 31/08/18, taux d'encadrement 40%, stage ingénieur niveau M1,
- Hakim Cheikh : Développement d'algorithmes de reconnaissance automatique d'objets 3D par méthodes d'apprentissage - 28/04/2016 - 26/08/2016, taux d'encadrement 50%, stage ingénieur niveau M1,
- Alexandre Langeois : Structuration et accès à des données historiques - 28/04/2016 - 28/08/2016, taux d'encadrement 50%, stage ingénieur niveau M1,
- Elsa Arrou-Vignot : Portage de la maquette numérisée du port de Nantes en 1900 - 03/05/2010 - 27/08/2010, taux d'encadrement 50%, stage de fin d'étude niveau M2,
- Daniel Lefèvre : Validation d'un modèle numérique 3D en vue de sa valorisation patrimoniale - 09/05/2011- 26/08/2011, taux d'encadrement 40%, stage de fin d'étude niveau M2.

## 2.5 RAYONNEMENT SCIENTIFIQUE

### 2.5.1 Distinction

2<sup>nd</sup> best paper à la conférence IPIN2017 [ASR17b].

## 2.5.2 Organisation de conférences

### 2.5.2.1 Internationale

- Participation à l'organisation de la conférence de la conférence IS-MAR 2017 16th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality à Nantes 9-13/10/2017 - conférence de Rang A\* (CORE2018) en Réalité Augmentée qui a rassemblé plus de 300 personnes
  - *Deputy general chair,*
  - *Workshops and tutorials chair,*
  - *Web chair.*
- *Posters chair* à la conférence ICAT-EGVE 2018 (International Conference on Artificial Reality and Telexistence & Eurographics Symposium on Virtual Environments),

### 2.5.2.2 Nationale

- Participation au comité d'organisation et de programme de la conférence SCAN en oct. 2018 à l'ENSAN

## 2.5.3 Organisation de *workshops* et atelier

J'ai co-organisé en 2013 et 2015 à Nantes et en 2016 à Milan et animé le *workshop* MOBIANCE : Outils numériques mobiles, Ambiances et Design urbains.

Ces *workshops* posaient la question des usages des outils mobiles comme dispositifs d'analyse et de conception de l'environnement construit, en mettant en avant la problématique des ambiances urbaines. Ils ont rassemblé 12 puis 20 étudiants de différentes filières (ingénieurs généralistes, architectes, designer et urbanistes) de niveau master. Organisés en quatre équipes pluridisciplinaires, ils ont été amenés à produire des propositions d'interactions entre les outils mobiles et l'espace public pour le design urbain en relation avec les ambiances.

Ces travaux ont fait l'objet de publications dans un chapitre de livre [SLS17], en conférences internationales [SPM<sup>+</sup>18, SPSM16, SSL14a] et nationales [SSL14c, SSL14b].

Co-organisation d'un atelier lors de la conférence SAGEO 2014 : « Données géographiques en 3D : Polysémie de l'appellation, variété des données mais pauvreté des usages ? » (environ 30 participants).

## 2.5.4 Participation à des comités de lecture, comités de programme

### 2.5.4.1 Pour des journaux

- Relecture pour International Journal of Digital Earth 2014,
- Relecture pour la Revue Internationale de géomatique 2017,
- Relecture pour la revue Sensor 2018.

#### 2.5.4.2 Pour des conférences internationales

- Relectures pour ISMAR 2008, 2009, 2011, 2018,
- Relectures pour IPIN 2018,
- Comité de programme de IAPR Conference on Machine Vision Applications 2009, 2011, 2013, 2015, 2017,
- Comité de lecture de Engineering Systems Design and Analysis (ESDA) 2012,
- Comité de lecture de International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT) 2008, 2011, 2015,
- Comité de lecture de International Symposium on Access Spaces (IEEE-ISAS) 2011,
- Comité de lecture du workshop UDMV 2015, 2016,
- Comité de lecture de OGRS 2009.
- Relectures pour le *workshop* Urban AR de ISMAR 2015.

#### 2.5.4.3 Pour des conférences nationales

- Comité de lecture SAGEO 2014, 2015, 2016, 2017 et 2018,
- Comité de lecture SCAN 2018.

#### 2.5.5 Invitations

- Tutorial à la conférence IEEE IPIN 2018 à Nantes sur les méthodes d'état de l'art de calcul de pose par vision.  
<http://ipin2018.ifsttar.fr/conference/tutorials/>,
- Cours « 3D, au-delà de la visualisation », avec V. Tourre, pendant l'école d'été 2016 du GDR CNRS MAGIS (Méthodes et Applications pour la Géomatique et l'Information Spatiale).

#### 2.5.6 Collaborations internationales et nationales

##### 2.5.6.1 Collaborations internationales

- Dr. Hideaki Uchiyama - Université de Kyuchu, Japon, depuis 2017.  
Séjour de recherche de 3 mois de Nicolas Antigny.
- Dr. Barbra Piga - Politecnico de Milano, Italie, depuis 2016.  
Nous avons collaboré à l'encadrement de 2 masters. [PCV<sup>+</sup>16, SPSM<sub>16</sub>, SPM<sup>+</sup>18]
- Pr Saito - Keio University, Japon, 2007-2011.  
Cette collaboration nous a permis, mon collègue Guillaume Moreau et moi, de participer à l'encadrement de la thèse de M. Uchiyama, un séjour scientifique au CERMA de M. Uchiyama pendant 6 mois et de M. Bioret à Keio pendant 6 mois ainsi que la participation du Pr. Saito au jury de thèse de M. Bioret. J'ai de plus effectué deux séjours dans le laboratoire du Pr. Saito, 2 semaines en 2007 et 1 mois en 2008.  
[USN<sup>+</sup>08a, USN<sup>+</sup>08b, USN<sup>+</sup>09, USSM<sub>09a</sub>, USSM<sub>09b</sub>, MSS<sub>09a</sub>, MSS<sub>09b</sub>, YUS<sup>+</sup>09, MUS<sup>+</sup>09, USSM<sub>11</sub>]



- Pr. Roland Billen - Université de Liège, Belgique, 2012 - 2014.  
[BZS<sup>+</sup><sub>12</sub>, BCD<sup>+</sup><sub>12</sub>, HBL<sup>+</sup><sub>12</sub>]

#### 2.5.6.2 Collaborations nationales

- Dr. Valérie Renaudin - IFSTTAR-GEOLOC Bouguenais. Co-encadrement de la thèse de N. Antigny [ASR<sub>16</sub>, ASR<sub>17a</sub>, ASR<sub>17b</sub>, ASR<sub>18a</sub>, ASR<sub>18b</sub>],
- Pr. Luce Morin et Dr. Muriel Pressigout - IETR Rennes. Co-encadrements du master de Shupeng Zhu et de la thèse de Hengyang Wei [Zhu<sub>12</sub>, ZMP<sup>+</sup><sub>13</sub>, WPM<sup>+</sup><sub>17</sub>],
- Pr. Gilles Gesquière - LIRIS Lyon. Collaboration avec l'entreprise *For-City Platform* [LTS<sup>+</sup><sub>16</sub>].

#### 2.5.7 Responsabilités scientifiques

##### 2.5.7.1 Animation d'une action prospective du GDR CNRS MAGIS (Méthodes et applications pour la géomatique et l'information spatiale)

Sur la période 2013-2016 j'ai co-animé avec Gilles Gesquière (Liris) l'Action Prospective « SIG 3D » du GDR CNRS MAGIS.

Nous avons organisé avec les deux responsables de l'AP Usages du GDR CNRS MAGIS un atelier lors de la conférence SAGEO 2014 sur le thème « Données géographiques en 3D : Polysémie de l'appellation, variété des données mais pauvreté des usages ? ».

En Novembre 2015, l'AP SIG3D a été associée à la journée séminaire sur les problématiques de visibilité et de simulation du microclimat urbain organisée lors des journées SOLÈNE du CRENAU (UMR AAU) à Nantes.

Cette AP a été reconduite dans le GDR pour la période 2017-2020 sous le nom « Données 3D géospatiales » et je la co-anime toujours avec Gilles Gesquière.

##### 2.5.7.2 Co-animation de l'axe de recherche « Tomographie Urbaine » de l'IRSTV

J'ai été responsable de l'action fédérative « Ville et Image » au sein de l'IRSTV (Institut Fédératif en Science et Technique de la Ville) pour le quadriennal 2012-2015.

Depuis 2016, cette action fédérative s'est transformée en axe de recherche appelée « Tomographie Urbaine » que je co-anime maintenant avec Valérie Renaudin (IFSTTAR) avec qui je collabore. Cela consiste en l'animation d'une équipe de 15 personnes de 8 laboratoires différents de l'ouest autour de projets informatiques axés sur les données et images en lien avec l'étude de la ville.

Cet axe de recherche a permis le travail conjoint du CRENAU et de l'IETR de Rennes à travers une thèse en collaboration de février 2014 à juillet 2017. La thèse de Nicolas Antigny, conjointe CRENAU-IFSTTAR résulte aussi de cette collaboration. D'autre part, ce groupe de travail a accompagné la mise en place d'une collaboration entre les laboratoires CRENAU, IRCCyN et Centre François Viète (Université de Nantes) en partenariat avec le musée du Château des Ducs de Bretagne sur le projet

Nantes 1900 (mise en valeur d'un plan relief du port de Nantes en 1900 à partir de son scan 3D) qui a donné lieu à 5 publications en conférences.

L'animation de ce groupe consiste en l'organisation de deux réunions de travail annuelles et à la rédaction et au dépôt de réponses à des appels à projets impliquant un ou plusieurs participants du groupe.

### 2.5.7.3 Responsabilités de recherche au sein du laboratoire AAU

Je co-porte deux groupes de recherche dans le cadre du laboratoire AAU :

- MOBIANCE : Mobilités et Ambiances urbaines depuis 2016 avec Daniel Siret. Ce groupe s'intéresse à l'évolution des relations des personnes à l'espace urbain due aux outils mobiles.
- Visibilité, Vision, Visualisation (3V) depuis 2017 avec Vincent Tourre et Thomas Leduc. Ce groupe s'intéresse à la médiation numérique du rapport visuel à la ville.

### 2.5.7.4 Administration et animation de la science

- Participation au bureau du GDR MAGIS en tant de responsable d'Action Prospective,
- Participation au comité de direction étendu de l'IRSTV en tant que responsable d'axe,
- Correspondante de l'Alliance Centrale-Audencia-ENSA pour le projet national MINND (Modélisation des informations interopérables pour les infrastructures durables).

### 2.5.8 Participation à des jurys de thèses

- Examineur au jury de thèse de doctorat de Chuanlin Liu sur le sujet « La transformée Mojette ligne à 3 matériaux » soutenue le 27 mai 2013 à l'Université de Nantes,
- Examineur au jury de thèse de doctorat de Henri Der Sarkissian sur le sujet « Tomographie et géométrie discrète avec la transformée Mojette » soutenue le 4 juin 2015 à l'Université de Nantes.

### 2.5.9 Participation à des comités de suivi de thèses

- Mathieu Delangle (IRCCyN) 2012-2015 « Utilisation d'outils de réalité virtuelle pour la conception universelle », dirigé par J.-F. Petiot et co-encadré par E. Poirson,
- Liming Yang (CRENAU) 2013-2016 « Point pattern matching for augmented reality », dirigé par G. Moreau et co-encadré par J.-M. Normand,
- Roberto Giudici (Univ. Bretagne Sud) 2015-2018 « Observation vidéo multi-vues d'objets environnementaux », dirigé par S. Lefevre, co-dirigé par T. Corpetti et co-encadré par L. Courtrai

### 2.5.10 Participation à des jurys de recrutements

- Comité de sélection d'un Maître de Conférences à l'ESGT (Mans) en avril-mai 2013 (poste dans les sections CNU 23 et 27),
- Comité de sélection d'un Maître de Conférences à l'ESGT (Mans) en avril-mai 2014 (poste dans les sections CNU 23 et 27),
- Comité de sélection d'un Maître de Conférences à L'ECN (Nantes) en avril et mai 2017 (poste dans la section CNU 27),
- Jury de recrutement d'un ingénieur d'études en géomatique à l'IF-STTAR en juin 2018.

### 2.5.11 Participation à des projets de recherche

- *Build2Spec* (2015-2018) : Built to Specifications - Tools for the 21st Century Construction Site - projet Européen H2020 : responsable de la tâche 2.1 dans le WP2 - coordination de l'équipe ECN sur ce projet (4 personnes pour un total de 9 hm) - Projet porté par l'entreprise Nobatek regroupant 20 partenaires, implication 1 hm,
- ARnBIM (2016-2018) : Augmented Reality and BIM - projet PME, implication 2 hm,
- TyCity (2018-2019) : Production automatique de maquettes urbaines de communication - projet PME, implication 4 hm,
- Immersion (2010 - 2012) : Plate-forme technologique de développement d'applications de Réalité Augmentée pour terminaux mobiles - projet PME, implication 6 hm.
- ANR VegDUD (2009 - 2013) : Rôle du végétal dans le développement urbain durable; une approche par les enjeux liés à la climatologie, l'hydrologie, la maîtrise de l'énergie et les ambiances - ANR Villes durables, implication 5 hm.

### 2.5.12 Expertise de projets scientifiques et techniques

Expertise d'un projet EMERGENCE - Région Basse-Normandie - juin 2010

## 2.6 PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Les notices et certains textes intégraux sont disponibles sur HAL : <https://cv.archives-ouvertes.fr/mservier>

(\*) Indexé sur la base Scopus - 37+2

(§) Indexé sur la base WoS - 28

### 2.6.1 Articles de journaux avec comités de lecture et actes

1. Nicolas Antigny, [Myriam Servières](#) and Valérie Renaudin. Fusion of 3D GIS, Vision, Inertial and MagneticData for Improved Urban Pedestrian Navigationand Augmented Reality Applications. *Navigation*, 2018. DOI : 10.1002/navi.254

2. Gwendoline L'Her, **Myriam Servières**, and Daniel Siret. Participer et transformer les territoires interactions entre habitants, techniques et milieux a partir de la notion de « Citoyen-Capteur ». *NetCom*, 31-1/2 :153–174, 2017.
3. § Frédéric Bertrand, Cyril Faucher, Jean-Yves Lafaye, Guillaume Moreau, **Myriam Servières**, and Chamseddine Zaki. Gérer les informations temporelles dans et par les modèles informatiques. *Revue Internationale de Géomatique*, 25(3) :415–436, 2015.
4. Chamseddine Zaki, Elyes Zekri, **Myriam Servières**, Guillaume Moreau, and Gérard Hégron. Generic modeling of application and spatiotemporal data : application to the study of pedestrian behavior. *Intelligent Decision Technologies*, 5(4) :297–302, 2011.
5. \* § Hideaki Uchiyama, Hideo Saito, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. Camera tracking by online learning of keypoint arrangements using LLAH in augmented reality applications. *Virtual Reality*, 15, Oct. 2011.
6. Nicolas Bioret, Guillaume Moreau, and **Myriam Servières**. Géolocalisation en milieu urbain par appariement entre une collection d'images et un SIG 2D. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information - Série ISI : Ingénierie des Systèmes d'Information*, 14(5) :107–131, 2009.
7. \* **Myriam Servières**, Nicolas Normand, Jeanpierre Guédon, and Yves Bizais. The Mojette Transform : Discrete Angles for Tomography. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 20 :587–606, 2005.
8. \* § Wilfried Bourgeois, Guillaume Gardey, **Myriam Servières**, and Richard M. Stuetz. A chemical sensor array based system for protecting wastewater treatment plants. *Sensors and Actuators B : Chemical*, 91(1-3) :109–116, June 2003.

Les revues « *NetCom* » et « *Revue Internationale de Géomatique* » publient à la fois des articles en français et en anglais et ont une audience internationale. La revue « *Revue des Sciences et Technologies de l'Information* » a une audience nationale.

### 2.6.2 Chapitres d'ouvrages

9. **Myriam Servières**, Daniel Siret, and L'Her Gwendoline. Mobile devices and urban ambiances : how connected wearable tools change the ways we perceive and design public spaces. In Barbara E.A. Piga and Rossella Salerno, editors, *Urban Design and Representation*, pages 207–216. Springer International Publishing, 2017.
10. \* Guillaume Moreau, **Myriam Servières**, Jean-Marie Normand, and Morgan Magnin. Challenges of Image-Based Crowd-Sourcing for Situation Awareness in Disaster Management. In Alanand Cojocaruv Svetlanaand Bruderlein Claude Teodorescu, Horia-Nicolaiand Kirshenbaum, editor, *Improving Disaster Resilience and Mitigation - IT Means and Tools*, pages 103–118. Springer Netherlands, 2014.
11. **Myriam Servières**, Jeanpierre Guédon, Nicolas Normand, and Yves J. Bizais. Mojette discrete tomography (chap 8). In Jeanpierre

Guédon, editor, *The Mojette Transform : Theory and Applications*, ISBN : 9781848210806, page 29 pages. Iste & Wiley, January 2009.

### 2.6.3 Articles de congrès internationaux avec comité de lecture et actes

12. Nicolas Antigny, **Myriam Servières**, and Valérie Renaudin. Continuous Pose Estimation for Urban Pedestrian Applications on Handheld Mobile Device. In *IPIN*, à paraître, 2018.
13. **Myriam Servières**, Barbara E.A. Piga, Eugenio Morello, Ignacio Requena, Gwendoline L'Her, Steven Saulnier-Sinan, Daniel Siret, Myriam Servières, Barbara E.A. Piga, Eugenio Morello, Ignacio Requena, Gwendoline L'Her, Steven Saulnier-Sinan, and Daniel Siret. Envisioning future urban scenarios - The outcomes of the international Mobiance 3 workshop on Sharing Cities, Ambient Commons and Urban Futures. In *eCAADe*, à paraître, 2018.
14. \* § Nicolas Antigny, **Myriam Servières**, and Valérie Renaudin. Pedestrian Track Estimation with Handheld Monocular Camera and Inertial-Magnetic Sensor for Urban Augmented Reality. In *2017 International conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Sapporo, Japan, 2017.
15. \* § Bernard Semaan, **Myriam Servières**, Guillaume Moreau, and Bilal Chebaro. A geographic data gathering system for image geolocalization refining. In *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume IV-4/W3, pages 63–70, Mexico, sept. 2017.
16. \* § Hengyang Wei, Muriel Pressigout, Luce Morin, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. A Study of Virtual Visual Servoing Sensitivity in the Context of Image/GIS Registration for Urban Environments. In *Fifteenth IAPR International Conference on Machine Vision Application*, Nagoya, Japan, 2017.
17. \* § Nicolas Antigny, **Myriam Servières**, and Valérie Renaudin. Hybrid Visual and Inertial Position and Orientation Estimation based on Known Urban 3D Models. In *IPIN 2016, International conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, pages pp.4–7, MADRID, Spain, October 2016.
18. **Myriam Servières**, Barbara E.A. Piga, Daniel Siret, and Nicolas Minvielle. Emotional Cities : imaginary future of ambiances explored in the Mobiance workshop. In Nicolas Rémy (dir.) and Nicolas Tixier (dir.), editors, *Ambiances, tomorrow. Proceedings of 3rd International Congress on Ambiances. Septembre 2016, Volos, Greece*, volume vol. 1, pages p. 535 – 540, Volos, Greece, September 2016.
19. Barbara E.A. Piga, Cecilia Chiarini, Irene Vegetti, Marco Boffi, Nicola Rainisio, Aurore Bonnet, Valerio Signorelli, Vincent Tourre, and Myriam Servières. Mapping Ambiances : a synopsis of theory and practices in an interdisciplinary perspective. In Nicolas Rémy (dir.); Nicolas Tixier (dir.), editor, *Ambiances, tomorrow. Proceedings of 3rd International Congress on Ambiances. Septembre 2016, Volos, Greece*, volume vol. 1, pages p. 367 – 372, Volos, Greece, September 2016.

20. Jean-Gil Langlois, Vincent Tourre, **Myriam Servières**, Bertrand Gervais, and Gilles Gesquière. A data model for simulation models relying on spatio-temporal urban data. In Vincent Tourre and Filip Biljecki, editors, *Eurographics Workshop on Urban Data Modelling and Visualisation*, Liège, Belgium, December 2016. The Eurographics Association.
21. Benjamin Hervy, Florent Laroche, Boris Lam, Vincent Tourre, Myriam Servières, Jean-Louis Kerouanton, and Alain Bernard. Historical Knowledge Management Through Virtual Reality : Theoretical Aspects and Experiment Proposal. In *Digital Intelligence*, Nantes, France, September 2014.
22. \* § Benoît Recur, Henri Der Sarkissian, and **Myriam Servières**. Global scheme for iterative moquette reconstructions. In *International Conference on Image Processing*, pages 1748–1752, Paris, France, October 2014. IEEE
23. \* § Shupeng Zhu, Luce Morin, Muriel Pressigout, Guillaume Moreau, and Myriam Servière. Video/GIS registration system based on skyline matching method. In *20th IEEE International Conference on Image Processing ICIP 2013*, pages 3632–3636, Melbourne, Australia, September 2013.
24. \* § Benoît Recur, Henri Der Sarkissian, **Myriam Servières**, Nicolas Normand, and Jeanpierre Guédon. Validation of Moquette reconstruction from Radon acquisitions. In *20th IEEE International Conference on Image Processing ICIP 2013*, pages 1041–1045, Melbourne, Australia, September 2013.
25. \* § Siju Wu, Samir Otmane, Guillaume Moreau, and **Myriam Servières**. Design of a Visual Query Language for Geographic Information System on a Touch Screen. In *15th International Conference on Human Computer Interaction International (HCI 2013)*, volume 8007 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 530–539, Las Vegas, NV, United States, July 2013.
26. § Rolland Billen, Chams-Eddine Zaki, **Myriam Servières**, Guillaume Moreau, and Pierre Hallot. Developing an ontology of space : Application to 3D city modeling. In T. Leduc, G. Moreau, and R. Billen, editors, *3U3D2012 : Usage, Usability, and Utility of 3D City Models – European COST Action TU0801*, Nantes, France, 2012.
27. § Benjamin Hervy, Roland Billen, Florent Laroche, Cyril Carré, Myriam Servières, Muriel Van Ruymbeke, Vincent Tourre, Vincent Delfosse, and Jean-Louis Kerouanton. A generalized approach for historical mock-up acquisition and data modelling : towards historically enriched 3D city models. In R. Billen T. Leduc, G. Moreau, editor, *3U3D2012 : Usage, Usability, and Utility of 3D City models*, Nantes, France, October 2012.
28. § Roland Billen, Cyril Carré, Vincent Delfosse, Benjamin Hervy, Florent Laroche, Daniel Lefevre, **Myriam Servières**, and Muriel Van Ruymbeke. 3D historical models : the case studies of Liege and Nantes. In *COST Action TU801 : Semantic Enrichment of 3D city models for sustainable urban development - Workshop*, pages 19–26, Bologna, Italy, April 2012.

29. \* § Ruijun Liu, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. A 3D-GIS updating method with interaction in an urban environment. In *ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA 2012*, volume 1, pages 369–374, 2012.
30. \* Ruijun. Liu, **Myriam Servières**, and Guillaume. Moreau. A GIS data updating method with video. GRAPP 2012 IVAPP 2012 - Proceedings of the International Conference on Computer Graphics Theory and Applications and International Conference on Information Visualization Theory and Applications, pages 511–514, 2012.
31. § Shupeng Zhu, Muriel Pressigout, **Myriam Servières**, Luce Morin, and Guillaume Moreau. Skyline Matching : A robust registration method between Video and GIS. In *Conference of the European COST Action TU0801 - Semantic Enrichment of 3D City Models for Sustainable Urban Development Location : Grad Sch Architecture*, pages 1–6, Nantes, France, October 2012.
32. \* § Florent Laroche, Daniel Lefevre, **Myriam Servières**, Benjamin Hervy, and Alain Bernard. Intelligent Reverse-Engineering Segmentation : Automatic Semantic Recognition of Large 3D Digitalized Cloud of Points Dedicated to Heritage Objects. In *ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, vol. 4, pages 485–492, Nantes, France, July 2012.
33. \* Jean-Marie Normand, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. A new typology of augmented reality applications. In *AH '12 Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference*, Megève, France, March 2012.
34. \* Florent Laroche, **Myriam Servières**, Daniel Lefevre, and Jean-Louis Kerouanton. Where Virtual Enhances Physical Mock-Up : A Way to Understand our Heritage. In *ISMAR - research, technology and application in Mixed and Augmented Reality*, 6 pp., Basel, Switzerland, October 2011.
35. \* Ruijun Liu, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. Facades modeling from a ground-view video with map constraints. In *Proceedings of the 12th IAPR Conference on Machine Vision Applications, MVA 2011*, pages 128–131, Nara, Japan, 2011.
36. Jean-Marie Normand, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. A functional typology of augmented reality applications based on their tracking requirements. In *Workshop on Location Awareness for Mixed and Dual Reality (LAMDa)*, pages 1–5, 2011.
37. \* Chamseddine Zaki, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. Implementing conceptual spatiotemporal model into object DBMS with semantic preserving. In *ICSDM 2011 - Proceedings 2011 IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services*, pages 160–165, 2011.
38. \* § Chamseddine Zaki, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. Transforming Conceptual Spatiotemporal Model into Object Model with Semantic Keeping. In Olga Troyer, Claudia Bauzer Medeiros, Roland Billen, Pierre Hallot, Alkis Simitsis, and Hans Mingroot, editors, *Advances in Conceptual Modeling. Recent Developments and New Directions. Lecture Notes in Computer Science.*, pages 281–290, 2011.

39. § Chamseddine Zaki, Elyès Zekri, **Myriam Servières**, Guillaume Moreau, and Gérard Hégron. Urban Spatiotemporal Data Modeling : Application to the Study of Pedestrian Walkways. In G. Phillips-Wren et Al., editor, *KES international Symposium IDT 2010*, pages 549–558, 2010.
40. \* § Nicolas Bioret Guillaume Moreau, and **Myriam Servières**. Towards outdoor localization from GIS data and 3D content extracted from videos. In *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pages 3613–3618, Bari, Italy, 2010.
41. \* Hideaki Uchiyama, Hideo Saito, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. AR geovisualization framework based on on-line geographic data matching between a map with intersections and its intersection database on GIS. *Kyokai Joho Imeji Zasshi/Journal of the Institute of Image Information and Television Engineers*, 64(4) :563–569, 2010.
42. Nicolas Bioret, Guillaume Moreau, and **Myriam Servières**. Urban Localization based on Correspondences between Street Photographs and 2D Building GIS Layer. In *CORESA*, Toulouse, France, 2009.
43. \* § Nicolas Bioret, Guillaume Moreau, and **Myriam Servières**. Pose computation based on Correspondence between 2D GIS and Street Images. In *Intelligent system and automation : 2nd Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation*, pages 169–174, Zarzis, Tunisia, 2009.
44. Chamseddine Zaki, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. Using Conceptual and Ontological Models for Tracking Changes of Spatio-Temporal Objects and Concepts over Time. In *Agile*, Hannover, Germany, 2009.
45. Chamseddine Zaki, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. Combining Conceptual and Ontological Models for Representing Spatio-Temporal Data and Semantic Evolution in GIS. In *Ontologies for urban development : Future development of urban ontologies*, Lièges, Belgium, 2009.
46. \* Hideaki Uchiyama, Hideo Saito, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. AR GIS on a physical map based on map image retrieval using LLAH tracking. In *Proc. of the IAPR Conference on Machine Vision Applications*, pages 382–385, Japan, 2009.
47. \* Naoyuki Yazawa, Hideaki Uchiyama, Hideo Saito, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. Image based view localization system retrieving from a panorama database by surf. In *Proc. of the IAPR Conference on Machine Vision Applications*, Japan, 2009.
48. Ryo Mitsumori, Hideaki Uchiyama, Hideo Saito, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. Change Detection Based on SURF and Color Edge Matching. In *Invited Workshop on Vision and Control for Access Space (VCAS) in 9th Asian Conference on Computer Vision (ACCV)*, pages 1–12, 2009.
49. Sandy Martedi, Hideo Saito, and **Myriam Servières**. 3D Shape Reconstruction of Foot Sole Surface using Flatbed Scanner. In *Workshop on Frontiers of Computer Vision*, Andong, Korea, 2009.



50. \* Sandy Martedi, Hideo Saito, and **Myriam Servières**. Shape measurement system of foot sole surface from flatbed scanner image. In *MVA2009 IAPR Conference on Machine Vision Applications 20-22nd June 2009 Keio, Japan*, pages 2–5, Japan, 2009.
51. \* Hideaki Uchiyama, Hideo Saito, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. AR city representation system based on map recognition using topological information. In *Virtual and Mixed Reality, Third International Conference, VMR 2009, Held as Part of HCI International 2009*, pages 128–135, 2009.
52. Guillaume Moreau, **Myriam Servières**, and Hideo Saito. AR-based GIS : Towards closing the loop between acquisition and visualization of geographical data. In *ISMAR workshop Lets Go Out Research in Outdoor Mixed and Augmented Reality*, pages 2–3, 2009.
53. § Hideaki Uchiyama, Hideo Saito, Vivien Nivesse, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. MapBook AiR : AR City Representation System on a Physical Map using Topological Information. In *The 3rd Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology*, Tokyo, Japan, 2009.
54. Nicolas Bioret, Guillaume Moreau, and **Myriam Servières**. Outdoor Localization Approach Based on Image / GIS Correspondence Using a Simple 2D Building Layer. In T. Badard and D. Daniel, editors, *2nd International Workshop on Mobile Geospatial Augmented Reality*, Québec, Canada, 2008.
55. Yuko Uematsu, Hideo Saito, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. AR Mapping of GIS Information by Pattern-based Tracking with Particle Filter. In *International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, pages 305–308, Yokohama, Japan, 2008.
56. Hideaki Uchiyama, Hideo Saito, Vivien Nivesse, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. AR representation system for 3D GIS based on camera pose estimation using distribution of intersections. In *International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, pages 218–225, Yokohama, Japan, 2008.
57. Hideaki Uchiyama, Hideo Saito, Vivien Nivesse, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. AR representation system for 3D GIS based on camera pose estimation using distribution of intersections (in Japanese). In *VRSJ*, volume 13, Unknown, Japan, 2008. VRSJ.
58. Chamseddine Zaki, **Myriam Servières**, and Guillaume Moreau. An ontology-based model for representing evolution of both data and semantic in GIS. In E. Pebesma, M. Bishr, and T. Bartoschek, editors, *GI Days*, Münster, France, 2008.
59. \* § **Myriam Servières**, Nicolas Normand, and Jeanpierre Guédon. Interpolation method for the Mojette Transform. In *Medical Imaging 2006 : Physics of Medical Imaging*, volume 6142, page 61424I, San Diego, United States, February 2006.
60. \* § Florent Autrusseau, Benoît Parrein, and **Myriam Servières**. Lossless Compression Based on a Discrete and Exact Radon Transform : A Preliminary Study. In *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pages 425–428, Toulouse, France, 2006.

61. \* § Nicolas Normand, **Myriam Servières**, and Jean-Pierre Guédon. How to obtain a lattice basis from a discrete projected space. In Pascal Lienhardt Éric Andres, Guillaume Damiand, editor, *Discrete Geometry for Computer Imagery*, volume 3429 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 153–160, Poitiers, France, April 2005.
62. \* § **Myriam Servières**, Jérôme Idier, Nicolas Normand, and Jean-Pierre Guédon. Conjugate gradient Mojette reconstruction. In *SPIE Medical Imaging 2005 : Image Processing*, volume 5747 of *Medical Imaging 2005 : Image Processing*, pages 2067–2074, San Diego, CA, United States, February 2005.
63. \* **Myriam Servières**, Nicolas Normand, Yves Bizais, and Jean-Pierre Guédon. Noise behavior of Spline Mojette FBP reconstruction. In *SPIE Medical Imaging 2005 : Image Processing*, volume 5747 of *Medical Imaging 2005 : Image Processing*, pages 2100–2109, San Diego, CA, United States, February 2005.
64. \* § Jeanpierre Guédon, **Myriam Servières**, Stéphane Beaumont, and Nicolas Normand. Medical software control quality using the 3D mojette projector. In *2004 2nd IEEE International Symposium on Biomedical Imaging : Macro to Nano*, volume 1, pages 836–839, Arlington, United States, 2004.
65. \* § **Myriam Servières**, Nicolas Normand, Peggy Subirats, and Jean-pierre Guedon. Some links between continuous and discrete Radon transform. In *Proceedings SPIE Medical Imaging 2004*, volume 5370, pages 1951–1960, San Diego, United States, 2004.
66. \* § Peggy Subirats, **Myriam Servières**, Nicolas Normand, and Jean-pierre Guédon. Angular assessment of the Mojette filtered back projection. In *Medical Imaging 2004, Proceedings SPIE 5370, Medical Imaging 2004 : Image Processing*, pages 1951–1960, San Diego, United States, 2004.
67. **Myriam Servières**, JP Guédon, and N Normand. A discrete tomography approach to PET reconstruction. In Y. Bizais, editor, *Fully 3D Reconstruction In Radiology and Nuclear Medicine*, number 1 in *Fully 3D Reconstruction In Radiology and Nuclear Medicine*, pages 1–4, Saint-Malo, France, 2003.
68. **Myriam Servières**, Nicolas Normand, and Jean-Pierre Guédon. A Mojette Transform Approach to Discrete Medical Tomography. In *First Malaysia-France Regional Workshop on Image Processing in Vision System and Multimedia Communication*, pages 1–11, Kuching, Malaysia, April 2003.

#### 2.6.4 Articles de congrès nationaux avec comité de lecture et actes

69. Gabriel Giraldo, **Myriam Servières**, Vincent Tourre, Valerio Signorelli, and Aurore Bonnet. Caractérisation et restitution vidéographique des ambiances urbaines. In *SCAN*, à paraître, 2018.
70. Audrey Bedel, **Myriam Servières**, and Daniel Siret. Les ambiances du projet urbain à travers les outils numériques mobiles. In *Mutation du projet, cultures et milieux numériques*, Paris, France, 2015.

71. Daniel Siret, **Myriam Servières**, and Laurent Lescop. Communication multimodale et collaboration instrumentée pour le design urbain : opportunités et risques des outils mobiles analysés à travers l'expérience du workshop MOBIANCE. In Pierre Leclecrq, editor, *COMMON'14 - Communication multimodale et collaboration instrumentée. Regards croisés sur Énonciations, Représentations, Modalités*, Liège, Belgium, September 2014. Université de Liège.
72. **Myriam Servières**, Daniel Siret, and Laurent Lescop. Outils numériques mobiles, ambiances et design urbain : quelques résultats issus du workshop pluridisciplinaire MOBIANCE. In *Scan'14*, pages 233–243, France, 2014.
73. Florent Laroche, Jean-Louis Kerouanton, **Myriam Servières**, and Alain Bernard. Un renouveau des pratiques muséographiques grâce au virtuel : un support à des applications pluridisciplinaire en pédagogie active. In *12ème colloque national AIP Primeca*, 11 pp., Mont-Dore, France, Avril 2011.

### 2.6.5 Communications dans un congrès

74. Gwendoline L'Her, **Myriam Servières**, and Daniel Siret. The concept of citizen as sensors in urban public action : interactions in urban walks. In *Communication dans un congrès, III International Conference URBAN E-PLANNING*, Lisbonne, 2018.
75. **Myriam Servières** and Vincent Tourre. UrbApp : On-site urban materials acquisition. In *Challenges and Applications of Urban Augmented Reality workshop*, Japan, 2015.
76. Nicolas Bioret, **Myriam Servières** and G. Moreau. Géolocalisation à partir d'images en environnement urbain en s'appuyant sur un SIG 2D. 3èmes journées de l'Association Française de Réalité Virtuelle, Bordeaux, 2008.

### 2.6.6 Posters

77. \* § Nicolas Antigny, **Myriam Servières**, and Valérie Renaudin. An Inertial , Magnetic and Vision Based Trusted Pose Estimation for AR and 3D Data Qualification on Long Urban Pedestrian Displacements. In *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 2017.
78. Bernard Semaan, Guillaume Moreau, **Myriam Servières**, and Bilal Chebaro. Towards Automated Image Geolocalization Refining. SA-GEO 2016 , 2016.
79. Bahtiyor Zohidov, Hervé Andrieu, **Myriam Servières**, and Nicolas Normand. Rainfall retrieval in urban areas using commercial microwave links from mobile networks : A modelling feasibility study. European Geosciences Union General Assembly 2014, April 2015.
80. **Myriam Servières**, Daniel Siret, and Laurent Lescop. Mobile Devices for Multimodal Communication and Instrumented Collaboration in Urban Design. *Digital Intelligence*, 2014.

### 2.6.7 Communications orales invitées

81. [Myriam Servières](#) and Vincent Tourre. 3D, au-delà de la visualisation, Cours à l'école d'été du GDR CNRS MAGIS, 2016.
82. [Myriam Servières](#). Mobile tool, ambience and urban design - Link between numeric images and urban information system, séminaire international Walk-scape : Ongoing research on Augmented Reality solutions for the built environment, Milan, 2015.

### 2.6.8 Thèse et DEA

83. [Myriam Servières](#). *Tomographic Mojette Reconstruction*. Theses, Université de Nantes ; Ecole Centrale de Nantes (ECN), Décembre 2005.
84. [Myriam Servières](#). *Méthodes de tatouage et robustesse à la désynchronisation*. DEA, Ecole Centrale de Nantes (ECN), Septembre 2002.

### 2.6.9 Rapport de recherche

85. [Myriam Servières](#) and Nicolas Normand. Opérateur Mojette en 3D. Research Report RI2003-7, IRCCYN, 2003.

### 2.6.10 Démonstration

86. Etienne Peillard, [M. Servières](#), and Jean-Marie Normand. RA-Go : a SAR Go Interface, October 2017. Démonstration à ISMAR 2017.

### 2.6.11 Divers

87. \* G. Moreau, A. Lécuyer, J.-M. Normand, and [M. Servières](#). Message from the ISMAR 2017 General Chair and Deputy General Chairs. In *Adjunct Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR-Adjunct 2017*, 2017.
88. \* G. Bruder, [M. Servieres](#), and M. Sugimoto. Message from the Workshop and Tutorial Chairs. In *Adjunct Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR-Adjunct 2017*, 2017.



# CONTEXTE ET ENJEUX

# 3

## SOMMAIRE

3.1	VERS UN DOUBLE NUMÉRIQUE DE LA VILLE GÉRÉ DANS UN SIG	26
3.1.1	Une augmentation et une diversification des données spatiales	26
3.1.2	Le SIG, un système de gestion de la donnée spatiale	27
3.1.3	Une possible mise à jour des SIG <i>via</i> des images urbaines	29
3.2	VERS UNE MÉDIATION SUR SITE	29
3.2.1	Mobilité informationnelle et spatiale, une évolution des pratiques	29
3.2.2	Une modification de l'ambiance urbaine	30
3.3	LA RÉALITÉ AUGMENTÉE COMME OUTIL DE MÉDIATION	30
3.3.1	Caractéristiques de la Réalité Augmentée	31
3.3.2	Vers une RA sur site	31
3.3.3	Des applications et usages de la RA liés à l'espace bâti et aux données spatiales 3D	36
3.4	ORGANISATION TEMPORELLE DES TRAVAUX	38

L'ensemble des données des villes possédant une composante spatiale est en augmentation, que ce soient des données institutionnelles ou produites par les usagers quotidiens de la ville. Ces données sont de natures diverses et évoluent. Leur modélisation est nécessaire pour pouvoir les gérer dans des systèmes d'information dédiés. Nous allons vers un double numérique de la ville géré par un Système d'Information Géographique (SIG) (partie 3.1).

Il est courant actuellement d'accéder à une information de géolocalisation peu précise mais suffisante pour la majorité des usages quotidiens, principalement la recherche d'itinéraires ou de services à proximité de sa position, à l'aide de terminaux numériques mobiles de type *smartphone*. En plus d'une localisation, ces terminaux fournissent l'accès à un réseau, à des informations sur site qui « augmentent » le contexte de l'utilisateur et modifient l'ambiance urbaine [KSN<sup>+</sup>13]. Les pratiques évoluent (partie 3.2).

Le lien sur site avec une donnée spatialisée passe par la détermination précise de la localisation et de l'orientation de l'utilisateur. Les techniques qui se sont à la fois intéressées à cette détermination précise de la localisation et de l'orientation et à l'interaction avec des données spatialisées sont les techniques de Réalité Augmentée (RA) sur site. Après un rappel rapide des caractéristiques de la RA (partie 3.3.1), nous présenterons l'évolution des matériels et des algorithmes qui ont permis l'apparition d'une

RA sur site à travers le calcul de pose (localisation et orientation) des caméras utilisées et une portabilité accrue des dispositifs techniques (partie 3.3.2). Nous verrons enfin quelques applications et usages de la RA liés à l'espace bâti et aux données spatiales 3D et les verrons qu'il reste à lever (partie 3.3.3).

C'est dans ce contexte que s'inscrit mon travail de recherche. Je me place à l'échelle de l'humain immergé dans la ville. Ce chapitre se conclut sur une description de l'organisation temporelle de mes travaux.

### 3.1 VERS UN DOUBLE NUMÉRIQUE DE LA VILLE GÉRÉ DANS UN SIG

#### 3.1.1 Une augmentation et une diversification des données spatiales

Dans un contexte d'ouverture des données publiques en général<sup>1</sup> et particulièrement des données à caractère géographique avec l'application de la directive européenne INSPIRE sur l'infrastructure d'information géographique (directive 2007/2/EC) [BK11], la masse de données publiques accessibles et interopérables sur un espace urbain augmente très fortement. Nous allons définir une donnée géographique ou spatiale comme une données « portant sur les entités spatiales et leurs relations » [qdl1F]. Ces données sont collectées par des acteurs divers. Cela peut être des services opérationnels de l'état (comme l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) ou la direction générale des impôts (DGI)), des collectivités locales ou territoriales ou encore des entreprises ou des associations [Jol11]. Toute donnée spatiale produite par un acteur public doit maintenant être librement mise à disposition et accessible, même si cette ouverture des données demande un effort important aux acteurs publics et est loin d'être totalement réalisée à l'échelle européenne [GR16]. Cette logique va à l'encontre d'anciennes pratiques où chaque organisme gardait précieusement ses données [Jol11].

Les communautés urbaines ont créé ou acquis des données et les ont mises à disposition sur des sites de données ouvertes (*Open Data*<sup>2</sup>) comme par exemple pour Nantes<sup>3</sup>, Lyon<sup>4</sup> ou encore Rennes<sup>5</sup> ou Paris<sup>6</sup> pour ce qui est d'exemples nationaux. Mais il existe aussi un grand nombre d'exemples internationaux avec Barcelone<sup>7</sup>, New York<sup>8</sup>, Milan<sup>9</sup>, Séoul<sup>10</sup>, etc. Ce mouvement est mondial<sup>11</sup>. Sur ces plateformes les données ne sont

1. <https://www.economie.gouv.fr/republique-numerique> (consulté le 17/05/2018)

2. OpenData pouvant recouvrir différentes approches comme décrit dans [GR16]

3. <https://data.nantesmetropole.fr/pages/home/> (consulté le 19/06/2018)

4. <https://data.grandlyon.com/> (consulté le 17/05/2018)

5. <https://data.rennesmetropole.fr/> (consulté le 17/05/2018)

6. <https://opendata.paris.fr/> (consulté le 17/05/2018)

7. <http://opendata-ajuntament.barcelona.cat/en> (consulté le 17/05/2018)

8. <https://opendata.cityofnewyork.us/> (consulté le 17/05/2018)

9. <http://dataportals.org/portal/comune-milano> (consulté le 17/05/2018)

10. <http://data.seoul.go.kr> (consulté le 17/05/2018)

11. Une liste des portails Open Data pourra être trouvée sur <https://index.okfn.org/> (consulté le 17/05/2018) ou <https://opendatainception.io> (consulté le 17/05/2018)

pas que des données à caractère spatial mais une bonne partie possèdent une composante « géospatiale » car « une très grande part des données en général [...] sont *in fine* localisables ou rattachables à un objet localisable sur la surface terrestre avec un niveau de précision variable » [Jol11].

Les données spatiales peuvent aussi être produites par un grand nombre de personnes (*crowdsourcing*) avec le développement de l'information géographique volontaire (*Volunteered Geographic Information (VGI)*) [Goo07] qui est la création et la diffusion d'informations géographiques de manière volontaire et partagée par un ensemble de personnes, souvent sur le web [Jol11]. OpenStreetMap<sup>12</sup> en est un exemple marquant. [Goo07] a nommé ce phénomène de partage volontaire d'informations à caractère géographique en parlant de « *citizen as sensor* » qui a été traduit en français par « citoyen-capteur ». Le « citoyen-capteur » traduit une sorte de lien entre l'individu qui partage des informations sur son milieu, sur son contexte et les outils numériques. C'est une nouvelle pratique cartographique mais aussi une nouvelle pratique urbaine provenant d'outils nomades à tel point que la relation à l'espace urbain en est modifiée [Bou14].

Ces données issues de pratiques habitantes via des outils numériques soulèvent des enjeux de protection de la vie privée qui est un élément central dans la *Data City* comme la nomme [Peu14] lui préférant ce terme à *Smart City*. Elle considère d'autre part que la production, le stockage et particulièrement le contrôle et la réutilisation de ces informations seront des thèmes centraux dans la ville de demain, qui est peut-être déjà celle d'aujourd'hui. Est-ce que les données générées seront un plus pour les habitants [Tow14] ou une source de contrôle [Peu14]? Nous ne traiterons pas ici cet aspect directement mais il fait partie du contexte.

L'utilisation de ces données spatiales pose des problèmes d'accès, d'interopérabilité, de structure, de précision et même de visualisation [GR16]. L'objectif de certaines villes est d'arriver à un double numérique croisant les différentes données un peu sous la forme d'un tableau de bord ou d'un centre de contrôle qui rassemble l'ensemble des informations sur la ville [Peu14].

Toutes ces données collectées sont structurées par des modèles théoriques qui doivent être pensés pour un problème spécifique et pour favoriser leurs interopérabilités. L'interopérabilité des données, qui dépend de l'adoption de standards comme ceux de l'Open Geospatial Consortium (OGC)<sup>13</sup> ou de l'ISO<sup>14</sup>, est une priorité dans la constitution des bases de données des villes pour leur ouverture à des acteurs divers (collectivités, entreprises privées, milieux associatifs et aussi grand public). Les métadonnées et leurs descriptions doivent être standardisées et les formats doivent être interopérables pour que les utilisateurs puissent croiser différentes sources [Jol11] ce qui est le but de la directive INSPIRE. Mais l'incomplétude et l'imprécision de certaines données spatiales [DLD15] freinent leurs réutilisations ainsi que des dimensions juridiques et politiques [Jol11] qui ne seront pas abordées ici.

12. [www.osm.org](http://www.osm.org) (consulté le 17/05/2018)

13. <http://www.opengeospatial.org> consultée le 24/05/2018

14. Organisation internationale de normalisation [www.iso.org](http://www.iso.org) (consulté le 08/07/18)



### 3.1.2 Le SIG, un système de gestion de la donnée spatiale

La donnée spatiale est souvent d’abord de nature géométrique mais peut aussi être attributive. Une information spatiale est une information contenant une référence à un lieu, qu’il s’agisse d’un point précis du territoire, d’une infrastructure linéaire (comme une route par exemple) ou encore un polygone délimitant un périmètre donné (par exemple une ville, un parc naturel, etc.) [Min16]. Elle peut être de trois sortes [Min16] :

- les référentiels géographiques qui servent de fond de plan pour l’affichage ou la saisie d’autres données (cartes ou plans, photographies aériennes et satellitaires, maquettes 3D),
- les objets géographiques que l’on visualise sur les référentiels (ponctuels, linéaires, surfaciques, relief (2.5D) et même objets 3D),
- les données attributaires rattachées aux objets géographiques qu’elles caractérisent.

Cette donnée géographique, urbaine ou non, va être gérée par un système d’information dédié, un *Système d’Information Géographique* (SIG).

Il est intéressant de noter que pour [qdlf], un SIG « est constitué d’un ensemble de ressources humaines, matérielles et logicielles ». Dans la plupart des définitions, l’humain est oublié au profit d’une notion uniquement fonctionnelle de « système de gestion de base de données géographiques ». Nous allons néanmoins plutôt considérer cette dernière vision du SIG même si le point de vue de l’humain reste central dans ce travail.

Un système d’information va être constitué de l’« ensemble de tous les éléments qui contribuent au traitement et à la circulation de l’information »<sup>15</sup> ou exprimé autrement il va recouvrir l’ensemble des outils qui vont permettre d’acquérir, stocker, traiter et distribuer de l’information. Ces fonctionnalités sont exactement celles attendues d’un SIG vis à vis de la donnée spatiale. Selon [DBGH<sup>+</sup>94] un SIG est un ensemble organisé de matériels informatiques, de logiciels, de données géographiques et de personnels capables de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter toutes formes d’informations géographiquement référencées.

Un SIG possède 5 fonctionnalités [LT94] :

- Abstraction : il s’agit de la modélisation de l’information, de sa structuration vis à vis d’un problème spécifique.
- Acquisition : il s’agit d’ajouter une information du monde réel dans la base de données spatiale du SIG ou de mettre à jour une telle information.
- Archivage : cela correspond à un stockage persistant des données de façon à les retrouver et les interroger facilement.
- Analyse : est le cœur du SIG en ce sens qu’elle permet sous forme de traitements (requêtes) sur les données existantes de créer de nouvelles informations dérivées.
- Affichage : recouvre la restitution graphique, le plus souvent sous forme de cartes 2D, et maintenant 3D, de la donnée spatiale acquise.

<sup>15</sup>. [http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=8392214](http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8392214)  
Consulté le 20/05/2018

A ces 5 dimensions on peut actuellement en ajouter une 6<sup>ème</sup> liée au stockage d'une donnée non plus uniquement spatiale mais aussi spatio-temporelle dans les systèmes les plus récents [JPE<sup>+</sup>16]. Ce stockage d'informations spatio-temporelles permet de faire de la prospective à partir des données d'un SIG et rajoute la dimension d'*Anticipation*.

### 3.1.3 Une possible mise à jour des SIG *via* des images urbaines

Un SIG urbain n'est pas à jour par essence. Le coût de la collecte et de la mise à jour régulière des données est très grand or cette information apparait de plus en plus comme une ressource permettant une action ultérieure [Jol11]. Cependant, l'extraction d'informations à partir d'images peut nous permettre de l'enrichir. Si l'on considère comme [Jol11] que les récepteurs GPS (*Global Positioning System*) et les appareils photographiques peuvent devenir des « dispositifs habituels de saisie de terrain » il devient normal de vouloir extraire des informations de l'environnement *via* des images ou des vidéos. Si on croise cette tendance avec celle du partage sur site de données environnementales, les images partagées deviennent une source possible d'information pour la mise à jour.

## 3.2 VERS UNE MÉDIATION SUR SITE

### 3.2.1 Mobilité informationnelle et spatiale, une évolution des pratiques

L'utilisateur sur site à besoin d'un système prenant en compte les dimensions spatiales, sociales, physiques et temporelles [KSN<sup>+</sup>13]. Il est d'autant plus possible actuellement de prendre en compte ces dimensions du fait de la connexion quasi-constante à un réseau qui double la mobilité spatiale d'une mobilité informationnelle [CH14] à tel point que [Lus14] parle d'« hyperspatialité »<sup>16</sup>. La mobilité a évolué, en particulier la mobilité piétonne et comme le remarque [CH14] : « si au lieu de penser la mobilité de manière isolée on commençait à l'envisager doublée d'un potentiel de télécommunication pour permettre une maximisation des interactions entre le matériel et l'immatériel ? ». Une nouvelle forme d'utilisation de l'informatique en mobilité est apparue où l'utilisateur change régulièrement d'environnement d'exécution et dans les interactions des utilisateurs avec leurs environnements la localisation est un élément prépondérant [ST94].

Le lien entre l'individu participant et les outils numériques ne nécessite pas forcément d'être sur site, d'être situé, la contribution pouvant aussi être « hors-site » mais elle concernera un savoir géographique, une information située. Quel que soit le support, cela finira toujours par une saisie numérique à travers une *interface* faisant le lien entre le monde réel et numérique.

Bien que cela soit un des modes de participation étudié dans nos travaux [LSS17], nous allons ici nous concentrer sur un positionnement sur site *augmenté* d'une mobilité informationnelle, une « mobilité augmenté » [CH14]. Les outils numériques mobiles fournissent à leurs usagers à la fois

<sup>16</sup>. En décembre 2017, 54,4% de la population mondiale était connecté à internet <https://www.internetworldstats.com/stats.htm> Consulté le 06/06/2018.

une mobilité spatiale et informationnelle au point de parler d'information mobile et ubiquitaire qui est un champ de recherche à part entière dont une partie est dédiée aux applications dépendantes du contexte et aux services dépendants de la localisation de l'utilisateur. Le terme d'*informatique ubiquitaire* a été utilisé pour la 1<sup>ère</sup> fois par Mark Weiser en 1991 pour désigner les outils informatiques embarqués dans la vie quotidienne et utilisés de manière transparente par les utilisateurs. Deux éléments sont particulièrement importants dans ce champ : la position et l'échelle [Sch11].

### 3.2.2 Une modification de l'ambiance urbaine

Dans [Thio2], l'auteur s'intéresse à la perception située et son lien à l'ambiance urbaine. Il propose trois façons de caractériser l'ambiance urbaine par un sujet immergé. D'abord, il va l'expérimenter dans son ensemble, comme un tout. Ensuite l'ambiance va modifier sa perception. On ne perçoit pas l'ambiance, on perçoit « selon l'ambiance » ce qui nous donne une « potentialité d'action ». Enfin, l'ambiance est comme un arrière-plan sensoriel qui donc influence nos perceptions.

[KSN<sup>+</sup>13] est parti de ces constats pour étudier l'apport de ressources contextuelles numériques fournies par des appareils mobiles vis à vis de l'expérience du piéton en ville et de l'évolution de son sentiment par rapport à l'ambiance urbaine. Il a travaillé sur des services basés sur la localisation du piéton à travers une expérience spécifique où l'outil mobile sert de médiateur entre l'utilisateur et les informations contextuelles proposées. Le système étudié donne plusieurs vues, une vue carte et une vue en RA (de type Layar<sup>17</sup>) et les informations affichées sont des informations sur les bâtiments (magasins) autour de soi, les horaires de bus et les positions de ses amis dans la ville.

Les conclusions de cette étude montrent que les usagers ont utilisé un tel système car il « augmente leur expérience de leur environnement immédiat en relation avec leur activité du moment ». La RA mobile leur donne l'expérience d'une ville plus interactive. Le système proposé modifie la perception de l'ambiance urbaine des usagers et leur révèle des potentialités d'actions ce qui est totalement en accord avec [Thio2].

[Jol11] aborde aussi le lien à distance « sur des lieux précis par les services cartographiques » en distinguant deux aspects, une « exploration du monde par le Web » et une exploration « du Web par le monde ». Dans le premier cas, la vue carte fournie par des services géoweb est suffisante mais dans le deuxième cas, il s'agit de recueillir de l'information contextuelle située en utilisant des *interfaces* mobiles. Comme [Jol11], dans les travaux qui suivent je considère que c'est « un des enjeux des techniques de réalité augmentée localisée » et que ces techniques « peuvent conduire à l'élaboration de nouveaux modes de rapport sensible au monde ».

## 3.3 LA RÉALITÉ AUGMENTÉE COMME OUTIL DE MÉDIATION

Intégrer les technologies informatiques pour la saisie d'informations environnementales et faciliter l'action dans la vie quotidienne, tel que présenté précédemment, est un champ de recherche émergent appelé « Ur-

17. <https://www.layar.com> (consulté le 06/06/2018)

ban Computing », que l'on pourrait traduire par *Informatique Urbaine* qui traite de l'utilisation de technologies informatiques ubiquitaires dans des espaces qui n'étaient pas traditionnellement associés avec des besoins de traitements informatiques, les environnements urbains en particulier [KLY<sup>+</sup>14]. C'est une sorte « d'ici et maintenant » assisté par ordinateur. Ces systèmes *d'informatique urbaine* font toujours le lien entre des personnes, des lieux et des technologies [KFD15]. L'étude de [KLY<sup>+</sup>14], assez récente, basée sur l'utilisation actuelle des nouvelles technologies a conclu que l'utilisation des technologies numériques n'allait pas forcément avoir pour résultat l'abandon de l'espace urbain réel mais plutôt que les utilisateurs allaient mélanger leur monde connecté et non connecté dans une seule réalité. Une modalité permettant ce mélange est l'utilisation de la Réalité Augmentée (RA).

### 3.3.1 Caractéristiques de la Réalité Augmentée

La réalité augmentée est définie comme un ajout d'informations virtuelles aux perceptions sensorielles d'un utilisateur à l'aide d'un outil informatique [FEI02] tout en améliorant ses compétences et ses sens en supprimant les limites des lois physiques et des propriétés matérielles des mondes réels [NI13].

En RA, l'utilisateur fait l'expérience à la fois du monde réel et d'un monde virtuel. La RA peut donc être considérée comme une interface d'interaction entre des données numériques (ou « virtuelles ») et le monde réel. Elle vise à créer l'illusion que les images virtuelles sont parfaitement combinées avec le monde réel.

Dans son état de l'art [Azu97] lui définit les trois caractéristiques suivantes reprises depuis lors :

- combiner le monde réel et des données numériques,
- être interactif en temps réel avec l'utilisateur et s'adapter aux modifications du monde réel,
- faire une mise en correspondance en 3D.

Ces trois caractéristiques définissent également les exigences techniques d'un système de RA. L'augmentation ne se limite pas à l'ajout d'informations virtuelles visuelles, même si c'est le plus courant. L'augmentation peut aussi être auditive [LGK<sup>+</sup>94], haptique [TST10], voire même olfactive [NNK<sup>+</sup>11].

Si on se limite à une augmentation visuelle, un système de RA doit avoir un affichage qui peut combiner des images réelles et virtuelles, un système informatique capable de générer en temps réel des affichages 3D répondants aux stimuli des utilisateurs et enfin un système de suivi de l'utilisateur permettant à l'image virtuelle d'apparaître fixe dans l'image, éventuellement mouvante, du monde réel.

### 3.3.2 Vers une RA sur site

La RA ne suppose pas par essence de s'utiliser sur des appareils mobiles, mais le mouvement est inhérent à la notion d'augmentation. Cela peut être celui du monde réel regardé par une caméra fixe (par exemple pour les augmentations médicales), de la caméra dans le monde réel (pour

voir des objets à l'échelle 1 dans les applications architecturales) ou encore de l'objet virtuel se déplaçant dans la scène réelle. Les applications de RA sont généralement composées de trois parties [GLZR17] : un processus de localisation et suivi, un processus de rendu et un processus permettant l'interaction. Bien que ces trois parties puissent toutes les trois être considérées comme essentielles, nous allons nous concentrer dans la suite sur le processus de localisation et suivi qui va calculer la position de l'utilisateur ou de son matériel selon 6 degrés de liberté qui a été notre contexte de travail principal.

### 3.3.2.1 Une portabilité liée à l'évolution des matériels

La mobilité, si elle n'est pas essentielle à la RA, est le but à atteindre par un grand nombre de dispositifs techniques dont [AGG<sup>+</sup>15] a fait un historique entre 1968 et 2014 (Figure 3.1).

Les applications de RA sont le plus souvent en intérieur dans des conditions d'éclairage contrôlées mais très vite les premières applications en extérieur ont lié la réalité augmentée aux données spatiales pour afficher des informations dépendantes de la position et de l'orientation de l'utilisateur (d'abord 2D+ $\theta$  uniquement).

Le premier système de réalité augmentée a été mis au point en 1968 par [Sut68]. Il n'était pas mobile, dû aux contraintes techniques de l'époque, mais permettait de faire le suivi de la tête selon 6 degrés de liberté. Il affichait en temps réel sur un casque de visualisation équipé d'un système optique semi-transparent des formes fil de fer simples à cause des capacités calculatoires des ordinateurs de l'époque.

Le premier téléphone portable fut présenté par Motorola en avril 1973 et le premier ordinateur portable fut lancé par GRiD en 1982. En 1992 fut lancé le premier smartphone par IBM et Bellsouth. C'est la même année que [CM92] employèrent le terme de *Réalité Augmentée* comme une « technologie utilisée pour « augmenter » le champ de vue de l'utilisateur avec les informations nécessaires pour la réalisation de sa tâche ». Ils pointent particulièrement le fait que la précision de la mise en correspondance réel/virtuel dépend de l'application.

Le lien avec la nécessité de géolocalisation et les SIG apparaît dès les premières applications en extérieur en 1993 où [LGK<sup>+</sup>94] ont développé un système de navigation en extérieur pour les déficients visuels. L'augmentation dans ce système n'est pas visuelle mais auditive. Ils déterminaient la position de l'utilisateur à l'aide d'un GPS différentiel qui leur donnait une précision métrique<sup>18</sup>. La perte de visibilité des satellites GPS en environnement urbain était bien-sûr déjà un problème et ils ont complété leur système par des capteurs inertiels permettant une navigation à l'estime. Ils utilisaient aussi une base de données spatiales contenant des informations pertinentes sur le nombre d'objets d'un type donné ou encore leurs formes ou leurs positions dans la zone de test. L'utilisateur

18. Les GPS différentiels corrigent la position obtenue par GPS conventionnel grâce aux données envoyées par une station terrestre de référence localisée très précisément. Les GPS commerciaux à cette époque donnaient une précision de 100 m car les signaux GPS étaient encore brouillés par l'armée américaine. Cette dégradation volontaire du service a été suspendue par le président Clinton le 1er mai 2000.

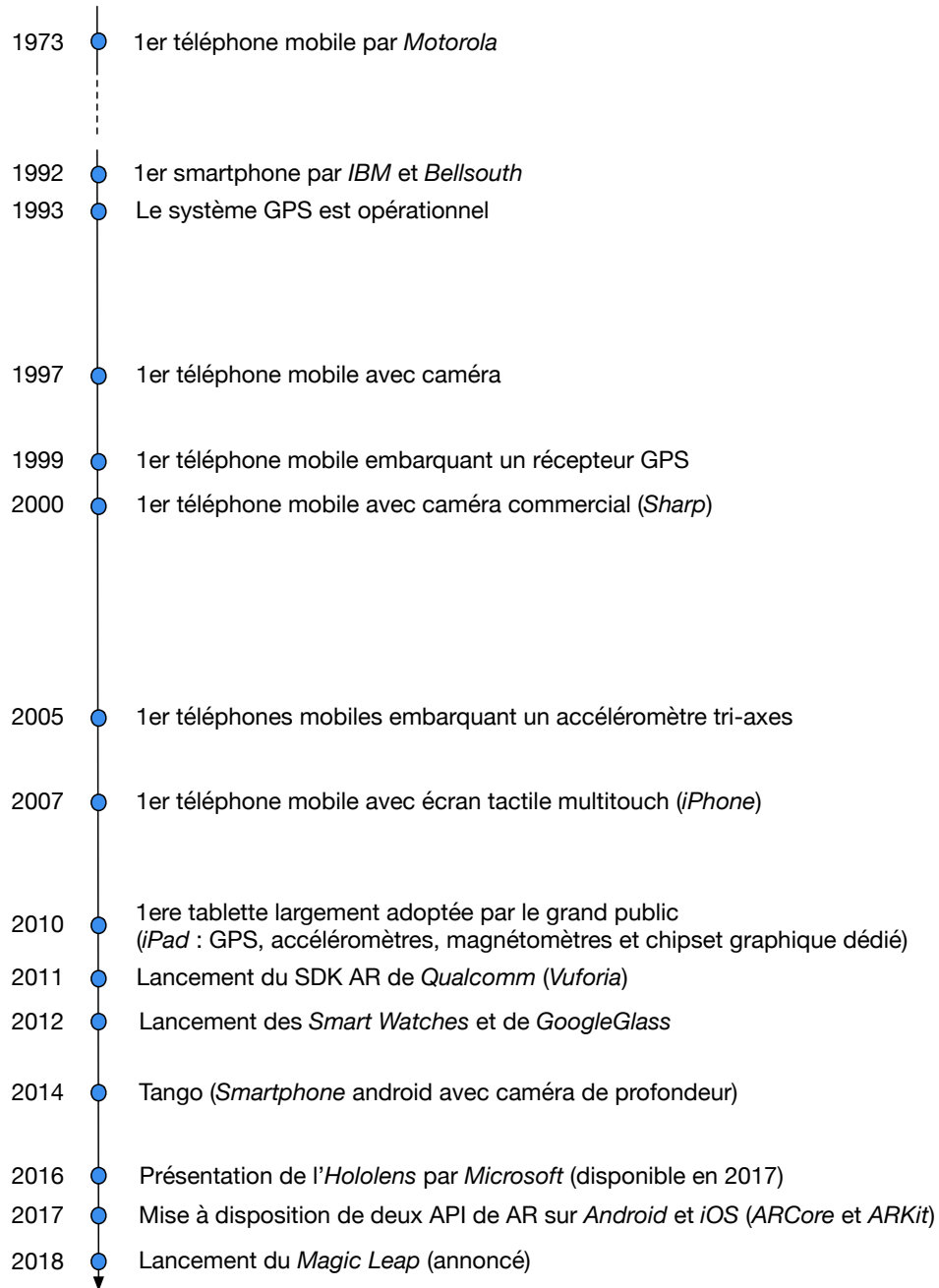


FIGURE 3.1 – Avancées des dispositifs techniques permettant de faire de la RA mobile (d'après [AGG<sup>+</sup>15] et complété).

était alors guidé à l'aide de « balise auditives » spatialisées sur un parcours prédéterminé.

Les premières applications pour faire l'expérience d'une augmentation visuelle pendant un déplacement étaient plus « transportables » que réellement portables. Un des premiers dispositifs est la *Touring Machine* de [FMHW97]. [HFT<sup>+</sup>99] ont construit une série de prototypes (MARS : *Mobile Augmented Reality System*) permettant de faire de la RA en extérieur à la suite de la *Touring Machine*. Un autre système, le *Tinmith System*, a été construit par [PT01]. L'application *Tinmith-Metro*, en tirant parti de la présence physique de l'utilisateur en extérieur, a démontré la possibilité de saisir une géométrie 3D sur site en temps réel.

De transportables, les dispositifs techniques vont ensuite de plus en plus devenir portables [WS03], avec l'avènement des *smartphones* et des tablettes jusqu'aux *Google Glass* ou *Hololens* qui sont maintenant des outils classiques pour les chercheurs et les développeurs dans le domaine. Les lunettes ou casques de RA posent des problèmes d'affichage en extérieur mais certaines expériences récentes montrent aussi leurs possibles usages malgré ces limitations<sup>19</sup>.

L'arrivée de systèmes portables munis de caméras ont permis la création de systèmes de type *magic-windows* où l'augmentation est ajoutée en temps réel à la vidéo capturée par la caméra de l'appareil et le résultat est affiché sur l'écran de ce même appareil. L'utilisation de matériels dédiés, fusionnant souvent des données de capteurs GNSS<sup>20</sup> et IMMU<sup>21</sup> avec les résultats de calculs de poses en vision a permis des applications en extérieur. [RDo7] a démontré la possibilité de faire du suivi temps réel basé vision pour de l'affichage en RA en extérieur. *Smart Vidente* rend les réseaux enterrés visibles [SZR12]. A la même époque sont apparus les premiers navigateurs avec un affichage en RA qui seront ensuite améliorés et dont une présentation des caractéristiques se trouve dans [LNSG14].

Ces applications basées sur la connaissance de la position absolue de l'utilisateur et sur ses mouvements enregistrés par les capteurs embarqués de son appareil mobile, plus généralement décrites sous le terme de *Géo AR* [MGFL18], sont devenues grand public et tendent à montrer une acceptation de ces technologies. On peut citer comme exemple les premiers *browsers Geo AR* comme *Layar*<sup>22</sup> ou *Wikitude*<sup>23</sup>, ou encore plus récemment l'interfaçage de *Google Map* avec *Google Lens* et un affichage en RA<sup>24</sup>. Mais au-delà de cette acceptation grand public, certains se posent la question de l'utilisation de la RA pour les entreprises, liée à leur données spatialisées stockées dans un SIG [NI13].

19. Affichage en RA à l'aide d'un *Hololens* de canalisations enterrées par Bentley [https://communities.bentley.com/other/old\\_site\\_member\\_blogs/bentley\\_employees/b/stephanecotes\\_blog/posts/using-the-hololens-for-accurate-subsurface-utility-pipes-augmented-reality](https://communities.bentley.com/other/old_site_member_blogs/bentley_employees/b/stephanecotes_blog/posts/using-the-hololens-for-accurate-subsurface-utility-pipes-augmented-reality) consulté le 07/06/2018

20. *Global Navigation Satellite System : système de positionnement par satellites*

21. *Inertial and Magnetic Measurement Unit : centrales inertielles et magnétiques*

22. <https://www.layar.com> consulté le 07/06/2018

23. <https://www.wikitude.com> consulté le 07/06/2018

24. <https://www.youtube.com/watch?v=82CGhuwfk1I> consulté le 07/06/2018

### 3.3.2.2 Une évolution des algorithmes de localisation et de suivi

Concomitant avec les avancés du matériel, les algorithmes de localisation et suivi ont eux aussi beaucoup évolué pour aller vers un suivi en 6 degrés de liberté qui va permettre l’affichage en RA. Les premiers algorithmes de suivi étaient au début purement basés sur des données inertielles [AHNS99] avec une position globale parfois donnée par GPS [FMHW97, HFT<sup>+</sup>99]. Plus récemment, les applications de GéoAR comme *CityView AR* [LDKB12] ont utilisé uniquement les capteurs inertiels des *smartphones* pour connaître le déplacement de l’appareil.

Les techniques ont très vite évolué vers des algorithmes fusionnant données inertielles et données issues de la vision pour permettre le suivi de l’utilisateur ou de son matériel. Dès 1999, [YNA99] propose un système de suivi en extérieur combinant suivi optique et capteurs inertiels. Peu après [SAYTo2] propose un système appelé « *Town Wear* » qui utilise un gyroscope de haute précision pour mesurer l’orientation du point de vue des utilisateurs. La dérive des mesures du gyroscope est compensée par des données issues de la vision. [RLG<sup>+</sup>02] propose un système de suivi hybride pouvant être utilisé pour des applications de RA extérieures. Une base de données de points caractéristiques, établie hors ligne, est utilisée avec un ensemble d’images de référence et un modèle 3D. [RDo7] présente un système portable pour la RA en extérieur dans les environnements urbains. Ils utilisent un système de suivi hybride basé sur la connaissance préalable d’un modèle 2,5D du bâti. Il combine un algorithme de suivi des contours pour obtenir une localisation précise avec des mesures gyroscopiques pour les mouvements rapides et des mesures de gravité et de champs magnétiques pour atténuer la dérive pendant les mouvements lents. Dans [SWR<sup>+</sup>09], un filtre de Kalman est proposé pour fusionner un système GPS différentiel avec des hauteurs barométriques. Une centrale inertielle complète le système. En utilisant un suivi visuel de l’orientation, qui est sans dérive, ils corrigent les erreurs des données de la boussole. Ce système, comme les précédents, utilise un matériel mobile dédié. [KMPK14] combinent des informations visuelles issues d’un patch d’image autour de chaque point d’intérêt avec des informations spatiales basées sur un modèle de l’environnement et les données des capteurs attachés à la caméra (GPS, accéléromètres et boussole). Cela leur donne une description plus discriminante des points d’intérêt qui correspondent à des points 3D de l’espace.

Certaines approches basées sur la vision utilisent des images panoramiques [AKRS11] ou calculent la pose d’une seule image dans une scène de ville en utilisant un appareil mobile en faisant correspondre les images par appariement de points d’intérêt avec un nuage de points précalculés de la zone [VH12]. Ils peuvent néanmoins continuer à utiliser des informations inertielles en traitant les données de l’accéléromètre et du magnétomètre embarqués dans le téléphone pour aider à la construction d’images panoramiques mais ne réalisent pas de véritable fusion [AMS12]. Ils utilisent des points d’intérêt calculés hors ligne pour faire la mise en correspondance.

Les méthodes de SLAM qui construisent à la fois la carte et se localisent par rapport à elle sont devenues très populaires. Cela a commencé avec



l'apparition de la première méthode de SLAM monoculaire [DRMS07] puis avec l'exécution sur deux processus séparés de la construction de la carte et de la localisation avec PTAM [KM07] qui sera assez vite porté sur mobile [KM09]. PTAM ouvre la voie au visual-SLAM avec SVO [FZG<sup>+</sup>17], DTAM [NLD11], LSD-SLAM [ESC14] ou ORB-SLAM [MAMT15].

[MSUK14, VH12, VARS14] proposent des méthodes utilisant une base de données d'images préalablement localisées avec une mise en correspondance entre l'image d'intérêt et le modèle global réalisé sur un serveur. Uniquement la partie « utile » du modèle est envoyée à l'appareil mobile qui fait le calcul de localisation en utilisant des méthodes de SLAM. Ces méthodes en exécutant du SLAM sur le périphérique gèrent la latence de la transmission d'images au serveur et peuvent suivre la pose pendant les périodes où la localisation par rapport au modèle global échoue.

[SEC14, ESC14] sont capables de travailler à grande échelle. Ils proposent un système d'odométrie visuelle monoculaire directe fonctionnant en temps réel sur un *smartphone*. Le système suit et construit la carte directement à partir des images au lieu de travailler à partir d'extraction de points d'intérêt. L'alignement direct de l'image est appliqué pour suivre les nouvelles images. Une carte de profondeur semi-dense est utilisée pour représenter la géométrie. [APV<sup>+</sup>15] présente un système basé sur du SLAM et localise la première image clé en utilisant des cartes 2.5D non texturées. Ensuite, [LSB<sup>+</sup>15] ont proposé un système de SLAM embarquant la totalité du modèle sur un appareil mobile de façon compressé et utilisant des données inertielles pour améliorer leur recherche de points d'intérêt dans la scène. Plus récemment, commencent à apparaître des méthodes de SLAM effectuant une fusion serrée avec des données inertielles [BOHS15, QLS17].

D'autres méthodes de localisation et de suivi existent, par exemple basées sur des marqueurs et sont détaillées dans [BCL15].

Les systèmes et les algorithmes ont évolué au point que [GLZR17] présentent le concept de RA généralisée (*Pervasive Augmented Reality, PAR*) où le système de RA va constamment s'adapter au contexte de l'utilisateur pour une utilisation prolongée à travers plusieurs tâches aux buts différents. La RA mobile qui s'adapte à son contexte serait un sous ensemble des méthodes de RA généralisée.

### 3.3.3 Des applications et usages de la RA liés à l'espace bâti et aux données spatiales 3D

Une des premières applications de RA pour la construction a été présentée par [WFM<sup>+</sup>96]. Elle permettait de rendre visible l'armature des bâtiments qui est cachée dans les murs.

Dès 2006 [SR06] pointe l'intérêt d'utiliser la RA comme un médium pour accéder à des informations spatiales. Les premières expériences se font en intérieur en commençant par augmenter des cartes papiers [RED05]. Leur système permettait d'avoir accès à des images associées à des lieux de la carte pour montrer des simulations d'inondations. Mais, comme présenté dans 3.3.2, les applications liant la RA et les données spatiales se déplacent très vite en extérieur.

Le potentiel de la RA pour l'industrie de la construction et l'architec-

ture est étudié en 2008 par [SDo8]. Ils ont exploré l'utilisabilité de la RA pour effectuer une tâche dans les domaines de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction. Ils identifient deux verrous pour que la RA se répande dans ces champs d'applications. Le premier est le positionnement et le suivi précis sur site de l'utilisateur et le deuxième est de déterminer les domaines d'application dans lesquels la RA peut être exploitée pour de meilleures performances dans une tâche donnée au-delà d'une « simple » démonstration mais en passant aussi par une validation de sa pertinence.

[WKLK13] ont en 2013 présenté une classification de 120 articles publiés entre 2005 et 2013 sur l'utilisation de la RA dans les environnements construits. Les deux domaines d'applications les plus populaires étaient l'architecture et le design et construction.

[MTD15] se sont interrogés sur le potentiel de la RA en génie civil lors d'une construction. Leur étude montre que la réalité augmentée peut contribuer de manière significative à la compréhension de la documentation du projet à différents stades et permettre ainsi une meilleure intégration de la phase de conception (dans leur cas supporté par un BIM) dans la phase de construction.

Dès 2002, [REDo2] a proposé un système pour visualiser sur site en RA des données spatiales correspondant à des structures enterrées. Plus tard, le projet Vidente [SSJ10] a proposé un système pour visualiser des informations sur des structures enterrées. Ce projet a été poursuivi par le projet Smart-Vidente [SZR12]. Ce projet a montré la possibilité d'utiliser des applications de RA sur site pour des tâches professionnelles mais avec un matériel dédié.

La RA sur un site de construction peut permettre de faire une comparaison entre le bâtiment tel que construit et ce qui était prévu en affichant l'avancement sur le bâtiment en construction et les informations associées. Cette possibilité de comparer directement sur site par surimposition d'une information 3D spatiale correspondant à la scène observée recalée avec la réalité est considérée comme une opportunité d'éviter des erreurs et de diminuer la charge de travail [ZHK<sup>+</sup>14]. Ce type de visualisation a été largement utilisé dans des applications liées à la construction pour l'affichage de données à composante spatiales. Pour afficher des modèles BIM sur site, [WHK<sup>+</sup>10] permet à l'utilisateur une inspection de ses plans en les comparant à la réalité avec quelques interactions pour simplifier la mise en correspondance réel/virtuel. [GFPMSo9] ont proposé un système qui représente l'état de la construction par rapport à ce qui avait été planifié en affichant des couleurs sur les éléments construits pour montrer les parties du chantier dans les temps ou en retard. [ZHK<sup>+</sup>14] ont proposé un système de réalité augmenté pour permettre le suivi et la documentation d'un chantier.

Dans [MLWX12, HSL16] contrairement au système de RA traditionnel, le système ARGIS qu'ils ont proposé n'exigeait pas l'utilisation d'une méthode de suivi par vision pour la mise en correspondance. Ils utilisaient un appareil mobile pour faire la mise en correspondance sur site entre le modèle fil de fer 3D existant dans la base de données du SIG et le bâti réel par interaction avec l'utilisateur.

D'autres applications se sont intéressées à l'édition de données spatiales sur site. Par exemple, [HWRo9] propose un système en plusieurs

modules axés sur la saisie sur site pour positionner géographiquement un modèle BIM pré-existant dans le système. Un autre exemple est [LMZ<sup>+</sup><sub>11</sub>] où ils ont permis sur site aux utilisateurs de créer de nouveaux contenus 2D et 3D ainsi que répliquer des objets 3D.

Outre l’affichage et la mise en correspondance des données avec le monde réel, d’autres problématiques ont été adressées comme par exemple le lien entre les données SIG affichées à l’utilisateur et leur stockage [ZS<sub>12</sub>] ou encore l’évaluation des outils de RA par des experts métiers [ZS<sub>12</sub>, SZR<sub>12</sub>].

La RA a aussi été testée pour permettre le design d’espaces public en ajoutant des informations numériques. Le retour des professionnels de l’aménagement ayant utilisé ce système a été qu’être sur site avec une information en RA leur a permis de mieux comprendre l’ambiance du lieu et un niveau accru d’engagement au delà de ce qui leur a été permis par le même exercice sur une vidéo augmentée du même site [MD<sub>11</sub>].

Les systèmes de RA portables sur site ont montré leur utilité pour certaines tâches du domaine de l’architecture et de la construction, particulièrement pour de la visualisation de données spatialisées en contexte et leur mise en correspondance avec la réalité. Néanmoins ces systèmes ne sont pas encore en mesure de suivre avec précision les appareils avec six degrés de liberté à grande échelle [GLZR<sub>17</sub>] ce qui constitue le verrou technique essentiel qu’il reste à lever.

#### 3.4 ORGANISATION TEMPORELLE DES TRAVAUX

La figure 3.2 présente l’organisation temporelle de mes travaux liée aux thèses que j’ai co-encadrées. Je les ai découpés en trois parties :

- Modélisation de données spatio-temporelles multi-thématiques qui est la phase amont qui va permettre de stocker des données urbaines dans des modèles qui vont supporter leurs diversités et évolutions pour ensuite permettre d’y accéder (chapitre 4),
- Géolocalisation à l’aide d’images et de données spatiales qui comme on vient de le voir est le verrou principal qui empêche de faire de la RA sur site à grande échelle (chapitre 5),
- Usages de la géolocalisation et du calcul de pose qui présente quelques usages possibles liés directement ou non aux données spatialisées urbaines (chapitre 6).

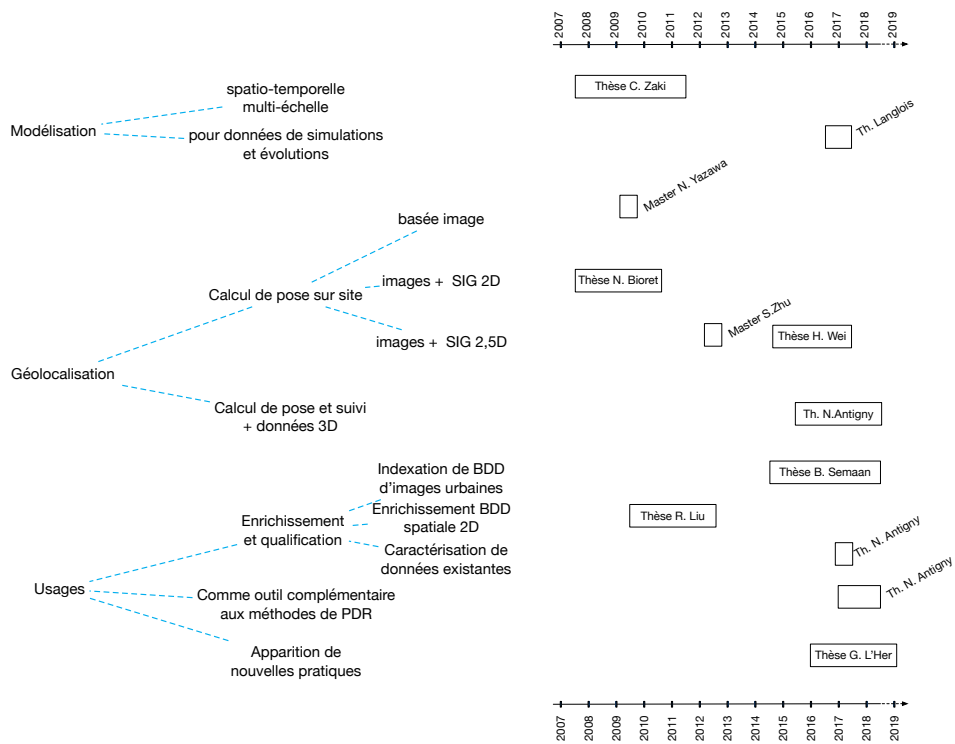


FIGURE 3.2 – Organisation temporelle des travaux.



# MODÉLISATION DE DONNÉES SPATIO-TEMPORELLES MULTI-THÉMATIQUES

## SOMMAIRE

4.1	UNE TYPOLOGIE DE DONNÉES MULTIPLES AVEC DES MODÉLISATIONS SPÉCIFIQUES . . . . .	42
4.2	UNE MODÉLISATION SPATIO-TEMPORELLE MULTI-ÉCHELLE . . .	43
4.2.1	Modélisation des changements : les <i>occurents</i> et <i>continnants</i>	43
4.2.2	Implémentation en minimisant la perte de sémantique . .	44
4.2.3	Un exemple d'application . . . . .	48
4.3	UN MODÈLE COMMUN POUR DES DONNÉES DE SIMULATIONS ET LEURS ÉVOLUTIONS TEMPORELLES . . . . .	49
4.4	CONCLUSION . . . . .	52

Dans l'idée de faire une visualisation sur site des données spatiales et une éventuelle saisie, nous avons dû nous intéresser à la manière d'organiser ces données pour prendre en compte leur diversité et stocker leurs évolutions. De plus, la saisie sur site se fait en mobilité et cette évolution du déplacement dans la ville dans l'espace et dans le temps est aussi à prendre en compte. Pour cela nous avons travaillé sur la notion de modèle spatio-temporel. En 2007, au début de cette recherche, aucun modèle existant ne nous permettait d'enregistrer les évolutions des données dans le temps, l'espace et la thématique.

Nous allons dans ce chapitre présenter rapidement les types de données adressées et les modèles conceptuels correspondants, puis nous présenterons nos travaux sur un modèle conceptuel de données répondant à nos contraintes et ce jusqu'à son implémentation. Cela sera suivi de la présentation d'un autre travail plus récent (2016) se voulant plus générique et permettant de stocker à la fois des données de simulations, leurs évolutions temporelles et différentes versions de chaque donnée.

### 4.1 UNE TYPOLOGIE DE DONNÉES MULTIPLES AVEC DES MODÉLISATIONS SPÉCIFIQUES

Les modèles de données qui permettent de stocker et manipuler des informations spatiales dans les SIG sont multiples. Les défauts majeurs

d'un SIG étaient et restent encore en partie dans la conception des données spatio-temporelles et dans la couverture incomplète de la dimension temporelle.

Les données ont différentes dimensions temporelles et spatiales et adressent différentes thématiques. Elles peuvent concerner par exemple l'évolution de la population [Ben99], les transports [Weg04], les demandes énergétiques [RTIC10, ZYL<sup>+</sup>15] ou encore les comportements piétons [SB14].

Les informations stockées sont de plus multi-résolutions, i.e. leurs représentations dépend de l'échelle à laquelle elles vont être utilisées. Par exemple, pour les données géométriques, le modèle CityGML [Kolo9], qui est une norme de l'OGC [GKNH12], permet de définir un modèle sémantique 3D avec 5 niveaux de détails (LoD) allant d'une représentation 2D jusqu'à l'intérieur des bâtiments. Il a des classes qui couvrent plusieurs thématiques comme *buildings*, *relief*, *transportation*, *landuse*, *tunnels*, *bridges*, *vegetation*, *water bodies* et *city furniture*.

Toutes ces données ont des précisions voire des imperfections différentes [DLD15].

Il existe des modèles conceptuels qui ont été étendus pour modéliser à la fois les dimensions spatiales, temporelles et thématiques des données [PSZo6, LBPo6].

Les propriétés attendues des modèles conceptuels sont [ZZS<sup>+</sup>11] :

- d'abord modéliser les dimensions spatiales des objets,
- ensuite modéliser les dimensions temporelles des objets ainsi que de leurs évolutions temporelles pour un suivi historique et une gestion des événements qui se produisent dans un domaine d'étude (interactions),
- puis permettre une orthogonalité entre les dimensions thématiques, spatiales et temporelles (i.e. qu'un choix de représentation dans une dimension ne limite pas les possibilités de choix dans les autres dimensions),
- enfin gérer la notion d'échelle et de point de vue dans toutes les dimensions, i.e. permettre la représentation de données multiples qui incluent plusieurs résolutions (échelles de cartes différentes) et de nombreux points de vue (basés sur le profil de l'utilisateur).

Ces propriétés ont déjà été prises en compte dans plusieurs approches de modélisations spatiotemporelles [PTKT04]. Ces modèles peuvent principalement être séparés en deux classes : ceux basés sur des approches Entités-Associations (EA) et ceux sur des approches Orientées Objets (OO). Ces modèles ne seront pas détaillés ici mais pour l'approche OO nous pouvons néanmoins citer STUM (*Spatio-temporal UML*) [PTJo2] et Perceptory [BLPN04] qui sont tous les deux basés sur UML. Parmi les modèles ayant une approche EA, nous pouvons citer STER (*Spatio-Temporal Entity-Relationship*) [TJ99] et MADS (Modélisation d'Applications à Données Spatio-temporelles) [PSZo6] qui servira de base aux travaux présentés dans la partie suivante.

## 4.2 UNE MODÉLISATION SPATIO-TEMPORELLE MULTI-ÉCHELLE

Ces travaux ont été réalisés pendant la thèse de Chams-Eddine Zaki (2008-2011) qui a donné lieu aux publications suivantes [ZSMo8, ZSMo9b, ZSMo9a, ZZS<sup>+</sup>10, ZZS<sup>+</sup>11, ZSM11c, ZSM11b, Zak11].

Lors de ces travaux notre but était de prendre en compte à la fois les dimensions spatiales, temporelles et thématiques des données urbaines. Nous avons comme objectif de proposer une méthodologie de modélisation des données spatio-temporelles débutant à la phase de conception jusqu'à la mise en œuvre dans un SIG.

Nous avons utilisé le modèle MADS [PSZo6] qui est dédié aux données spatio-temporelles et basé sur un formalisme entités-associations que nous avons étendu. Nous avons proposé une approche de conceptualisation qui distingue les entités physiques (*continuants*) des événements (*occurents*) particulièrement adaptée aux modélisations des évolutions des données urbaines.

### 4.2.1 Modélisation des changements : les *occurents* et *continuants*

MADS était, au moment de ces recherches, considéré comme un des meilleurs modèles spatio-temporels [PTKT04, MGDMo6]. Il permet la représentation d'entités du monde réel en tant qu'objets et associations. Pour représenter les concepts spatiaux et temporel, il possède des notations visuelles relativement intuitives [PSZo6] (figure 4.1). Il supporte l'orthogonalité entre les dimensions structurelles, spatiales et temporelles et gère efficacement plusieurs représentations de données [MGDMo6]. Enfin, il possède un langage spécifique pour interroger le modèle de données [PSZo6].

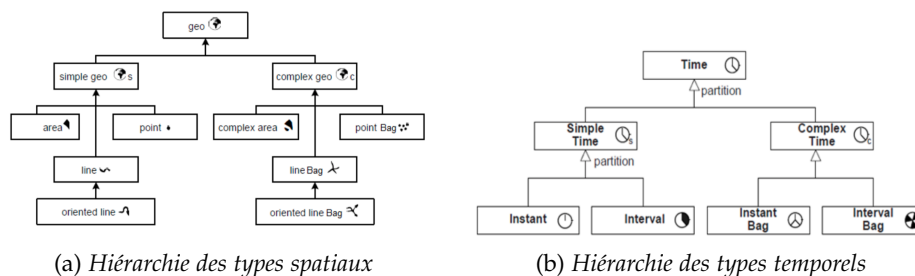


FIGURE 4.1 – Hiérarchie des types spatiaux et temporels de MADS [extrait de [Par97]].

Ces raisons nous l'ont fait utiliser comme base. Néanmoins, il ne distingue pas nativement clairement les objets physiques des événements, ni ne permet de représenter les données en 3D. Enfin, il ne prend pas en compte les données incertaines. Nous voulions, de plus, l'implémenter dans un SIG sans perte de sémantique notamment temporelle, ce qui n'avait pas été fait dans [SSMP03].

Nous avons proposé la création de deux modèles qui étendent MADS en prenant en compte la distinction entre objets et événements traduite sous les concepts d'*occurents* et *continuants*. Le modèle des *continuants* traduit les objets physiques et leurs relations et le modèle des *occurents* décrit les événements (affectant les objets) et leurs relations. Leur réunion



forme le modèle global. Nous nous sommes inspirés pour cela de Galton et Worboys [GW05] qui représentent et formalisent les relations entre les « événements » et les « états ». Un événement est relié à un autre par une relation de causalité et est lié avec des objets de telle manière qu'un événement peut changer l'état d'un objet et qu'un objet peut déclencher ou arrêter un événement (figure 4.2).

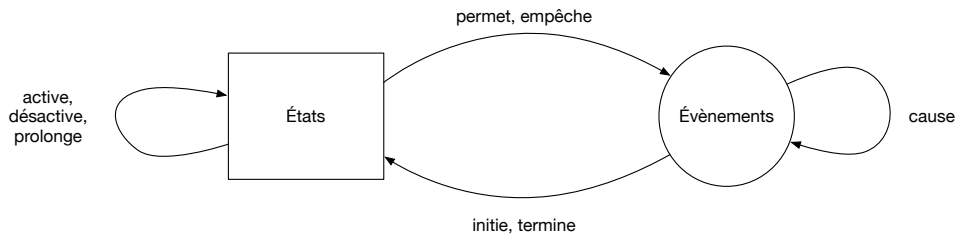


FIGURE 4.2 – Relations entre les événements et les états [traduit de [GW05]]

Ainsi nous avons dû introduire de nouveaux concepts liant les *occurents* et les *continuants* et leurs représentations associées [ZZS<sup>+</sup>11] :

- un *occurent* représente un événement et est représenté par un rectangle avec des coins arrondis,
- la relation *occurent-continuant* est représentée par une flèche allant d'un *occurent* à un *continuant* et implique la création d'un attribut « état » dans le *continuant* qui peut stocker le résultat de l'occurrence d'un ou de plusieurs événements,
- la relation *continuant-occurent* est représentée par une flèche allant d'un *continuant* à un *occurent* et implique la création d'un attribut déclencheur dans le *continuant* qui lui donne la permission de lancer (ou d'arrêter) un ou plusieurs événements.

Cette extension du modèle MADS a la propriété d'être lisible et de bien séparer les événements par une forme spécifique pour les *occurents*.

La thèse de Chams-Eddine Zaki [Zak11] a aussi détaillé une conception de types spatiaux 3D et une conception de données incertaines comme concepts supplémentaires à ajouter dans MADS mais qui ne seront pas détaillés ici.

La suite de nos travaux a consisté à la minimisation de la perte de sémantique lors de l'implémentation effective de notre modèle dans une base de données objet liée à un SIG.

#### 4.2.2 Implémentation en minimisant la perte de sémantique

La phase d'implémentation est réalisée à l'aide de procédures qui transforment les schémas conceptuels en code objet Java. La persistance des objets est assurée dans une base de données objet. Cette transformation permet d'une part de préserver la richesse sémantique du modèle conceptuel MADS en limitant la perte de sémantique lors de la traduction [ZSM11b] et d'autre part elle rend exploitable ce modèle par un SIG. L'implémentation dans un SIG est importante car un utilisateur va pouvoir utiliser ses fonctionnalités intrinsèques (5A voir 3.1.2) pour créer des requêtes sur les données existantes et visualiser les résultats via une interface graphique. C'est le modèle de données sous-jacent au SIG qui est modifié.

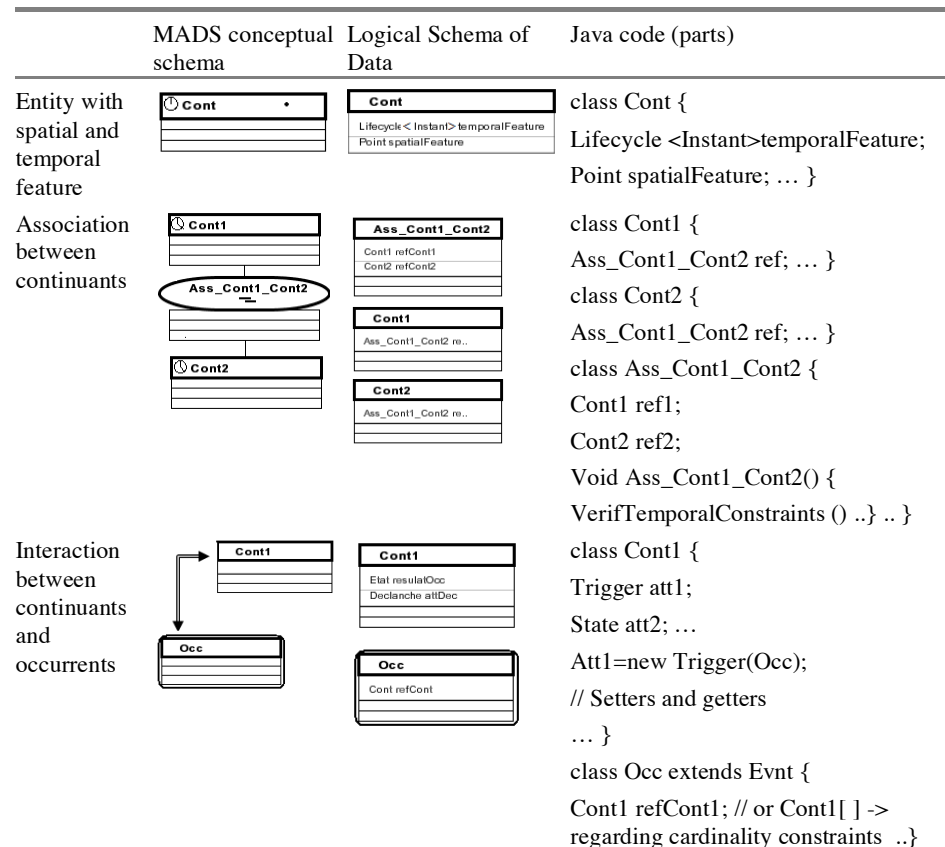


FIGURE 4.3 – Exemples de transformations du modèle conceptuel MADS en Java [extrait de [ZZS<sup>+</sup>11]].

MADS est sémantiquement plus riche que Java. Néanmoins comme MADS possède une orthogonalité entre ses dimensions structurelles, spatiales, temporelles cela nous a permis de transformer ces dimensions séparément. Nous avons proposé une traduction du modèle conceptuel MADS en code objet en passant par un modèle logique de données (figure 4.3).

La première étape de transformation de MADS dans un langage objet débute par la transformation du modèle conceptuel générique. Cela consiste à traduire les types spatiaux et temporels de MADS (figure 4.1) en classes Java génériques. Nous avons pour cela utilisé autant que possible des bibliothèques Java existantes et nous avons créé de nouvelles classes lorsque cela a été nécessaire. Ces classes constituent les classes de bases et seront les mêmes pour tous les cas d'études. Ensuite pour un schéma conceptuel modélisant une application spécifique, une structure en Java est générée de manière automatique. Les règles de transformation du modèle créant cette structure donnent un programme qui cherche à préserver, autant que possible, la sémantique du modèle MADS initial.

#### 4.2.2.1 Transformation du modèle conceptuel générique

MADS embarque les éléments habituels des modèles d'entité-relation étendus : les classes, les associations et les liens de généralisation / spécialisation. Les classes et les associations peuvent avoir des méthodes, des attributs et des clés primaires.

MADS conceptual schema	Java code (parts)
	<pre>public class Building { // constructor... Integer number; Fireplace fireplace; // method set (), get ()... Roofing roofing; class Roofing { String form; Integer tent; ...} List&lt;String&gt; owner = new ArrayList&lt;String&gt;(); List&lt;String&gt; otherName = new ArrayList &lt;String&gt;(); ...}</pre>

(a) Transformation d'attributs

MADS conceptual schema	Java code (parts)
	<pre>public class Plot { List&lt;Contains&gt; contient = new ArrayList&lt; Contains&gt;(); ...}  public class Building { Contains estContenu; ...} public class Contains { Plot plot; Building Building; ...}  public class Public_building extends Building {...} public class Private_building extends Building {...}</pre>

(b) Transformation de relations

MADS conceptual schema	Java code (parts)
	<pre>import com. Vividsolutions .jts .geom.Polygon; public class Building { Polygon spatialFeature; Polygon parking; Lighting lighting ; class Lighting { private Map &lt;Polygon, Integer&gt; value ; // methods set() et get () ...} ... }</pre>

(c) Transformation de concepts spatiaux

MADS conceptual schema	Java code (parts)
	<pre>public class Building { List &lt;lifecycle&gt; lifecycle = new ArrayList &lt;Lifecycle&gt; ; class Lifecycle{ String status; Interval time; // verification methods... }... }</pre> <pre>public class Building { M_R_spatialFeature spatialFe ature; Integer number; private String use; //set et get - conditionner class M_R_spatialFeature { private Polygon spatialFeature_s1; private Line spatialFeature_s2; //constructors, set(), get(), ...} ...}</pre>

(d) Transformation de concepts temporels

FIGURE 4.4 – Exemples de Transformations du Modèle conceptuel MADS en Java [extrait de [ZSM11b]].

Le concept de classe existe à la fois en Java et en MADS. La première règle de transformation est de remplacer chaque classe dans le schéma conceptuel MADS par une classe Java (figure 4.4 (a)).

Les attributs peuvent être simples ou composés d'autres attributs (complexes). MADS définit un ensemble de types de données simples (*Float*, *Integer*, *Boolean*, *String*, etc.) pouvant être affectés à des attributs qui seront directement traduits en leur classe Java équivalente. Ils sont optionnels ou obligatoires, mono-valués ou multivalués. Par exemple un attribut mono-valué de type simple sera directement transformé en un attribut Java avec le même nom et avec le type correspondant à son type déclaré dans MADS. La transformation d'un attribut mono-valué de type « objet » (défini par l'utilisateur) est similaire à la transformation d'un objet de type simple. Un attribut complexe à valeur unique devient une instance d'une nouvelle classe déclarée à l'intérieur de la classe principale afin de simuler cet attribut. Pour les ensembles de valeurs multiples, MADS définit les *collections*, les *lists*, les *sets* et les *bags* [PSZ06] et Java les classes *Collection*, *Set*, *List* et *TreeList*. Nous avons donc mis en correspondance respectivement *collection*, *set*, *bag* et *list* de MADS avec les classes *Collection*, *HashSet*, *ArrayList* et *TreeList* de Java pour les attributs pouvant prendre plusieurs valeurs.

Un attribut variant dans l'espace est un attribut dont la valeur dépend d'une localisation spatiale quel que soit son type (*int*, *string*, etc.) ou ses

caractéristiques (mono-valuées, multivaluées). Il sera simulé en tant qu'objet complexe à valeurs multiples contenant deux sous-attributs (un sous-attribut spatial et une valeur). Un attribut qui varie au cours du temps a aussi deux sous attributs (une valeur et un élément temporel de type intervalle ou instant). Un attribut variant dans l'espace et/ou dans le temps devient une instance d'une nouvelle classe déclarée à l'intérieur de la classe principale afin de simuler cet attribut.

Nous nous sommes intéressés aux relations les plus utilisées : l'association et la généralisation. Une association relie plusieurs classes, chacune jouant un rôle dans cette association. Une relation d'association dans MADS est transformée en une classe Java (figure 4.4 (b)). Si l'association contient des attributs, les règles de transformations sont les mêmes que celles décrites pour les classes. Pour une classe participant à une association, cette association peut être simulée par un attribut avec une cardinalité égale à la cardinalité portée par le rôle qui lie la classe à l'association. Le concept de « généralisation » entre classes et associations de MADS est directement traduit dans le mécanisme d'héritage entre classes en Java (figure 4.4 (b)).

#### 4.2.2.2 Transformation des dimensions spatiales et temporelles de MADS

Nous n'avons pas pu créer un équivalent exact de tous les types spatiaux MADS (figure 4.1 (a)) car nous nous sommes basés sur la bibliothèque spatiale « *Java Topology Suite (JTS)*<sup>1</sup> » pour faire une correspondance directe entre les types spatiaux de MADS et les classes JTS. Les équivalences choisies sont présentées figure 4.5. Néanmoins, il y avait dans MADS des types qui n'avaient pas d'équivalent dans JTS (comme par exemple « *SimpleGeo* » et « *OrientedLine* »).

Type MADS	Classe JTS	Type MADS	Classe JTS
Geo	↔ Geometry	ComplexeGeo	↔ GeometryCollection
SimpleGeo	↔ Geometry	PointBag	↔ MultiPoint
Point	↔ Point	LineBag	↔ MultiLineString
Line	↔ LineString	OrientedLineSet	↔ MultiLineString
OrientedLine	↔ LineString	SurfaceBag	↔ MultiPolygon
Surface	↔ Polygon	SimpleSurfaceBag	↔ MultiPolygon
SimpleSurface	↔ Polygon		

FIGURE 4.5 – Correspondance entre les types spatiaux de MADS et les classes JTS [extrait de [ZSM11b]].

Les types temporels MADS sont utilisés pour préciser des dates précises (instants, intervalles, etc.) (figure 4.1 (b)), le cycle de vie des objets ou l'évolution temporelle des attributs spatiaux et thématiques.

Contrairement aux types spatiaux, il n'existait pas de bibliothèque Java existante pouvant prendre en compte les types de cycles de vie décrits en MADS. Nous avons donc développé des classes génériques pour simuler tous les types temporels MADS. Les classes que nous avons créées sont sémantiquement équivalentes et portent les mêmes noms que les types temporels MADS (« *Instant* », « *Interval* », « *SimpleTime* », etc.).

1. <https://github.com/locationtech/jts> (consulté le 25/06/2018)

Ces types temporels ou spatiaux peuvent être assignés à une classe, à une association ou à un attribut, ce qui encore amène à des transformations différentes selon les cas [ZZS<sup>+</sup>11] (figure 4.4 (c) et (d)).

Les contraintes topologiques et temporelles de MADS ont été traduites par des méthodes dans les classes correspondantes [ZSM11a].

### 4.2.3 Un exemple d'application

L'ensemble des transformations présentées précédemment créent des classes génériques qui contiennent l'équivalent de chaque schéma conceptuel MADS en langage objet. Elles préservent la sémantique du schéma conceptuel car les contraintes sont mises en œuvre sous la forme de méthodes de classe appelées automatiquement en cas de manipulation de données.

Pour éprouver notre modélisation nous l'avons appliquée à un cas d'étude réel dont l'objectif était d'analyser les déplacements piétons dans les zones urbaines en fonction de l'influence de facteurs micro-climatiques (vent, lumière radiative, éclairage, etc.). Les résultats de cette étude ont été présentés dans [ZZS<sup>+</sup>11].

La première étape de ce travail a été de créer un schéma conceptuel basé sur MADS pour représenter ce cas d'étude avant de le traduire.

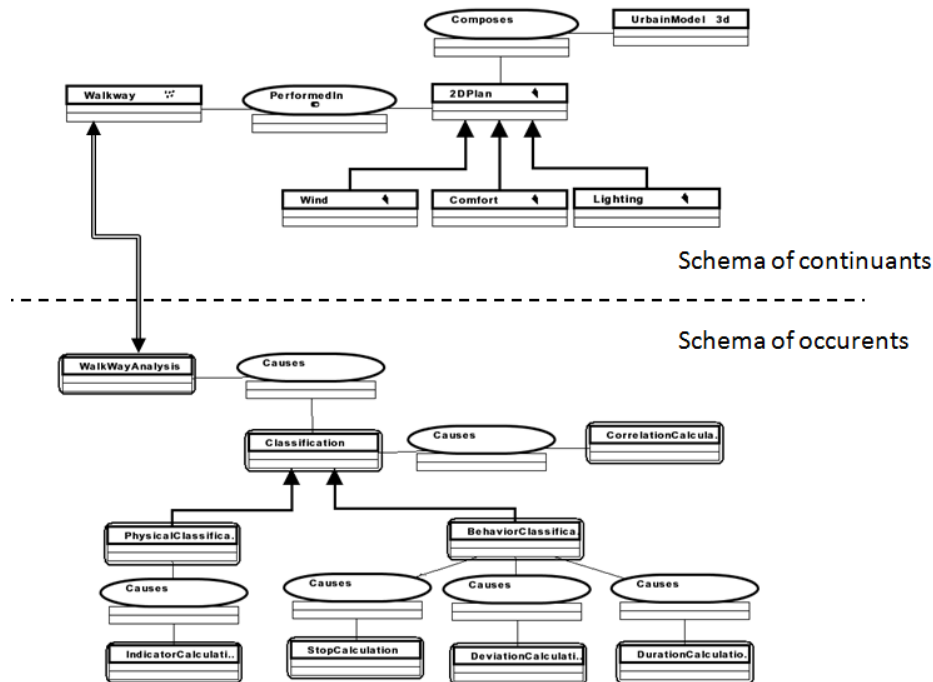


FIGURE 4.6 – Modèle conceptuel pour l'analyse des déplacements piétons dans les zones urbaines vis à vis de l'influence de facteurs micro-climatiques [extrait de [ZZS<sup>+</sup>11]].

Ce modèle fait bien la différence entre le « support » des déplacements qui sont décrits dans la partie *continuants* de la figure 4.6 et les analyses qui sont décrites dans la partie *occurents* de la figure 4.6. L'algorithme de classification utilisé est implémenté dans la classe *Classification* qui est la classe mère de deux types de classifications *PhysicalClassification* et *BehaviorClassification*. L'événement *Classification* est lancé par l'événement *WalkwayAnalysis*.

La classe *CorrelationCalculation* permet de calculer les coefficients de corrélation entre les classes de microclimats et les classes comportementales préalablement établies. Entre les classes *Classification* et *CorrelationCalcul* l'association de causalité *Cause* permet d'assurer que l'exécution des deux occurrences de *Classification* a été faite avant d'effectuer l'appel à l'occurrence de *CorrelationCalcul*.

Le modèle conceptuel présenté ici (et son implémentation) modélise à la fois les dimensions spatiales, temporelles et thématiques des données ainsi que leurs contraintes temporelles et spatiales et peut stocker l'évolution d'une donnée spatio-temporelle.

La partie suivante veut aussi travailler sur un modèle qui cherche à être le plus générique possible.

### 4.3 UN MODÈLE COMMUN POUR DES DONNÉES DE SIMULATIONS ET LEURS ÉVOLUTIONS TEMPORELLES

*Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec l'entreprise ForCity Platform et Gilles Gesquière (LIRIS) et publiés dans [LTS<sup>+</sup>16] dans le cadre de la thèse Cifre de Jean-Gils Langlois.*

Le but de ces travaux était de définir un modèle de données assez générique pour être partagé par le plus grand nombre possible de modèles de simulation ou d'analyse. Nous voulions aussi qu'il puisse servir de pivot pour permettre différents usages (autres types de simulations, visualisations de données, analyses, etc.).

Nous voulions un modèle interopérable définissant des objets réutilisables (par exemple le même objet « immeuble » à travers plusieurs simulations). En d'autres termes et pour faire le lien avec la partie précédente, nous voulions différencier les *occurents* et les *continuant*s en partageant le même *continuant* par plusieurs *occurents*. Le même objet doit être utilisable indifféremment par tous les modèles de simulation et doit être personnalisable pour répondre à des scénarios d'usages spécifiques, par exemple modéliser un réseau ou stocker des données statistiques.

Nous nous sommes pour cela inspiré du mécanisme d'ADE (*Application Domain Extensions*) de CityGML [Kolo9]. Les ADE sont utilisés pour modéliser des objets et des attributs qui ne sont pas couverts par le modèle de données de base de CityGML.

En nous inspirant de ce mécanisme, nous avons proposé le modèle présenté figure 4.7.

La classe de base du modèle proposé est *City Object* qui a une description spatiale et temporelle et sera la classe mère de toutes les autres classes décrivant des objets urbains. Sa description se veut assez générique pour représenter n'importe quel objet urbain. Un *City Object* peut ne pas avoir de géométrie si il spécifie un concept abstrait comme une organisation ou stocke des données statistiques. Si il possède une géométrie elle peut être 2D ou 3D. Il a une période de validité dans le temps. Enfin, un *City Object* est composé de plusieurs attributs sémantiques. Ces attributs peuvent avoir différentes formes, des types simples (booléen, nombre ou chaîne de

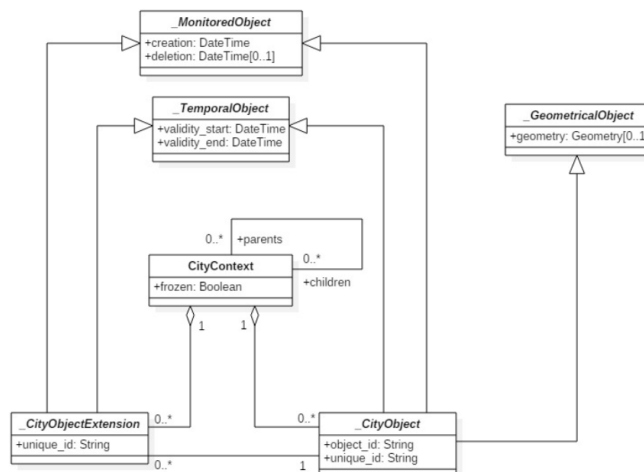


FIGURE 4.7 – Représentation UML des classes de bases du modèle proposé [extrait de [LTS<sup>+</sup>16]].

caractères) ou plus complexes. Un *City Object* est identifié par un *Object ID* et un *UID* unique. Deux *City Objects* ne peuvent avoir le même *Object ID* que si leurs périodes de validité respectives ne se chevauchent pas. Dans ce cas, cela signifie que ces deux *City Objects* sont des versions du même objet à des moments différents. Chaque objet possède également un *UID* qui ne peut pas être dupliqué.

La classe *City Object Extension* permettra l’ajout d’une dimension thématique aux objets pour les spécialiser. Elle aura une description spatiale. Un *City Object Extension* doit être lié à un *City Object*. Plusieurs extensions peuvent être liées au même objet urbain. Un *City Object Extension* a sa propre période de validité qui elle doit être contenue dans la période de validité du *City Object* auquel elle étend. Elle peut être identique ou plus courte que la période de validité du *City Object* auquel elle est liée. Comme un *City Object Extension* est liée à un *City Object*, le *City Object* référencé sert d’identification et les *City Object Extensions* ne possèdent pas d’identifiants propres.

Toutes ces classes sont ensuite agrégées dans un *City Context* qui est versionné selon un mécanisme similaire à celui des systèmes de contrôle de versions. Un *City Context* est un objet qui représente l’espace urbain étudié. Les *City Object Extensions* ne peuvent étendre que les *City Objects* qui appartiennent au même *City Context*. Un *City Context* peut être dérivé d’un autre (*fork*) ou deux *City Context* peuvent être fusionnés (*merge*). Il peut aussi être « gelé » à un instant donné et ainsi ne plus pouvoir être modifié à moins d’en faire une version dérivée. Quand un *City Context* est dérivé tous ses *City Objects* et *City Context Extensions* sont dupliqués et conservent le même *Object ID*. Par conséquent, il est facile d’identifier et de comparer deux objets ou extensions appartenant à deux contextes différents. On peut ainsi créer des applications qui pour chaque scénario sur une ville a un *City Context* différent (figure 4.8).

Une implémentation de ce modèle a été réalisée en utilisant une base de données PostGIS et une API REST pour y accéder. Coté client, un ensemble d’outils Python ont été développés pour permettre l’interrogation du modèle et la création de modèles de simulations.

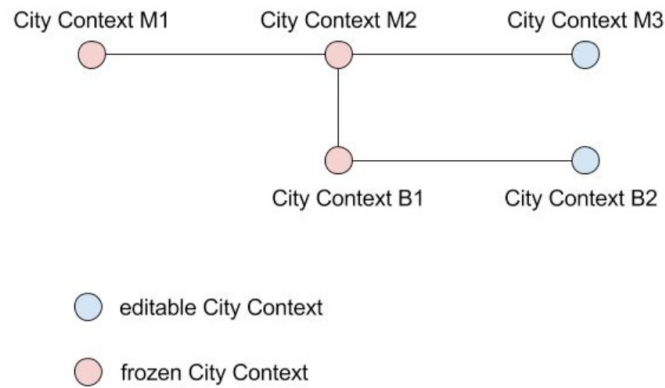


FIGURE 4.8 – Exemple d’une application avec deux scénarios et donc deux City Context [extrait de [LTS<sup>+</sup>16]].

Nous avons dérivé ce modèle pour plusieurs cas d’utilisations présentés dans [LTS<sup>+</sup>16]. Par exemple, la figure 4.9 montre un objet *Building* spécialisé avec trois extensions donnant des informations sur la consommation d’énergie, les habitants et l’occupation du bâtiment. Les classes *Building*, *Population*, *Occupancy* et *EnergieConsumption* héritent de *\_CityObject* ou *\_CityObjectExtension* et ainsi possèdent une période de validité. Seul *Building* qui hérite de *\_CityObject* possède une géométrie. Cette modélisation pourrait servir à un modèle de simulation pour évaluer les besoins en énergie en fonction du nombre d’habitants et de leur présence.

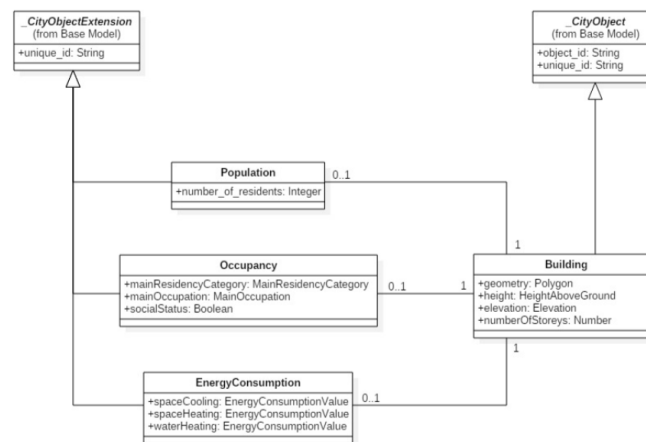


FIGURE 4.9 – Exemple d’une classe *Building* et de trois extensions héritant de *CityObject* et *CityObjectExtension* [extrait de [LTS<sup>+</sup>16]].

Ce modèle était une première ébauche de ce que pourrait être un modèle de données spatio-temporel urbain permettant à la fois le versionnement et la simulation. Il manque néanmoins encore ici la possibilité de décrire les contraintes temporelles, spatiales et thématiques sur les relations entre les objets du modèle de données.

## 4.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté brièvement nos contributions dans la création de deux types de modèles spatio-temporel dédiés aux



données urbaines qui devaient nous permettre d'accéder à cette donnée et l'enrichir sur site. Nous allons maintenant présenter le cœur de notre travail qui est la localisation et le calcul de pose sur site.

# GÉOLOCALISATION À L'AIDE D'IMAGES ET DE DONNÉES SPATIALES

## SOMMAIRE

5.1	MOTIVATIONS POUR UNE GÉOLOCALISATION SUR SITE À PARTIR D'IMAGES ET DE DONNÉES SPATIALES . . . . .	53
5.1.1	Une nécessité à calculer la pose d'une prise de vue sur site	53
5.1.2	Des informations GNSS et IMMU insuffisantes . . . . .	54
5.1.3	Des données SIG imprécises . . . . .	55
5.1.4	Positionnement et suivi du piéton . . . . .	55
5.2	CALCUL DE POSE SUR SITE . . . . .	56
5.2.1	Localisation basée image . . . . .	56
5.2.2	Géolocalisation par images en s'appuyant sur un SIG 2D .	58
5.2.3	Géolocalisation par images en s'appuyant sur un SIG 2,5D	63
5.3	CALCUL DE POSE ET SUIVI DU DÉPLACEMENT SUR SITE . . . . .	70
5.3.1	Localisation par fusion de données image et inertielle . . .	70
5.3.2	Suivi du déplacement . . . . .	77
5.4	CONCLUSION . . . . .	79

Nous commençons dans ce chapitre par indiquer nos motivations soutenant l'utilisation des données spatialisées de différentes dimensions croisées avec des caractéristiques extraites des images pour la géolocalisation du piéton. Nous détaillons ensuite les méthodes développées, classées en fonctions des données qu'elles utilisent en entrée (données spatiales 2D, 2,5D et 3D). Nous finissons par une méthode qui fusionne des données issues de capteurs à bas coût, vision et inertiels.

## 5.1 MOTIVATIONS POUR UNE GÉOLOCALISATION SUR SITE À PARTIR D'IMAGES ET DE DONNÉES SPATIALES

### 5.1.1 Une nécessité à calculer la pose d'une prise de vue sur site

Un SIG permet de regrouper des informations géoréférencées sur la ville. Les opérateurs des collectivités ou privés qui travaillent sur le terrain font de constants allers-retours entre la donnée présente dans leur système de gestion et la réalité terrain.

Pour pouvoir détecter des incohérences entre réalité et données géographiques et enrichir le SIG, une solution est de permettre une visualisation sur site des informations contenues dans le SIG et ainsi par comparaison au monde réel, permettre une mise à jour. Cet usage est typiquement une application de réalité augmentée comme décrit dans la partie 3.3.3. Néanmoins, la mise en correspondance en 3D entre le monde réel est le monde virtuel voulu par la RA [Azu97] nécessite de connaître la pose (la position et l'orientation) du centre optique de la caméra permettant la prise de vue qui sera ensuite augmentée. Selon les usages, les techniques pour se repérer dans le monde réel sont diverses.

Nous avons évoqué dans la partie 3.1.3 l'utilisation possible d'informations extraites d'images urbaines pour mettre à jour et enrichir les données d'un SIG (urbain). Ces extractions et un croisement de ces informations avec celles extraites d'un SIG peuvent aussi nous permettre de nous positionner et nous orienter dans l'espace avant d'utiliser cette position pour mettre à jour une information spatiale.

Nous nous plaçons ici dans un schéma d'enrichissement continu des données géoréférencées entre mobilité spatiale et mobilité informationnelle, captation/visualisation sur site et lien à la base de données spatialisée dont le positionnement piéton est la clé.

### 5.1.2 Des informations GNSS et IMMU insuffisantes

Le positionnement en milieu urbain souffre d'une idée reçue assez répandue comme quoi l'information de position donnée par GNSS<sup>1</sup> est précise. Or pour de la localisation sur site en milieu urbain, et *a fortiori* pour des application en RA, elle est très insuffisante pour plusieurs raisons. D'abord, un système GNSS ne donne que la position avec une erreur d'environ 5 m sous ciel ouvert pour les GPS standard embarqués dans les smartphones [Nat17]. En milieu urbain dense, cette précision est altérée par les phénomènes de diffraction, réflexion, atténuation [BMELW11].

Pour augmenter la précision, il est possible d'utiliser un GNSS différentiel qui utilise un réseau de stations fixes de référence qui transmet l'écart entre les positions indiquées par les satellites et leurs positions réelles connues et donne une précision inférieure à 10 cm.

Les signaux GNSS ne sont pas toujours disponibles, même en travaillant avec plusieurs constellations ce qui généralement améliore la disponibilité. Par exemple, sur un parcours urbain 2,9 km sur l'île de Nantes (figure 5.1), un récepteur GNSS bas coût qui n'utilise que les signaux satellitaires GPS a eu une disponibilité de 63% avec un écart type de 30 m et un récepteur GNSS différentiel de référence (Septentrio qui utilise les signaux satellitaires GPS et GLONASS<sup>2</sup>) a eu une disponibilité de 75 % avec un écart type de 21 m.

L'orientation peut être donnée par les capteurs IMMU<sup>3</sup> embarqués. Mais les capteurs inertiels bas coût imprécis intégrés aux *smartphones* dérivent. [MGFL18] a proposé un *benchmark* très détaillé sur la précision de la rotation que l'on peut obtenir à partir des capteurs inertiels et magné-

1. *Global Navigation Satellite System* : système de positionnement par satellites

2. Système de positionnement par satellites russe.

3. *Inertial and Magnetic Measurement Unit* : centrales inertielle et magnétiques

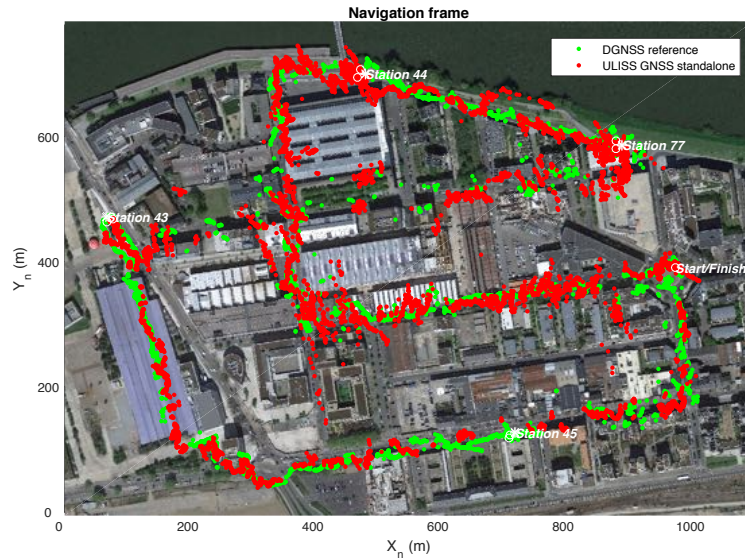


FIGURE 5.1 – Traces GNSS sur un chemin de 2.9 km. La trace du récepteur GPS (ULISS) est représentée en rouge et celle du GNSS différentiel (DGNSS) en vert [extrait de [ASR17b]].

tiques embarqués dans un *smartphone* compte tenu des différentes perturbations subies. Par exemple la dérive peut aller de  $5^\circ/\text{min}$  à  $20^\circ/\text{min}$  pour des gyroscopes non calibrés. En présence de perturbations magnétiques, ce qui est le cas en milieu urbain, [MGFL18] montre qu'il a au mieux une précision de  $5.3^\circ$  lors d'un déplacement en tenant le téléphone en mode *texting*.

### 5.1.3 Des données SIG imprécises

Pour permettre le lien au SIG sur site, nous cherchons à obtenir les coordonnées géographiques du point de prise de vue (i.e. du centre optique de la caméra) et l'orientation de la caméra dans un repère lié au monde. Nous allons nous positionner par rapport à un bâtiment à la position géographique connue en travaillant dans un système de coordonnées 3D cartésien avec l'hypothèse de la terre localement plane. Pour se positionner par rapport à un bâtiment nous avons besoin de déterminer une transformation rigide  $[\mathbf{R}, \mathbf{t}]$ . C'est un problème difficile car nous travaillons en environnement non contrôlé (lumière, météo, objets mobiles, obstacles...) et à cause de l'inexactitude des données SIG qui ne sont pas à jour, sont incomplètes (figure 5.2) ou même fausses (figures 5.3a et 5.3b) [DLD15].

### 5.1.4 Positionnement et suivi du piéton

Nous nous sommes principalement intéressés à la détermination de la pose initiale à partir d'un ensemble d'amers visuels et de données géométriques spatialisées préexistantes dans un SIG et dans une moindre mesure au suivi du déplacement piéton. Tous les travaux suivants ont été réalisés en prenant l'hypothèse d'un point de vue immergé dans l'espace urbain, un point de vue piéton.

Nous allons présenter nos travaux de géolocalisation image-SIG sur site selon le type de données spatiales utilisées :

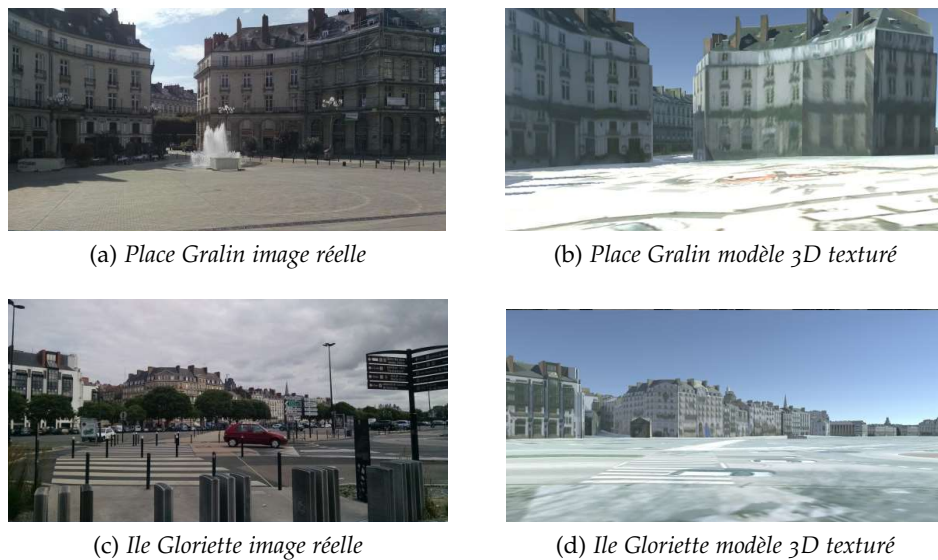


FIGURE 5.2 – Comparaison d'une photo de la place Graslin (a) et de l'Ile Gloriette (c) à Nantes et du rendu de la maquette CityGML LoD 3 texturée obtenue dans l'outil logiciel Unity (resp. b et d). Les points de vue et conditions de prises de vue sont approximativement identiques entre le modèle numérique et la photo [extrait de [SL15]].

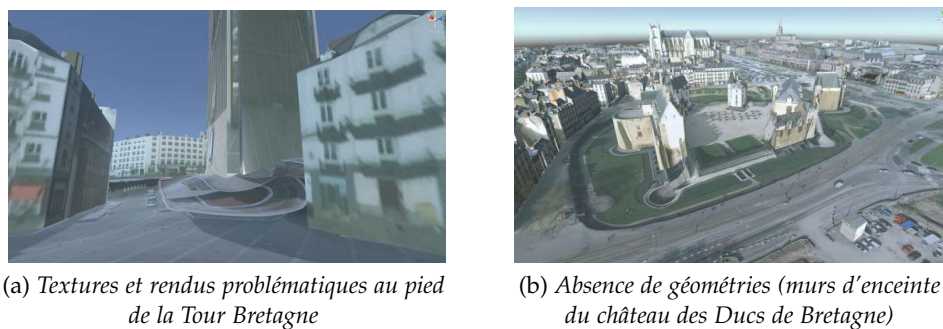


FIGURE 5.3 – SIG3D faux [extrait de [SL15]].

- pas de SIG : comparaison d'images, sortie : calcul de pose,
- SIG 2D + image (ou vidéo) : aucune donnée 3D utilisée, uniquement emprises au sol (figure 5.4a) et une information de localisation grossière, sortie : calcul de pose
- SIG 2.5D + image : seule la hauteur des bâtiments est utilisée (figure 5.4b) et une information de localisation grossière, sortie : calcul de pose
- SIG 3D + vidéo + capteurs inertiels : un modèle 3D plus complet est fourni (figure 5.4c) et utilisation de capteurs inertiels, sorties : calcul de pose et suivi.

## 5.2 CALCUL DE POSE SUR SITE

### 5.2.1 Localisation basée image

*Le travail présenté dans cette section a été réalisé pendant la thèse de master de Naoyuki Yazawa à Keio. Ce master a été co-encadré par Guillaume Moreau et moi*

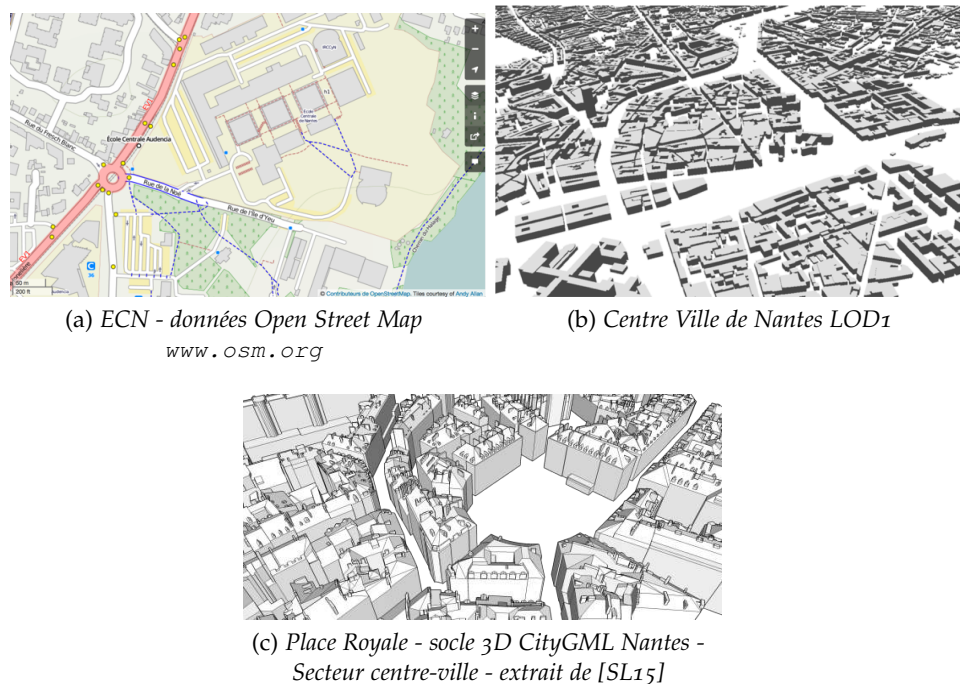


FIGURE 5.4 – Exemples de données SIG.

pour la partie française et par Hideo Saito et Hideaki Uchiyama à Keio. Ce travail a fait partie de nos collaborations avec l'équipe du professeur Saito de 2007 à 2011.

Une première méthode pour se localiser sur site est d'utiliser une base de données d'images panoramiques géo-référencées au préalable pour pouvoir ensuite trouver sa localisation. Dans [YUS<sup>+</sup>09] nous avons proposé un système d'estimation de la position et de l'orientation d'un utilisateur à l'aide de la prise de vue d'une image. Cette image était ensuite mise en correspondance avec une image panoramique extraite de la base de données.

Nous sommes partis de l'hypothèse que l'utilisateur avait une position GPS connue avec une erreur au pire de 1 km. Nous avons acquis des panoramiques sur site aux carrefours sur une zone de 400 m × 1100 m (104 panoramiques). Pour chacun d'entre eux nous avons extrait les points SURF [BETV08] au préalable et nous les avons stockés dans la base.

Un résumé de l'algorithme est présenté figure 5.5. Ensuite, pour chaque image à localiser nous avons extrait les points SURF et les avons comparés avec ceux extraits des panoramiques. Le panoramique qui a le plus de points de correspondance est retenu comme point de vue de l'utilisateur. Pour obtenir l'orientation de l'utilisateur, nous avons calculé l'homographie (avec un processus RANSAC [FB81]) entre l'image requête et le panoramique retenu.

Pour des images requêtes capturées à la même position que les panoramiques la précision de la position obtenue était de 100% et la différence entre l'orientation calculée et l'orientation réelle était en moyenne 1,2° (figure 5.6a). Ensuite les images requêtes ont été capturées entre 1 m et 10 m du point de capture du panoramique pour évaluer la robustesse la méthode (figures 5.6b). Comme SURF est robuste au changement d'échelle,

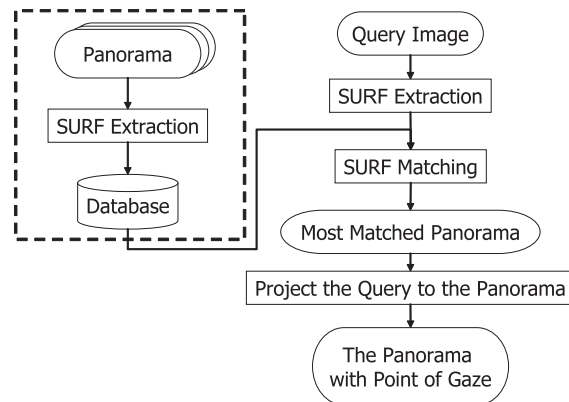
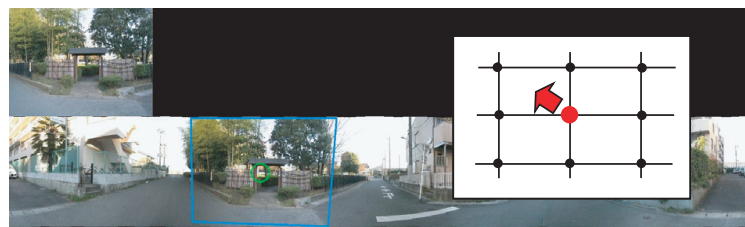
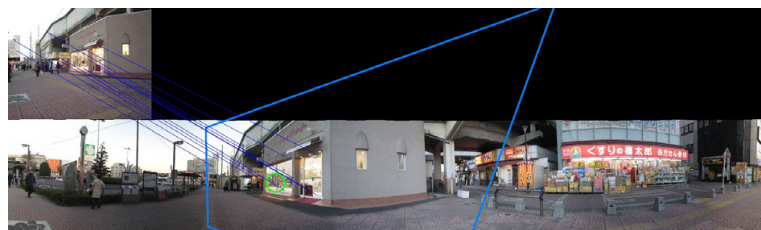


FIGURE 5.5 – Résumé de l’algorithme de localisation. [extrait de [YUS<sup>+</sup>09]].

nous avons eu de relativement bons résultats mais autour de 8 m d’écart l’estimation a échoué à cause du trop grand changement d’échelle.



(a) Image prise au point d’acquisition du panoramique



(b) Image prise à 7 m du point d’acquisition du panoramique

FIGURE 5.6 – Exemple de résultats. Le cercle vert sur le panoramique représente la re-projection du centre de l’image requête. [extrait de [YUS<sup>+</sup>09]].

Nous avons aussi fait des acquisitions d’images requêtes de nuit alors que les panoramiques avaient été acquis de jour. Dans ce cas si la rue est éclairée le taux de succès augmente sinon l’évaluation échoue.

En 2009 cette approche était relativement nouvelle, même si elle ne donnait qu’une position approximative mais une orientation assez fiable. Le même type d’approche a depuis été largement utilisé, que ce soit à base de panoramiques localisés ou d’images. Par exemple [ZS10] s’est repéré en utilisant des images requêtes et des points SIFT [Low99] dans des images Google Street Map.

Néanmoins les méthodes basées un appariement entre une base d’images et une image requête souffrent de deux inconvénients majeurs qui sont la constitution de la base de départ et son maintien à jour. Nous avons donc abandonné ce type d’approche pour ces raisons.

## 5.2.2 Géolocalisation par images en s'appuyant sur un SIG 2D

*Les travaux présentés dans cette partie ont été réalisés pendant la thèse de Nicolas Bioret [BMS08b, BMS08a, BMS09c, BMS09a, BMS09b, BMS10] (2007-2010).*

Nous avons développé une méthode de calcul de la pose initiale d'une caméra sur site par mise en correspondance de données images avec des données vectorielles issues d'un SIG2D.

Au début de ce travail en 2007, la donnée vectorielle la plus répandue était une donnée vectorielle 2D, l'emprise au sol des bâtiments (figure 5.4a). Les données *OpenStreetMap* étaient encore peu répandues et nous nous sommes basés sur les données du cadastre français fournies par l'IGN dans la BDTopo. Ces données ont d'ailleurs été incluses dans OSM en 2009<sup>4</sup>. Il existait en 2007 des modèles 3D vectoriels de bâtiments mais la couverture de la plupart des villes restait limitée à certains quartiers et à quelques bâtiments remarquables. La situation à ce point de vue a beaucoup évolué ces dernières années comme précisé dans la partie 3.1.1.

### 5.2.2.1 Méthodologie

Nous travaillons en utilisant un ensemble d'hypothèses de départ, outre la connaissance d'une information SIG2D sur la zone d'intérêt. Nous supposons avoir une information grossière de la position de l'utilisateur donnée par un GPS. Cette position peut être remplacée par une indication de cet utilisateur sur sa position approximative. Nous travaillons dans une zone de 1 km de rayon autour de cette position. Nous supposons que les façades photographiées sont verticales, bien visibles dans l'image et associées à un point de fuite vertical (le même pour toutes les façades) et un point de fuite horizontal (identifiable dans l'image). Les façades sont limitées soit par le cadre de l'image soit par des arrêtes verticales que nous pouvons identifier. Nous supposons que nous pouvons obtenir une information sur la relation de voisinage entre deux façades voisines à partir d'analyses de l'image.

Nous utilisons pour modéliser la caméra un modèle de caméra sténopé et supposons la caméra calibrée et les images corrigées des distorsions radiales.

À partir de ces hypothèses, pour calculer la pose nous suivons la méthodologie suivante :

1. extraire de l'image les éléments caractéristiques de la géométrie de la scène (points de fuite et arêtes verticales séparant des façades voisines),
2. établir les relations de voisinage entre les différentes zones de façades identifiées pour permettre une reconstruction 3D partielle de la scène,
3. calculer les rapports de longueurs et les angles entre les différentes façades de la scène, ainsi que les incertitudes sur ces rapports de longueurs et angles,

---

4. L'autorisation officielle de décalquer les données du cadastre français au format raster dans OSM a été donné par la Direction Générale des Finances Publiques en début d'année 2009 <https://fr.wikipedia.org/wiki/OpenStreetMap>



4. à partir de ces derniers éléments, faire une requête dans le SIG pour extraire des correspondances possibles entre le SIG et l'image et calculer toutes les poses possibles résultantes,
5. filtrer ces poses possibles à l'aide d'hypothèses supplémentaires.

L'utilisation de ces hypothèses et de tolérances permet de s'assurer que la correspondance restante est la pose exacte, sauf dans les cas où le SIG n'est pas à jour.

### 5.2.2.2 Extraction de la géométrie à partir d'une image

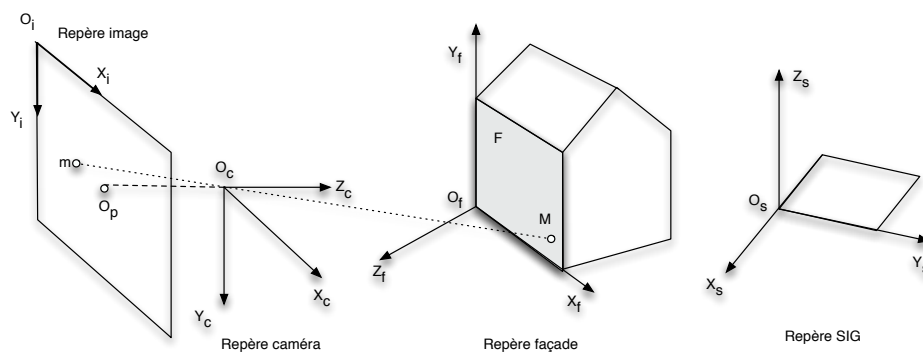


FIGURE 5.7 – Repères utilisés pour faire le calcul de pose à partir d'une image de façades et d'un SIG 2D. [adapté de [BMS09b]].

Les repères utilisés pour faire le calcul de pose à partir d'une image de façades et d'un SIG 2D sont le repère lié à l'image  $\mathcal{R}_i$  dont les axes  $X_i$  et  $Y_i$  sont parallèles et dans le même plan que les axes  $X_c$  et  $Y_c$  du repère  $\mathcal{R}_c$  lié au centre optique de la caméra  $O_c$ , les repères  $\mathcal{R}_f$  liés à chaque façade verticale et enfin un repère de référence lié au SIG  $\mathcal{R}_s$  (figure 5.7).

Ces repères sont liés entre eux par un ensemble de relations que nous avons calculées à partir des informations extraites des images, de la calibration de la caméra et de requêtes dans le SIG.

Pour déterminer l'orientation d'une façade à l'aide d'une image nous sommes partis d'images de façades prises selon une orientation naturelle et nous avons calculé à partir des coordonnées d'un point d'intérêt dans le repère image, les coordonnées correspondantes dans les autres repères. C'est un problème inverse avec plusieurs solutions que nous avons réduit en utilisant les hypothèses faites sur la scène 3D (façades perpendiculaires au sol et existence de points de fuites horizontaux et d'un point de fuite vertical). Nous avons utilisé la détection des points de fuite [KJG09] pour déterminer l'orientation  $\theta_{F\mathcal{R}_c}$  de la façade  $F$  dans le repère caméra  $\mathcal{R}_c$  [BMS09c, BMS09a, BMS09b].

Nous avons pu ainsi déterminer l'angle  $\theta_{F_2F_1}$  entre deux façades voisines  $F_1$  et  $F_2$  autour d'un axe vertical orienté vers le haut à partir de celui de chacune des façades dans  $\mathcal{R}_c$  [BMS09c, BMS09a, BMS09b].

Nous avons calculé le rapport de longueur entre deux façades voisines visibles dans l'image à l'aide de la géométrie projective [BMS09c, BMS09a, BMS09b].

Le calcul de pose se décompose en calcul de position de la caméra dans le repère façade puis calcul de la position de la caméra dans le repère SIG

en utilisant une mise en correspondance entre le repère SIG et le repère façade. Pour cela nous avons utilisé 2 points en correspondance entre le repère façade et l'image et 2 points en correspondance entre le repère SIG et le repère façade (intersection des limites gauches et droites des façades avec le plan horizontal) [BMS09c, BMS09a, BMS09b]. On ne se préoccupe pas de l'altitude de la caméra dans le repère SIG puisque nous travaillons avec un SIG 2D.

### 5.2.2.3 Calculs des incertitudes

En pratique il y a des erreurs de mesure dans les images, mais les différentes mesures étant considérées comme indépendantes, nous avons modélisé ces erreurs par une distribution gaussienne [CRZ97]. Expérimentalement nous avons établi que les erreurs sur les variables d'entrée peuvent être modélisées comme des gaussiennes particulièrement lorsque les points de fuite considérés sont suffisamment éloignés du point principal. Plus de détails sur la détermination des erreurs se trouvent dans [BMS08b].

### 5.2.2.4 Requêtes dans le SIG

En partant d'une reconstruction sous forme de façades verticales, nous cherchons à apparier chaque façade avec un ensemble de segments de la couche « bâti » du SIG. Nous avons simplifié la couche « bâti » du SIG à notre disposition pour supprimer toutes les arrêtes non visibles de la rue et fusionner les bâtiments ayant des arrêtes en commun. Ensuite tous les vides dans les polygones résultants sont comblés (figure 5.8).



FIGURE 5.8 – Exemple d'une zone de la couche « bâti » du SIG avant (gauche) et après (droite) préparation [extrait de [BMS08b]].

Les données géométriques extraites des images associées à des incertitudes de mesures (tolérances sur les longueurs de façades et leurs angles) permettent de requêter cette couche « bâti » modifiée. Les extractions des informations des images dans ces travaux étaient manuelles.

De manière générale nous recherchons des n-uplets de segments  $(s_1, \dots, s_n)$  où chaque couple de segments  $(s_i, s_{i+1})$  vérifie des contraintes de rapports de longueurs et d'angles entre les façades voisines visibles sur l'image. Cette requête est faite dans un rayon d'1 km autour de la position probable de l'image que l'on suppose donnée par un GPS.

On obtient en résultat de cette première requête l'ensemble des poses possibles pour la caméra qui doit contenir la vraie pose (figure 5.9). Il

existe néanmoins une incertitude sur la position et l'orientation de la caméra, qu'il est difficile d'évaluer car elle dépend de l'exactitude des données SIG que l'on considère d'une précision métrique.

De plus, plus les tolérances sont hautes, plus le nombre de poses possibles renvoyées par la requête dans le SIG est grand [BMS08b]. Les façades avec des angles classiques ( $90^\circ$  et  $180^\circ$ ) renvoient le plus de poses multiples.



FIGURE 5.9 – Exemple d'image et de poses résultats avec uniquement une requête basée sur la façade gauche et la façade du milieu. La pose exacte est indiquée en bas à gauche [extrait de [BMS08b]].

### 5.2.2.5 Filtrage des résultats

Les poses obtenues sont filtrées avec des informations supplémentaires extraites de l'image ou du SIG. On utilise la présence de routes et l'absence de bâtiment dans la ligne de vue. Si une route est reconnue sur l'image alors qu'il n'y en a pas entre la position renvoyée et la façade dans le SIG, alors cette pose est considérée comme incorrecte, de même si il y a un bâtiment entre la position détectée et la façade reconnue dans le SIG. Cela exclut aussi toutes les poses situées dans un bâtiment.

Après filtrage il n'est pas toujours possible de n'avoir qu'une seule pose restante. En travaillant avec plusieurs images prises de positions proches mais dans des directions différentes, il est possible de faire un filtrage supplémentaire. En effet, dans ce cas, nous faisons l'hypothèse que les points de prises de vues sont peu distants les uns des autres et cela permet de faire un croisement entre les différents résultats des requêtes précédentes sur chaque image et ainsi de filtrer toutes les poses qui ne seraient pas dans un même voisinage.

### 5.2.2.6 Résultats

Notre jeu de tests comportait 32 photographies sur 9 sites différents. En supprimant les zones pour lesquelles le SIG n'était pas à jour, la base de données ne comportait plus que 28 images. 8 images sur 28 ont été localisées directement avec succès avec une précision métrique. 7 images ont donné plusieurs poses possibles même après filtrage et les 13 restantes

n'ont pas été localisées. Les causes des échecs sont multiples. Dans 4 des cas la modélisation dans le SIG était fautive. Dans 7 cas il aurait fallu utiliser une approche multi-hypothèses pour supprimer les ambiguïtés (par exemple dans le cas de façades ayant entre-elles des angles de  $180^\circ$ ). La dernière erreur provenait de l'absence de façade entière dans l'image.

#### 5.2.2.7 Automatisation du processus

Une des limites principales était l'extraction manuelle des informations sur les images et pour automatiser le processus nous avons ensuite travaillé sur des vidéos. Nous avons créé des nuages de points par *Structure from Motion (SfM)* à partir de vidéos des façades puis dans ce nuage les plans étaient recherchés à l'aide d'un processus RANSAC [FB81]. Nous avons imposé aux plans 3D d'être verticaux et d'avoir des directions correspondantes aux points de fuite horizontaux qui pouvaient être observés dans les images. Une fois les façades segmentées, nous avons appliqué le processus précédent [BMS10].

#### 5.2.2.8 Conclusion sur la géolocalisation basée image/SIG2D

À l'époque de cette recherche, il n'y avait pas ou peu de SIG 3D disponible ce qui nous aurait permis de faire des requêtes supplémentaires et restreindre le nombre de poses possibles. Néanmoins ces travaux ont permis de montrer la pertinence de l'approche de géolocalisation basée sur l'extraction d'informations géométriques des images et leur croisement avec des données SIG.

Ce travail sera utilisé pour localiser des images dans la thèse de Bernard Seeman et complété d'une extraction d'informations sémantiques pour permettre un autre filtrage des poses (6.1.1).

### 5.2.3 Géolocalisation par images en s'appuyant sur un SIG 2,5D

*Les travaux présentés ci-après ont été réalisés en collaboration avec l'IETR de Rennes dans le cadre de l'IRSTV. Cette collaboration a porté sur le stage de master de Shupeng Zhu [Zhu12] et la thèse de doctorat de Hengyang Wei [Wei17]. Elle a donné lieu aux publications suivantes [Zhu12, ZMP<sup>+</sup>13, WPM<sup>+</sup>17].*

#### 5.2.3.1 Calcul de pose basé sur l'extraction de la ligne de ciel des images

La méthode proposée repose sur la constatation que la plupart des images prises en milieu urbain contiennent toujours une « ligne de ciel » qui correspond à la frontière entre les bâtiments et le ciel. Nous avons fait l'hypothèse que pour une position connue, pour chaque orientation possible à partir de cette position, la ligne de ciel est, si ce n'est unique, au moins un élément caractéristique de l'orientation et permettant de la déterminer. Extraire la ligne de ciel dans des images urbaines est beaucoup plus facile qu'extraire des caractéristiques de façades. En effet, quasiment toutes les occlusions se produisent sous la ligne de ciel ce qui en fait une caractéristique plus robuste que les autres et la couleur du ciel est généralement assez uniforme, ce qui simplifie l'extraction.

### 5.2.3.1.1 Vue générale de la méthode proposée

Le principe est de comparer la ligne de ciel partielle extraite de l'image avec une ligne de ciel panoramique synthétique générée à partir de données SIG 2,5D à partir de la même position que celle de la caméra. La meilleure correspondance fournit l'orientation de la caméra. Nous supposons avoir comme entrées une position grossière dans la ville fournie par un GPS ainsi que les données d'une couche « bâti » 2,5D d'un SIG de la zone. Nous supposons aussi que la caméra est calibrée (correction des distorsions et paramètres intrinsèques  $\mathbf{K}$  connus).

Le système peut être divisé en deux parties avant le processus d'appariement entre les deux lignes de ciel (figure 5.10). Premièrement, l'information de localisation grossière est utilisée pour interroger le modèle de bâtiment environnant dans le SIG et générer la ligne de ciel panoramique synthétique. Ensuite, l'image ou la vidéo d'entrée est utilisée dans deux algorithmes. Ils permettent d'extraire la ligne de ciel partielle de l'image, de détecter le point de fuite vertical et de calculer les angles de tangage ( $\beta$ ) et de roulis ( $\gamma$ ). Ensuite, la ligne de ciel extraite est rectifiée pour correspondre à une image prise avec un axe optique exactement horizontal ( $\beta = 0$  et  $\gamma = 0$ ). Enfin, l'appariement des lignes de ciel permet d'estimer l'angle de lacet ( $\alpha$ ) qui était le dernier angle nécessaire pour estimer l'orientation de la caméra dans le monde. Les modèles bâtis extraits du SIG sont projetés sur l'image. Une dernière étape (non présentée dans le schéma) va optimiser la localisation grossière donnée par le GPS.

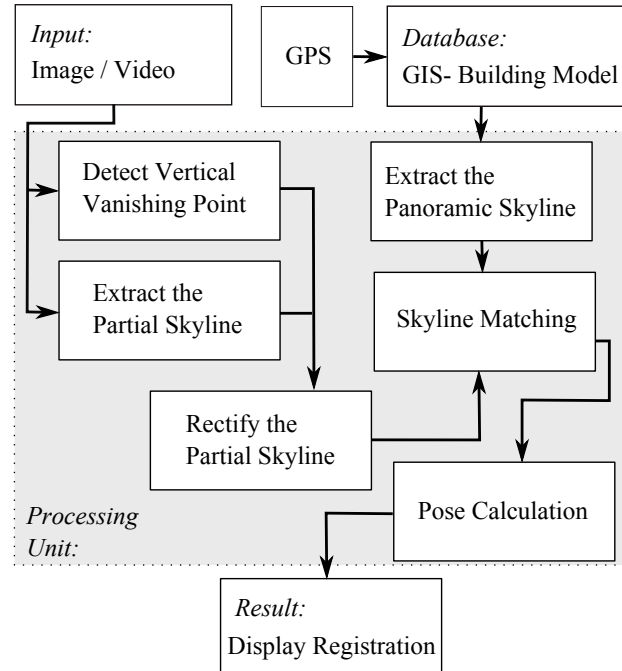


FIGURE 5.10 – Vue générale de la méthode de calcul de pose par extraction de ligne de ciel [extrait de [ZMP<sup>+</sup>13]].

### 5.2.3.1.2 Extraction et rectification des lignes de ciel

Pour extraire la ligne de ciel nous devons distinguer le ciel du reste de l'image. En général, le ciel est une zone plus uniforme que le reste de l'image. Ainsi le gradient d'intensité à l'intérieur de la zone du ciel est faible. Pour tirer parti de cette propriété nous avons utilisé le seuillage adaptatif qui est rapide et robuste. Le résultat est filtré par un filtre morphologique et une opération de fermeture pour éliminer les artefacts comme les poteaux et les fils électriques. Un exemple de résultat est présenté figure 5.11.

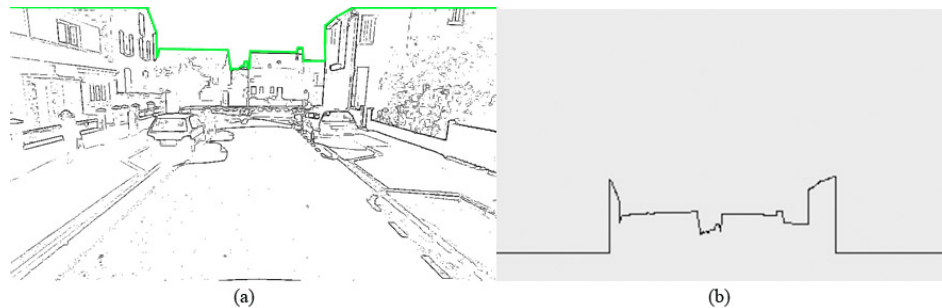


FIGURE 5.11 – Ligne de ciel extraite (vert) en utilisant un seuillage adaptatif [extrait de [ZPS<sup>+</sup>12]].

La ligne de ciel obtenue est transformée dans un système de coordonnées cylindriques pour s'affranchir de l'échelle de représentation de la ligne de ciel dans l'image. Dans ce contexte, nous calculons l'angle d'azimut  $\varphi$  et l'angle d'élévation  $\theta$  entre un point  $P$  sur une ligne de ciel et le centre optique de la caméra [ZPS<sup>+</sup>12].

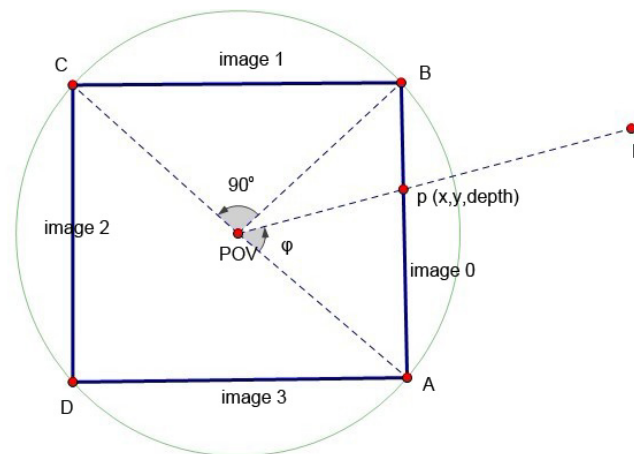


FIGURE 5.12 – Création de 4 images contiguës à partir de la position connue de la caméra dans le SIG [extrait de [ZPS<sup>+</sup>12]].

Nous avons créé à partir des données SIG 4 images contiguës comme présenté figure 5.12 à 360° autour de la position grossière connue. La carte de profondeur de chaque image est calculée. Sur la base des informations de profondeur de chaque point, les points de la ligne de ciel panoramique sont extraits de l'image avec leurs coordonnées 3D et sont exprimés dans le repère  $(\varphi, \theta)$  comme la ligne de ciel extraite de l'image.

### 5.2.3.1.3 Rectification de la ligne de ciel

Pour détecter le point de fuite vertical, nous commençons par détecter les lignes dans l'images avec l'algorithme LSD [GJMR10]. Ces lignes sont filtrées pour ne garder que les lignes proches de la verticale. Nous détectons ensuite le point de fuite vertical à l'aide d'une méthode géométrique proposée par [KJG09] dont les coordonnées vont nous permettre de calculer les angles de tangage ( $\beta$ ) et de roulis ( $\gamma$ ) [ZMP<sup>+</sup>13].

La connaissance de  $\beta$  et  $\gamma$  nous permet de rectifier l'image et avoir une ligne de ciel extraite correspondant à une image prise avec un axe optique horizontal (figure 5.13).



FIGURE 5.13 – A est la ligne de ciel originale ( $\beta = 12,71^\circ$ ,  $\gamma = -0,74^\circ$ ) et B est la ligne de ciel corrigée ( $\beta = 0^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$ ) [extrait de [ZMP<sup>+</sup>13]].

### 5.2.3.1.4 Mise en correspondance des lignes de ciel

Après correction, nous avons les deux lignes de ciel prises du même point de vue que nous mettons dans le même repère ( $\varphi$ ,  $\theta$ ). Pour trouver leur correspondance, nous avons utilisé une mesure de similarité croisée entre la ligne de ciel extraite de l'image et la ligne de ciel panoramique (figure 5.14).

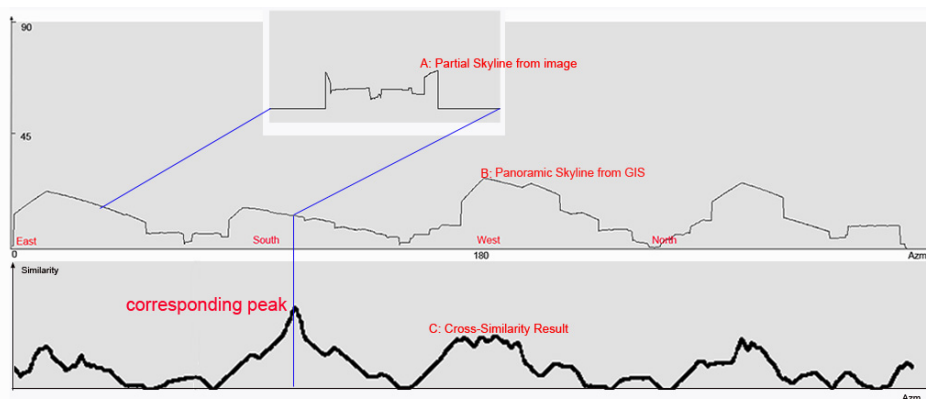


FIGURE 5.14 – A est la ligne de ciel partielle extraite de l'image, B est la ligne de ciel panoramique générée à partir des données SIG et C est la courbe de similarité croisée [extrait de [ZPS<sup>+</sup>12]].

L'angle de lacet  $\alpha$  est donné par la position de la valeur maximum de la courbe de corrélation [ZPS<sup>+</sup>12, ZMP<sup>+</sup>13].

### 5.2.3.1.5 Optimisation de la localisation

Comme expliqué dans 5.1.3, la position donnée par un GPS est imprecise à plusieurs mètres. Nous avons pris cela en compte dans cette méthode. La position donnée par le GPS nous donne un point de départ. Puis, au lieu de ne faire correspondre la ligne de ciel partielle extraite de l'image avec uniquement la ligne de ciel panoramique générée à partir de la position GPS, nous la comparons aussi à une série de lignes de ciel panoramiques générées à partir de lieux environnants cette position initiale. La position ayant la valeur de similarité la plus grande est considérée comme représentant l'emplacement optimal de la caméra [ZMP<sup>+</sup>13].

### 5.2.3.1.6 Résultats expérimentaux

Nous avons d'abord testé cette méthode sur des images synthétiques extraites du SIG avec des matrices de projection connues pour qualifier la précision de l'algorithme. Les résultats montrent que nous pouvons reconnaître correctement l'orientation de la caméra tant que nous avons une ligne de ciel qui fait plus de 10% de la largeur de l'image.

Ensuite nous l'avons appliquée sur des images prises dans le centre-ville de Rennes dont un résultat est montré figure 5.15. Des résultats plus détaillés sont présentés dans [ZMP<sup>+</sup>13].



(a) Résultat d'affichage des données SIG 2,5D à partir de la localisation initiale



(b) Résultat d'affichage des données SIG 2,5D après optimisation de la position

FIGURE 5.15 – Exemple de résultat d'affichage des données SIG 2,5D après application de la méthode de localisation à l'aide de lignes de ciel [extrait de [ZMP<sup>+</sup>13]].

### 5.2.3.2 Étude de la sensibilité au bruit lors de calcul de pose par asservissement visuel virtuel

La même idée que précédemment, une localisation à l'aide de la mise en correspondance d'une ligne de ciel extraite d'une image et d'une ligne de ciel extraite d'un SIG 2,5D, a été utilisée pour faire un calcul de pose à l'aide de la méthode d'asservissement visuel virtuel (*Virtual Visual Servoing* - VVS).

L'asservissement visuel virtuel [MCo2, CMPCo6] est temps réel et peut combiner différentes caractéristiques géométriques pour faire un calcul de pose et un suivi d'objet. Il est très précis lorsque les caractéristiques sont bien extraites des images. Une imprécision sur l'extraction des contours va entraîner une imprécision sur la pose. Ainsi nous avons étudié la sensibilité de l'estimation de pose par l'asservissement visuel virtuel au bruit sur les contours de la ligne de ciel extraits de l'image.



### 5.2.3.2.1 Choix des caractéristiques

Dans l'asservissement visuel virtuel, n'importe quel type de caractéristiques géométriques  $\mathbf{p}$  peut être utilisé du moment que l'on calcule la matrice d'interaction correspondante. La matrice d'interaction  $\mathbf{L}_{\mathbf{p}_m}$  liée à la projection dans le plan de l'image  $\mathbf{p}_m$  est définie comme :

$$\mathbf{L}_{\mathbf{p}_m} = \frac{\partial \mathbf{p}_m}{\partial \mathbf{r}} \quad (5.1)$$

où  $\mathbf{r}$  est la matrice des paramètres extrinsèques de la caméra.

Nous avons modélisé la ligne de ciel comme une série de segments et les droites portant ces segments nous servent de géométrie de référence. Ces lignes 2D et leur équivalent 3D extraits du SIG 2,5D sont fournis comme entrées avec la pose initiale estimée de la caméra pour calculer la pose par asservissement visuel virtuel.

Les lignes 2D dans l'image sont définies comme :

$$x \cos \theta + y \sin \theta - \rho = 0 \quad (5.2)$$

mais peuvent aussi être exprimées en pixels :

$$x_{px} \cos \theta_{px} + y_{px} \sin \theta_{px} - \rho_{px} = 0 \quad (5.3)$$

Nous avons défini les matrices  $\mathbf{L}_{\mathbf{p}_m}$  pour ces deux paramétrisations. Elles sont détaillées dans [WPM<sup>+</sup>17].

Pour prendre en compte les différents ordres de grandeur entre  $\rho$  et  $\theta$  nous avons fait des expériences en les normalisant, i.e. en divisant par des coefficients fixes, qui sont les coordonnées de l'erreur initiale maximale sur  $\rho$  et sur  $\theta$ .

### 5.2.3.2.2 Estimateur robuste

Nous avons voulu estimer les bénéfices d'un estimateur robuste, dans notre cas RANSAC [FB81]. Nous avons un ensemble de caractéristiques correspondantes  $S$  entre les lignes droites formant la ligne de ciel dans le modèle et dans l'image. Pour chaque essai, nous tirions au hasard un ensemble minimum de trois caractéristiques  $s_i$  de  $S$  et appliquions l'asservissement visuel virtuel à  $s_i$  pour calculer la pose de la caméra. Une fois cette pose calculée, les autres éléments  $S$  étaient projetés en utilisant cette matrice et leurs distances à la ligne de ciel étaient calculées. La distance entre deux segments est définie comme le maximum de la distance entre chacun des deux segments et la médiane du segment opposé. Si un certain nombre de segments projetés sont proches (i.e. à une distance inférieure à un seuil fixé expérimentalement à 2 pixels) de la ligne de ciel, la matrice de pose correspondant aux  $s_i$  est gardée. Il faut expérimentalement au moins 3 segments proches. La pose finalement renvoyée par le processus RANSAC est celle qui a le plus de segments proches de la ligne de ciel.

### 5.2.3.2.3 Protocole expérimental

Pour contrôler exactement le niveau de bruit sur les données, nous avons travaillé avec des images synthétiques  $800 \times 800$ . La ligne de ciel

3D et la ligne de ciel 2D correspondante dans l'image proviennent des données bâti 2,5D et d'une connaissance préalable de la pose exacte de la caméra. La pose initiale d'entrée est obtenue en ajoutant un décalage aléatoire uniforme à la pose exacte de la caméra, avec une amplitude de  $5^\circ$  et 5 m respectivement pour la rotation et la translation, ce qui est similaire à l'erreur fournie par des capteurs réels (GPS et accéléromètres) dans un environnement urbain.

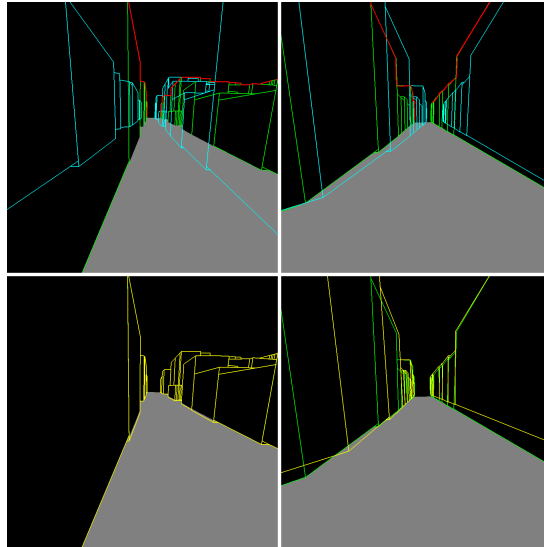


FIGURE 5.16 – Exemple d'images de deux tests. Les deux images du haut sont des images synthétiques (vert) avec les contours projetés du bâtiment selon la pose initiale (bleu clair) et la ligne d'horizon de l'image générée (rouge). Les deux images du bas affichent les résultats de la mise en correspondance après calcul de pose par asservissement visuel virtuel (vert pour la vérité terrain et jaune pour l'estimation) correspondant aux images du haut respectivement. Dans l'image de la mise en correspondance du premier cas (image en bas à gauche), les deux contours projetés du bâtiment sont superposés puisque l'estimation correspond à la vérité terrain. [extrait de [WPM<sup>+</sup>17]]

#### 5.2.3.2.4 Résultats

Nous avons fait un premier jeu de tests destiné à connaître l'influence du paramétrage sur le calcul de pose par asservissement visuel virtuel. Nous avons comparé les résultats pour deux paramétrisations  $(\rho, \theta)$  et  $(\rho_{px}, \theta_{px})$  et avec et sans normalisation. Un exemple de résultat est présenté figure 5.16.

Les résultats montrent que le paramétrage en mètres est plus performant que celui en pixels. L'analyse détaillée des résultats présentés dans [WPM<sup>+</sup>17] indique que le paramétrage habituel en mètre sans normalisation utilisé généralement a une normalisation implicite sur  $\rho$  et  $\theta$  et ainsi il est bien adapté lorsqu'on utilise des droites comme caractéristique géométrique.

Le deuxième jeu de tests devait lui estimer l'influence du bruit sur les segments de la ligne de ciel de l'image. Nous avons ajouté un bruit uniforme aléatoire aux extrémités des segments de la ligne d'horizon de l'image exacte générée à partir du SIG 2,5 et de la pose connue de la caméra. Nous avons appliqué trois niveaux de bruit (0,5, 1 et 2 pixel(s))

avec une paramétrisation des lignes en mètres sans normalisation (à la suite du 1<sup>er</sup> test) comme entrée de l'asservissement visuel virtuel. Les résultats détaillés dans [WPM<sup>+</sup>17] montrent que même une erreur de 1 pixel sur les points extrémité des segments ne peut pas être négligée et a un fort impact sur la pose estimée. Une estimation en utilisant RANSAC dans le cas des données bruitées en entrée a un impact significatif sur la réduction de l'erreur finale à la fois sur la translation et la rotation. La réduction de l'erreur est plus notable sur la translation.

### 5.2.3.3 Conclusion sur la géolocalisation basée image / SIG<sub>2,5D</sub>

La ligne de ciel est une caractéristique intéressante à extraire des images pour faire un calcul de pose. La sensibilité au bruit de l'asservissement visuel virtuel explique la difficulté de l'appliquer dans les cas d'utilisation en extérieur comme l'estimation de la pose en milieu urbain. Même si une méthode d'estimation robuste, RANSAC par exemple, améliore sa robustesse contre le bruit sur les mesures 2D, nous avons fait le choix dans les travaux présentés dans la partie suivante d'utiliser une autre méthode de calcul de pose, moins sensible au bruit, et de faire un couplage avec des données provenant de capteurs inertiels.

## 5.3 CALCUL DE POSE ET SUIVI DU DÉPLACEMENT SUR SITE - UTILISATION DE DONNÉES SPATIALISÉES 3D

*Les travaux présentés ci-après ont été réalisés pendant la thèse de Nicolas Antigny (2015-2018) et ont donné lieu aux publications suivantes [ASR16, ASR17b, ASR17a, ASR18a, ASR18b]. Cette thèse est le fruit d'une collaboration étroite avec le laboratoire GEOLOC de l'IFSTTAR.*

Nous nous intéressons à la mobilité piéton et donc cherchons à tirer parti des appareils à sa disposition comme des *smartphones* et tablettes. Comme présenté dans 3.3.2.1 ils sont maintenant équipés de GNSS, de caméras, d'accéléromètres, de centrales inertiels et de magnétomètres.

Un système GNSS donne en ville une position imprécise à cause d'atténuations, réflexions et effets de masquage (partie 5.1.3). Il est donc insuffisant pour permettre un positionnement précis même si il est utile pour obtenir une position initiale comme utilisé précédemment.

Comme nous voulons tirer parti de tous les capteurs en possession du piéton, nous avons travaillé sur la fusion des données fournies par les capteurs inertiels et extraites des images captées par la caméra tout en gardant comme précédemment une connaissance préalable d'une donnée spatiale, mais dans ce cas précis nous avons utilisé une données spatiale 3D. Nous voulons proposer une solution autonome indépendante de toute infrastructure et pouvant être embarquée dans les appareils mobiles des piétons.

### 5.3.1 Localisation par fusion de données image et inertielle

#### 5.3.1.1 Vue générale

Nous avons comme entrées les données issues d'un gyroscope, d'un accéléromètre, d'un magnétomètre ainsi que les images d'une caméra tous tenus à la main. Nous connaissons aussi exactement dans un référentiel global la position d'un élément du mobilier urbain à 5 cm près et nous possédons son modèle 3D. Nous avons choisi d'utiliser les bornes des stations vélo libre-service (Bicloo ®) à Nantes qui sont aussi implantées dans 28 villes dans le monde (figure 5.17).



FIGURE 5.17 – Exemple de borne [extrait de [ASR16]].

La méthode de couplage entre les données inertielles et les données vision est présentée figure 5.18. La partie gauche du diagramme corres-

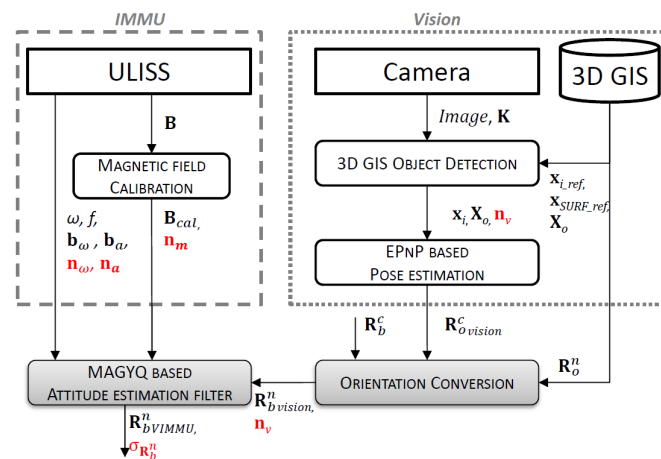


FIGURE 5.18 – Bloc diagramme de la méthode de couplage vision/inertiel [extrait de [ASR18b]].

pond aux traitements des données inertielles et magnétiques pour calibrer le magnétomètre. La partie droite décrit le calcul de pose basé vision. La fusion est réalisée dans les étapes matérialisées par les blocs gris. Elle s'accompagne d'une estimation de la confiance.

L'ensemble des notations sont définies dans les parties 5.3.1.3 et 5.3.1.4.

### 5.3.1.2 Matériel d'acquisition

Pour l'ensemble des expériences nous avons utilisé une plateforme appelée ULISS avec une caméra Garmin à focale fixe rigidement attachée dessus (figure 5.19). La plateforme ULISS (*Ubiquitous Localization with Inertial Sensors and Satellites*) [OSR17] a été développée par le laboratoire GEOLOC de l'IFSTTAR. Il embarque une unité de mesure inertielle et magnétique à trois axes (IMMU), un récepteur GPS haute sensibilité, une antenne et un thermomètre. Ces capteurs sont équivalents à ceux que l'on peut trouver dans un *smartphone*. Les référentiels de tous les capteurs sont orthogonaux et alignés avec la même origine ce qui définit un repère, que nous allons appeler repère *body*  $\mathcal{R}_b$  (indiqué par la lettre *b*) pour les mesures inertielles.



FIGURE 5.19 – Capteur ULISS et caméra Garmin fixés ensemble [extrait de [ASR18a]].

La caméra est une Gamin « VIRB 30 Ultra » avec une longueur focale fixe et une résolution de 1920\*1080 pixels. Cette résolution que nous avons fixée est proche de celle des *smartphones* actuels. La vidéo a été acquise à une fréquence d'image de 60 Hz et échantillonnée à 10 Hz pour réduire le temps de calcul. Cette caméra intègre un récepteur GPS dont l'heure a été utilisée pour synchroniser les mesures IMMU et les images de la vidéo.

### 5.3.1.3 Repères

Les repères associés aux capteurs inertiels  $\mathcal{R}_b$  et caméra  $\mathcal{R}_c$  sont présentés figure 5.20.

ULISS et la caméra sont attachés rigidement l'un à l'autre et les deux repères sont alignés et ainsi ont peut exprimer le passage de l'un à l'autre comme :

$$\mathbf{R}_b^c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (5.4)$$

Si l'hypothèse de l'alignement des deux repères n'est pas vérifiée cela induit une erreur dans le calcul de pose [ASR16]. A 10 m de l'objet 1°

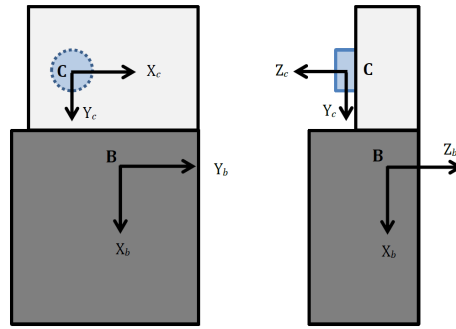


FIGURE 5.20 – Repères associés à la caméra et à ULISS [extrait de [ASR18b]].

d'erreur dans l'alignement des deux repères induit une erreur de positionnement de 17 cm [ASR16].

Les repères objet  $\mathcal{R}_o$  et caméra  $\mathcal{R}_c$  sont présentés figure 5.21.

La transformation d'un point  $\mathbf{X}_o$  exprimé dans le repère objet (indiqué par le symbole  $o$ ) en un point dans le repère caméra  $\mathbf{X}_c$  (indiqué par  $c$ ) s'écrit en coordonnées homogènes comme :

$$\mathbf{X}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_o^c & | & \mathbf{t}_o^c \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X}_o, \quad (5.5)$$

avec  $\mathbf{R}_o^c$  la rotation du repère objet vers le repère caméra et  $\mathbf{t}_o^c = -\mathbf{R}_o^c \cdot \mathbf{O}_{c\mathcal{R}_o}$ .  $\mathbf{t}_o^c$  donne la translation de l'origine  $O_{\mathcal{R}_o}$  du repère objet à l'origine  $O_{\mathcal{R}_c}$  du repère caméra.  $\mathbf{O}_{c\mathcal{R}_o}$  représente la position du centre optique de la caméra dans le repère l'objet.

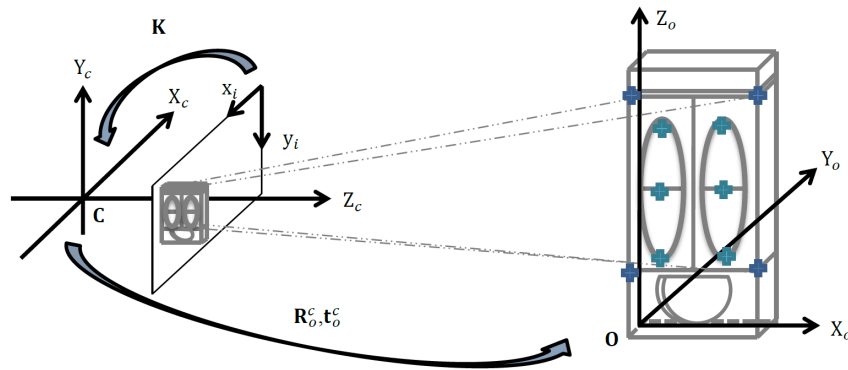


FIGURE 5.21 – Référentiels objet (terminal de station de vélo), image et caméra. [extrait de [ASR18b]].

Les coordonnées d'un point  $\mathbf{X}_o$  dans le référentiel objet peuvent être exprimées dans le référentiel de l'image comme :

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{K} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R}_o^c & | & \mathbf{t}_o^c \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X}_o, \quad (5.6)$$

avec  $\mathbf{K}$  la matrice des paramètres intrinsèques de la caméra (connue).

Les repères objet  $\mathcal{R}_o$  et navigation  $\mathcal{R}_n$  sont présentés figure 5.22.

L'orientation donnée par les capteurs inertiels l'est dans le repère NED (*North-East-Down*) qui est donc choisi comme repère de navigation.

Cela nous amène à définir la position  $\mathbf{t}_o^n$  et l'orientation  $\theta_o^n$  du terminal vélo (objet) dans le repère de navigation.

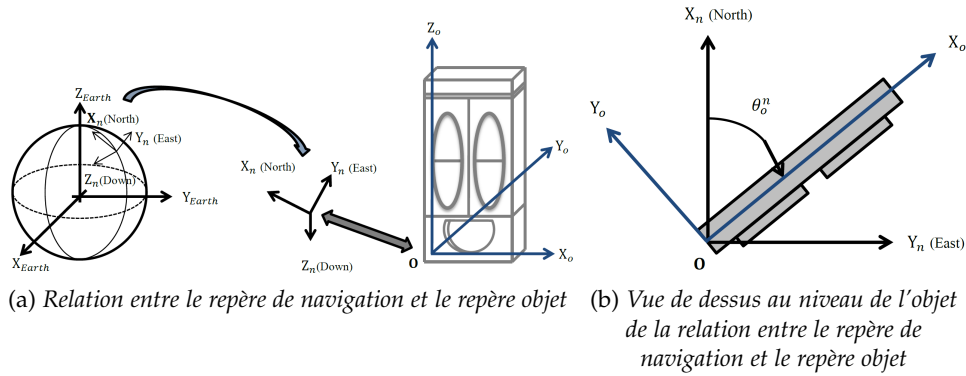


FIGURE 5.22 – Référentiels objets et navigation (NED) [extrait de [ASR18b]].

La matrice de rotation  $\mathbf{R}_o^n$  entre le référentiel objet et navigation est définie comme :

$$\mathbf{R}_o^n = \begin{bmatrix} \cos(\theta_o^n) & \sin(\theta_o^n) & 0 \\ \sin(\theta_o^n) & -\cos(\theta_o^n) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (5.7)$$

Les positions des deux côtés de la borne ont été mesurées très précisément dans un repère global (WGS84) avec une précision sub-centrimétrique (acquisition avec un GNSS différentiel en phase statique suivi par un traitement RTKlib). Si cette hypothèse n'est pas vérifiée, là encore la précision de la pose sera altérée [ASR16]. A 10 m de l'objet, une erreur de positionnement des bords de la station vélo de 2 cm induit une erreur de positionnement de 29 cm.

Pour exprimer toutes les rotations dans le même repère, nous aurons besoin d'exprimer la rotation du repère caméra vers le repère navigation :

$$\mathbf{R}_c^n = \mathbf{R}_o^n \cdot \mathbf{R}_c^o = \mathbf{R}_o^n \cdot (\mathbf{R}_o^c)^T. \quad (5.8)$$

Ce qui nous permet d'exprimer la position du centre optique de la caméra  $\mathbf{O}_{c\mathcal{R}_n}$  dans le repère navigation :

$$\mathbf{O}_{n\mathcal{R}_n} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_o^n & | & \mathbf{t}_o^n \end{bmatrix} \cdot \mathbf{O}_{o\mathcal{R}_o}. \quad (5.9)$$

Il ne nous reste plus qu'à exprimer la rotation entre le repère *body* et le repère navigation :

$$\mathbf{R}_b^n = \mathbf{R}_o^n \cdot \mathbf{R}_c^o \cdot \mathbf{R}_b^c = \mathbf{R}_o^n \cdot (\mathbf{R}_o^c)^T \cdot \mathbf{R}_b^c. \quad (5.10)$$

#### 5.3.1.4 Modélisation

Une étude de variance d'Allan a été appliquée au signal du gyroscope acquis pendant une phase statique pour modéliser les principales composantes du bruit et choisir un modèle pour la mesure de la vitesse angulaire  $\omega_{ib}^b$ . Sont ajoutés un biais de mesure  $\mathbf{b}_\omega$  et un bruit blanc  $\mathbf{n}_\omega$ , ce qui fait que la mesure de la vitesse angulaire du gyroscope est modélisée par :

$$\mathbf{y}_g = \omega_{ib}^b + \mathbf{b}_\omega + \mathbf{n}_\omega. \quad (5.11)$$

De même, la mesure de la force spécifique  $\mathbf{f}_{ib}^b$  de l'accéléromètre est modélisée par :

$$\mathbf{y}_a = \mathbf{f}_{ib}^b + \mathbf{b}_a + \mathbf{n}_a, \quad (5.12)$$

avec un biais de mesure  $\mathbf{b}_a$  et un bruit blanc  $\mathbf{n}_a$  estimé par variance d'Allan après une longue phase statique.

Le magnétomètre a d'abord subi une phase de calibration selon la méthode décrite dans [RAL10] pour supprimer le facteur d'échelle, les non-orthogonalités et le biais. Il ne reste qu'à prendre en compte le bruit blanc  $\mathbf{n}_m$  dans le modèle de mesure du champ magnétique  $\mathbf{B}^{cal}$  :

$$\mathbf{y}_m^b = \mathbf{B}^{cal} + \mathbf{n}_m. \quad (5.13)$$

Nous modélisons la caméra suivant un modèle sténopé et elle est calibrée. Ses paramètres intrinsèques  $\mathbf{K}$  sont connus et les images sont corrigées des distorsions.

Les mesures faites avec la caméra  $\mathbf{y}_v$  seront modélisées par un signal extrait des images  $\mathbf{x}_v$ , un bruit blanc gaussien  $\mathbf{n}_v$  et un biais  $\mathbf{b}_v$ . Ici  $\mathbf{x}_v$  est l'orientation  $\mathbf{R}_o^c$  et  $\mathbf{n}_v$  est estimé avec la variance de la distribution de l'erreur angulaire induite par la différence entre la sélection automatique de points et la sélection manuelle de points sur plusieurs images. La reprojection des points 3D du modèle sur l'image n'est pas parfaite d'où l'ajout d'un biais qui correspond à l'erreur angulaire de la reprojection due à l'algorithme EPnP et à l'estimation de la pose basée sur l'optimisation Gauss-Newton. Ainsi  $\mathbf{y}_v$  s'exprime comme :

$$\mathbf{y}_v = \mathbf{x}_v + \mathbf{b}_v + \mathbf{n}_v. \quad (5.14)$$

### 5.3.1.5 Estimation de la rotation par fusion

Nous avons calculé  $\mathbf{R}_o^c$  par EPnP [MNLf07] à partir de 10 points caractéristiques  $\mathbf{X}_o$  de l'objet d'intérêt qui sont indiqués en bleu sur la figure 5.21. Ces points sont extraits des images à partir d'une triangulation avec des points SURF [BETV08] reconnus et préalablement stockés dans une base de données de points de référence [ASR16, ASR17a]. Nous avons choisi cet algorithme car un algorithme PnP constitue une des solutions les plus appropriées dans notre cas [Wu16]. Nous pourrions modifier cette brique du processus global par un autre algorithme de calcul de pose.

Une fois la pose fournie par EPnP, on retrouve dans l'image les coordonnées  $\mathbf{x}_i$  des caractéristiques géométriques  $\mathbf{X}_o$ .

La fusion est réalisée par l'algorithme MAGYQ [RC14], développé par GELOC et complété pour intégrer les données issues de la vision.

L'algorithme MAGYQ (*Magnetic, Acceleration fields and Gyroscope Quaternion*) est un filtre d'estimation de la rotation basé sur un filtre de Kalman étendu qui fusionne les signaux IMMU et estime en continu les erreurs des capteurs en utilisant un paramétrage des angles basé sur des quaternions. Il intègre les erreurs présentées dans la partie 5.3.1.4.

Le vecteur d'état inclut la rotation entre le repère *body* et le repère navigation et le biais du gyroscope sous forme de quaternions, respectivement  $\mathbf{q}_b^n$  et  $\mathbf{b}_{q_\omega}$ , le biais de l'accéléromètre  $\mathbf{b}_a$  et la rotation entre le repère objet et le repère caméra  $\mathbf{R}_o^c$  :

$$\mathbf{x} = [ \mathbf{q}_b^n \quad \mathbf{b}_{q_\omega} \quad \mathbf{b}_a \quad \mathbf{R}_o^c ] \quad (5.15)$$



Comme les rotations des capteurs inertiels sont exprimées en quaternion dans le repère navigation,  $\mathbf{R}_o^c$  est convertie en quaternion.

Pour estimer l'orientation du repère *body* dans le repère navigation et pour atténuer les biais des capteurs, plusieurs mises à jour  $\delta\mathbf{z}$  sont effectuées [ASR16, ASR17b, ASR18b].

La première mise à jour est effectuée lors de la détection d'une phase quasi statique dans le champ d'accélération  $\mathbf{f}_{ref}^n$  (QSA) :

$$(\delta\mathbf{z}_a)_q = \left(\mathbf{f}_{ref}^n\right)_q - \hat{\mathbf{q}}_b^n \otimes \left(\mathbf{y}_a^b - \hat{\mathbf{b}}_a\right)_q \otimes \hat{\mathbf{q}}_b^{n*} \quad (5.16)$$

où  $(\hat{\mathbf{q}})$  indique l'estimé de  $\mathbf{q}$  et  $(\mathbf{q}^*)$  indique le conjugué de  $\mathbf{q}$ .

La deuxième mise à jour est effectuée lors de la détection d'une phase quasi statique dans le champ magnétique  $\mathbf{m}_{ref}^n$  (QSF) :

$$(\delta\mathbf{z}_m)_q = \left(\mathbf{m}_{ref}^n\right)_q - \hat{\mathbf{q}}_b^n \otimes \left(\mathbf{y}_m^b\right)_q \otimes \hat{\mathbf{q}}_b^{n*} \quad (5.17)$$

La troisième mise à jour est faite lorsque que la borne est détectée et que  $\mathbf{q}_b^n$  est disponible :

$$(\delta\mathbf{z}_v)_q = \left(\mathbf{y}_v - \mathbf{b}_v\right)_q - \hat{\mathbf{q}}_b^n \quad (5.18)$$

Pour fusionner correctement les mesures basées sur la vision (échantillonnées à  $f_l = 10$  Hz) avec les mesures IMMU (échantillonnées à  $f_h = 200$  Hz) dans le filtre, leur différence de temps  $\Delta_{max}$  doit respecter la condition (figure 5.23) :

$$0 < \Delta_{max} < \frac{1}{f_h} \quad (5.19)$$

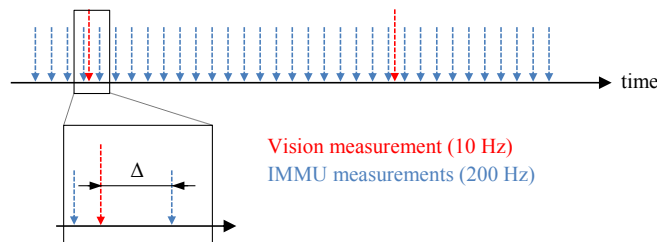


FIGURE 5.23 – Synchronisation entre les mesures de vision et les mesures IMMU [extrait de [ASR18b]].

### 5.3.1.6 Estimation qualifiée de la pose

Nous voulons qualifier la pose estimée pour pouvoir l'utiliser dans d'autres applications (parties 6.1.3 et 6.2).

Dès que la borne vélo est détectée, le filtre proposé estime  $\hat{\mathbf{R}}_b^n$ . Mais pour reprojeter un modèle 3D connu géoréférencé nous avons besoin de  $\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{R}}_o^c & | & \hat{\mathbf{t}}_o^c \end{bmatrix}$  qui sont calculés à partir de  $\hat{\mathbf{R}}_b^n$ , de l'estimation de la rotation entre les repères *body* et navigation et des points virtuels définis dans les repères caméra et objet [ASR16].

Quand nous avons cette estimation, nous pouvons reprojeter les points 3D du modèle connu sur l'image. Lorsque l'écart type sur l'estimation d'orientation par le filtre est inférieur à  $1^\circ$  sur chaque axe et permet

de reprojeter des données 3D avec une erreur inférieure à 50 pixels (sur l'image 1920\*1080), la reprojektion est expérimentalement considérée comme « fiable » pour des objets situés à une distance d'environ 15 mètres et l'estimation de la pose est qualifiée de « digne de confiance ».

#### 5.3.1.7 Résultats et conclusion

Pour évaluer cette estimation de la pose par fusion de données inertielle avec une pose basée vision à partir d'un objet connu, nous avons défini des points de référence à proximité des bornes sur un parcours en extérieur dont la position est connue avec une précision subcentimétrique. Pendant les acquisitions, les piétons marchaient sur ces points de référence en faisant un arrêt de quelques secondes dessus.

Le sol n'est pas un plan horizontal parfait entre le point d'acquisition et l'objet connu et nous n'avons pas de mesure de la hauteur précise du centre optique de la caméra lors de l'arrêt. Nous avons donc étudié la précision de positionnement uniquement dans le plan horizontal. La méthode présentée est exécutée *a posteriori* et donne une position avec une erreur moyenne de 34 cm et un écart type de 22 cm quand la borne est vue et que la pose est qualifiée de « digne de confiance » [ASR17b].

L'utilisation de la fusion d'une information inertielle et SIG 3D permet d'obtenir un positionnement du piéton dans un repère global en dessous de 35 cm avec des mesures réalisées par des capteurs à bas coût.

L'application de cette méthode à un affichage en RA est présenté dans la partie 6.1.3.

### 5.3.2 Suivi du déplacement

*Les travaux présentés dans cette partie ont été en partie réalisés en collaboration avec Hideaki Uchiyama de l'université de Kyushu, Japon.*

Pour pouvoir proposer une pose qualifiée même quand la borne n'est pas vue par la caméra, nous avons complété la fusion précédemment présentée avec une solution qui intègre de l'odométrie visuelle monoculaire qui utilise une estimation du déplacement piéton pour estimer l'échelle.

#### 5.3.2.1 Vue générale de la méthode de couplage visuel, inertiel et magnétique

La figure 5.24 résume notre solution globale pour l'estimation continue et qualifiée de la pose applicable en extérieur et en intérieur.

Une partie des notations et le bloc de calcul de pose à partir d'un objet connu ont déjà été présentés dans la partie précédente 5.3.1. Les notations manquantes sont introduites dans les parties suivantes.

#### 5.3.2.2 Estimation de la longueur de pas

Pour estimer la longueur de pas, nous utilisons les signaux du gyroscope et de l'accéléromètre. Une classification est effectuée sur ces signaux pour savoir quand le piéton est statique ou en mouvement [ASR16]. Pour déterminer l'instant d'un pas  $t_{step_k}$ , quand le pied du piéton est à plat au sol, nous détectons les pics et seuillons l'énergie des signaux du gyroscope et de l'accéléromètre. En suivant [SRL13] une seconde classification

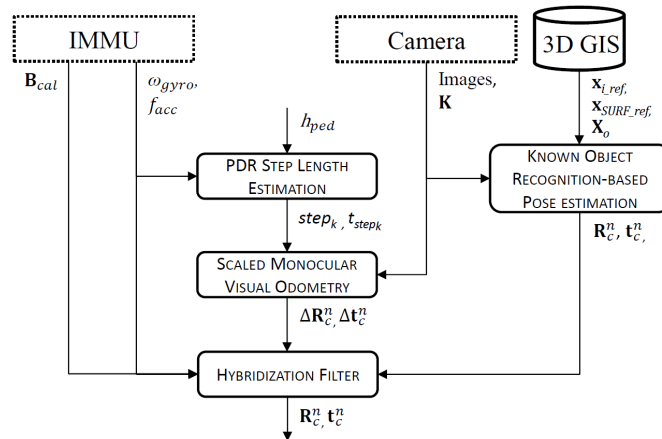


FIGURE 5.24 – Diagramme de la solution globale pour l'estimation continue et qualifiée de la pose [extrait de [ASR18a]].

de mouvement est faite en analysant la variance des mesures inertielles pour déterminer comment l'appareil est tenu en main (*texting*, *swinging*) et les instants de pas.

Nous utilisons le modèle défini dans [RSL12] pour calculer la longueur de pas  $step_k$  :

$$step_k = h_{ped} \times (a \times f_k + b) + c \quad (5.20)$$

avec  $h_{ped}$  la taille du piéton,  $a, b, c$  3 paramètres définis après expériences sur 12 personnes et  $f_k$  la fréquence de pas obtenue à partir de  $t_{step_k}$ .

### 5.3.2.3 Estimation de l'échelle de l'odométrie visuelle

Pour connaître l'échelle et éviter les dérives, nous utilisons l'estimation de la longueur de pas précédente dans l'odométrie visuelle. Pour implémenter l'odométrie visuelle proposée, nous avons suivi l'état de l'art [SF11] sans optimisation [ASR18a].

La longueur de pas estimée précédemment donne une évaluation du déplacement du piéton dans le plan horizontal. On peut estimer l'échelle  $s(t)$  en comparant les longueurs de pas du piéton avec les déplacements estimés de la caméra :

$$s(t) = \frac{D_{step}(t)}{D_{VO}(t)}, \quad (5.21)$$

avec  $D_{step}(t)$  le déplacement du piéton dans le plan horizontal entre deux images consécutives à  $(t-1)$  et  $(t)$  et  $D_{VO}(t)$  le déplacement du centre optique de la caméra dans le plan horizontal estimé par odométrie visuelle aux mêmes instants [ASR18a].

### 5.3.2.4 Fusion

Les signaux visuels et IMU sont modélisés comme précédemment (partie 5.3.1.4) mis à part que maintenant les positions sont estimées incrémentalement dans le filtre par rapport à l'initialisation grâce à la sortie de l'étape *Scaled monocular Visual Odometry* de la figure 5.24. Lorsque l'objet connu est détecté, le calcul de la pose absolue permet une mise à jour qui va corriger la dérive de position. Quand l'objet n'est pas détecté, les estimations de pose sont relatives à la dernière pose absolue détectée.

Les sorties de *Scaled monocular Visual Odometry* sont la différence d'orientation  $\Delta \mathbf{R}_n^c$  et de translation  $\Delta \mathbf{t}_n^c$  entre les repères navigation et caméra sur le plan horizontal. Nous ajoutons un bruit blanc  $\mathbf{n}_{\mathbf{R}_{VO}}$ , qui correspond à l'erreur angulaire moyenne de l'odométrie visuelle monoculaire et un bruit blanc  $\mathbf{n}_{\mathbf{t}_{VO}}$  correspondant à l'erreur de positionnement dû au calcul de la longueur de pas.

Le vecteur d'état contient maintenant  $\mathbf{O}_{c\mathcal{R}_n}$ , la position de la caméra dans le repère de navigation, la rotation entre le repère de la caméra et le repère de navigation sous forme de quaternion  $\mathbf{q}_c^n$ , le biais du gyroscope sous forme de quaternion  $\mathbf{b}_{\mathbf{q}_\omega}$  et le biais de l'accéléromètre  $\mathbf{b}_a$  :

$$\mathbf{x} = \left[ \mathbf{O}_{c\mathcal{R}_n} \quad \mathbf{q}_c^n \quad \mathbf{b}_{\mathbf{q}_\omega} \quad \mathbf{b}_a \right] \quad (5.22)$$

### 5.3.2.5 Résultats et conclusion

Nous avons fait une acquisition avec 4 personnes sur environ 500 m avec des passages en intérieur. Pour comparer notre solution à une vérité terrain nous avons équipé les volontaires d'un système appelée PERSY (*PE*destrian *R*eference *S*ystem [SOR17] sur le pied (figure 5.25).

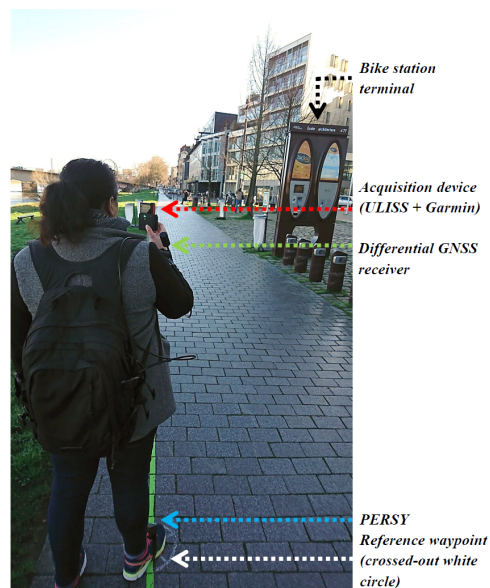


FIGURE 5.25 – Matériels d'acquisition (ULISS + Garmin), PERSY et récepteur GNSS externe pour acquisition d'une vérité terrain et point de référence au sol [extrait de [ASR18a]].

PERSY fournit des positions relatives à la position de départ avec une erreur moyenne de positionnement de 0,3 % de la distance parcourue. Sur cette dernière expérience d'une marche de 500 m avec passage en intérieur (figure 5.26), nous avons obtenu une erreur de positionnement moyenne entre 8,6 m et 18,1 m par rapport à la solution de référence PERSY, et une erreur de positionnement entre 3,5 m et 17,4 m à la fin du parcours. L'erreur moyenne de positionnement par rapport à la distance parcourue est entre 6,1% et 11% sur les différents tests. L'ensemble des expériences est présenté en détail dans [ASR18a].

Ces résultats montrent que nous pouvons suivre le déplacement du

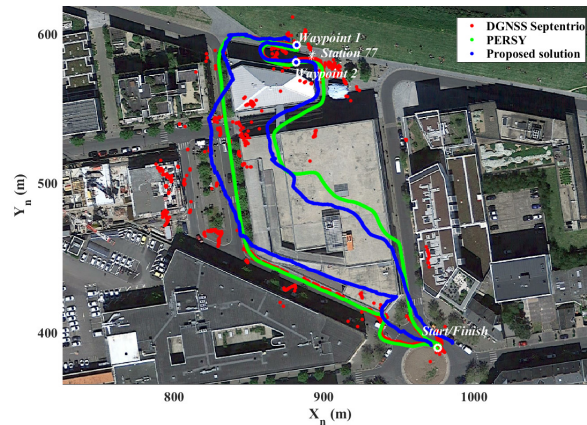


FIGURE 5.26 – Points de référence (en blanc), trajet de référence DGNSS (en rouge), trajet de référence PERSY (en vert) et trajet estimée avec la méthode de fusion proposée (en bleu) pour une acquisition [extrait de [ASR18a]].

piéton sur un parcours long en ville même quand il s'éloigne de l'objet d'intérêt.

## 5.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté nos motivations à réaliser une géolocalisation sur site à partir d'images et de données spatiales et nos travaux dans ce domaine avec différentes données d'entrée. Nous avons présenté des méthodes de calculs de pose basées sur des images complétées par la connaissance de données spatiales 2D, 2,5D et 3D. Dans l'optique de réaliser une médiation sur site avec les données urbaines pour le piéton, nous avons aussi utilisé d'autres capteurs maintenant en sa possession et des méthodes hybrides vision/inertielle de calcul de pose et de suivi.

Nous allons maintenant voir quelques usages possibles de ce calcul de pose sur site.

# USAGES DE LA GÉOLOCALISATION ET DU CALCUL DE POSE

## SOMMAIRE

6.1	POUR L'ENRICHISSEMENT ET LA QUALIFICATION DE DONNÉES SPATIALES . . . . .	81
6.1.1	Indexation de bases de données d'images urbaines . . . . .	81
6.1.2	Enrichissement une base de données spatiale 2D . . . . .	84
6.1.3	Caractérisation de données existantes . . . . .	86
6.2	COMME OUTIL COMPLÉMENTAIRE AUX MÉTHODES DE SUIVI DU DÉPLACEMENT PIÉTON . . . . .	87
6.3	APPARITION DE NOUVELLES PRATIQUES . . . . .	90
6.4	CONCLUSION . . . . .	92

Nous avons dans le chapitre précédent présenté un ensemble de méthodes destinées à permettre une localisation sur site du piéton allant jusqu'à un calcul de pose de la caméra qu'il tient en main. Nous commencerons dans ce chapitre par présenter quelques usages pour enrichir et qualifier les données spatiales. Certaines applications peuvent se faire sur site mais toutes nécessitent une localisation et un calcul de pose. Nous avons aussi utilisé la géolocalisation comme méthode permettant de limiter la dérive de la méthode de navigation à l'estime pour le piéton dans la partie 6.2. Nous finirons dans la partie 6.3 par une partie moins technique en s'intéressant à l'aspect sociétal de l'apparition de la possibilité de se localiser sur site pour le citoyen.

## 6.1 POUR L'ENRICHISSEMENT ET LA QUALIFICATION DE DONNÉES SPATIALES

Nous allons commencer par présenter des travaux d'enrichissement de bases de données d'images urbaines à partir de photographies téléchargées sur internet. Ensuite nous montrerons comment on peut enrichir une base de données 2D existante en lui ajoutant des données manquantes et/ou une 3<sup>ème</sup> dimension. Nous finirons par une caractérisation sur site de données spatiales 3D.

### 6.1.1 Indexation de bases de données d'images urbaines

*Les travaux présentés dans cette partie reprennent la base des travaux présentés partie 5.2.2 et les complètent par des filtrages sémantiques. Ce fut l'objet de la*

thèse de Bernard Semaan (2014 - en cours). Ils ont été publiés dans [SMSC16] et [SSMC17].

L'idée directrice de ce travail a été de profiter du partage de photographies partiellement géolocalisées que l'on peut trouver sur des réseaux sociaux comme Flickr<sup>1</sup> pour obtenir des vues à jour de la ville et en extraire des informations (partie 5.2.2.2) qui pourraient permettre à un gestionnaire de mettre à jour un SIG urbain. Pour cela il faut être capable de localiser les immeubles visibles dans l'image.

Le travail proposé se compose d'un ensemble de couches qui permettent de raffiner l'information de localisation : une couche d'extraction et de pré-traitement des données, une couche d'extraction et de traitement des primitives géométriques et sémantiques et une couche de croisement des informations qui permet d'obtenir la pose la plus probable.

La couche d'extraction et pré-traitement des données extrait soit d'une base de données en ligne de type Flickr, soit d'une base de données locale, des images qui correspondent à la zone d'intérêt de l'utilisateur, la ville de Nantes par exemple. Ce module extrait aussi les méta-données des EXIF<sup>2</sup> des images chargées ainsi que les méta-données et commentaires associés aux images si elles proviennent d'une plateforme de partage. Si les images proviennent de Flickr, elles sont filtrées par zone géographique et intervalle de temps choisis par l'utilisateur ainsi que par étiquettes associées (liées à l'environnement bâti comme « immeuble/*building* », « maison/*house* » ou encore « architecture »). Ce module donne aussi en sortie une carte 200 m × 200 m extraite de *OpenStreetMap* autour de la position GPS de la photographie.

Il peut y avoir dans les images renvoyées des images qui ne représentent pas des immeubles. Pour n'utiliser dans cette couche de traitement que des images d'immeubles, nous avons utilisés l'API Google Vision<sup>3</sup> qui pour chaque image renvoie le texte et les logos détectés et un ensemble de mots clés décrivant son contenu. Nous avons préalablement sélectionné les mots suivants « *building* », « *architecture* », « *property* », « *commercial building* », « *facade* », « *downtown* », « *skyscraper* », « *town* », « *house* », « *metropolitan area* » et « *tower block* » parmi les sorties possibles de cette API. Nous ne gardons les images que si un de ces mots clés est présent avec un score de confiance de plus de 90% qui a été fixé expérimentalement.

Le texte extrait de ces images et les mots clés qui y étaient associés peuvent contenir des informations de géolocalisation (par exemple le nom d'une rue). Les textes sont envoyés à l'API Nominatim<sup>4</sup> d'*OpenStreetMap* qui permet de renvoyer une ou plusieurs géolocalisations pour un texte spécifique. Un *buffer* de 50 m est considéré autour de chacune de ces localisations.

Il a été développé un algorithme assez simple d'extraction de contours d'immeubles dans l'image [SSMC17] à partir des segments fournis par

1. <https://www.flickr.com> (consulté le 07/07/18)

2. EXchangeable Image File format, balises de métadonnées incluses dans les en-têtes des fichiers images.

3. <https://cloud.google.com/vision/> (consulté le 07/07/18)

4. <https://nominatim.openstreetmap.org> (consulté le 07/07/18)

LSD [GJMR10] et de la détermination des points de fuites [KJG09] (Figure 6.1).



FIGURE 6.1 – Exemple de détection de contour d'un immeuble [extrait de [SSMC17]].

A partir de cette extraction d'enveloppe, de la détermination de la position des coins de l'immeuble dans l'image, des points de fuites et de la carte réduite OSM, il est possible de se placer dans le cadre des travaux précédents de géolocalisation par images en s'appuyant sur un SIG 2D 5.2.2 pour trouver les poses possibles (Figure 6.2).

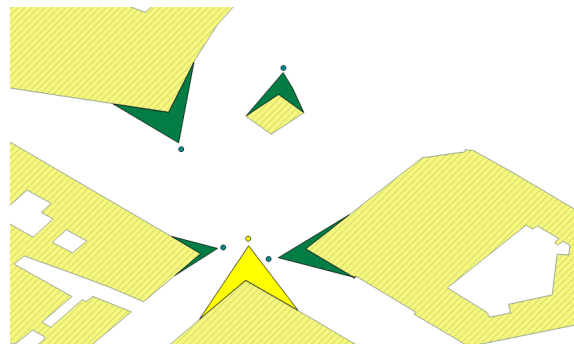


FIGURE 6.2 – Carte des poses possibles calculées à partir de l'extraction d'informations géométriques de l'image figure 6.1 et de la carte OSM réduite [extrait de [SSMC17]].

Nous croisons les poses obtenues par extraction d'informations sémantiques et géométriques, mais il peut en rester plusieurs.

Pour augmenter la fiabilité des poses proposées, nous croisons les poses trouvées avec des images issues d'*OpenStreetView*, bien que cela ne soit pas une base de données d'images à jour. Cette étape nous permet juste de conforter une localisation parmi celles qui ont été calculées mais pas de modifier les résultats précédents. Pour chaque pose possible nous téléchargeons les images les plus proches géographiquement issues d'*OpenStreetView* et comparons l'image de départ avec ces images téléchargées à l'aide de mise en correspondance SIFT [Low04]. L'image *OpenStreetView* ayant le plus de correspondances SIFT avec l'image de départ est supposée avoir été prise de la pose la plus proche ce qui nous permet de ne choisir qu'une pose finalement.

La figure 6.3 nous montre l'ensemble du processus sur un exemple.

Sur 19 images de test dont nous connaissons les poses, ce système n'a pas permis de trouver une pose dans 50% des cas, dans 15% des cas le



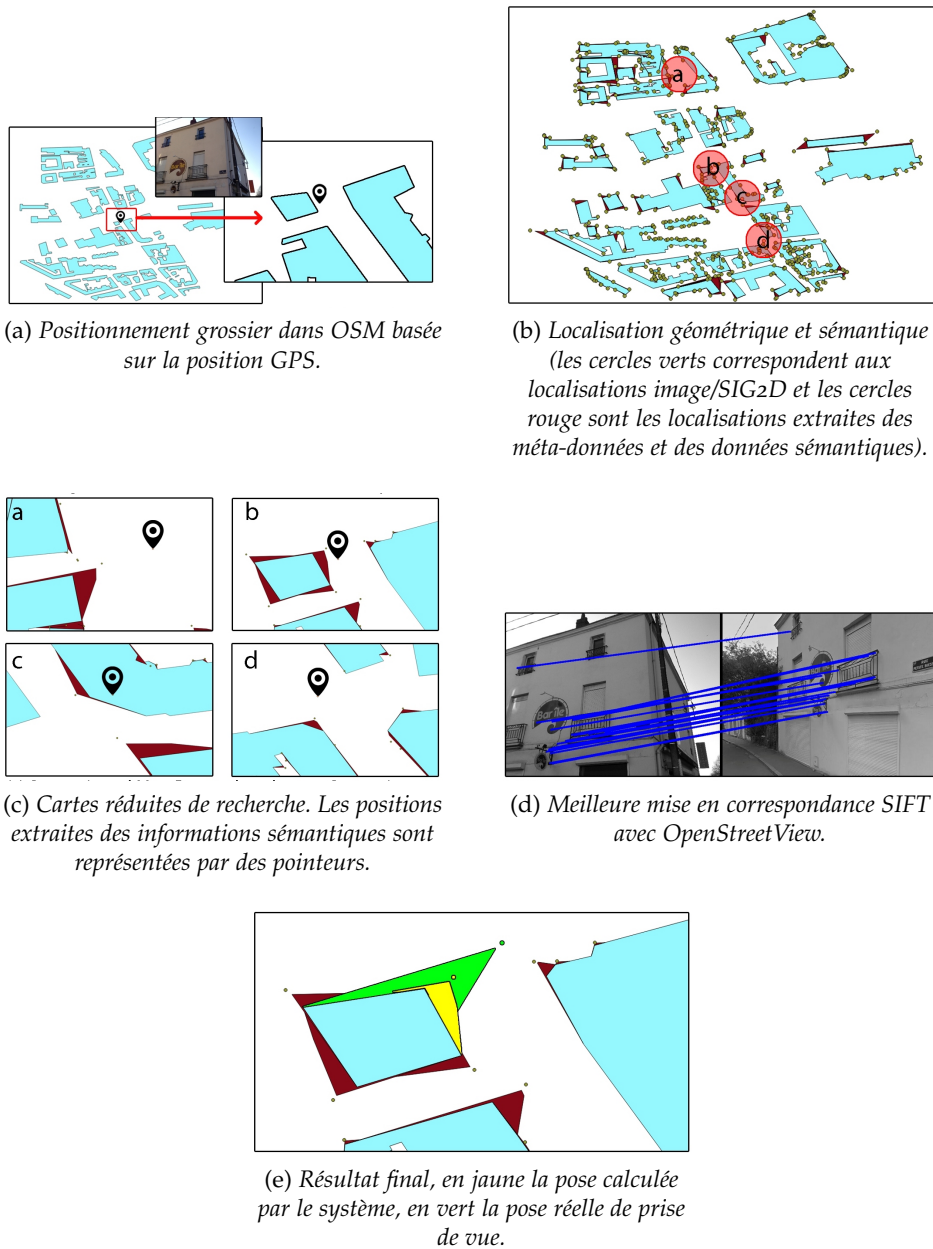


FIGURE 6.3 – Exemple de localisation d’une image [extrait de [SSMC17]].

bon emplacement est parmi les positions trouvées mais avec des informations d’orientation fausses ou inexistantes et dans les 35% restant plusieurs poses ont été trouvées et l’une d’entre elles est correcte. Le filtrage SIFT/*OpenStreetMap* permet ensuite de trouver la bonne [SSMC17].

Cette méthode est un travail préliminaire qui donne des résultats mitigés mais permet de montrer l’intérêt d’un filtrage sémantique en complément d’un filtrage géométrique des poses possibles pour retrouver la position et l’orientation de la prise de vue d’une photographie et ensuite pouvoir utiliser les informations spatiales qu’elle contient.

### 6.1.2 Enrichissement une base de données spatiale 2D

Les travaux présentés dans cette partie ont été réalisés pendant la thèse de Ruijun Liu (2009-2012) et ont donné lieu aux publications suivantes [LSM11, LSM12b, LSM12a].

A l'époque de ces travaux, les données spatiales stockées dans les SIG étaient principalement 2D.

Le but la méthode proposée est d'enrichir *a posteriori* des données d'un SIG à partir d'informations extraites de vidéos. Nous utilisons en entrée soit une vidéo acquise au sol d'un point de vue piéton dont nous connaissons le trajet et les données spatiales 2D du SIG de la zone d'intérêt ou soit uniquement les données vidéos. Nous commençons par extraire des points d'intérêt de cette vidéo qui nous permettent de reconstruire la structure des façades visibles. Après élimination des valeurs aberrantes par filtrage, nous recréons l'empreinte au sol des bâtiments. Cette reconstruction est faite soit directement à partir de la vidéo soit à l'aide d'une connaissance préalable des données spatiales 2D du SIG de la zone puis nous reconstruisons un modèle 3D. Une fois ce modèle reconstruit, nous rétroprojetons l'empreinte 2D et le modèle 3D sur la vidéo. Enfin l'utilisateur corrige ces données pour mettre à jour le SIG. Le processus complet est présenté figure 6.4.

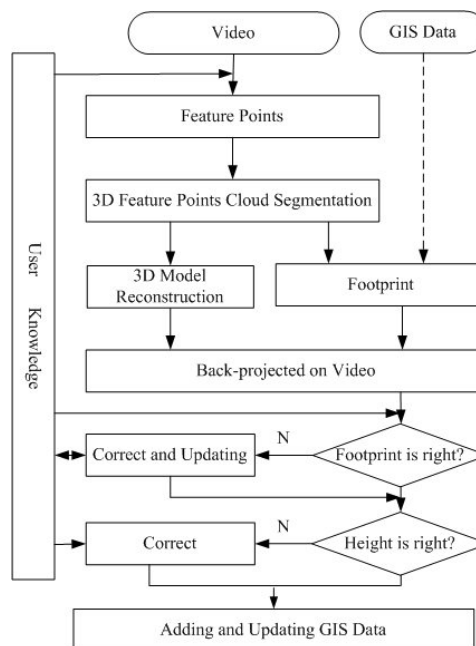


FIGURE 6.4 – Processus de mise à jour du SIG [extrait de [LSM12a]].

L'étape d'extraction des points d'intérêt est faite à l'aide d'un algorithme de SLAM (*Simultaneous Localisation and Mapping*), PTAM (*Parallel Tracking and Mapping*) [KM07] qui faisait référence à ce moment là. PTAM nous fournit en sortie un nuage de points d'intérêt et la pose de la caméra.

Nous supposons que les façades à reconstruire sont sur un sol plan et horizontal et qu'elles sont perpendiculaires au sol. Avec ces hypothèses, nous n'avons besoin pour chaque façade que des positions de ses limites gauche et droite et de sa hauteur pour la reconstruire. La segmentation du

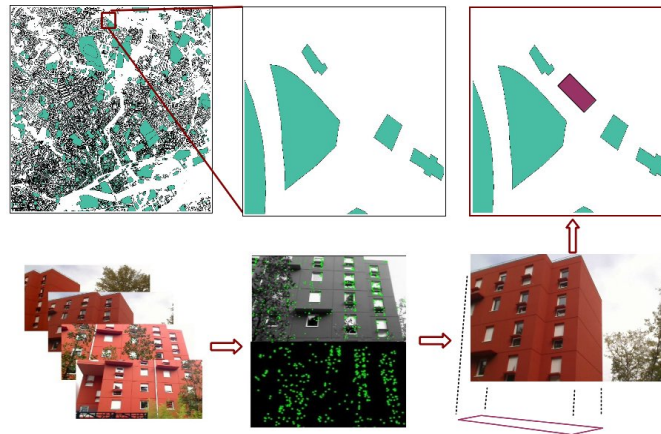


FIGURE 6.5 – Ajout dans un SIG 2D de l’empreinte au sol d’un bâtiment manquant [extrait de [LSM12b]].

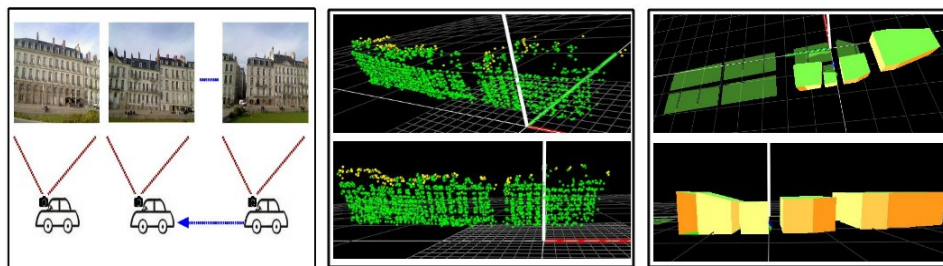


FIGURE 6.6 – Mise à jour d’un SIG 2D avec la hauteur des bâtiments [extrait de [LSM12a]].

nuage de points [LSM12a] nous donne les limites de chaque façade, seule manque la hauteur. Nous créons une zone tampon autour de l’empreinte au sol et pour chaque façade nous lui assignons comme hauteur la hauteur du point d’altitude maximal à l’intérieur de la zone tampon concernée. Cela permet de reconstruire un modèle 3D de l’immeuble [LSM11].

Le modèle reconstruit est rétro-projeté sur la vidéo mais il n’est pas toujours précis. L’utilisateur va pouvoir interagir avec le modèle pour corriger des décalages entre le bâtiment virtuel 3D et la forme réelle du bâtiment dans la vidéo (positions des coins, corrections de hauteurs, etc.). Une fois le modèle corrigé, le SIG peut être mis à jour avec l’empreinte au sol correcte et la hauteur du bâtiment [LSM12b].

La figure 6.5 montre l’ajout dans le SIG de l’empreinte au sol d’un bâtiment manquant et la figure 6.6 montre l’ajout dans le SIG de la hauteur de bâtiments existants.

### 6.1.3 Caractérisation de données existantes

Nous avons utilisé la méthode présentée partie 5.3.1 pour afficher des données spatiales sur site.

Les informations spatiales 3D à disposition proviennent de sources différentes et n’ont pas toutes les mêmes qualités et précisions (voir partie 3.1.1).

Pouvoir qualifier ces contenus 3D est important pour valider leur per-

tinence (niveau de détail, élément manquant ou surnuméraire, élément mal placé, etc.). Une solution pour les qualifier est de les visualiser sur site et de les confronter à la réalité. Pour cela la position et l'orientation de l'utilisateur doit être connue et qualifiée. En effet, en cas de non alignement du modèle 3D géométrique à la réalité, il faut être capable de dire si c'est parce que l'utilisateur est mal positionné ou parce que le modèle est faux.

Nous avons utilisé la méthode de fusion multicapteurs présentée partie 5.3.1 et dans la figure 5.18 pour obtenir une estimation de la pose qualifiée comme présenté dans la partie 5.3.1.6.

La figure 6.7 complète la figure 5.18 avec l'estimation qualifiée de la pose pour des applications de caractérisation de données spatiales SIG 3D en Réalité Augmentée directement sur site par un utilisateur.

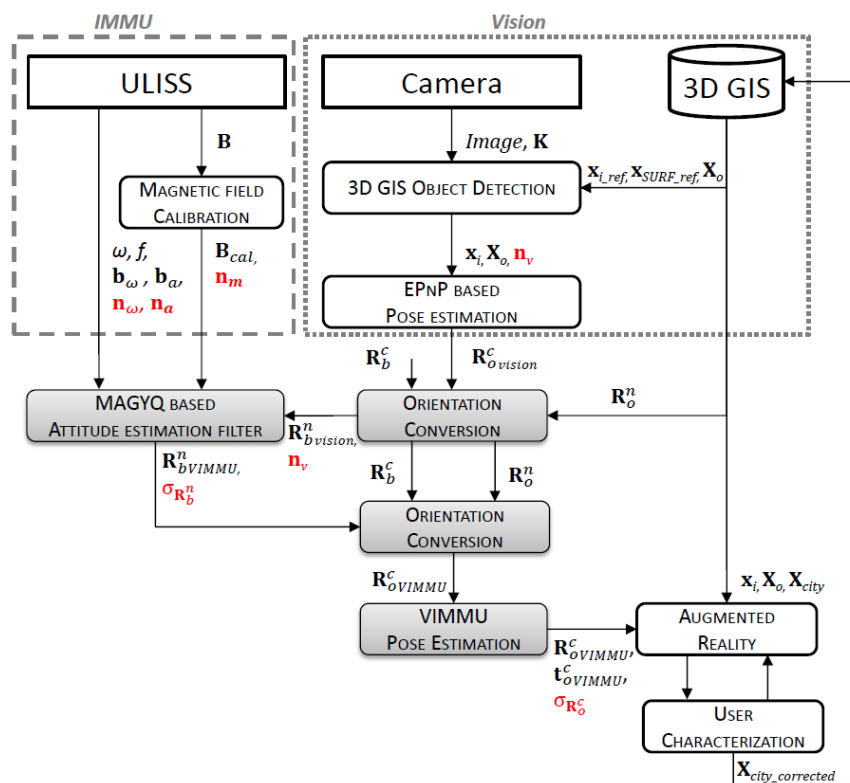


FIGURE 6.7 – Méthode de caractérisation de données spatiales 3D sur site [extrait de [ASR18b]].

Ce complément se découpe en trois étapes :

- la conversion dans le repère navigation de l'orientation estimée basée sur la fusion de la partie 5.3.1 ainsi que la conversion dans le même repère de l'orientation de l'objet connu,
- l'amélioration de l'estimation de l'orientation en fusionnant l'orientation basée sur la vision, les mesures inertielles et magnétiques ainsi que l'estimation du niveau de confiance (bloc VIMMU),
- la caractérisation de la donnée spatiale 3D.

Quand la pose est qualifiée de « digne de confiance » (partie 5.3.1.6). Cela donne la possibilité de qualifier la donnée 3D comme présenté figure 6.8.

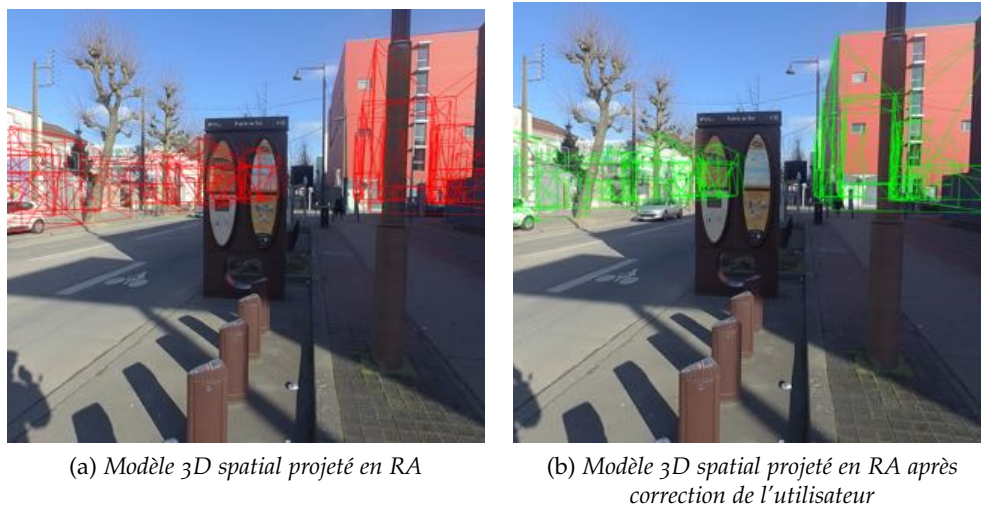


FIGURE 6.8 – Projection et correction par l'utilisateur d'un modèle 3D spatial de la zone d'intérêt. Ici l'erreur est d'environ 2 m en translation. [extrait de [ASR17a]].

## 6.2 COMME OUTIL COMPLÉMENTAIRE AUX MÉTHODES DE SUIVI DU DÉPLACEMENT PIÉTON

Ces travaux ont fait l'objet de la distinction 2<sup>nd</sup> best paper à la conférence IPIN2017 [ASR17b].

La navigation à l'estime (*Pedestrian Dead-Reckoning* - PDR) consiste à estimer la position du piéton à partir d'un point de départ connu, de son orientation et de son déplacement. L'algorithme MAGYQ [RC14] (introduit partie 5.3.1.5) permet d'estimer l'orientation, la détection de pas et la longueur de pas à partir des données des capteurs inertiels tenus en main (ULISS).

La figure 6.9 enrichit la figure 5.18 avec une méthode de navigation à l'estime qui tire parti de la pose qualifiée obtenue par fusion des données inertielles et vision.

Ce processus est découpé en 8 blocs [ASR17b, ASR18b] :

- la détection des phases de déplacement,
- l'analyse de la fréquence de marche,
- la classification du type de portage de l'appareil tenu en main (*Texting, Swinging*),
- la détection de pas,
- la détection de la longueur de pas,
- le processus de navigation à l'estime,
- l'estimation de pose qualifiée (VIMMU, fusion serrée sur la rotation, fusion lâche sur la translation)
- le processus de navigation à l'estime avec position corrigée par VIMMU.

Les 6 premiers ont déjà été cités ou présentés dans les parties antérieures (5.3.2.2, 5.3.1.5, 5.3.1.6).

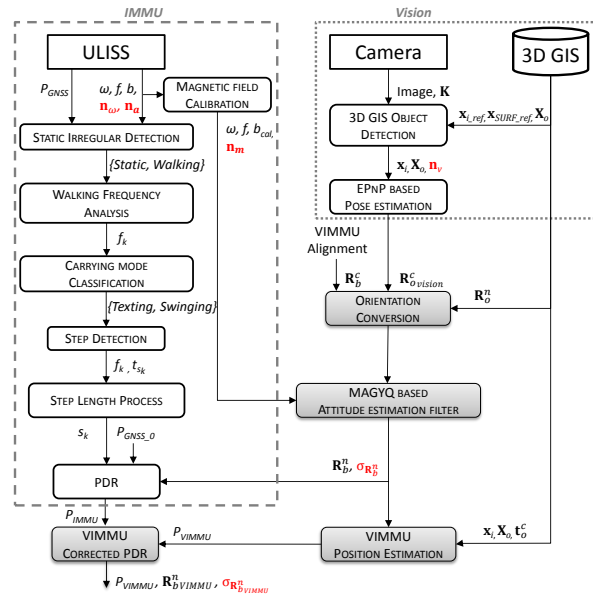


FIGURE 6.9 – Diagramme des étapes de la méthode de navigation à l'estime assistée [extrait de [ASR17b]].

La partie d'estimation de pose par VIMMU est dédiée au processus de couplage entre les données vision et IMMU. Il améliore l'estimation de la rotation en fusionnant l'orientation basée sur des mesures visuelles, inertielles et magnétiques avec estimation du niveau de confiance et estime la position basée sur l'estimation de pose lorsque elle est qualifiée de « digne de confiance ».

Le vecteur d'état  $\mathbf{x}$  est modifié par rapport aux couplages précédents. Il inclut la position du repère *body* dans le repère navigation  $\mathbf{O}_{b\mathcal{R}_n}$ , la rotation entre le repère *body* et le repère navigation sous forme quaternion  $\mathbf{q}_b^n$ , toutes les sources d'erreurs du capteur (le biais du gyroscope sous forme quaternion  $\mathbf{b}_{q_\omega}$  et le biais de l'accéléromètre  $\mathbf{b}_a$ ), la fréquence de marche piétonne  $f_k$  et la longueur de pas  $s_k$ , les coordonnées 2D  $x_i$  des points correspondant aux coordonnées 3D des points remarquables de l'objet connu et enfin la rotation  $\mathbf{R}_o^c$  et la translation  $\mathbf{t}_o^c$  du repère objet vers le repère caméra. Les équations de modélisation et de mise à jour sont les mêmes que précédemment (parties 5.3.1.4 et 5.3.1.5).

$$\mathbf{x} = \left[ \mathbf{O}_{b\mathcal{R}_n} \quad \mathbf{q}_b^n \quad \mathbf{b}_{q_\omega} \quad \mathbf{b}_a \quad f_k \quad s_k \quad x_i \quad \mathbf{R}_o^c \quad \mathbf{t}_o^c \right] \quad (6.1)$$

Le principe du dernier bloc est que lorsque la pose est qualifiée comme étant « digne de confiance » (partie 5.3.1.6), une position absolue est calculée et remplace la position du piéton calculée par navigation à l'estime. Quand la borne n'est plus vue, le processus de navigation à l'estime est relatif à la dernière position fiable connue.

Classiquement, une navigation à l'estime basée sur des données inertielles a une exactitude un peu supérieure à 5% par kilomètre. Pour un déplacement entre deux bornes vélo distantes d'environ 400 m cela fait une erreur de positionnement de plus de 20 m. La correction de position quand la borne est détectée permet d'éviter cette dérive.

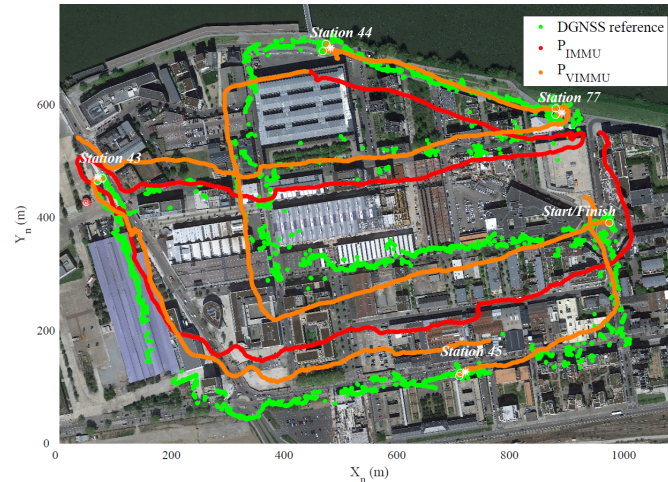


FIGURE 6.10 – Traces des chemins obtenus par navigation à l'estime. DGNSS reference indique le chemin parcouru mesuré avec un GNSS différentiel,  $P_{IMMU}$  est la trace évaluée par navigation à l'estime seule et  $P_{VIMMU}$  est la trace obtenue par navigation à l'estime corrigée par la méthode fusionnée [extrait de [ASR18b]].

Nous avons fait un parcours de 2,9 km en ville avec des passages couverts après calibration du magnétomètre (figure 6.10). Le chemin passe à proximité de 4 stations (44, 77, 43, 45) à proximité desquelles nous avons pour chacune deux points de référence marqués au sol et dont la position est connue précisément.

La figure 6.11 montre la précision de localisation de la navigation à l'estime par rapport au chemin de référence. À la fin de la marche de 2,9 km, on obtient une erreur de positionnement d'environ 160 m pour la navigation à l'estime basée sur l'IMMU et une erreur de positionnement inférieure à 50 m pour la version corrigée. Un ajustement ponctuel permet bien de limiter l'erreur d'estimation de la trajectoire pour un déplacement piéton long en milieu urbain [ASR17b, ASR18b].

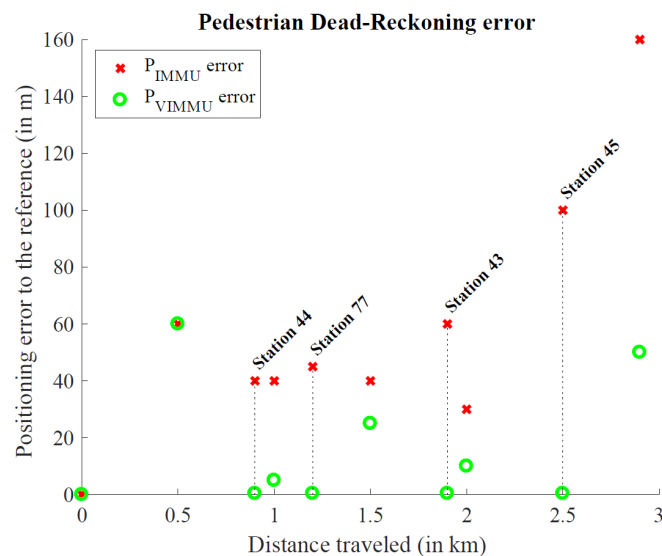


FIGURE 6.11 – Erreurs de positionnement le long du parcours piéton de 2,9 km et position des points caractéristiques sur ce parcours [extrait de [ASR18b]].

## 6.3 APPARITION DE NOUVELLES PRATIQUES

*Ces travaux font l'objet de la thèse de Gwendoline L'Her (2016 - en cours) qui a donné lieu aux publications [LSS17, SLS17, SPM<sup>+</sup>18, LSS18].*

Pour conclure ce chapitre, nous allons nous intéresser aux nouvelles pratiques apparues avec les possibilités de localisation, même imprécises, des appareils mobiles actuels.

Nous nous intéressons à la manière dont les citoyens *via* les outils mobiles participent aux processus de transformation du territoire et comment le numérique est intégré au sein des dispositifs de participation. Nous cherchons à répondre à la question posée par [Dou16] sur la possibilité des technologies numériques à renouveler les dispositifs de participation au sein de l'action publique urbaine.

Nous avons commencé ce travail par une étude bibliographique dont le résultat est rapporté dans [LSS17] en s'attachant à montrer les enjeux que suscitent l'introduction des outils numériques dans les pratiques de participations citoyennes.

Ces outils numériques se veulent complémentaires des outils classiques pour provoquer un premier engagement de participation envers des personnes qui traditionnellement ne participent pas [LSS17]. A travers les outils numériques au sens large et les outils mobiles en particulier, les acteurs de l'action publique urbaine « espèrent réorganiser le panel de contributeurs et les thématiques abordées » [LSS17]. L'utilisation de ces outils provoque dans certain cas un *empowerment* habitant au point qu'« un savoir » et « une expertise habitante » par appropriation de ces dispositifs participatifs apparaît au sein de l'action publique urbaine et fédère habitants et professionnels autour d'une action commune [LSS17].

Nous avons voulu nous intéresser aux participations des citoyens-captateurs et à cette interaction avec l'action publique à travers trois terrains : une action de cartopartie à Nantes d'inventaire d'arbres remarquables et de recensement de services d'hyperproximité et des actions de métrologie citoyenne à Rennes sur la pollution aux particules fines (projet *Ambassad'Air*<sup>5</sup>) et de mesure de l'intensité sonore en environnement à Pornichet (à l'aide de l'outil *NoiseCapture*<sup>6</sup>).

Ces travaux sont en cours et non encore publiés mais les premières conclusions suggèrent que les enjeux de l'introduction des équipements numériques au sein des dispositifs de participation sont nombreux. Ils permettent la production de données par des habitants au quotidien (particulièrement dans le cas d'*Ambassad'Air*) et soulèvent des questions sur une métrologie alternative habitante en marge des métrologies institutionnelles. La participation des personnes est souvent d'abord guidée par une volonté militante ou de dénonciation de ce qu'ils pensent être un état de fait (sensibilité à la pollution due à des problèmes de santé, volonté de dénoncer un quartier trop bruyant, etc.). Les pratiques de mesure s'en ressentent et sont liées aux perceptions et représentations des habitants. Le fait de ne pas pouvoir manipuler facilement les données qu'ils produisent ou de ne pas forcément avoir un retour des autorités publiques provoque à

5. <http://www.wiki-rennes.fr/Ambassad%27Air> (consulté le 04/07/18)

6. <http://noise-planet.org/noisecapture.html> (consulté le 04/07/18)



la longue un désengagement des participants dans la démarche. La question de l'usage des données produites et de leur interopérabilité est aussi récurrente.

La mise en place de ces dispositifs par les acteurs urbains traduit une pratique volontariste pour « changer les comportements » autour d'enjeux environnementaux plutôt qu'une volonté de retour immédiat aux participants.

Cette étude en cours montre l'évolution des comportements à la fois des citoyens mais aussi des collectivités qui passe par le numérique et la création et/ou le partage de données.

## 6.4 CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre plusieurs usages possibles de la localisation sur site liée à des données spatiales.

Les comportements ont déjà été modifiés par les outils mobiles actuels alors la question se pose des modifications de comportements qui pourraient être induites par l'utilisation massive d'outil de médiation sur site avec des données spatiales par le biais de la réalité augmenté.

# CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

# 7

J'ai présenté dans ces trois derniers chapitres les méthodes que j'ai mises en place à travers mes recherches pour mettre au point un système de médiation numérique avec des données urbaines pour un piéton immergé dans la ville.

La modélisation des données est une nécessité pour pouvoir prendre en compte la multiplicité des données à adresser et les changements inévitables dus à l'interaction avec un piéton en mobilité. Il faut gérer simultanément les dimensions spatiales, temporelles et thématiques mais aussi le changement d'échelle à travers différents niveaux de détails et surtout les évolutions temporelles qui n'affectent pas les objets spatiaux et les événements de la même manière. Faire de la prospective va nécessiter la possibilité de simuler, et donc de stocker, plusieurs versions possibles d'une ville pour les comparer.

Le verrou central largement adressé dans ce mémoire est la localisation du piéton *via* le calcul de pose de sa caméra tenue en main en utilisant une connaissance préalable de données spatialisées contenues dans un SIG. Cette localisation a pris plusieurs formes selon le type et les dimensions des données d'entrées : image, données spatiales 2D, 2,5D ou 3D et données inertielles. J'ai exploré au cours de ces recherches plusieurs combinaisons possibles à travers un ensemble de collaborations. Récemment, avec une collaboration avec le laboratoire GEOLOC de l'IFSTTAR, j'ai pu ajouter une dimension supplémentaire pour un système dédié au piéton : prendre en compte les spécificités de sa marche.

Les données spatialisées se multiplient et leurs sources sont maintenant diverses. Dans les usages de la géolocalisation sur site présentés ici, nous avons pu détailler quelques méthodes pour extraire à l'aide de techniques de vision par ordinateur des informations spatiales qui vont pouvoir par rétroaction enrichir la base de données spatiales dont la connaissance préalable a permis la localisation. Un affichage sur site des données spatialisées va nous autoriser à les qualifier. Par un autre effet de bouclage, la marche piéton a bénéficié pour une de ses applications, la navigation à l'estime, d'une géolocalisation fine sur site. Enfin, la géolocalisation grand public, à l'aide des puces GNSS embarquées sur les *smartphones*, a provoqué des changements de pratique durables et profonds dans le partage d'informations environnementales spatialisées. Nous avons commencé à étudier comment ces pratiques sont intégrées par les collectivités dans les démarches participatives, quels sont leurs

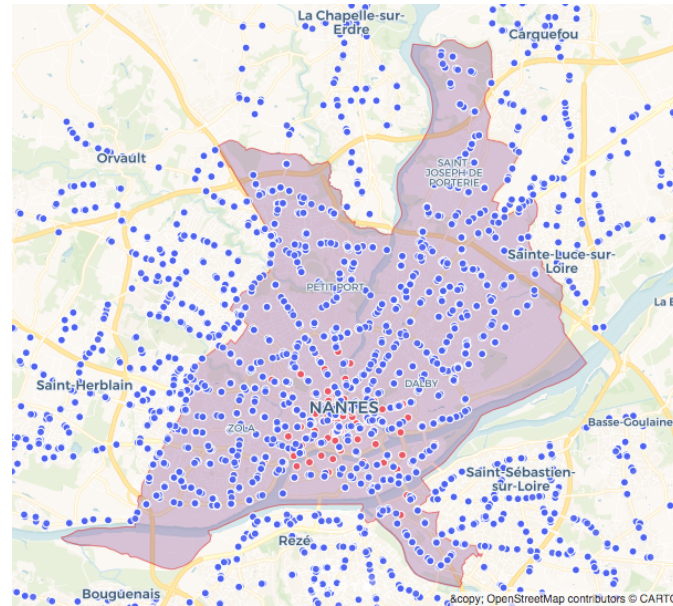


FIGURE 7.1 – Bornes vélo (rouge) et stations de bus et tram (bleu) sur la ville de Nantes (source <https://data.nantesmetropole.fr> données exportées le 05/07/18).

avantages et leurs limites.

Dans le chapitre 3, j'ai détaillé les raisons qui font qu'actuellement je considère qu'accéder sur site à des données spatialisées dans un « ici et maintenant » augmenté vont permettre à l'utilisateur une meilleure perception en contexte de ces informations et une action. La technologie pour moi la plus adaptée à cela est la réalité augmentée. Des travaux préalables dans l'état de l'art en montrent l'intérêt mais au delà de la partie technique, ce qui nécessite une investigation plus approfondie sont les usages. C'est dans cette voie que je compte diriger la suite de mes recherches. Vis à vis de l'urbanisme et de l'aménagement urbain, je vais m'intéresser à deux sortes de piétons sur site immergés dans la ville qui n'ont pas les mêmes usages possibles de la donnée spatialisée : le grand public et les professionnels de l'aménagement.

Mon but reste d'obtenir une pose et un suivi à 6 degrés de liberté sur site de la caméra tenue en main d'un piéton avec un système mobile grand public à l'échelle, si ce n'est de la ville, au moins d'un quartier. A court terme, je vais continuer les travaux d'hybridation vision/inertiel pour aller vers une fusion serrée et un calcul de pose en continu effectivement déployés sur un appareil mobile avec la connaissance de certains objets 3D du mobilier urbains. Par exemple sur Nantes, si en plus des bornes de vélo on utilise la connaissance de la position des abris bus et tramway, le maillage de la ville est bien plus dense (figure 7.1). Cela nous donnerait une possibilité bien plus grande de suivre un piéton dans la ville mais toujours de manière autonome sans dépendre d'une infrastructure réseau.

Utiliser un mobilier urbain peu texturé comme un arrêt de bus ou de tram mais dont le modèle 3D est peu variable va imposer de modifier la brique de calcul de pose vision en utilisant des algorithmes basés modèles

comme l'asservissement visuel virtuel, en utilisant une méthode d'estimation robuste pour améliorer sa sensibilité au bruit.

Nous pouvons envisager de nous orienter vers des algorithmes récents de SLAM visuel et inertiel comme [QLS17] qui est prévu pour traiter des environnements larges, mais pas encore de la taille d'une ville.

Le calcul qualifié de pose présenté ici a des perspectives de valorisation industrielle dans la visualisation de canalisations enterrées pour les chantiers où la précision nécessaire règlementaire doit être inférieure à 40 cm ou encore pour une localisation dans un espace industriel vu qu'il fonctionne aussi bien en intérieur qu'en extérieur.

Je débute actuellement d'autres travaux sur la localisation sur site à l'aide d'isovists<sup>1</sup> réels extraits d'images et d'isovists calculés (dans le cadre du groupe de recherche AAU 3V) et qui pourraient être complémentaires des travaux de localisation basés sur la ligne de ciel.

A moyen terme, je compte explorer les usages issus de cette localisation et ce suivi sur site, plus ou moins précis, pour le grand public et les professionnels de l'aménagement. Pour cela je voudrais travailler sur des méthodes de visualisation sur site de données spatialisées pour donner à voir l'invisible (affichage sur site d'un phénomène non visible comme le vent par exemple (thèse en cours de G. Giraldo) ou la pollution ou encore des données de simulations).

A long terme, je veux m'adresser aux usagers de la ville et aux professionnels de l'aménagement qui n'ont pas les mêmes nécessités d'utilisation des données spatiales. D'une part, les utilisateurs quotidiens de la ville ne comprennent pas nécessairement facilement les intentions de conception des urbanistes. Une solution pour faciliter cette compréhension est leur montrer des projets et des simulations pour les aider à comprendre les choix de conception. Pour avoir une contextualisation directe, cette représentation peut se faire sur site en utilisant la RA. Pour naviguer entre les échelles, une vue en surplomb avec une maquette avec laquelle ils peuvent interagir les aiderait à tester les impacts de ce qui est proposé par la simulation à différentes échelles. Les résultats de ces outils de co-conception pourraient également être affichés sur le site. Je souhaiterais mettre en place et étudier les usages, avantages et inconvénients de tels dispositifs.

D'autre part, les urbanistes des professionnels n'ont pas nécessairement accès facilement à toutes les données spatiales dont ils ont besoin pour concevoir leur projet. Je souhaiterais étudier quelles sont les données nécessaires par tâche, l'impact et l'usage de leurs accès sur site sur les pratiques professionnelles. Les professionnels, bien que cherchant la participation habitante, ne vont pas jusqu'à partager le point de vue de l'usager. J'aimerais mettre en place un système pour leur permettre d'avoir accès à un retour participatif habitant, leur faire partager les points de vue et les usages habitants à travers différentes temporalités.

Ces travaux à travers les échelles, le choix des données à afficher et

1. Un isovist correspond à l'ensemble des points de l'espace visibles à 360° par un observateur positionné dans un espace architectural ou urbain. On peut aussi l'appeler bassin de visibilité. Il peut être calculé/représenté en 2D ou en 3D.

les types de représentation vont permettre *via* une médiation avec des données urbaines grâce à une localisation sur site un échange de points de vue situés entre professionnels et habitants pour aller, j'espère, vers une co-construction de l'espace urbain.

# BIBLIOGRAPHIE

- [AGG<sup>+</sup>15] Clemens Arth, Raphael Grasset, Lukas Gruber, Tobias Langlotz, Alessandro Mulloni, and Daniel Wagner. The History of Mobile Augmented Reality. *arXiv preprint arXiv :1505.01319*, 2015. (Cité pages ix, 32 et 33.)
- [AHNS99] R. Azuma, B. Hoff, H. Neely, and R. Sarfaty. A motion-stabilized outdoor augmented reality system. In *Proceedings IEEE Virtual Reality (Cat. No. 99CB36316)*, volume 99, pages 252–259, 1999. (Cité page 34.)
- [AKRS11] Clemens Arth, Manfred Klopschitz, Gerhard Reitmayr, and Dieter Schmalstieg. Real-time self-localization from panoramic images on mobile devices. *2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pages 37–46, oct 2011. (Cité page 35.)
- [AMS12] Clemens Arth, Alessandro Mulloni, and Dieter Schmalstieg. Exploiting Sensors on Mobile Phones to Improve Wide-Area Localization. In *ICPR*, number ICPR, pages 2152–2156, 2012. (Cité page 35.)
- [APV<sup>+</sup>15] Clemens Arth, Christian Pirchheim, Jonathan Ventura, Dieter Schmalstieg, and Vincent Lepetit. Instant Outdoor Localization and SLAM Initialization from 2.5D Maps. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 21(11) :1309–1318, 2015. (Cité page 36.)
- [ASR16] Nicolas Antigny, Myriam Servières, and Valerie Renaudin. Hybrid visual and inertial position and orientation estimation based on known urban 3D models. In *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pages 1–8, Madrid, oct 2016. IEEE. (Cité pages x, 12, 70, 71, 73, 74, 75, 76 et 78.)
- [ASR17a] Nicolas Antigny, Myriam Servièrès, and Valérie Renaudin. An Inertial , Magnetic and Vision Based Trusted Pose Estimation for AR and 3D Data Qualification on Long Urban Pedestrian Displacements. In *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, page Poster, 2017. (Cité pages x, 12, 70, 75 et 88.)
- [ASR17b] Nicolas Antigny, Myriam Servièrès, and Valérie Renaudin. Pedestrian Track Estimation with Handheld Monocular Camera and Inertial-Magnetic Sensor for Urban Augmented Reality. In *2017 International conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Sapporo, Japan, 2017. (Cité pages ix, xi, 9, 12, 55, 70, 75, 77, 87, 88 et 90.)

- [ASR18a] Nicolas Antigny, Myriam Servières, and Valérie Renaudin. Continuous Pose Estimation for Urban Pedestrian Applications on Hand-held Mobile Device. In *IPIN*, page à paraître, 2018. (Cité pages x, 12, 70, 72, 77, 78, 79 et 80.)
- [ASR18b] Nicolas Antigny, Myriam Servières, and Valérie Renaudin. Fusion of 3D GIS, Vision, Inertial and MagneticData for Improved Urban Pedestrian Navigationand Augmented Reality Applications. *Navigation*, page à paraître, 2018. (Cité pages x, xi, 12, 70, 71, 72, 73, 75, 76, 87, 88 et 90.)
- [Azu97] RT Azuma. A survey of augmented reality. *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, 4(August) :355–385, 1997. (Cité pages 31 et 54.)
- [BCD<sup>+</sup>12] R Billen, C Carré, V Delfosse, Benjamin Hervy, Florent Laroche, Daniel Lefèvre, Myriam Servières, and Muriel Van Ruymbeke. 3D historical models : the case studies of Liege and Nantes. In *COST Action TU801 : Semantic Enrichment of 3D city models for sustainable urban development - Workshop, Madrid : Espagne*, number 1, 2012. (Cité page 12.)
- [BCL15] Mark Billinghurst, Adrian Clark, and Gun Lee. A Survey of Augmented Reality. *Foundation and Trends in Human-Computer Interaction*, 8(2) :73–272, 2015. (Cité page 36.)
- [Ben99] Itzhak Benenson. Modeling population dynamics in the city : From a regional to a multi-agent approach. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 3(2-3) :149–170, 1999. (Cité page 42.)
- [BETVo8] Herbert Bay, Andreas Ess, Tinne Tuytelaars, and Luc Van Gool. Speeded-Up Robust Features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, 110(3) :346–359, 2008. (Cité pages 57 et 75.)
- [BGSS03] W. Bourgeois, G. Gardey, M. Servières, and R.M. Stuetz. A chemical sensor array based system for protecting wastewater treatment plants. *Sensors and Actuators B : Chemical*, 91(1-3) :109–116, jun 2003. (Cité page 1.)
- [BK11] Gabor Bartha and Sandor Kocsis. Standardization of Geographic Data : The European INSPIRE Directive. *European Journal of Geography*, 22 :79–89, 2011. (Cité page 26.)
- [BLPN04] Yvan Bédard, Suzie Larrivée, Marie-Josée Proulx, and Martin Nadeau. Modeling Geospatial Databases with Plug-Ins for Visual Languages : A Pragmatic Approach and the Impacts of 16 Years of Research and Experimentations on Perceptory. *Conceptual Modeling for Advanced Application Domains*, 3289(3289) :17–30, 2004. (Cité page 42.)
- [BMELW11] B Ben-Moshe, E Elkin, H Levi, and A Weissman. Improving Accuracy of GNSS Devices in Urban Canyons. *Presented at : Canadian Conference on Computational Geometry*, 2011. (Cité page 54.)
- [BMS08a] N. Bioret, G. Moreau, and M. Servières. Localization approach based on image/gis correspondence using a simple

- 2d building layer. In *Regards*, pages 28–29, 2008. (Cité page 58.)
- [BMS08b] Nicolas Bioret, Guillaume Moreau, and Myriam Servières. Outdoor Localization Approach Based on Image / GIS Correspondence Using a Simple 2D Building Layer. In T. Badard and D. Daniel, editors, *2nd International Workshop on Mobile Geospatial Augmented Reality*, Québec, 2008. Springer-Verlag. (Cité pages ix, 58, 61 et 62.)
- [BMS09a] N. Bioret, G. Moreau, and M. Servières. Urban Localization based on Correspondences between Street Photographs and 2D Building GIS Layer. In *CORESA*, Toulouse, France, 2009. (Cité pages 58 et 60.)
- [BMS09b] N. Bioret, G. Moreau, and M. Servières. Géolocalisation en milieu urbain par appariement entre une collection d’images et un SIG 2D. *Ingénierie des systèmes d’information*, 14(5) :107–131, 2009. (Cité pages ix, 58 et 60.)
- [BMS09c] Nicolas Bioret, Guillaume Moreau, and Myriam Servières. Pose computation based on Correspondence between 2D GIS and Street Images. In *INTELLIGENT SYSTEMS AND AUTOMATION : 2nd Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation*, pages 169–174. Aip, 2009. (Cité pages 58 et 60.)
- [BMS10] Nicolas Bioret, Guillaume Moreau, and Myriam Servières. Towards outdoor localization from GIS data and 3D content extracted from videos. In *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pages 3613–3618. IEEE, jul 2010. (Cité pages 58 et 63.)
- [BOHS15] Michael Bloesch, Sammy Omari, Marco Hutter, and Roland Siegwart. Robust visual inertial odometry using a direct EKF-based approach. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 298–304. IEEE, sep 2015. (Cité page 36.)
- [Bou14] Dominique Boullier. Habitele : mobile technologies reshaping urban life. *URBE*, 1(6) :13–16, 2014. (Cité page 27.)
- [BZS<sup>+</sup>12] R. Billen, C. Zaki, M. Servières, G. Moreau, and P. Hallot. Developing an ontology of space : Application to 3D city modeling. In T. Leduc, G. Moreau, and R. Billen, editors, *Usage, Usability, and Utility of 3D City Models - European COST Action TU0801*, volume 02007, page 02007, Les Ulis, France, oct 2012. EDP Sciences. (Cité page 12.)
- [CH14] Eduardo Camacho-Hübner. Mobilités numériques. De l’usage à l’expérience utilisateur (UX) du monde, 2014. (Cité page 29.)
- [CM92] T. P. Caudell and D. W. Mizell. Augmented reality : an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences*, volume ii, pages 659–669 vol.2, Jan 1992. (Cité page 32.)



- [CMPCo6] Andrew I. Comport, Eric Marchand, Muriel Pressigout, and François Chaumette. Real-time markerless tracking for augmented reality : The virtual visual servoing framework. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 12(4) :615–628, 2006. (Cité page 67.)
- [CRZ97] Antonio Criminisi, Ian Reid, and Andrew Zisserman. A plane measuring device. *Image and Vision Computing*, 17(8) :625–634, Septembre 1997. (Cité page 61.)
- [dBGH<sup>+</sup>94] Françoise de Blomac, Rony Gal, Manuel Hubert, Didier Richard, and Christophe Tourret. *ARC/INFO concepts et applications en géomatique*. Hermes, Paris, 1994. (Cité page 28.)
- [DLD15] Éric Desjardin, Bastien Lefebvre, and Cyril De Runz. Intégration de l'imperfection de l'information dans les dynamiques spatiales Définitions, outils et exemples. *Rev. Int. Geomat.*, 23(3) :437 – 463, 2015. (Cité pages 27, 42 et 55.)
- [Dou16] Nicolas Douay. La numérisation des dispositifs de participation de la Mairie de Paris. *Netcom*, (30-3/4) :249–280, dec 2016. (Cité page 91.)
- [DRMSo7] Andrew J. Davison, Ian D. Reid, Nicholas D. Molton, and Olivier Stasse. MonoSLAM : Real-Time Single Camera {SLAM}. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29(6) :1052–1067, 2007. (Cité page 35.)
- [ESC14] Jakob Engel, Thomas Schöps, and Daniel Cremers. LSD-SLAM : Large-Scale Direct Monocular SLAM. In *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pages 834–849. 2014. (Cité pages 35 et 36.)
- [FB81] Martin a Fischler and Robert C Bolles. Random Sample Consensus : A Paradigm for Model Fitting with. *Communications of the ACM*, 24 :381–395, 1981. (Cité pages 57, 63 et 68.)
- [FEIo2] Steven K. FEINER. Augmented Reality : A new way of seeing. *Scientific American*, 286(4) :34–41, 2002. (Cité page 31.)
- [FMHW97] Steven Feiner, Blair Macintyre, Tobias Höllerer, and Anthony Webster. A Touring Machine : Prototyping 3D Mobile Augmented Reality Systems for Exploring the Urban Environment. In *ISWC '97 (Int. Symp. on Wearable Computing)*, volume 97, pages 74–81, 1997. (Cité pages 34 et 35.)
- [FZG<sup>+</sup>17] Christian Forster, Zichao Zhang, Michael Gassner, Manuel Werlberger, and Davide Scaramuzza. SVO : Semidirect Visual Odometry for Monocular and Multicamera Systems. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(2) :249–265, 2017. (Cité page 35.)
- [GFPMSo9] M. Golparvar-Fard, F. Pena-Mora, and S. Savarese. D 4 AR - A 4-Dimensional augmented reality model for automating construction progress monitoring data collection , Processing and communication. *Journal of Information Technology in Construction*, 14(June) :129–153, 2009. (Cité page 37.)

- [GJMR10] Rafael Grompone Von Gioi, Jeremie Jakubowicz, Jean Michel Morel, and Gregory Randall. LSD : A fast line segment detector with a false detection control. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(4) :722–732, 2010. (Cité pages 65 et 82.)
- [GKNH12] Gerhard Gröger, Thomas Kolbe, Claus Nagel, and Karl-Heinz Häfele. OGC City Geography Markup Language (CityGML) En-coding Standard, 2012. (Cité page 42.)
- [GLZR17] Jens Grubert, Tobias Langlotz, Stefanie Zollmann, and Holger Regenbrecht. Towards pervasive augmented reality : Context-awareness in augmented reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 23(6) :1706–1724, 2017. (Cité pages 31, 36 et 38.)
- [Goo07] Michael F. Goodchild. Citizens as sensors : The world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4) :211–221, 2007. (Cité page 27.)
- [GR16] Dann Goncalves and Samuel Rufat. Open data et droit de la donnée : les collectivités à l’épreuve des réglementations européennes. *Cybergeo*, aug 2016. (Cité pages 26 et 27.)
- [GW05] Antony Galton and Michael Worboys. Processes and Events in Dynamic Geo-Networks. In M.A. Rodríguez, I. Cruz, S. Levashkin, and M.J. Egenhofer, editors, *International Conference on GeoSpatial Semantics*, volume 3799, pages 45–59. Springer, 2005. (Cité pages ix et 44.)
- [HBL<sup>+</sup>12] B. Hervy, R. Billen, F. Laroche, C. Carré, M. Servières, M. Van Ruymbeke, V. Tourre, V. Delfosse, and J.-L. Kerouanton. A generalized approach for historical mock-up acquisition and data modelling : Towards historically enriched 3D city models. In T. Leduc, G. Moreau, and R. Billen, editors, *Usage, Usability, and Utility of 3D City Models - European COST Action TU0801*, volume 02009, page 02009, Les Ulis, France, oct 2012. EDP Sciences. (Cité page 12.)
- [HFT<sup>+</sup>99] Tobias Höllerer, Steven Feiner, Tachio Terauchi, Gus Rashid, and Drexel Hallaway. Exploring MARS : Developing indoor and outdoor user interfaces to a mobile augmented reality system. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 23(6) :779–785, 1999. (Cité pages 34 et 35.)
- [HSL16] Wei Huang, Min Sun, and Songnian Li. A 3D GIS-based interactive registration mechanism for outdoor augmented reality system. *Expert Systems with Applications*, 55 :48–58, 2016. (Cité page 37.)
- [HWR09] M Hakkarainen, C Woodward, and K Rainio. Software Architecture for Mobile Mixed Reality and 4D BIM Interaction. *Proc. 25th CIB W78 Conference*, pages 1–8, 2009. (Cité page 37.)
- [Jol11] Thierry Joliveau. Le géoweb, un nouveau défi pour les bases de données géographiques. *Espace Géographique*, 40(2) :154–163, 2011. (Cité pages 26, 27, 29 et 30.)

- [JPE<sup>+</sup>16] Florence Jacquinod, Frédéric Pedrinis, Jérémy Edert, Gilles Gesquière, Florence Jacquinod, Frédéric Pedrinis, Jérémy Edert, Gilles Gesquière, Automated Production, Florence Jacquinod, Frédéric Pedrinis, Jérémy Edert, and Gilles Gesquière. Automated Production of Interactive 3D Temporal Geovisualizations so as to Enhance Flood Risk Awareness To cite this version : HAL Id : hal-01413338 Automated Production of Interactive 3D Temporal Geovisualizations so as to Enhance Flood Risk Awareness. In *UDMV*, Lièges, Belgique, 2016. (Cité page 28.)
- [KFD15] Hannu Kukka, Marcus Foth, and Anind K. Dey. Transdisciplinary approaches to urban computing. *International Journal of Human Computer Studies*, 81 :1–3, 2015. (Cité page 31.)
- [KJG09] Mahzad Kalantari, Franck Jung, and Jeanpierre Guedon. Precise, automatic and fast method for vanishing point detection. *Photogrammetric Record*, 24(127) :246–263, 2009. (Cité pages 60, 65 et 82.)
- [KLY<sup>+</sup>14] Hannu Kukka, Anna Luusua, Johanna Ylipulli, Tiina Suopajärvi, Vassilis Kostakos, and Timo Ojala. From cyberpunk to calm urban computing : Exploring the role of technology in the future cityscape. *Technological Forecasting and Social Change*, 84 :29–42, 2014. (Cité pages 30 et 31.)
- [KM07] Georg Klein and David Murray. Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces. In *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. IEEE, nov 2007. (Cité pages 35 et 85.)
- [KM09] Georg Klein and David Murray. Parallel tracking and mapping on a camera phone. In *Science and Technology Proceedings - IEEE 2009 International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2009*, pages 83–86, 2009. (Cité page 35.)
- [KMPK14] D.a Kurz, P.G.a Meier, A.b Plopski, and G.c Klinker. Absolute spatial context-aware visual feature descriptors for outdoor handheld camera localization : Overcoming visual repetitiveness in urban environments. *VISAPP 2014 - Proceedings of the 9th International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, 2 :56–67, 2014. (Cité page 35.)
- [Kolo9] Thomas H. Kolbe. Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. In J. Lee and S. Zlatanova, editors, *3D Geo-Information Sciences*, pages 15–31. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009. (Cité pages 42 et 49.)
- [KSN<sup>+</sup>13] Jesper Kjeldskov, Mikael B. Skov, Glen W. Nielsen, Søren Thorup, and Michael Vestergaard. Digital urban ambience : Mediating context on mobile devices in a city. *Pervasive and Mobile Computing*, 9(5) :738–749, 2013. (Cité pages 25, 29 et 30.)
- [LBP06] Suzie Larrivée, Yann Bédard, and Jacynthe Pouliot. Fondement de la modélisation conceptuelle des bases de données

- géospatiales 3D. *Revue internationale de géomatique*, 16(1) :9–27, mar 2006. (Cité page 42.)
- [LDKB12] Gun A Lee, Andreas Dünser, Seungwon Kim, and Mark Billinghurst. CityViewAR : A Mobile Outdoor AR Application for City Visualization. In *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2012 Arts, Media, and Humanities Proceedings*, pages 57–64, Atlanta, 2012. (Cité page 35.)
- [LGK<sup>+</sup>94] J. M. Loomis, R. G. Golledge, R. L. Klatzky, J. M. Speigle, and J. Tietz. Personal guidance system for the visually impaired. In *Proceedings of the ACM Conference on Assistive Technologies, ASSETS 1994*, pages 85–91, Marina Del Rey, California, USA, 1994. ACM. (Cité pages 31 et 32.)
- [LMZ<sup>+</sup>11] Tobias Langlotz, Stefan Mooslechner, Stefanie Zollmann, Claus Degendorfer, Gerhard Reitmayr, and Dieter Schmalstieg. Sketching up the world : in situ authoring for mobile Augmented Reality. *Personal and Ubiquitous Computing*, 16(6) :623–630, jul 2011. (Cité page 37.)
- [LNSG14] Tobias Langlotz, Thanh Nguyen, Dieter Schmalstieg, and Raphael Grasset. Next-Generation Augmented Reality Browsers : Rich, Seamless, and Adaptive. *Proceedings of the IEEE*, 102(2) :155–169, feb 2014. (Cité page 34.)
- [Low99] D G Lowe. Object recognition from local scale-invariant features. In *Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on*, volume 2, pages 1150–1157 vol.2, 1999. (Cité page 58.)
- [Low04] David G Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60.2 :91–110, 2004. (Cité page 83.)
- [LSB<sup>+</sup>15] Simon Lynen, Torsten Sattler, Michael Bosse, Joel Hesch, Marc Pollefeys, and Roland Siegwart. Get Out of My Lab : Large-scale, Real-Time Visual-Inertial Localization. *Robotics : Science and Systems XI*, 2015. (Cité page 36.)
- [LSM11] Ruijun Liu, Myriam Servieres, and Guillaume Moreau. Facades Modeling from a Ground-View Video with Map Constraints. In *MVA2011 IAPR Conference on Machine Vision Applications 13-15nd June 2011 Nara, Japan*, pages 1–4, 2011. (Cité pages 84 et 85.)
- [LSM12a] R. Liu, M. Servières, and G. Moreau. A 3D-GIS updating method with interaction in an urban environment. In *ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA 2012*, volume 1, pages 369–374, 2012. (Cité pages x, 84, 85 et 86.)
- [LSM12b] R. Liu, M. Servières, and G. Moreau. A GIS data updating method with video. In *GRAPP 2012 IVAPP 2012 - Proceedings of the International Conference on Computer Graphics Theory and Applications and International Conference on Information Visualization Theory and Applications*, pages 511–514, 2012. (Cité pages x, 84, 85 et 86.)

- [LSS17] Gwendoline L’Her, Myriam Servières, and Daniel Siret. Participer et transformer les territoires interactions entre habitants, techniques et milieux a partir de la notion de « Citoyen-Capteur ». *NetCom*, 31-1/2 :153–174, 2017. (Cité pages 29, 90 et 91.)
- [LSS18] Gwendoline L’Her ;, Myriam Servières, and Daniel Siret. The concept of citizen as sensors in urban public action : interactions in urban walks. In *Communication dans un congrès, III International Conference URBAN E-PLANNING*, Lisbonne, 2018. (Cité page 90.)
- [LT94] R. Laurini and D. Thompson. *Fundamentals of Spatial Information Systems*. Academic Press, London, 3rd edition, 1994. (Cité page 28.)
- [LTS<sup>+</sup>16] Jean-Gil Langlois, Vincent Tourre, Myriam Servières, Bertrand Gervais, and Gilles Gesquière. A data model for simulation models relying on spatio-temporal urban data. In Filip Biljecki and Vincent Tourre, editors, *Eurographics Workshop on Urban Data Modelling and Visualisation*, 2016. (Cité pages ix, 12, 49, 50 et 51.)
- [Lus14] Michel Lussault. Hyperspatialité. *espacestemp.net*, 2014. (Cité page 29.)
- [MAMT15] Raul Mur-Artal, J. M. M. Montiel, and Juan D. Tardos. ORB-SLAM : A Versatile and Accurate Monocular SLAM System. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(5) :1147–1163, oct 2015. (Cité page 35.)
- [MCo2] E Marchand and François Chaumette. Virtual visual servoing : A framework for real-time augmented reality. In *H.-P. EUROGRAPHICS 2002 Conference Proceeding*, pages 289–298, 2002. (Cité page 67.)
- [MD11] Jules Moloney and Bharat Dave. From abstraction to being there : mixed reality at the early stages of design. *International Journal of Architectural Computing*, 9(1) :1–16, 2011. (Cité page 38.)
- [MGDMo6] Bogdan Moisuc, Jérôme Gensel, Paule-Annick Davoine, and Hervé Martin. Designing Adaptive Spatio-temporal Information Systems for Natural Hazard Risks with ASTIS. In *Web and Wireless Geographical Information Systems, 6th International Symposium, W2GIS 2006*, pages 146–157, 2006. (Cité page 43.)
- [MGFL18] Thibaud Michel, Pierre Genevès, Hassen Fourati, and Nabil Layaïda. Attitude estimation for indoor navigation and augmented reality with smartphones. *Pervasive and Mobile Computing*, 46 :96–121, 2018. (Cité pages 34 et 54.)
- [Min16] Ministère de la transition écologique et solidaire. L’information Géographique, 2016. (Cité page 28.)
- [MLWX12] Sun Min, Liu Lei, Huang Wei, and Ren Xiang. Interactive registration for Augmented Reality GIS. *Proceedings of International Conference on Computer Vision in Remote Sensing, CVRS 2012*, 00 :246–251, 2012. (Cité page 37.)

- [MNLf07] Francesc Moreno-Noguer, Vincent Lepetit, and Pascal Fua. Accurate Non-Iterative O(n) Solution to the PnP Problem. *2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision*, pages 1–8, oct 2007. (Cité page 75.)
- [MSS09a] S. Martedi, H. Saito, and M. Servieres. Shape measurement system of foot sole surface from flatbed scanner image. In *MVA2009 IAPR Conference on Machine Vision Applications 20-22nd June 2009 Keio, Japan*, pages 2–5, 2009. (Cité page 11.)
- [MSS09b] Sandy Martedi, Hideo Saito, and Myriam Servières. 3D Shape Reconstruction of Foot Sole Surface using Flatbed Scanner. In *Workshop on Frontiers of Computer Vision*, Andong, Korea, 2009. (Cité page 11.)
- [MSUK14] Sven Middelberg, Torsten Sattler, Ole Untzelmann, and Leif Kobbelt. Scalable 6-DOF Localization on Mobile Devices. In Tuytelaars T. Fleet D., Pajdla T., Schiele B., editor, *Lecture Notes in Computer Science*, pages 268–283. Springer, Cham, vol 8690 edition, 2014. (Cité page 35.)
- [MTD15] Sebastjan Meža, Žiga Turk, and Matevž Dolenc. Measuring the potential of augmented reality in civil engineering. *Advances in Engineering Software*, 90 :1–10, 2015. (Cité page 37.)
- [MUS<sup>+</sup>09] Ryo Mitsumori, Hideaki Uchiyama, Hideo Saito, M. Servières, and G. Moreau. Change Detection Based on SURF and Color Edge Matching. In *Invited Workshop on Vision and Control for Access Space (VCAS) in 9th Asian Conference on Computer Vision (ACCV)*, pages 1–12, 2009. (Cité page 11.)
- [Nat17] National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. GPS Accuracy. <http://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>, 2017. Accessed : 2017-02-22. (Cité page 54.)
- [NI13] Gareth Nicholls and Powertech Ist. Using augmented reality as an extension to utility GIS. *PositionIT*, (February) :62–64, 2013. (Cité pages 31 et 34.)
- [NLD11] Richard A Newcombe, Steven J Lovegrove, and Andrew J Davison. DTAM : Dense tracking and mapping in real-time. In *2011 International Conference on Computer Vision*, pages 2320–2327. IEEE, nov 2011. (Cité page 35.)
- [NNK<sup>+</sup>11] T. Narumi, S. Nishizaka, T. Kajinami, T. Tanikawa, and M. Hirose. Meta Cookie+ : An Illusion-Based Gustatory Display. In *Virtual and Mixed Reality - New Trends. VMR 2011, Lecture Notes in Computer Science*, volume 6773, 2011. (Cité page 31.)
- [OSR17] M. Ortiz, M. De Sousa, and V. Renaudin. A new PDR navigation device for challenging urban environments. *Journal of Sensors*, vol. 2017(Article ID 4080479), 2017. (Cité page 71.)
- [Par97] C Parent. MADS, modèle conceptuel spatio-temporel. *Revue internationale de géomatique*, 7(3-4) :159–186, 1997. (Cité pages ix et 43.)

- [PCV<sup>+</sup>16] Barbara E.A. Piga, Cecilia Chiarini, Irene Vegetti, Marco Boffi, Nicola Rainisio, Aurore Bonnet, Valerio Signorelli, Vincent Tourre, and Myriam Servières. Mapping Ambiances : a synopsis of theory and practices in an interdisciplinary perspective. In *Ambiances, tomorrow 3rd International Congress on Ambiances, Volos*, 2016. (Cité page 11.)
- [Peu14] Valérie Peugeot. Collaborative ou intelligente? La ville entre deux imaginaires. In *Devenirs Urbains*, page 378. 2014. (Cité page 27.)
- [PSZo6] Christine Parent, Stefano Spaccapietra, and Esteban Zimányi. *Conceptual Modeling for Traditional and Spatio-Temporal Applications*. Springer Berlin Heidelberg, 2006. (Cité pages 42, 43 et 46.)
- [PTo1] Wayne Piekarski and Bruce H Thomas. Tinmith-Metro : New Outdoor Techniques for Creating City Models with an Augmented Reality Wearable Computer. *Wearable Computers, 2001. Proceedings. Fifth International Symposium*, pages 31–38, 2001. (Cité page 34.)
- [PTJo2] Rosanne Price, Nectaria Tryfona, and Christian S. Jensen. Extended Spatiotemporal UML. In *Successful Software Reengineering*, pages 143–170. IGI Global, 2002. (Cité page 42.)
- [PTKT04] Nikos Pelekis, Babis Theodoulidis, Ioannis Kopanakis, and Yannis Theodoridis. Literature review of spatio-temporal database models. *Knowledge Engineering Review*, 19(3) :235–274, 2004. (Cité pages 42 et 43.)
- [qdllF] Office québécois de la langue Française. Cap sur la géomatique. (Cité pages 2, 26 et 28.)
- [QLS17] Tong Qin, Peiliang Li, and Shaojie Shen. VINS-Mono : A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator. *Journal of Field Robotics*, 35(1) :23–51, aug 2017. (Cité pages 36 et 95.)
- [RAL10] V. Renaudin, M. Haris Afzal, and G. Lachapelle. Complete triaxis magnetometer calibration in the magnetic domain. *J. Sensors*, 2010 :967245 :1–967245 :10, 2010. (Cité page 74.)
- [RC14] V. Renaudin and C. Combettes. Magnetic, acceleration fields and gyroscope quaternion (MAGYQ)-based attitude estimation with smartphone sensors for indoor pedestrian navigation. *Sensors*, 14(12) :22864–22890, 2014. (Cité pages 75 et 87.)
- [RD07] G. Reitmayr and T.W. Drummond. Going out : Robust model-based tracking for outdoor augmented reality. *Proceedings - ISMAR 2006 : Fifth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2007. (Cité pages 34 et 35.)
- [RED02] Gw Roberts, Andrew Evans, and A Dodson. The use of augmented reality, GPS and INS for subsurface data visualization. *FIG XXII International ...*, pages 1–12, 2002. (Cité page 37.)

- [REDo5] Gerhard Reitmayr, Ethan Eade, and Tom Drummond. Localisation and interaction for augmented maps. In *Proceedings of the 4th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pages 120–129. IEEE Computer Society, 2005. (Cité page 36.)
- [RLG<sup>+</sup>02] Miguel Ribo, Peter Lang, Harald Ganster, Markus Brandner, Christoph Stock, and Axel Pinz. Hybrid tracking for outdoor augmented reality applications. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 22(6) :54–63, 2002. (Cité page 35.)
- [RSL12] V. Renaudin, M. Susi, and G. Lachapelle. Step length estimation using handheld inertial sensors. *Sensors*, 12(7) :8507–8525, 2012. (Cité page 78.)
- [RTIC10] Ian Richardson, Murray Thomson, David Infield, and Conor Clifford. Domestic electricity use : A high-resolution energy demand model. *Energy and Buildings*, 42(10) :1878–1887, oct 2010. (Cité page 42.)
- [SAYTo2] Kiyohide Satoh, Mahoro Anabuki, Hiroyuki Yamamoto, and Hideyuki Tamura. A Hybrid Registration Method for Outdoor Wearable Mixed Reality. 7(2) :129–137, 2002. (Cité page 35.)
- [SB14] Patrick Simo Kanmeugne and Aurélie Beynier. Simulating Autonomous Pedestrians Navigation : A Generic Multi-Agent Model to Couple Individual and Collective Dynamics. *8th International Workshop on Agents in Traffic and Transportation (ATT-2014)*, 2014. (Cité page 42.)
- [Sch11] Gerhard Schall. *Dissertation Mobile Augmented Reality for Human Scale Interaction with Geospatial Models*. PhD thesis, Graz University of Technology, 2011. (Cité page 30.)
- [SDo8] Do Hyoung Shin and Phillip S. Dunston. Identification of application areas for Augmented Reality in industrial construction based on technology suitability. *Automation in Construction*, 17(7) :882–894, 2008. (Cité page 36.)
- [SEC14] Thomas Schops, Jakob Enge, and Daniel Cremers. Semi-dense visual odometry for AR on a smartphone. *ISMAR 2014 - IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality - Science and Technology 2014, Proceedings*, pages 145–150, 2014. (Cité page 36.)
- [SF11] D. Scaramuzza and F. Fraundorfer. Visual odometry [tutorial]. *IEEE robotics & automation magazine*, 18(4) :80–92, 2011. (Cité page 78.)
- [SL15] Valerio Signorelli and Thomas Leduc. Utilisation du socle 3D CityGML Nantes - Secteur centre-ville. Technical Report AUGUST, CRENAU-UMR AAU, Nantes, 2015. (Cité pages ix, 56 et 57.)
- [SLS17] Myriam Servières, Gwendoline L’Her, and Daniel Siret. Mobile devices and urban ambiances : how connected wearable tools change the ways we perceive and design public spaces.



- In Barbara E. A. Piga and Rossella Salerno, editors, *Urban Design and Representation, A Multidisciplinary and Multisensory Approach*. Springer International Publishing, 2017. (Cité pages 10 et 90.)
- [SMSC16] Bernard Semaan, Guillaume Moreau, Myriam Servières, and Bilal Chebaro. Towards Automated Image Geolocalization Refining. In *SAGEO 2016 - Poster*, 2016. (Cité page 81.)
- [SOR17] J. Le Scornec, M. Ortiz, and V. Renaudin. Foot-mounted pedestrian navigation reference with tightly coupled GNSS carrier phases, inertial and magnetic data. In *2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pages 1–8, Sept 2017. (Cité page 79.)
- [SPM<sup>+</sup>18] Myriam Servières, Barbara Piga, Eugenio Morello, Ignacio Requena, Gwendoline L’Her, Steven Saulnier-Sinan, and Daniel Siret. Envisioning future urban scenarios - The outcomes of the international Mobiance 3 workshop on Sharing Cities, Ambient Commons and Urban Futures. In *eCAADe*, page à paraître, 2018. (Cité pages 10, 11 et 90.)
- [SPSM16] Myriam Servières, Barbara E.A. Piga, Daniel Siret, and Nicolas Minvielle. Emotional Cities : imaginary future of ambiances explored in the Mobiance workshop. In *Ambiances, tomorrow 3rd International Congress on Ambiances*, 2016. (Cité pages 10 et 11.)
- [SRo6] Dieter Schmalstieg and Gerhard Reitmayr. Augmented Reality as a Medium for Cartography. In G Gartner W. Cartwright M. Peterson, editor, *Multimedia Cartography, 2nd ed.*, pages 267–282. Springer, 2006. (Cité page 36.)
- [SRL13] M. Susi, V. Renaudin, and G. Lachapelle. Motion mode recognition and step detection algorithms for mobile phone users. *Sensors*, 13(2) :1539–1562, 2013. (Cité page 78.)
- [SSJ10] G. Schall, D. Schmalstieg, and S. Junghanns. VIDENTE-3D Visualization of Underground Infrastructure using Handheld Augmented Reality. *Geohydroinformatics-Integrating GIS and Water Engineering*, 1 :1–17, 2010. (Cité page 37.)
- [SSL14a] Myriam Servières, Daniel Siret, and Laurent Lescop. Mobile Devices for Multimodal Communication and Instrumented Collaboration in Urban Design. In *Digital Intelligence - Poster*, 2014. (Cité page 10.)
- [SSL14b] Myriam Servières, Daniel Siret, and Laurent Lescop. Outils numériques mobiles, ambiances et design urbain : quelques résultats issus du workshop pluridisciplinaire Mobiance. In *Scan’14*, pages 233–243. Presses Universitaires de Nancy, 2014. (Cité page 10.)
- [SSL14c] Daniel Siret, Myriam Servières, and Laurent Lescop. Communication multimodale et collaboration instrumentée pour le design urbain : opportunités et risques des outils mobiles analysés à travers l’expérience du workshop Mobiance. In

- COMMON'14 - *Communication multimodale et collaboration instrumentée. Regards croisés sur Énonciations, Représentations, Modalités*, 2014. (Cité page 10.)
- [SSMC17] B. Semaan, M. Servières, G. Moreau, and B. Chebaro. A geographic data gathering system for image geolocalization refining. In *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume IV-4/W3, pages 63–70, Mexico, sep 2017. (Cité pages x, 81, 82, 83 et 84.)
- [SSMP03] Thiam Souleymane, Marie Hélène Sède-Marceau, and Christine Parent. COBALT : A design tool for geographic and temporal data application. In *The 6th AGILE Conference on Geographic Information Science*, 2003. (Cité page 43.)
- [ST94] B. N. Schilit and Marvin M Theimer. Disseminating Active MapInformation to Mobile Hosts. *IEEE Network*, 8(5) :22–32, 1994. (Cité page 29.)
- [Sut68] Ivan E. Sutherland. A head-mounted three dimensional display. In *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference, Part I, AFIPS '68 (Fall, part I)*, pages 757–764, New York, NY, USA, 1968. ACM. (Cité page 32.)
- [SWR<sup>+</sup>09] Gerhard Schall, Daniel Wagner, Gerhard Reitmayr, Elise Taichmann, Manfred Wieser, Dieter Schmalstieg, and Bernhard Hofmann-Wellenhof. Global pose estimation using multi-sensor fusion for outdoor Augmented Reality. In *2009 8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pages 153–162. Ieee, oct 2009. (Cité page 35.)
- [SZR12] Gerhard Schall, Stefanie Zollmann, and Gerhard Reitmayr. Smart Vidente : advances in mobile augmented reality for interactive visualization of underground infrastructure. In *Personal and Ubiquitous Computing*, pages 1–17. Springer-Verlag, sep 2012. (Cité pages 34, 37 et 38.)
- [Thio2] Jean-Paul Thibaud. From situated perception to urban ambiances. In *First international Workshop on Architectural and Urban Ambient Environment*, page 11p, Nantes, 2002. (Cité page 30.)
- [TJ99] Nectaria Tryfona and CS Jensen. Conceptual data modeling for spatiotemporal applications. *Geoinformatica*, 268 :245–268, 1999. (Cité page 43.)
- [Tow14] Anthony M. Townsend. *Smart Cities : Big Data, Civic Hackers, and the Quest for a New Utopia*. 2014. (Cité page 27.)
- [TST10] Dzmitry Tsetserukou, Katsunari Sato, and Susumu Tachi. Exointerfaces : Novel exoskeleton haptic interfaces for virtual reality, augmented sport and rehabilitation. In *Proceedings of the 1st Augmented Human International Conference, AH '10*, pages 1 :1–1 :6, New York, NY, USA, 2010. ACM. (Cité page 31.)
- [USN<sup>+</sup>08a] Hideaki Uchiyama, Hideo Saito, Vivien Nivesse, M. Servières, and Guillaume Moreau. AR representation system

- for 3D GIS based on camera pose estimation using distribution of intersections (in Japanese). In *VRSJ*, volume 13. VRSJ, 2008. (Cité page 11.)
- [USN<sup>+</sup>08b] Hideaki Uchiyama, Hideo Saito, Vivien Nivesse, M. Servieres, Guillaume Moreau, and E.C.N.C. IRSTV. AR representation system for 3D GIS based on camera pose estimation using distribution of intersections. In *International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, pages 218–225, Yokohama, Japan, 2008. (Cité page 11.)
- [USN<sup>+</sup>09] Hideaki Uchiyama, Hideo Saito, Vivien Nivesse, Myriam Servières, and Guillaume Moreau. MapBook AiR : AR City Representation System on a Physical Map using Topological Information. In *The 3rd Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology*, Tokyo, Japon, 2009. (Cité page 11.)
- [USSM09a] H. Uchiyama, H. Saito, M. Servieres, and G. Moreau. AR GIS on a physical map based on map image retrieval using LLAH tracking. In *Conference on Machine Vision Applications*, pages 382–385, 2009. (Cité page 11.)
- [USSM09b] Hideaki Uchiyama, Hideo Saito, Myriam Servières, and Guillaume Moreau. Ar city representation system based on map recognition using topological information. In *Virtual and Mixed Reality, Third International Conference, VMR 2009, Held as Part of HCI International 2009*, pages 128–135. Springer, 2009. (Cité page 11.)
- [USSM11] Hideaki Uchiyama, Hideo Saito, Myriam Servières, and Guillaume Moreau. Camera tracking by online learning of keypoint arrangements using LLAH in augmented reality applications. *Virtual Reality*, 15, oct 2011. (Cité page 11.)
- [VAR14] Jonathan Ventura, Clemens Arth, Gerhard Reitmayr, and Dieter Schmalstieg. Global Localization from Monocular SLAM on a Mobile Phone. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 20(4) :531–9, apr 2014. (Cité page 35.)
- [VH12] Jonathan Ventura and Tobias Höllerer. Wide-area scene mapping for mobile visual tracking. In *ISMAR 2012 - 11th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2012, Science and Technology Papers*, pages 3–12, 2012. (Cité page 35.)
- [Weg04] Michael Wegener. Overview of land-use transport models. *Transport Geography and Spatial Systems*, pages 127–146, 2004. (Cité page 42.)
- [Wei17] Hengyang Wei. *Study of camera pose estimation in urban environments using skyline in a virtual visual servoing framework*. PhD thesis, INSA Rennes, 2017. (Cité page 63.)
- [WFM<sup>+</sup>96] Anthony Webster, Steven Feiner, Blair MacIntyre, William Massie, and Theodore Krueger. Augmented reality in architectural construction, inspection and renovation. *Proc ASCE Third Congress on Computing in Civil Engineering*, (July) :1–7, 1996. (Cité page 36.)

- [WHK<sup>+</sup><sub>10</sub>] C. Woodward, M. Hakkarainen, O. Korkalo, T. Kantonen, K. Rainio, and K. Kahkönen. Mixed reality for mobile construction site visualization and communication. In *Proc. 10th Int. Conf. Constr. Appl. Virtual Reality*, pages 1–10, 2010. (Cité page 37.)
- [WKLK<sub>13</sub>] Xiangyu Wang, Mi Jeong Kim, Peter E.D. Love, and Shih-Chung Kang. Augmented Reality in built environment : Classification and implications for future research. *Automation in Construction*, 32(April 2016) :1–13, jul 2013. (Cité page 37.)
- [WPM<sup>+</sup><sub>17</sub>] Hengyang Wei, Muriel Pressigout, Luce Morin, Myriam Servières, and Guillaume Moreau. A Study of Virtual Visual Servoing Sensitivity in the Context of Image/GIS Registration for Urban Environments. In *Fifteenth IAPR International Conference on Machine Vision Application*, 2017. (Cité pages 12, 63, 68 et 69.)
- [WS<sub>03</sub>] Daniel Wagner and Dieter Schmalstieg. First steps towards handheld augmented reality. In *7th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, pages 127–135, 2003. (Cité page 34.)
- [Wu<sub>16</sub>] Yihong Wu. Image based camera localization : an overview. *CoRR*, abs/1610.03660, 2016. (Cité page 75.)
- [YNA<sub>99</sub>] Suya You, Ulrich Neumann, and Ronald Azuma. Orientation tracking for outdoor augmented reality registration. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19(6) :36–42, 1999. (Cité page 35.)
- [YUS<sup>+</sup><sub>09</sub>] Naoyuki Yazawa, Hideaki Uchiyama, Hideo Saito, M. Servières, and Guillaume Moreau. Image based view localization system retrieving from a panorama database by surf. In *Proc. of the IAPR Conference on Machine Vision Applications*, 2009. (Cité pages ix, 11, 56 et 58.)
- [Zak<sub>11</sub>] Chamseddine Zaki. *Modélisation spatio-temporelle multi-échelle des données dans un SIG urbain*. PhD thesis, École Centrale Nantes, 2011. (Cité pages 43 et 44.)
- [ZHK<sup>+</sup><sub>14</sub>] Stefanie Zollmann, Christof Hoppe, Stefan Kluckner, Christian Poglitsch, Horst Bischof, and Gerhard Reitmayr. Augmented Reality for Construction Site Monitoring and Documentation. *Proceedings of the IEEE*, 102(2) :137–154, feb 2014. (Cité page 37.)
- [Zhu<sub>12</sub>] Shupeng Zhu. *Skyline based video/GIS registration method for future mobile device application*. Master thesis, École Centrale Nantes, 2012. (Cité pages 12 et 63.)
- [ZMP<sup>+</sup><sub>13</sub>] S. Zhu, L. Morin, M. Pressigout, G. Moreau, and M. Servières. Video/GIS registration system based on skyline matching method. In Brian Lovell and David Suter, editors, *2013 IEEE International Conference on Image Processing, ICIP 2013 - Proceedings*, pages 3632–3636, 2013. (Cité pages ix, x, 12, 63, 64, 65, 66 et 67.)

- [ZPS<sup>+</sup>12] S. Zhu, M. Pressigout, M. Servièrès, L. Morin, and G. Moreau. Skyline matching : A robust registration method between Video and GIS. In T. Leduc, G. Moreau, and R. Billen, editors, *Usage, Usability, and Utility of 3D City Models - European COST Action TU0801*, volume 03007, page 03007, Les Ulis, France, oct 2012. EDP Sciences. (Cité pages x, 65 et 66.)
- [ZS10] Amir Roshan Zamir and Mubarak Shah. Accurate image localization based on google maps street view. In *European Conference on Computer Vision*, pages 255–268. Springer, 2010. (Cité page 58.)
- [ZS12] Stefanie Zollmann and Gerhard Schall. Comprehensible and Interactive Visualizations of GIS Data in Augmented Reality. *8th International Symposium on Visual Computing*, pages 675–685, 2012. (Cité page 38.)
- [ZSM08] Chamseddine Zaki, Myriam Servièrès, and Guillaume Moreau. An ontology-based model for representing evolution of both data and semantic in GIS. In E. Pebesma, M. Bishr, and T. Bartoschek, editors, *GI Days*, number section 2, Münster, 2008. (Cité page 43.)
- [ZSM09a] Chamseddine Zaki, Myriam Servièrès, and Guillaume Moreau. Combining Conceptual and Ontological Models for Representing Spatio-Temporal Data and Semantic Evolution in GIS. In *Ontologies for urban development : Future development of urban ontologies*, Lièges, Belgique, 2009. (Cité page 43.)
- [ZSM09b] Chamseddine Zaki, Myriam Servièrès, and Guillaume Moreau. Using Conceptual and Ontological Models for Tracking Changes of Spatio-Temporal Objects and Concepts over Time. In *Agile*, Hannover, Germany, 2009. (Cité page 43.)
- [ZSM11a] C. Zaki, M. Servierès, and G. Moreau. Implementing conceptual spatiotemporal model into object DBMS with semantic preserving. In *ICSDM 2011 - Proceedings 2011 IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services*, pages 160–165, 2011. (Cité page 48.)
- [ZSM11b] Chamseddine Zaki, Myriam Servièrès, and Guillaume Moreau. Implementing Conceptual Spatiotemporal Model into Object DBMS with Semantic Preserving. In *ICSDM 2011 & BJ-IWGIS 2011*, Fuzhou, Fujian, China, 2011. (Cité pages ix, 43, 45, 46 et 47.)
- [ZSM11c] Chamseddine Zaki, Myriam Servièrès, and Guillaume Moreau. Transforming Conceptual Spatiotemporal Model into Object Model with Semantic Keeping. In Olga Troyer, Claudia Bauzer Medeiros, Roland Billen, Pierre Hallot, Alkis Simitsis, and Hans Mingroot, editors, *Advances in Conceptual Modeling. Recent Developments and New Directions. Lecture Notes in Computer Science.*, pages 281–290. Springer Berlin Heidelberg, 2011. (Cité page 43.)
- [ZYL<sup>+</sup>15] Toufic Zaraket, Bernard Yannou, Yann Leroy, Stéphanie Minel, and Emilie Chapotot. An Occupant-Based Energy

Consumption Model for User-Focused Design of Residential Buildings. *Journal of Mechanical Design*, 137(7) :074501, 2015. (Cité page 42.)

- [ZZS<sup>+</sup><sub>10</sub>] C. Zaki, E. Zekri, M. Servièeres, G. Moreau, and G. Hégron. *Urban spatiotemporal data modeling : Application to the study of pedestrian walkways*, volume 4. 2010. (Cité page 43.)
- [ZZS<sup>+</sup><sub>11</sub>] Chamseddine Zaki, Elyes Zekri, Myriam Servièeres, Guillaume Moreau, and Gérard Hégron. Generic modeling of application and spatiotemporal data : application to the study of pedestrian behavior. *Intelligent Decision Technologies*, 5(4) :297–302, 2011. (Cité pages ix, 42, 43, 44, 45 et 48.)

**Titre**

Méthodes pour la géolocalisation du piéton sur site - vers une médiation numérique avec les données urbaines

**Résumé**

Le but de ma recherche a été de mettre au point un système de médiation numérique avec des données urbaines pour un piéton immergé dans la ville, un lien basé sur des technologies numériques pour concevoir, analyser, représenter l'espace urbain et accéder à des informations sur cet espace urbain. La réalité augmentée est un des outils permettant cette médiation dont l'élément critique est la localisation du piéton et plus précisément le calcul de pose de la caméra qu'il transporte.

Ainsi, l'axe principal de mon travail est la géolocalisation sur site à l'aide de données spatiales de différentes dimensions. Je me suis intéressée à une phase amont qui nécessite la mise en place de modèles de données pour garder trace des modifications des données spatiales. J'ai enfin abordé quelques usages de la géolocalisation et du calcul de pose. Je conclus ce mémoire en présentant mes perspectives de recherches vers une médiation numérique avec des données urbaines pour le piéton.

**Mots-clés**

Géolocalisation, Vision par Ordinateur, Géomatique, Modélisation, Réalité Augmentée, Usages.

**Title**

Methods for on-site pedestrian geolocation - towards digital mediation with urban data

**Abstract**

The aim of my research was to develop a digital mediation system with urban data for a pedestrian immersed in the city, a link based on digital technologies to design, analyse, represent urban space and access information on this urban space. Augmented Reality is one of the tools allowing this mediation whose critical element is the location of the pedestrian and more precisely the pose calculation of the camera it carries.

Thus, the main focus of my work is geolocation on site using spatial data of different dimensions. I was interested in an upstream phase that requires the implementation of data models to keep track of spatial data changes. Finally, I touched on some uses of geolocation and pose calculation. I conclude this report by presenting my research perspectives towards digital mediation with urban data for pedestrians.

**Keywords**

Geolocalization, Computer Vision, Geomatics, Modelling, Augmented Reality, Uses.