

BRUNO ST-AUBIN

**VERS LE DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME
INTERACTIF ET COLLABORATIF DE RÉALITÉ
AUGMENTÉE GÉOSPATIALE POUR DES
APPLICATIONS EN DESIGN URBAIN**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en sciences géomatiques
pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M. Sc.)

DÉPARTEMENT DES SCIENCES GÉOMATIQUES
FACULTÉ DE FORESTERIE, DE GÉOGRAPHIE ET DE GÉOMATIQUE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2011

Résumé

Au fil des années, la nécessité de tirer profit de données géospatiales, dans tous domaines d'application, a été bien établie et les innovations dans l'utilisation de ces données ne se dénombrent plus. Cependant, les outils géomatiques traditionnels utilisés afin d'exploiter ces données, malgré leur évolution technologique remarquable des dernières années, comportent des lacunes au niveau de la visualisation, de l'interaction et de leur capacité de collaboration qui peuvent limiter la compréhension de l'espace par un public utilisateur non-expert. Pour répondre à ces limites, la technologie de réalité augmentée offre des possibilités intéressantes en ce qui a trait à la visualisation et l'interaction avec les données géospatiales 3D. Malgré les récentes avancées technologiques dans ce domaine, ce type d'application demeure peu exploré, particulièrement en contexte géospatial, ce qui fait en sorte que le développement de systèmes de réalité augmentée reste un processus laborieux et expérimental. Considérant ceci, nous proposons une étude établissant les bases du développement de systèmes interactifs et collaboratifs de réalité augmentée géospatial.

Pour cette étude, nous avons choisi de retenir le contexte d'application du design et de l'aménagement urbain, un domaine dans lequel l'interaction et la visualisation de l'espace jouent un rôle central. La première partie de ce travail présente les résultats de la recherche conceptuelle et littéraire menée préalablement au développement de notre prototype. La deuxième partie présente le prototype développé en suivant la méthodologie *Unified Process* pour le développement logiciel ainsi que les résultats de la phase d'expérimentation du prototype menée par la suite. À la lumière des travaux réalisés, il nous est apparu évident que la réalité augmentée présente un potentiel très intéressant pour répondre aux limites des outils traditionnels mais que la réalisation d'une solution complète nécessiterait l'intervention d'une quantité de ressources qui dépasse le cadre d'un travail de maîtrise.

Abstract

Over the years, the usefulness of geospatial data, in any given field, has been well established and countless innovations in the usage of such data have appeared. However, traditional geomatic tools used for the exploitation of data, despite their remarkable technological evolution in recent years, still contain certain limits concerning 3D visualization, interaction and their collaboration capacity that can limit spatial comprehension by a public of non-expert users. To overcome these limits, augmented reality technologies demonstrate interesting possibilities regarding the interaction and visualization of 3D geospatial data. In spite of the recent technological advances, these types of applications remain poorly explored, especially in geospatial contexts. Consequently, the development of geospatial augmented reality systems remains a laborious and experimental process. Considering this, we propose a study to establish the basis for the development of geospatial interactive and collaborative augmented reality systems.

We have chosen to inscribe this study in the urban design and planning context, a domain of application for which the interaction and visualization of space plays a central role. The first part of this study presents the results of our literary and conceptual research, undertaken prior to the development of our prototype. The second part presents the prototype developed following the Unified Process methodology for software development as well as the results of the prototype experimentation step conducted afterwards. This research project completed, it appears obvious to us that augmented reality presents an interesting potential to overcome the limits of traditional geomatic tools. However, the realization of a complete solution would require the intervention of a larger pool of resources that are unavailable in the scope of a master's project.

Remerciements

Je remercie d'abord sincèrement mon directeur Mir Abolfazl Mostafavi pour l'opportunité qu'il m'a offerte en m'encourageant à poursuivre mes intuitions tout au long de ce projet, pour sa flexibilité face à mes horaires parfois difficiles et pour toutes les occasions d'apprentissage connexes au domaine de la recherche qu'il m'a fourni. Je remercie également mon co-directeur, Stéphane Roche pour ses conseils, ses révisions et son appui tout au long de mon cheminement. Je suis également reconnaissant de l'évaluation et des commentaires de Tania Martin, qui ont permis d'enrichir mes travaux grâce à un regard critique sur le contexte d'application retenu.

Je remercie spécialement ma partenaire Judith-Marie, pour avoir cru en moi lors de mes périodes d'hésitations, pour m'avoir supporté moralement lors des périodes difficiles et aussi pour son support financier sans lequel la vie aurait été plus difficile et désagréable au cours de ces deux dernières années. Je remercie aussi mes parents qui m'ont permis de toujours poursuivre mes volontés académiques sans hésitation et qui ont toujours été présents pour moi, en cas de besoin. Un merci particulier à mes amis de longue date Benoit Pelletier et Yves qui ont passé de nombreuses soirées à écouter mes idées et questionnements sur mon projet. Je remercie également mes amis et collègues de recherche, du baccalauréat à la maîtrise, Vincent et Jean.

Je souhaite remercier spécialement Nicolas Dedual et Ohan Oda, mes collaborateurs du *Computer Vision and User Interface Laboratory* de l'université Columbia de New York pour leur accueil lors de mon séjour dans leur laboratoire ainsi que leur support technique soutenu qui m'a permis de progresser beaucoup plus rapidement dans le développement de mon prototype.

Enfin, je souhaite reconnaître la contribution financière des différents organismes qui m'ont supporté à travers mon cheminement. Tout d'abord, le laboratoire REGARD grâce auquel j'ai pu disposer du matériel et des facilités nécessaires à la réalisation de mon projet. Je remercie également l'ensemble des chercheurs

responsables du projet Initiative de développement et recherche (IDR) intitulé Patrimoine Religieux : la géomatique au service de la consultation publique, qui m'a permis de travailler au sein d'une équipe multidisciplinaire. Je remercie aussi la Chaire de recherche du Canada en patrimoine religieux bâti, ainsi que sa titulaire Mme Tania Martin, qui m'a offert des opportunités de travail rémunéré en lien avec mes propres intérêts de recherche. Je remercie ensuite Hydro-Québec pour l'attribution de la bourse d'excellence qui a facilité mon entrée aux études supérieures. Enfin, je remercie le Conseil de recherche en sciences naturelles et génie qui m'a fourni plusieurs opportunités de travail rémunéré en tant qu'auxiliaire de recherche.

Table des matières

Résumé	II
Abstract	III
Remerciements	IV
Table des matières	VI
Table des figures	IX
Liste des tableaux	XI
Liste d'abréviations	XII
Chapitre 1 Introduction	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Problématique.....	3
1.3 Objectifs	6
1.4 Méthodologie	8
1.4.1 La méthodologie <i>Unified Process</i> (UP)	8
1.4.2 Justification du choix de la méthode retenue	15
1.5 Structure du mémoire.....	16
Chapitre 2 La géomatique en appui aux processus de design urbain	18
2.1 Introduction	18
2.2 Les processus de design urbain	19
2.2.1 Le processus de conception	20
2.2.2 Le processus décisionnel.....	23
2.2.3 Un modèle conceptuel intégrant les deux processus	26
2.3 La géomatique au support du design urbain.....	26
2.3.1 Les outils de conception.....	27
2.3.2 Les outils d'analyse.....	30
2.3.3 De nouvelles tendances en géomatique et design.....	33
2.4 La géomatique pour supporter la collaboration.....	35
2.4.1 Définir la collaboration.....	35
2.4.2 La géomatique comme plateforme de collaboration	38

2.5 Concevoir une solution aux limites des outils existants	44
2.5.1 Identifier les besoins auxquels répondre	44
2.5.2 Concevoir une solution en fonction des besoins	47
Chapitre 3 La réalité augmentée géospatiale : une solution potentielle aux limites des outils géospatiaux actuels	51
3.1 Introduction	51
3.2 Concepts et définitions	52
3.2.1 Réalité augmentée	52
3.2.2 Systèmes de réalité augmentée	54
3.2.3 Concepts de réalité augmentée	56
3.3 Évolution de la réalité augmentée	60
3.3.1 Les débuts de la réalité augmentée	61
3.3.2 La réalité augmentée moderne	67
3.3.3 La réalité augmentée en design urbain	73
3.4 Les composantes de base d'un SRA	76
3.4.1 Systèmes d'affichage	77
3.4.2 Système d'enregistrement	82
3.4.3 Unité de calcul	90
3.5 Une classification des SRA	93
3.5.1 L'environnement d'opération	93
3.5.2 La mobilité du système	96
3.5.3 La capacité de collaboration	98
3.6 L'interaction en RA	101
Chapitre 4 Conception d'un prototype de système de réalité augmentée géospatial	105
4.1 Introduction	105
4.1.1 Choix du scénario d'application	105
4.1.2 Notre position face à la réalité augmentée	107
4.2 Architecture matérielle du prototype	108
4.2.1 Modèle conceptuel du système	109
4.2.2 Choix des composantes de bases	113
4.3 Architecture logicielle du système	116
4.3.1 Choix des composantes logicielles	117
4.3.2 Modèle conceptuel du logiciel	122

Chapitre 5 Implémentation et expérimentation de la solution retenue	125
5.1 Introduction.....	125
5.2 Implémentation de la solution	126
5.2.1 La structure de données de base.....	126
5.2.2 Création des interfaces	129
5.2.3 Implantation de la capacité de collaboration	138
5.3 Conception d'une ville numérique 3D	141
5.4 Expérimentation de la solution.....	144
5.4.1 Contexte d'expérimentation	144
5.4.2 Expérimentation de l'interface administrateur	145
5.4.3 Expérimentation de l'interface utilisateur.....	148
5.5 Discussion des résultats	149
5.5.1 Points forts du prototype	150
5.5.2 Points faibles du prototype.....	151
Chapitre 6 Conclusion	155
6.1 Résumé du travail effectué	155
6.2 Apprentissage scientifique et contribution à la recherche.....	157
6.3 Atteinte des objectifs	159
6.4 Travaux futurs.....	161
Bibliographie	164
ANNEXE A : SPÉCIFICATIONS DU VUZIX IWEAR VR920	179
ANNEXE B : DÉROULEMENT DE L'EXPÉRIMENTATION	180

Table des figures

Figure 1.1 : Cycle de développement logiciel Unified Process.....	9
Figure 1.2 : Graphique de la méthodologie employée.....	11
Figure 2.1 : Modèle conceptuel de la conception.....	20
Figure 2.2 : La forme cyclique du processus de design urbain.....	23
Figure 2.3 : La prise de décision en design urbain en utilisant le modèle.....	24
Figure 2.4 : Modèle conceptuel de l'intégration des processus de design urbain.....	26
Figure 2.5 : L'interface non-intrusive de SESAME.....	29
Figure 2.6: Le logiciel CityCAD.....	29
Figure 2.7: Un exemple de simulation du nombre d'emplois.....	32
Figure 2.8 : Le SIG délibératif.....	42
Figure 2.9 : Le système CoViD en action.....	43
Figure 3.1 : Représentation simplifiée du continuum de réalité mixte.....	53
Figure 3.2 : Enregistrement par détection de formes.....	57
Figure 3.3 : Enregistrement par GPS.....	57
Figure 3.4 : Un exemple d'occlusion.....	59
Figure 3.5 : Le <i>Sensorama</i> développé par Morton Heilig.....	61
Figure 3.6: Le HMD de Sutherland.....	63
Figure 3.7: Un exemple du <i>VIDEOPLACE</i>	63
Figure 3.8: Un exemple de <i>markers</i> ARToolKit.....	64
Figure 3.9 : Une comparaison entre les SRAM.....	65
Figure 3.10 : Un exemple du jeu <i>ARQuake</i>	66
Figure 3.11 : La configuration matérielle du BARS.....	66
Figure 3.12 : Un exemple du SRA collaboratif basé sur Studierstube.....	68
Figure 3.13 : Un exemple du Archeoguide.....	68
Figure 3.14 : L'application de guide de restauration.....	69
Figure 3.15 : L'application Wikitude.....	69
Figure 3.16 : Le jeu <i>AR-Tennis</i>	70
Figure 3.17 : Le jeu <i>ARhrrrr!</i>	70
Figure 3.18 : L'application de White et al. en botanique.....	71
Figure 3.19 : L'application de Buchanan et al. en éducation.....	71
Figure 3.20: La table de visualisation collaborative.....	75
Figure 3.21 : Le système UrbanSketcher et le SiteLens.....	76
Figure 3.22 : Les trois angles d'orientation (<i>roll, pitch, yaw</i>).....	84
Figure 3.23 : Mécanisme interne d'un gyroscope et le senseur inertiel MTx.....	89
Figure 4.1 : L'architecture matérielle et le fonctionnement du prototype.....	112
Figure 4.2 : Le système d'affichage retenu, le Vuzix iWear VR920.....	115
Figure 4.3 : Schéma illustrant les relations entre les objets virtuels et le monde.....	120
Figure 4.4 : Architecture logicielle du prototype de SCRAG.....	123
Figure 5.1 : La structure d'une scène de <i>GoblinXNA</i> et celle de <i>GeoGoblinXNA</i>	127
Figure 5.2 : La structure des objets GeoFeature et GeoMarker.....	128
Figure 5.3 : L'interface administrateur.....	131
Figure 5.4 : L'interface utilisateur.....	135
Figure 5.5 : Les structures de données du pointeur 3D et du carnet de notes....	136
Figure 5.6 : Extrait de code permettant d'extraire les coordonnées écran.....	137

Figure 5.7 : Trois modes de communication réseau possibles.....	140
Figure 5.8 : L'extrait du jeu de données couvrant le secteur Sillery	142
Figure 5.9 : L'interface du participant dans le rôle d'administrateur du système .	146
Figure 5.10 : Vue d'ensemble d'un utilisateur interagissant avec une scène	149

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Résumé des besoins auxquels doit répondre un outil collaboratif...	47
Tableau 3.1 : Tableau comparatif des systèmes d'affichage	82
Tableau 3.2 : Tableau récapitulatif des systèmes d'enregistrement.....	90
Tableau 3.3 : Tableau récapitulatif des unités de calcul.....	92
Tableau 3.4 : Tableau récapitulatif des classes de SRA	101
Tableau 5.1 : Résumé des fonctions principales de l'administrateur.....	133

Liste d'abréviations

RA :	Réalité augmentée
RAS :	Réalité augmentée spatiale
RAG :	Réalité augmentée géospatiale
SRA :	Système de réalité augmentée
SRAS :	Système de réalité augmentée spatiale
SRAG :	Système de réalité augmentée géospatiale
SCRAG :	Système collaboratif de réalité augmentée géospatiale
RV :	Réalité Virtuelle
SIG :	Système d'information géographique
3D :	Tridimensionnel
DAO :	Dessin assisté par ordinateur
UP :	Unified Process
UML :	Unified Modeling Language
RM :	Réalité Mixte
HMD :	<i>Helmet Mounted Display</i>
TOF :	Time-of-Flight (Temps de vol)
CRSH :	Conseil de recherche en sciences humaines
CRSNG :	Conseil de recherche en sciences naturelles et génie
IDR :	Initiative développement et recherche
CRCPRB :	Chaire de recherche du Canada en patrimoine religieux bâti

Chapitre 1 Introduction

1.1 Mise en contexte

Au fil des années, le besoin de spatialiser l'information est devenu omniprésent dans tous les aspects de la société. Que ce soit dans un contexte personnel, professionnel ou académique, nous avons recours aux données géospatiales pour analyser l'espace, le représenter et le visualiser afin d'éclairer nos prises de décision. Ainsi, une multitude d'outils géomatiques ont été créés et mis à profit dans une variété de domaines d'application qui ne cesse de grandir. De façon générale, leur utilité n'est plus à démontrer. Toutefois, face à certains domaines d'application, ces outils traditionnels comportent des limites technologiques qui font en sorte que leur capacité à supporter la décision ne soit pas appropriée. Le design urbain par exemple, est une discipline qui requiert une capacité de visualisation 3D performante et des méthodes d'interaction intuitives que les outils géomatiques traditionnels ne sont pas en mesure de fournir. De plus, dans ces domaines d'application, la collaboration est pratique courante hors, les outils traditionnels tels que les systèmes d'information géographique ou les logiciels de dessin assisté par ordinateur ne peuvent agir comme support collaboratifs à la décision puisqu'ils ne supportent pas l'utilisation simultanée par plusieurs personnes. Nous avons donc choisi d'explorer le potentiel de la technologie de la réalité augmentée (RA) qui, grâce à sa capacité d'immersion et de visualisation en 3D, consiste en une solution possible aux limites technologiques que présentent les outils traditionnels dans un contexte de design urbain.

Cette science de l'espace est une discipline complexe qui fait intervenir des concepts d'économie, d'ingénierie, d'art, d'architecture ainsi que plusieurs autres [LYNCH 1984]. Il est donc naturel que les processus décisionnels qui y sont reliés,

peu importe la forme qu'ils prennent, impliquent un large éventail de participants. Urbanistes, promoteurs, politiciens, usagers futurs, architectes, chacun de ces acteurs possède différents types et niveaux de connaissances. Plus souvent qu'autrement, ceci occasionne une multitude d'obstacles allant de la complexité des outils de travail et des données utilisées jusqu'à des difficultés de communication entre les intervenants de différents milieux. Ces obstacles sont susceptibles de ralentir les processus décisionnels, notamment lorsque vient le temps pour les promoteurs de présenter leur projet aux clients. C'est généralement lors de cette étape que plusieurs intervenants sont appelés à délibérer en groupe pour ultimement sélectionner une option qui convient le mieux possible aux besoins de tous les partis impliqués.

De plus, dans la pratique du design urbain l'analyse, la visualisation et l'intégration de données géospatiales variées jouent un rôle primordial dans les processus de prise de décision. L'analyse et la visualisation de données géospatiales sont des besoins qui correspondent directement aux rôles des outils géomatiques. Par exemple, les systèmes d'information géographique (SIG) et la télédétection sont deux outils largement utilisés pour évaluer la progression du phénomène de l'étalement urbain ou pour déterminer l'évolution historique de l'utilisation des sols [BATTY 1998, QIU 2003]. Malgré le fait que la géomatique possède le potentiel permettant de démocratiser la pratique de cette discipline, plusieurs limites des outils existants continuent de faire obstacle à leur utilisation par le public non-expert. L'apparition récente de sources de données tridimensionnelles (3D) détaillées de haute précision offre des possibilités intéressantes face aux limites des outils traditionnels. En utilisant ces données géospatiales 3D afin de modéliser l'environnement urbain, on arrive à une représentation de la réalité plus familière et plus facilement compréhensible. Cependant, l'intégration efficace de données 3D aux outils communément utilisés est une tâche complexe à réaliser qui mérite d'être étudiée profondément.

Pour cette recherche, nous proposons d'étudier le potentiel de la réalité augmentée (RA) géospatiale comme technologie supportant la prise de décision

en fournissant un support collaboratif d'interaction et de visualisation intuitives de l'espace en 3D. Elle pose comme hypothèse que les systèmes collaboratifs de réalité augmentée géospatiale (SCRAG) peuvent supporter efficacement la prise de décision dans un contexte où les participants ne sont pas tous familiers avec la théorie et les outils traditionnels de gestion de l'information géospatiale, comme c'est souvent le cas en design urbain¹. Ce projet vise d'abord le développement d'un prototype de RA permettant l'intégration d'utilisateurs non-experts grâce à des méthodes d'interaction et de visualisation intuitives. Dans un second temps, il vise à développer un prototype d'outil interactif et collaboratif qui nous permettra d'évaluer la capacité de la RA à supporter les processus de conception et de décision. Ce mémoire fait état des recherches effectuées au cours de la conceptualisation du système et agit comme compte rendu de la concrétisation du prototype de système de réalité augmentée (SRA).

1.2 Problématique

Au cours des années 1970, une remise en question du déroulement des processus décisionnels affectant les espaces urbains fut amorcée. À partir de cette époque, les décisions qui jusqu'alors étaient majoritairement prises en huis clos par un nombre restreint d'experts et autorités des villes, furent soumises à l'examen minutieux par les citoyens, principaux intéressés par les impacts que ces décisions pouvaient avoir sur leur milieu de vie. Cette démocratisation des processus décisionnels sur l'avenir des espaces urbains se poursuit à ce jour, si bien qu'aujourd'hui, citoyens, promoteurs, experts de l'espace et autorités politiques sont appelés à se concerter et collaborer dans le but de concevoir et choisir une solution optimale, répondant aux besoins de chacun des partis impliqués. En parallèle à ce phénomène, l'apparition d'outils tels que *Google Earth*

¹ Au cours de la réalisation de ce projet de maîtrise, nous avons choisi de nous limiter au contexte du design urbain plutôt que de l'étendre au design urbain, à l'architecture et à l'aménagement du territoire, trois disciplines connexes qui, en pratique forment un ensemble. Les motivations de ce choix sont discutées plus en détail à la section 2.1.

ou *Google Map* ont favorisé l'accessibilité aux données géospatiales pour tous ces acteurs urbains qui peuvent maintenant les utiliser afin de se former des idées et opinions éclairées sur l'utilisation convenable de leur espace. Grâce à cette compréhension accrue de l'espace, le dialogue peut se concrétiser et chacun des partis arrive à mieux communiquer leurs besoins aux autres partis impliqués [WEINER 2002]. Il est donc primordial de mettre à la disposition des participants impliqués dans ces processus, des outils qui supportent et encouragent la collaboration. L'intégration des participants au processus, qu'ils soient citoyens, promoteurs, élus municipaux ou autres est le défi central dans la conception d'un outil accessible et visant à supporter ces processus en facilitant l'interprétation de l'espace.

Considérant la nature du processus de design urbain, il apparaît évident que les outils géomatique sont particulièrement pertinents puisqu'ils permettent aux architectes, urbanistes et designers de mieux interpréter les caractéristiques de l'espace dans lequel doit être implanté un projet. D'ailleurs, l'utilité des outils géomatiques conventionnels dans ces disciplines, tels que les SIGs ou la télédétection, a été démontrée à plusieurs reprises par des équipes de chercheurs indépendants [BATTY 1998, QIU 2003, RAZA 2002]. Cependant, ces outils conventionnels comportent certaines limites qui font en sorte qu'ils ne répondent pas complètement aux besoins actuels face à l'étude de l'espace. En effet, la tendance courante en design urbain veut qu'un maximum d'acteurs soit impliqué dans les processus, ce qui vient multiplier la complexité des processus de conception et de décision [BARENDSE 2007, MAYER 2005]. Hors, plusieurs auteurs s'accordent pour affirmer que les outils géomatiques traditionnels comportent des défaillances qui limitent leur efficacité dans les processus impliquant plusieurs acteurs [LINDQUIST 2006, MACEACHREN 2005].

Plus précisément, les acteurs qui participent aux processus de design possèdent chacun un ensemble de connaissances de bases qui diffère de celui des autres participants. Ceci peut provoquer des difficultés au niveau de la communication entre les participants et de l'interprétation des informations qui leur sont

présentées. Ainsi, un outil géospatial ayant pour objectif de supporter les processus de design urbain collaboratif doit réduire, voire éliminer l'écart de connaissances entre chacun des participants afin de faciliter la mise en commun d'idées et de concepts. En plus de permettre le travail collaboratif, il doit être simple d'utilisation et offrir des méthodes d'interaction et de visualisation intuitives. À la suite d'une étude approfondie des technologies géomatiques en support au design urbain, il nous est apparu que les outils géospatiaux existants démontraient au moins une des problèmes spécifiques suivants:

1) *L'exploitation de données géospatiales 3D est difficilement réalisable, se limitant généralement au 2D ou au 2.5D.* En offrant une représentation plus intuitive de la réalité, l'exploitation de données géospatiales 3D facilite la compréhension de l'espace pour tous les participants, peu importe leur niveau de familiarité avec les données géospatiales. En effet, en utilisant des données 3D, l'abstraction de la réalité est moins élevée que lorsque des données 2D sont utilisées, leur interprétation est donc plus naturelle. Les données géospatiales 3D ont également l'avantage de permettre une représentation par niveaux de détails plus ou moins élevés, ce qui est impossible en 2D [CARNEIRO 2008]. Par exemple, on peut choisir d'afficher précisément le nombre d'étages d'un bâtiment, d'afficher les détails de façade ou de représenter fidèlement les toits. La possibilité de représenter les détails permet une meilleure considération du contexte immédiat du projet à implanter et ainsi d'assurer que la nouvelle construction s'intègre harmonieusement avec son environnement.

2) *Les modes d'interaction avec les données géospatiales sont peu intuitifs d'opération donc difficilement utilisable par un public non-expert.* La plupart des outils géomatiques courants sont très spécialisés et requièrent une certaine familiarité avant de pouvoir être utilisés de façon efficace. Ceci est du, entre autres, aux interfaces utilisateurs complexes et souvent, aux trop grand nombre de fonctionnalités mises à la disposition de l'utilisateur [HAKLAY 2008, HAKLAY 2003]. Conséquemment, leur utilisation exige la

plupart du temps l'intervention d'un spécialiste, formé pour l'utilisation de l'outil en particulier. Dans un contexte participatif, ceci constitue un obstacle de taille qui limite l'intégration à part égale de tous les participants au processus.

- 3) *Aucune capacité de support collaboratif n'est prévue afin de permettre la concertation entre plusieurs utilisateurs de façon simultanée.* Sans cette capacité, les outils se limitent à une utilisation par un seul individu à la fois. De tels systèmes peuvent être utilisés dans un contexte de design urbain collaboratif mais limitent largement le côté dynamique de la collaboration puisque le contrôle sur le système est réduit à un seul utilisateur. Ceci a pour effet de rendre plus difficile l'intégration des acteurs au processus et en conséquence, diminuer le caractère participatif de l'outil.

1.3 Objectifs

L'objectif principal de ce travail de recherche consiste à concevoir et développer un outil supportant la prise de décision grâce à des méthodes d'interaction et de visualisation intuitives qui permettent d'intégrer plusieurs acteurs non-experts aux processus décisionnels. Pour ce faire, nous avons opté de recourir à une combinaison de technologies géomatiques et de réalité augmentée qui est en mesure de répondre aux limites des outils géomatiques conventionnels. Afin de répondre aux problématiques spécifiques identifiées à la section précédente, nous avons orienté la conception et le développement de notre solution selon les trois objectifs spécifiques suivants :

- 1) Faciliter la compréhension et l'interprétation de l'espace par un public non-expert grâce à des méthodes de visualisation reposant sur la mise à profit de données géospatiales 3D.

- 2) Faciliter la manipulation et la visualisation de données géospatiales pour des utilisateurs n'ayant aucune formation préalable grâce à l'implantation de modes d'interactions intuitifs.
- 3) Supporter la collaboration en facilitant l'intégration d'acteurs non-experts aux processus décisionnels par des mécanismes d'interaction et de visualisation intuitifs.

Plus spécifiquement, le but de cette recherche est de démontrer que cette combinaison de deux technologies est susceptible de surmonter les limites des outils géospatiaux conventionnels. Ainsi, l'application développée consistera en un prototype agissant comme preuve de concept plutôt que comme solution complète et professionnelle. Évidemment, le développement d'une application de niveau professionnel utilisable par le public visé par cette solution exige beaucoup plus de ressources que nous disposons. Cela nécessiterait l'implication d'une grande équipe de développement, d'une longue période d'expérimentation ainsi que de ressources matérielles plus avancées technologiquement, donc plus dispendieuses.

Notons également qu'afin de nous assurer que le développement de l'outil demeure inscrit dans des limites qui sont atteignables dans le cadre de ce travail de maîtrise, nous limitons le public cible de cet outil à un nombre plus restreint d'utilisateurs. En effet, le développement d'un outil qui serait utilisé dans le cadre d'une consultation publique, où plusieurs centaines de personnes sont impliquées dans les processus de design, est d'une envergure qui dépasse le cadre de ce projet de recherche et qui nécessiterait beaucoup plus de ressources techniques et financières. Le développement de cet outil est donc orienté envers les situations où quelques acteurs principaux, tels que les promoteurs, les politiciens et les experts de l'espace doivent se réunir pour discuter des options disponibles. Cette forme de prise de décision est une situation bien présente dans les processus de prise de décision en design urbain, elles se déroulent généralement avant et entre les périodes de consultations publiques et parfois même les remplacent dans les cas où la consultation citoyenne n'est pas requise. Toutefois, le but de cet outil

demeure l'évaluation du potentiel de la RA comme outil d'interaction et de collaboration permettant de rassembler des utilisateurs non-experts et en ce sens, une réflexion critique sur son utilité face à un grand nombre d'utilisateurs, comme dans le cas des consultations publique, sera tout de même posée.

De façon secondaire à l'objectif principal, cette recherche vise également à étudier le potentiel de la réalité augmentée comme technologie permettant l'exploitation de données géospatiales 3D. En effet, la combinaison des technologies de réalité augmentée et de géomatique demeure jusqu'à ce jour, un sujet peu étudié par la communauté scientifique. Face à cette situation, le département de sciences géomatiques de l'Université Laval se retrouve en position avantageuse puisque ces deux sujets font partie de ses intérêts de recherche. Toutefois, au moment d'écrire ces lignes, un seul autre projet de recherche gradué (maîtrise) en réalité augmentée a été mené à terme, soit celui de Vincent Thomas qui s'intéressait surtout à la modélisation 3D rapide pour des fins de réalité augmentée géospatiale dans un contexte de jeux vidéo éducatifs [THOMAS 2010]. Aucune étude approfondie des différents systèmes de réalité augmentée, de leurs composantes et de leurs besoins n'a été réalisée par le département. La présente recherche adressera donc cette lacune, particulièrement lors du chapitre 3 qui abordera la conception des systèmes de réalité augmentée géospatiale de façon détaillée. Cependant, afin de simplifier la lecture et comme cet objectif est secondaire, il ne sera pas mentionné à nouveau ni détaillé plus profondément lors de la suite de ce document.

1.4 Méthodologie

1.4.1 La méthodologie *Unified Process* (UP)

La méthode retenue pour la réalisation de ce projet est basée sur la procédure unifiée (*Unified Process*) telle que développée par Jacobson, Ivar et Rumbaugh [JACOBSON 1999]. Cette méthode de développement de logiciel utilise le langage

de modélisation unifié (*Unified Modelling Language*) et repose sur les trois aspects suivants :

- Elle est basée sur des scénarios d'utilisation
- Elle est centrée sur l'architecture de système
- Elle est itérative et incrémentale

Bien que la méthode UP ait été développée il y a seulement un peu plus d'une décennie, elle est largement répandue et a été éprouvée par l'industrie du développement de logiciel. Elle est surtout adaptée et utilisée pour développer des systèmes complexes impliquant de grandes équipes de développement. Elle contient 4 étapes principales soient le démarrage, l'élaboration, la construction et la transition. L'élaboration et la construction sont les étapes itératives et incrémentales du processus unifié. La méthode UP se résume ainsi :

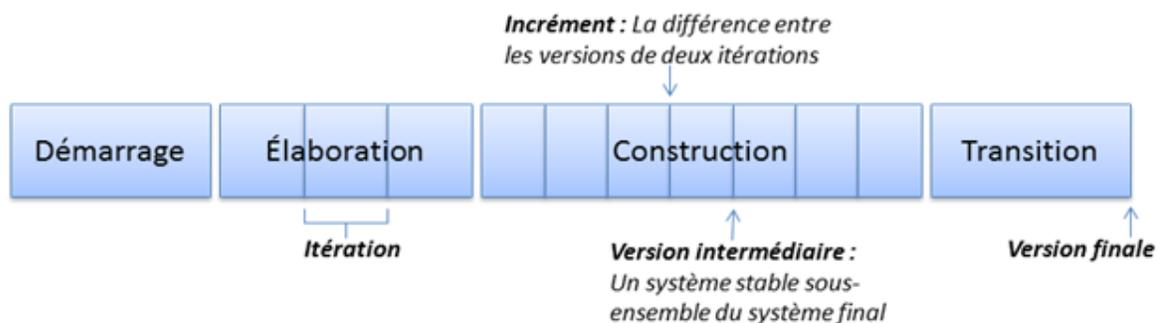


Figure 1.1 : Cycle de développement logiciel Unified Process d'après Bédard (2007)

Dans le cadre de notre projet, la méthode a été adaptée au contexte de recherche académique de telle sorte que certaines tâches non prévues par la méthode UP traditionnelle ont été incluses dans les étapes de développement, par exemple la revue de littérature incluse dans l'étape de démarrage ou l'étude des SRA dans l'étape suivante. De plus, nous avons laissé de côté l'étape de transition puisqu'elle consiste en une mise en opération du système conçu, ce qui n'est pas applicable au cas de recherche académique.

Ce projet a été réalisé en collaboration avec un groupe de recherche multidisciplinaire impliquant des chercheurs de la Chaire de recherche du Canada

en patrimoine religieux bâti (CRCPRB) et du Département des sciences géomatiques œuvrant dans le contexte d'un projet d'Initiatives de développement de la recherche financé par le Conseil de recherches en sciences humaines du Canada. La construction et le développement du système a été rendue possible grâce à l'implication du laboratoire REGARD qui a mis à notre disposition toutes ses installations et son matériel informatique. La section suivante résume le déroulement des étapes de la méthodologie suivie lors de ce projet de recherche. Mais d'abord, voici un graphique résumant la méthodologie complète :

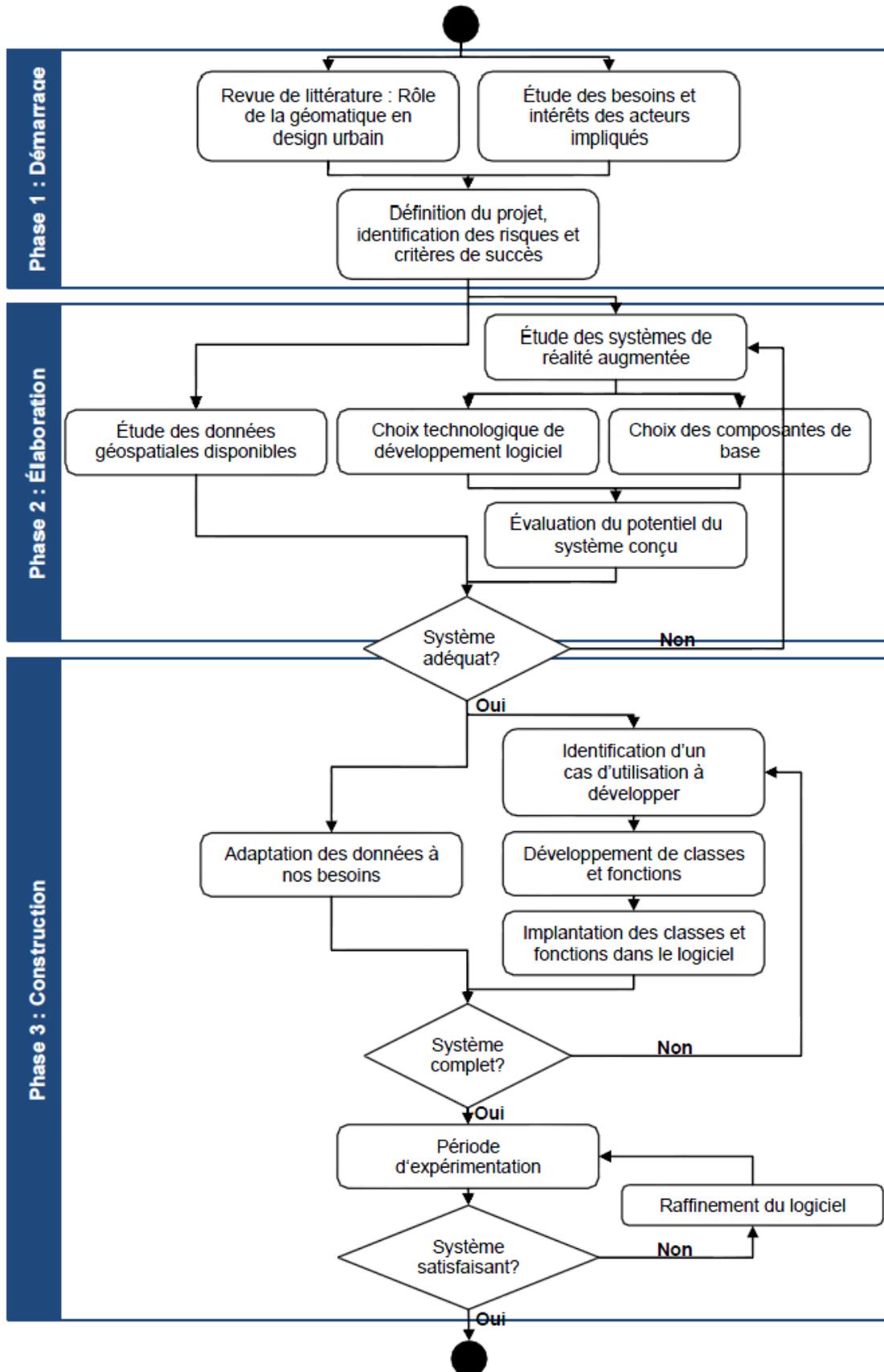


Figure 1.2 : Graphique de la méthodologie employée

1^{ère} Étape : Démarrage

C'est à cette étape que le scénario d'entreprise est établi, c'est-à-dire que la portée du projet est cernée, que les critères de succès sont établis, que les risques élevés sont identifiés, que les ressources nécessaires à la réalisation sont estimées, etc. Le démarrage agit en quelque sorte comme une analyse de faisabilité permettant de décider s'il est profitable d'aller de l'avant avec la suite du projet. Dans cette phase, les développeurs ne possèdent qu'une vision vague de la solution à développer.

L'étape de démarrage de notre projet a été de courte durée, comme elle doit l'être dans la méthode UP. Cependant, nous avons, en quelque sorte, procédé à l'inverse de l'analyse de faisabilité prévue dans cette phase. En effet, plutôt que de déterminer si le projet était profitable, nous avons choisi d'élaborer un projet profitable en étudiant les besoins et intérêts de tous les partis de notre équipe de recherche, soient les chercheurs en géomatique, design urbain, architecture et aménagement. C'est donc en discutant et réfléchissant avec cet ensemble d'experts de l'espace que nous avons établi les besoins auxquels doit répondre un outil de collaboration s'adressant à un public varié, impliqué dans les prises de décision. C'est également lors de cette étape que le contexte d'application a été précisé, que les limites des outils géomatiques existants ont été identifiées et qu'une technologie susceptible de les surmonter a été choisie, soit la réalité augmentée. Pour ce faire, nous avons procédé à une première revue de littérature au sujet du rôle de la géomatique en design urbain. Ceci nous a permis de nous familiariser avec le contexte d'application retenu et d'assurer la pertinence de notre prototype en orientant son développement sur les besoins et intérêts de la pratique du design urbain.

2^e Étape : Élaboration

Le but de l'étape d'élaboration consiste d'abord à établir une architecture fonctionnelle permettant de développer le système voulu. De plus, elle permet d'analyser plus profondément les besoins des utilisateurs et à éliminer les éléments

de risque majeur. À ce moment, la plupart des spécifications du système doivent être identifiées. L'élaboration se conduit par itérations, jusqu'à ce que l'architecture du système conçu permette le développement du logiciel souhaité. Dans cette phase, la vision vague du système initial est raffinée.

Lors de cette deuxième étape, une revue de littérature approfondie portant principalement sur les systèmes de réalité augmentée s'est avérée nécessaire puisque notre connaissance initiale limitée à ce sujet ne nous permettait pas d'établir une architecture matérielle répondant aux besoins identifiés à la première étape. Cette revue littéraire a également été l'occasion pour nous de revoir certains concepts de base de données géospatiales, de structure de données et de visualisation 3D nécessaires au développement de notre système. Une fois confortable avec la théorie sur ces sujets, nous avons procédé à une première itération au cours de laquelle nous avons sélectionné les composantes matérielles et avons développé un prototype élémentaire permettant d'éliminer les risques majeurs liés à l'incompatibilité matérielle entre les composantes. Ensuite nous avons réévalué les besoins de nos utilisateurs afin de concevoir un système mieux adapté aux nouveaux besoins identifiés et avons procédé à l'itération suivante.

De façon résumée, lors de l'élaboration de l'architecture matérielle de notre système de réalité augmentée, nous avons sélectionné ses composantes de base, soit un système d'affichage, un système de positionnement et une unité de calcul. Ces composantes ont été retenues en fonction des différents critères auxquels devait répondre notre système, soit de permettre une visualisation 3D, une interaction intuitive et une capacité de collaboration entre plusieurs utilisateurs. Nous avons donc choisi d'utiliser un système d'affichage de type « *video see-through* », un système de positionnement par balayage optique basé sur les *markers* et un ordinateur de bureau conventionnel comme unité de calcul.

C'est aussi lors de cette étape que nous avons recherché et préparé les données géospatiales 3D pour la mise en opération de notre système. Ces données, mises à notre disposition par le centre GéoStat de l'Université Laval, couvrent une zone d'étude spécifiquement centrée sur les besoins de nos collaborateurs de la

CRCPRB, soit les secteurs du Vieux-Québec, de Ste-Foy et de Sillery de la ville de Québec. Ce groupe de recherche a pour objectif l'étude du patrimoine religieux bâti, de leur création, leurs transformations, leurs usages et leurs significations, afin de développer des stratégies d'intervention et de mise en valeur de celui-ci. Les données 3D ainsi obtenues consistent en une modélisation 3D précise des bâtiments du patrimoine religieux et sommaire des autres bâtiments, routes et végétation du secteur couvert.

Les résultats de cette étape ainsi que les réflexions justifiant les choix sont discutés en détails dans le 4^e chapitre.

3^e Étape : Construction

La construction du logiciel est la période la plus exigeante en temps et en ressources de tout le cycle de développement de la méthodologie *Unified Process*. Elle consiste à développer itérativement et de façon incrémentale la solution complète, prête à être distribuée au public cible. À la fin de cette phase, la solution doit répondre à tous les critères de succès identifiés au départ. Cette phase est celle qui requiert le plus grand nombre d'itérations et d'incrémentations. La construction du logiciel se termine par une période de test qui vise à déterminer si le logiciel est prêt à être implémenté et à passer en mode opérationnel.

Cette 3^e étape est celle qui a consommé la majeure partie du temps de développement, comme prévu. La réalisation de cette phase a nécessité l'exécution d'une grande quantité d'itérations, chacune débutant généralement par une rencontre avec le groupe de recherche afin de dégager un cas d'utilisation dirigeant le développement au cours du cycle. Nous procédions ensuite au développement des classes et fonctions permettant de solutionner ce cas d'utilisation. Enfin, ces classes et fonctions étaient implémentées dans le système et une interface développée afin de permettre à l'utilisateur d'exploiter ces fonctions. De nombreuses itérations ont également dû être consacrées à l'implémentation de la méthode d'interaction entre l'utilisateur et le monde augmenté choisie, soit celle de l'interaction du plan image qui sera abordée avec

plus de détails au 4^e chapitre. C'est d'ailleurs pendant cette étape de développement que nous avons pu bénéficier de l'aide de nos collaborateurs du *Computer Vision and User Interface Laboratory* de l'Université Columbia de New York qui possédaient déjà une très bonne expérience dans ce domaine.

Pour le développement du logiciel d'exploitation du système, nous avons choisi d'utiliser l'environnement de développement *Microsoft Visual C#* qui permettait d'intégrer toutes les composantes de notre système sans trop de difficultés. De plus, ce langage de programmation offre un développement orienté objet de très haut niveau qui facilite l'intégration de composantes matérielles diversifiées et le développement d'interface utilisateur. Pour la visualisation et le rendu 3D des données géospatiales, nous avons choisi d'utiliser *Microsoft XNA Game Studio*, un moteur 3D simple, originalement conçu pour le développement de jeux vidéo sur console de type *XBox*. L'avantage de cet engin 3D est sa simplicité, qui s'est avérée très bénéfique pour nous puisque nous ne possédions pas d'expérience en programmation et rendu 3D à l'origine de ce projet.

Une fois le système terminé, nous avons procédé à une phase d'expérimentation visant à simuler la mise en opération du système, à confirmer l'atteinte des objectifs et à dégager des pistes de développement futures. Afin de réaliser cette étape, nous avons sollicité quelques utilisateurs provenant du milieu académique qui devaient remplir des tâches précises sans assistance. Tout au long de la période d'expérimentation, nous notions les difficultés rencontrées et les commentaires émis par les participants. Ce procédé se voulait plutôt informel puisque le temps disponible ne permettait pas une phase de validation exhaustive et plus exigeante en temps.

1.4.2 Justification du choix de la méthode retenue

Nous avons retenu cette méthode car elle nous paraissait naturellement adaptée à ce projet de maîtrise. Premièrement, le caractère exploratoire de la recherche faisait en sorte que les besoins des « clients », un public non-expert en géomatique, ainsi que notre connaissance du domaine du design urbain étaient

plutôt vagues au départ. Le caractère itératif et incrémental de la méthode UP permet de préciser, au fil des incréments, les besoins des clients ainsi que d'approfondir nos connaissances et notre compréhension du problème. De plus, procéder par itération favorise la considération de cas d'utilisation. Ceci nous permettait de nous concentrer à solutionner un cas d'utilisation précis par itération pour ensuite confirmer que la solution répondait aux besoins de ce cas et finalement reprendre une itération avec un prochain cas d'utilisation. Deuxièmement, notre méconnaissance au niveau des systèmes de réalité augmentée faisait en sorte que l'aspect centré sur l'architecture de la méthode UP était idéal à notre situation. En effet, la méthode UP prévoit une phase d'élaboration d'architecture lors de laquelle nous avons pu bien étudier les composantes des systèmes de réalité augmentée et sélectionner un système adapté à nos besoins. Jacobson et al résument bien la nécessité et le lien entre les trois aspects de la méthode UP dans le livre cité au chapitre 1.4 :

« Architecture provides the structure in which to guide the work in the iterations, whereas use cases define the goals and drives the work of each iteration. Removing one of the three key ideas would severely reduce the value of the Unified Process. » [JACOBSON 1999]

Ceci étant dit, la méthode UP est une méthode prévue pour être utilisée en milieu industriel plutôt qu'en milieu de recherche académique. Elle prévoit la livraison d'une multitude de modèles (analyse, cas d'utilisation, implantation, déploiement, etc.) et de manuels d'utilisateurs qui visent à faire état de l'avancement du projet à la hiérarchie administrative d'une entreprise. Comme cette particularité ne s'applique pas à notre situation, cet aspect a été limité au strict minimum afin de consacrer plus de temps aux cycles de développement.

1.5 Structure du mémoire

Ce mémoire se divise en cinq chapitres :

- Le présent chapitre consistait à présenter les détails de la méthode scientifique associée à un projet de recherche de cette nature.
- Le 2^e chapitre vise à faire état du rôle de la géomatique dans les processus de design urbain. Pour ce faire, une revue de littérature à ce sujet est d'abord présentée. Par la suite, les problématiques spécifiques associées aux technologies géomatiques en design urbain ainsi qu'un modèle conceptuel du prototype à développer sont présentés.
- Le 3^e chapitre consiste en une étude détaillée de la technologie de réalité augmentée. Ce chapitre fait d'abord état de quelques concepts et définitions, présente une revue de littérature concernant l'évolution des systèmes de réalité augmentée. Il discutera ensuite de plusieurs points d'intérêts concernant la réalité augmentée, telles les méthodes d'interaction, la modélisation et les composantes de base d'un système de réalité augmentée.
- Le 4^e chapitre a comme but de présenter les résultats du projet de recherche, de sa période d'expérimentation ainsi qu'une discussion sur les résultats obtenus.
- Le 5^e et dernier chapitre conclut ce document en discutant de l'atteinte des objectifs, de quelques questions résiduelles et du futur de la recherche dans ce domaine.

Chapitre 2 La géomatique en appui aux processus de design urbain

2.1 Introduction

Le design urbain, identifié pour la première fois selon cette appellation à l'occasion d'une série de conférences tenues en 1956 à l'Université de Harvard [BARNETT 2006], est une discipline située à mi-chemin entre une science et un art qui a été longuement relayée à l'architecture et à l'aménagement urbain, deux professions possédant chacune une vision différente, mais connexe à celle du design urbain. Ces professions se distinguent principalement par leur échelle d'intervention spatiale. D'un côté, l'architecte s'intéresse à la conception d'un site, espace correspondant au contexte immédiat d'un bâtiment, plus restreint que le quartier ou la ville [OAU 2011]. De l'autre côté, l'urbaniste s'intéresse à l'aménagement d'un espace de plus grande envergure spatiale, comprenant l'ensemble de la ville, des quartiers et des banlieues qui la compose ainsi qu'aux problématiques spécifiques à cette échelle d'intervention spatiale telles que les connections entre les différents secteurs, l'élaboration de plans de gestion d'infrastructure et le contrôle du développement immobilier [OUU 2011]. Le design urbain se retrouve au croisement de ces deux professions bien établies, s'établissant comme une discipline dont l'objectif est de conceptualiser la forme du bâti à une échelle plus grande que celle du site qui demeure le propre de l'architecte. Considérant la nature spatiale de ces trois professions, il n'est pas surprenant que les données géospatiales soit centrale aux processus qui en découlent. Les outils issus des technologies géomatiques, notamment les SIG, sont particulièrement aptes à supporter les processus de design urbain en favorisant l'intégration d'un maximum de données spatiales contribuant ainsi à une conception et une prise de décision éclairée. Cependant, tel que mentionné au premier chapitre, ces outils comportent des limites sérieuses face à leur utilisation de groupe.

Puisque les besoins envers les outils géospatiaux dans la pratique de l'architecture, du design urbain et de l'aménagement du territoire sont similaires, il serait possible d'adapter le concept de notre outil à chacune de ces professions. Toutefois, nous avons choisi de retenir spécifiquement le design urbain comme contexte d'application de notre outil. Ceci nous permet d'abord de nous concentrer davantage sur les besoins d'une seule profession ainsi que sur sur la technologie impliquée dans l'outil, soit la réalité augmentée. De plus, l'échelle spatiale et le type des données en design urbain, situés à mi-chemin celles de l'architecture et de l'aménagement, se prête bien au développement de notre outil. Le design urbain requiert une visualisation et une interaction moins détaillée qu'en architecture mais plus détaillées qu'en aménagement du territoire. De façon comparative, l'architecte s'intéresse à un bâtiment résidentiel individuel alors que le designer urbain s'intéresse à un ensemble de bâtiments résidentiels et l'urbaniste s'intéresse plutôt à la zone résidentielle qui englobe tous ces bâtiments. Ainsi, l'aménagement et l'architecture ne seront plus abordés explicitement dans la suite de ce mémoire.

Ce chapitre présentera le cadre théorique relatif au contexte d'application retenu, soit le design urbain. Il distinguera d'abord les deux processus centraux de la pratique du design urbain, soit la conception d'une solution et la prise de décision. Deuxièmement, il abordera les technologies géomatiques existantes et utilisées couramment en design urbain, pour ensuite discuter de la collaboration à travers les processus de design et du rôle des technologies géomatiques comme support collaboratif. Enfin, il présentera une réflexion conceptuelle sur le développement d'un nouvel outil géomatique susceptible de répondre aux besoins identifiés.

2.2 Les processus de design urbain

Dans le but de mettre en relation le design urbain avec la géomatique, il est nécessaire de d'abord définir les processus de design urbain, leurs objectifs et leur déroulement. Ceci nous permettra de situer les outils géospatiaux et leurs apports

à l'intérieur des processus du design urbain. Nous avons identifié deux processus centraux au design urbain, soit le processus de conception et celui de décision. Évidemment, la réduction du design urbain à seulement deux processus est une vision simplifiée de cette discipline complexe. Nous avons adopté cette approche par soucis de concision et parce qu'ils offrent des scénarios particulièrement intéressants pour les outils géospatiaux.

2.2.1 Le processus de conception

La conception, peu importe le domaine d'application, est un terme difficilement définissable qui a fait l'objet de plusieurs recherches auparavant. Selon une des études les plus exhaustives et les plus récentes sur le sujet, menée par Ralph et Wand en 2009, la conception peut être définie comme étant « La spécification d'un objet, crée par un agent, dont l'intention est d'accomplir des objectifs dans un environnement particulier, en utilisant un ensemble de composantes primitives, satisfaisant un ensemble de besoins et sujet à des contraintes. » [RALPH 2009] Cette définition, fondée sur une étude exhaustive des définitions antérieures de la conception, se veut applicable à tous les domaines où le processus de conception a lieu.

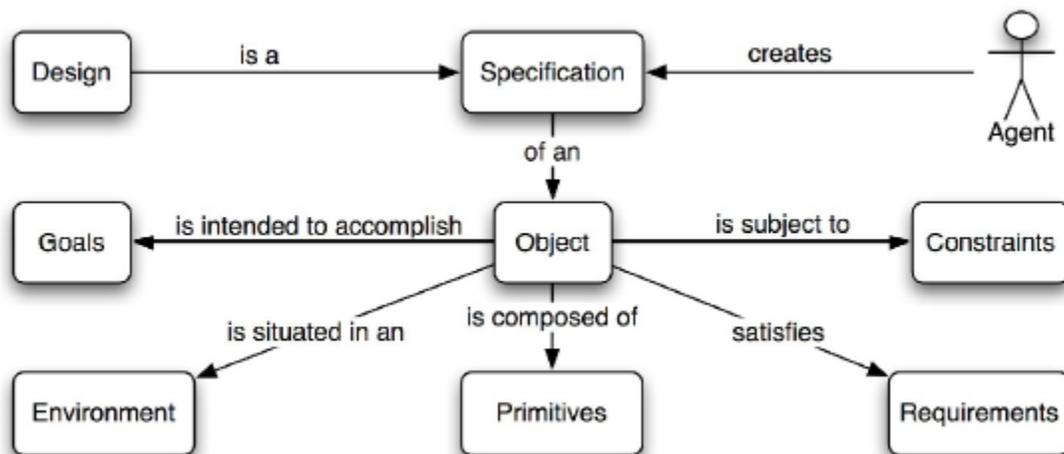


Figure 2.1 : Modèle conceptuel de la conception selon Ralph et Wand (2009)

En suivant cette définition nous pouvons affirmer que le processus de conception, de façon simplifiée, vise à produire, à partir de primitives, la spécification d'un objet dans son environnement, qui satisfait un ensemble d'exigences, de contraintes et de buts. Afin d'appliquer cette définition générale au design urbain, il suffirait de préciser chacun des termes clés en considérant le contexte de la discipline. Il n'en demeure pas moins que cet exercice peut s'avérer complexe et sujet à une étude plus approfondie qui dépasserait le cadre de cette section. En effet, la définition précise de chacune de ces composantes de la définition du design urbain nécessite une maîtrise de la discipline et, étant issus d'une formation en géomatique, nous ne prétendons pas posséder ce niveau de connaissance. Cependant, nous pouvons aisément affirmer que la définition de chacun de ces termes fera intervenir une grande variété de domaines d'applications différents, à l'image de la discipline du design urbain. Par exemple, les contraintes du processus de design urbain, peuvent être de nature sociale, culturelle, environnementale, économique ou politique, pour n'en nommer que quelques unes. Bien que ces composantes puissent être de natures très variées, une chose leur est commune, elles peuvent généralement être spatialisées dans le but de faciliter leur étude. La représentation de l'espace de l'objet de conception devient donc centrale au processus de conception [SIMON 1996]

Cela étant dit, un outil supportant spatialement le processus de design urbain doit également prendre en considération les étapes du processus de design auxquelles son utilisation est destinée. Il est donc important de définir les étapes du processus de conception en design urbain. Encore une fois, il n'existe pas de déroulement standard du processus de conception ce qui est sans doute conséquence de sa nature créative et de tous les facteurs discutés plus haut. Malgré cela, Ciobanu, dans son mémoire de recherche de maîtrise en 2006, s'est intéressé au déroulement du processus de conception et a proposé un modèle formel du processus de conception [CIOBANU 2006]. Pour ce faire, il s'est basé sur une étude menée sur plusieurs mois, auprès d'étudiants en design urbain œuvrant à la conception de divers projets académiques. Suite à ces observations il dégagera le modèle conceptuel formel et simple que l'on retrouve à la figure 2.2.

La première étape consiste à identifier les éléments permettant de poser un diagnostic du terrain. Pour ce faire, les designers sollicitent généralement la population pour obtenir leur avis face à un projet d'aménagement d'un espace. L'étape suivante vise à aborder l'espace sujet du processus sous plusieurs axes d'intervention ou points de vue. Pour ce faire, les designers décortiquent l'espace d'intervention en plusieurs sous-régions géographiques qu'ils étudient individuellement, selon différentes thématiques. Pour réaliser cette étude selon les axes d'intervention dégagés, les designers doivent changer de perspectives et d'échelles d'observation, ce qui exige une flexibilité de représentation de l'espace des supports utilisés. La troisième étape, qui est souvent réalisée en parallèle à la deuxième, consiste à élaborer une solution pour tous les axes d'intervention étudiés précédemment, ce qui donne lieu à autant de solutions partielles. La dernière étape du cycle vise à assembler ces solutions d'échelle locale en une solution d'échelle globale intégrée à son environnement et dont le but est de répondre aux objectifs, exigences et contraintes en considérant le diagnostic posé à l'origine du processus. Ce cycle est généralement répété plusieurs fois, chaque fois en posant à nouveau un diagnostic raffiné de l'espace afin de générer des solutions améliorées.

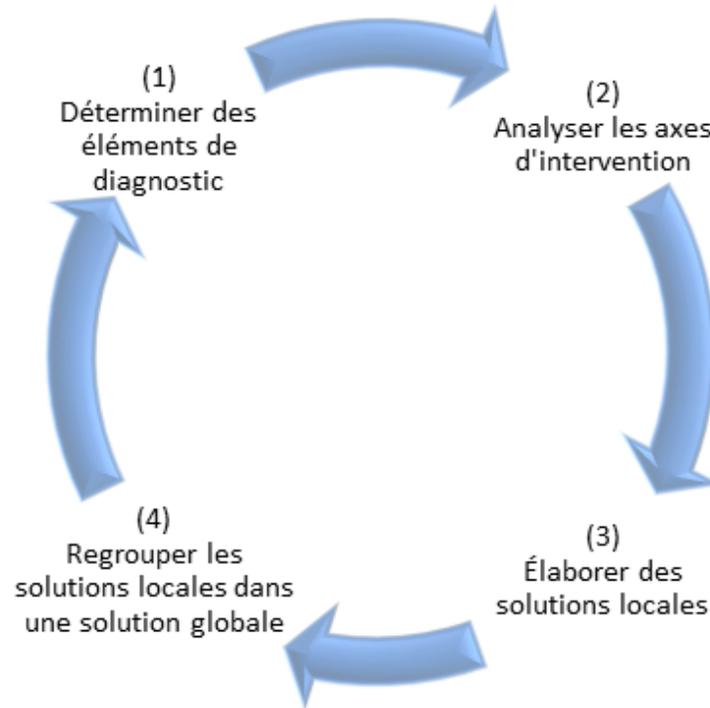


Figure 2.2 : La forme cyclique du processus de design urbain, selon Ciobanu (2006)

C'est en se basant sur cette définition que nous évaluerons la capacité des différents outils géomatiques existants à supporter le processus de conception en design urbain. C'est-à-dire que nous vérifierons d'abord si l'outil permet de prendre en considération l'environnement, les contraintes, les buts et les exigences visées par la solution conçue. Nous évaluerons ensuite à quelles étapes du processus de conception ces outils peuvent se prêter.

2.2.2 Le processus décisionnel

Le processus décisionnel, dans son ensemble, est une démarche qui dépasse largement la décision même. En effet, la décision doit plutôt être considérée comme étant un produit de la démarche décisionnelle [ROY 1985 CITÉ PAR CIOBANU 2006]. L'étude scientifique de la démarche décisionnelle, concernée par la rationalisation de la décision, est un phénomène dont les débuts peuvent être situés au début du 20^e siècle [BUCHANAN 2006]. Depuis cette époque, l'étude des processus décisionnels est devenue une discipline à part entière dont les

résultats ont eu un impact dans tous les domaines d'application, que ce soit dans les sciences sociales, naturelles, de la santé, ou autres. À la lumière de ceci, notre objectif n'est pas d'étudier la théorie de la démarche décisionnelle, ce qui dépasserait le cadre de cette section mais d'étudier le cas spécifique du rôle des outils géomatiques dans ces processus dans un contexte de design urbain. Afin d'atteindre cet objectif, une compréhension de base du processus décisionnel s'impose. Pour ce faire, nous proposons d'utiliser l'adaptation au design urbain d'un modèle formel du processus décisionnel réalisé par Ciobanu. Cette adaptation est fondée sur la définition de Herbert A. Simon, pionnier de la théorie de la décision, dans son ouvrage charnier *The New Science of Management* en 1977 [SIMON 1977]

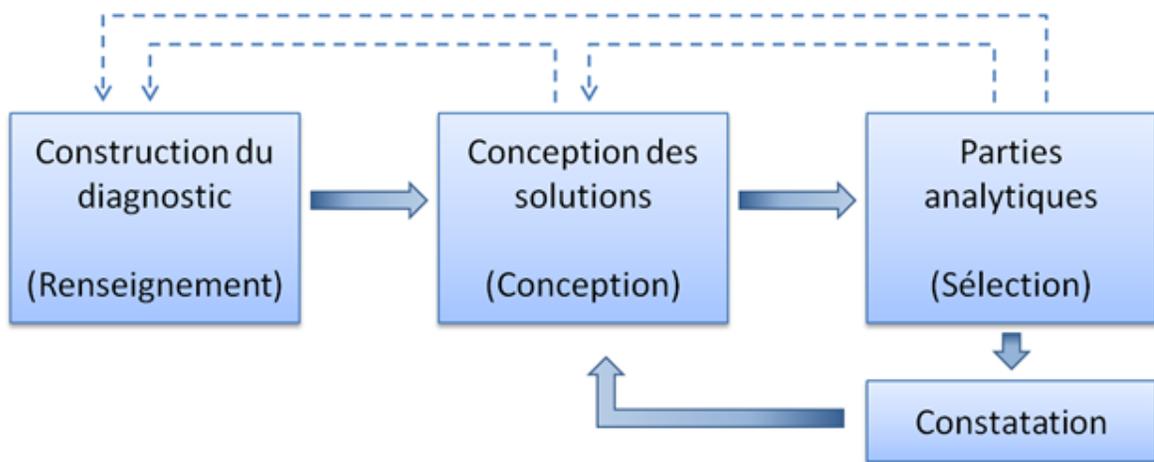


Figure 2.3 : La prise de décision en design urbain en utilisant le modèle de Simon (1960)

Appliqué au design urbain, la première étape consiste à effectuer un diagnostic de l'espace, c'est-à-dire à analyser l'espace où la solution qui sera conçue sera implantée. Pour poser le diagnostic de l'espace, les *designers* utilisent une approche reposant sur l'analyse de différents critères bien établis de l'espace. Plusieurs auteurs ont proposé des séries de critères variables par exemple, Bentley, dans son ouvrage intitulé *Responsive Environments : A Manual for Designers*, défini sept critères d'analyse dont la perméabilité, la variété, la lisibilité, la robustesse, la convenance visuelle, la richesse et la personnalisation

[BENTLEY 1985]. L'étape suivante, la conception des solutions, ramène au processus de conception discuté à la section précédente. C'est à cette étape qu'un nombre de solutions à la situation problématique initiale sont conçues. La troisième étape du processus consiste à procéder à l'analyse des solutions conçues et au choix d'une d'entre elles, si une est identifiée comme satisfaisant adéquatement les contraintes, les exigences et les buts visés. L'étape de constatation consiste à d'abord implanter la solution retenue et ensuite analyser les décisions prises lors du processus décisionnels pour considération lors de projets futurs.

Énoncé ainsi, le processus décisionnel semble plutôt direct, ce qui n'est pas du tout le cas. En effet, le processus décisionnel, particulièrement en design urbain, comporte plusieurs cycles et certaines phases sont fortement inter reliées. Par exemple, il est très possible, voir probable, qu'une fois la première phase de conception achevée, une constatation soit posée à l'effet que davantage de renseignements sur la nature de l'espace soient nécessaires, renvoyant ainsi à la première phrase du processus décisionnel. De même, il est possible qu'une fois la première analyse des solutions conçues effectuée, apparaisse une insatisfaction des besoins identifiés au départ. Ceci peut indiquer par exemple, un manque au niveau de la connaissance de l'espace concerné, un manque au niveau de la conception de la solution ou une mauvaise compréhension des besoins des utilisateurs de l'espace, renvoyant ainsi à l'une ou l'autre des étapes précédentes. Herbert Simon va même jusqu'à considérer la fin de chacune de ces étapes comme devant faire l'objet d'un processus décisionnel à part visant à décider si les conditions sont remplies pour procéder à l'étape suivante [SIMON 1977]. Enfin, les étapes cycliques se soldent par le choix définitif d'une solution satisfaisante, initiant ainsi l'étape finale de constatation.

C'est en nous basant sur cette définition sommaire que nous évaluerons la capacité des différents outils géospatiaux à supporter les processus décisionnels en design urbain. Face à la décision, nous analyserons surtout leur capacité à supporter les première, deuxième et quatrième étapes puisque la troisième sera

analysée d'un point de vue du processus de conception, tel que discuté précédemment.

2.2.3 Un modèle conceptuel intégrant les deux processus

Suite à la définition des processus de design urbain précédente, nous pouvons observer que le processus décisionnel et celui de conception se croisent au niveau de certaines étapes. En effet, dans le modèle du processus de conception, les deux premières phases peuvent être associées à l'étape du renseignement du processus décisionnel. De même, nous pouvons associer les deux phases suivantes du processus de conception à l'étape de conception du processus décisionnel. Afin d'éviter les ambiguïtés et simplifier notre discussion au sujet des outils géomatiques existants qui suivra, nous proposons d'adopter le modèle suivant qui intègre les deux processus en un seul dont la portée est plus globale :

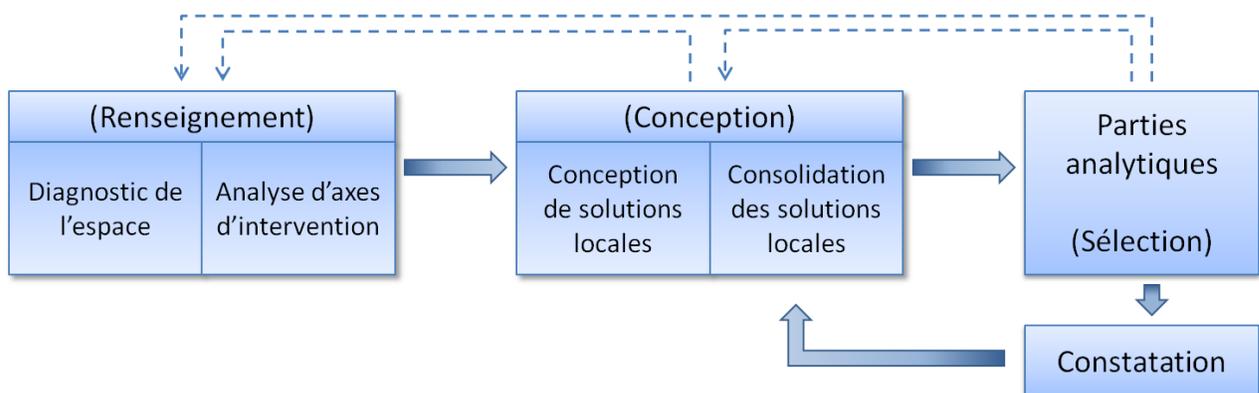


Figure 2.4 : Modèle conceptuel de l'intégration des processus de design urbain

2.3 La géomatique au support du design urbain

Suite à cette étude du design urbain, nous avons identifié deux processus centraux à la discipline, soit le processus de conception et celui de décision qui peuvent être intégrés en un seul processus global. Dans cette section, nous examinerons les outils géospatiaux existants développés afin de supporter les processus de design urbain. Pour ce faire, nous les situerons à l'intérieur du processus de design urbain global proposé plus haut et discuterons de leurs

limites face à celui-ci. Nous verrons également que ces outils viennent sous plusieurs formes, certaines conventionnelles, d'autres plus originales et font intervenir plusieurs types de technologies en géomatique.

Les différentes étapes du processus impliquent différentes exigences au niveau des outils les supportant, particulièrement lorsqu'on pense aux outils géospatiaux. Par exemple, un outil visant à supporter les étapes de conception doit offrir des capacités de dessin assisté par ordinateur. Il doit permettre des opérations typiques associées aux logiciels de dessin assisté par ordinateur (DAO ou CAD en anglais) telles que le dessin de formes géométriques variées, l'application de textures aux objets conçus et les extrusions de volumes pour n'en nommer que quelques-unes. Les autres étapes du processus global, soient l'analyse de l'espace environnant avant la conception, des différentes solutions conçues ou du processus à posteriori, impliquent un outil supportant qui possède des capacités se rapprochant plutôt des SIG. Ces étapes nécessitent par exemple, des fonctionnalités de gestion des informations descriptives, de la référence spatiale, de représentation spatiale, d'analyse spatiale et bien d'autres. Cette dichotomie entre les fonctionnalités requises entraîne inévitablement une différence au niveau de la conception et du développement d'un outil visant à supporter les processus de design urbain.

2.3.1 Les outils de conception

En ce qui a trait aux étapes de conception dans le processus de design urbain, la justification de l'utilité des outils CAD n'est plus à faire. En effet ce type d'outil est devenu omniprésent dans la conception de solution en design urbain. Conséquemment, peu de groupes de recherche s'intéressent encore au développement de CAD standards pour le support au design urbain puisque les outils déjà existants, tel qu'AutoCAD, SketchUp ou Adobe Illustrator, ont déjà démontré leur efficacité pour répondre aux besoins de la discipline. En conséquence, l'évolution future de ces outils se retrouve plutôt assurée par le milieu industriel, dans un contexte commercial plutôt que scientifique. Nous

pouvons tout de même noter certains développements intéressants dans cette catégorie d'outils, par des équipes de recherche qui abordent la conception sous différentes perspectives.

Mentionnons par exemple l'outil SESAME (*Sketch, Extrude, Sculpt, and Manipulate Easily*) (Voir figure 2.5) développé par un groupe de recherche Canado-américain dont le but est d'offrir un outil simplifié de conception [OH 2006, OH 2005]. Ces auteurs affirment d'abord que les outils CAD actuels supportent mal les premières phases du processus de conception en design urbain puisqu'ils sont plus adaptés au travail de détail qu'au travail conceptuel qui demeure réalisé grâce à des sketchs papiers manuels. Ils argumentent que ceci a pour effet de limiter les débuts de la conception aux designers puisque les sketchs papiers sont généralement difficile à comprendre pour les non-experts. À travers leurs recherches, les auteurs abordent en détail plusieurs principes qui ont guidés le développement de leur outil CAD. Par exemple, une interface non-intrusive qui vise à minimiser la complexité de l'interface entre l'utilisateur et l'ordinateur. La conception simple en utilisant une modélisation solide plutôt que polygonale, ce qui permet les extrusions et le « sculptage » des modèles. La tolérance envers l'ambigüité et les concepts non terminés qui sont souvent présents dans le processus de conception. Bref, nous comprenons que cet outil est axé envers la simplicité, la réflexion conceptuelle et son utilisation par des personnes inexpérimentées. De façon comparable à la majorité des CAD standards, cet outil demeure limité dans sa capacité à gérer les données descriptives et la référence spatiale, deux exigences requises par les étapes d'analyse du processus global de design urbain.

Un autre outil CAD intéressant et axé sur la réflexion conceptuelle a été développé par *Holistic City Ltd.* et lancé au grand public en 2008 [HOLISTIC CITY 2005-10]. Le logiciel *CityCAD* (Voir figure 2.6) s'agit d'un outil de qualité commerciale qui est très avancé et qui a été développé spécifiquement pour les besoins en design urbain. Il offre plusieurs fonctionnalités visant à simplifier le travail conceptuel, il permet par exemple d'utiliser directement des sketchs manuels numérisés afin de

démarrer un projet de conception. Il calcule automatiquement certains paramètres tels la superficie de planchers, les besoins en stationnements et la densité résidentielle. De plus, ces paramètres sont automatiquement mis à jour à mesure que des changements sont effectués au concept et des avertissements surviennent si certaines exigences ne sont plus respectées. Il permet également de considérer les besoins en développement durable en intégrant des fonctions visant à calculer les besoins en énergie et les dégagements de pollution. Toutes ces fonctions visent à faciliter la conception et l'évaluation de différentes options de solutions face à la situation problématique initiale. Nous comprenons donc que cet outil qui est en grande partie un outil CAD, comporte également une certaine capacité d'analyse. Cependant, ces fonctionnalités sont extrêmement spécifiques aux besoins du design urbain et ne permettent pas une analyse aussi flexible et étendue de l'espace que dans les logiciels de type SIG.

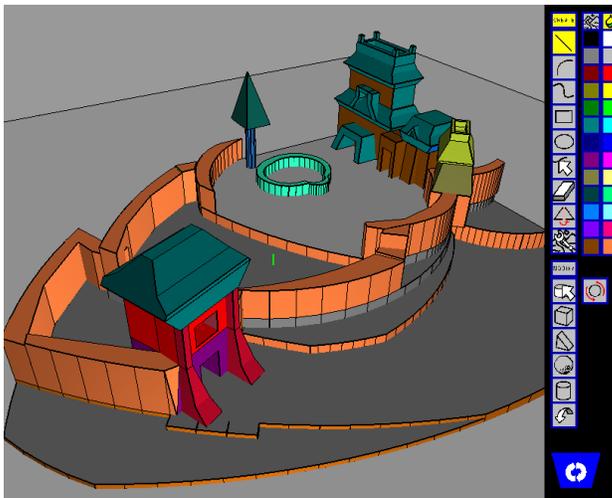


Figure 2.5 : L'interface non-intrusive de SESAME

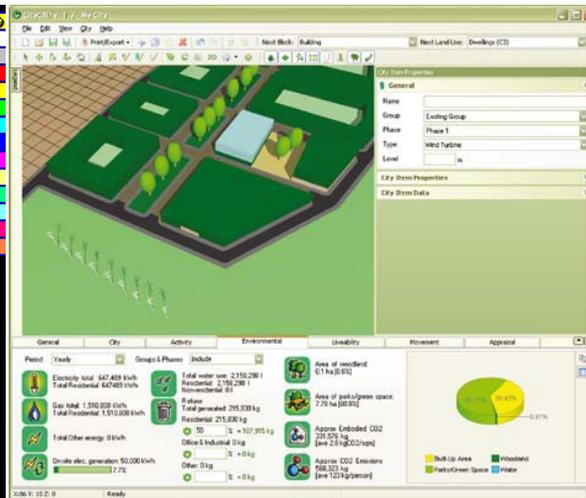


Figure 2.6: Le logiciel CityCAD

À travers ces deux exemples de logiciels CAD spécifiquement adaptés aux besoins du design urbain, nous comprenons que la tendance dans le développement d'outil de conception est à la simplification des logiciels. Ceci permet premièrement une utilisation plus intuitive qui facilite l'intégration d'acteurs inexpérimentés au processus et deuxièmement, permet de concevoir plus rapidement des solutions. Par contre, ces outils simplifiés n'éliminent pas le besoin pour le travail de détail, nécessaire une fois un concept de base bien établi. À cet

effet, les logiciels CAD standards demeurent très performants et ne seront sans doute pas remplacés de sitôt.

2.3.2 Les outils d'analyse

Au fil des années, plusieurs technologies et produits de la géomatique ont été étudiés afin d'être utilisés comme support aux processus d'analyse en design urbain. Il existe donc une très grande quantité de travaux, parfois similaires, concernant l'utilisation de la géomatique en support au design urbain. Depuis l'apparition de ces technologies, il existe un intérêt prononcé envers leur utilisation en design urbain, notamment à l'égard des technologies SIG et de la télédétection [QIU 2003, GREENWALD 2000, NEDOVIC-BUDIC 2000, HEROLD 2001, BATTY 1998]. L'utilité de ces technologies standards de la géomatique semble bien acceptée de nos jours puisque les groupes de recherches ont, pour la plupart, délaissé la tâche de démontrer qu'elles étaient propices au design urbain pour plutôt se concentrer sur le développement d'applications spécifiques, visant une problématique particulière en design urbain. Afin d'alléger cette étude des outils existants, nous discuterons seulement des applications que nous jugeons les plus novatrices et récentes des technologies géomatiques en support aux étapes d'analyse en design urbain.

On remarque d'abord un intérêt évident envers le développement d'outils SIG 3D afin de remplacer l'utilisation des SIG traditionnels en design urbain. L'intérêt envers les SIG 3D est facilement compréhensible lorsque nous considérons que le travail des designers s'effectue en grande majorité en 3D. C'est au tournant des années 2000 que l'intérêt envers cette technologie s'est accentué. À ce moment, plusieurs chercheurs ont entrepris l'étude de différents aspects des SIG 3D, notamment le stockage des données 3D, les besoins relatifs à la topologie en 3D, certains concepts d'analyse spatiale 3D, pour ne citer que quelques exemples [BATTY 1998, ZLATANOVA 2002, ZLATANOVA 2002, STOTER 2003]. Malgré ces études, très peu de prototypes ont été développés. Nous pouvons sans doute attribuer cette lacune à l'énormité de la tâche que consiste le développement d'un

outil GIS 3D. En effet, il suffit de considérer l'ampleur des logiciels SIG actuels, tel ArcGIS afin de comprendre l'ampleur de cette tâche. Face à cette réalité, la communauté scientifique s'est plutôt retournée vers le développement d'applications spécifiques des SIG 3D à divers domaines par exemple, le développement de SIG 3D collaboratifs qui sera discuté dans la section 2.4.2. Ainsi, il semblerait que le développement d'un outil SIG 3D robuste et complet ait été laissé aux compagnies spécialisées dans le domaine. D'ailleurs, au moment d'écrire ces lignes, Bentley et ESRI viennent tout juste de lancer chacun un logiciel de SIG 3D de qualité professionnelle [BENTLEY 2010, ESRI 2010B]. Les SIG 3D sont des outils dont la capacité à supporter les processus d'analyse est évidente, notamment au niveau de la représentation de l'espace en 3D qui facilite la compréhension par un public non-expert. Par contre, ces outils demeurent très spécialisés et resteront sans doute réservés à un public expert. De plus, ce ne sont pas des outils développés spécifiquement pour le travail collaboratif et ne supportent pas la délibération, étape nécessaire en design urbain afin de clôturer le processus décisionnel de groupe.

Un autre type d'outil suscite une grande attention face aux étapes d'analyse des processus de design, la géosimulation de différents phénomènes urbains. Par la simulation de phénomènes urbains, telle la congestion routière ou les déplacements piétonniers, la compréhension de ce phénomène en fonction de l'espace est approfondie [DAVIS 2006]. Paul Waddell et son équipe, un des groupes de recherche à l'avant-garde de ce domaine, ont conçus *UrbanSim* (récemment renommé *OPUS*) (Voir figure 2.7), un système de simulation *OpenSource* visant à faciliter la simulation flexible de phénomènes urbains tel le transport motorisé ou non, les émissions de gaz à effet de serre ou l'évolution des valeurs immobilières [WADDELL 2008, BORNING 2008, WADDELL 2002]. Cette plateforme de simulation est en constante évolution depuis sa conception, au milieu des années 1990. Il ne fait aucun doute que la simulation apporte une dimension intéressante et pratique aux processus décisionnel en design urbain. En effet, elle permet aux utilisateurs de prévoir l'impact à différents niveaux d'une solution retenue suite à un processus décisionnel. Cependant, la simulation, par

elle-même, ne constitue pas un outil complet d'analyse, elle ne permet pas la même flexibilité qu'un logiciel SIG par exemple. Comme la simulation d'un phénomène requiert un paramétrage strict, il est difficile de l'adapter rapidement aux besoins d'analyse. De plus, elle n'offre pas de méthodes de visualisation ou d'interaction efficace pour les utilisateurs inexpérimentés, elle demeure un outil d'expert. L'intérêt d'un outil de simulation serait multiplié s'il était jumelé aux technologies SIG et s'il supporterait la gestion des données 3D, ce qui permettrait une visualisation plus intuitive des données.

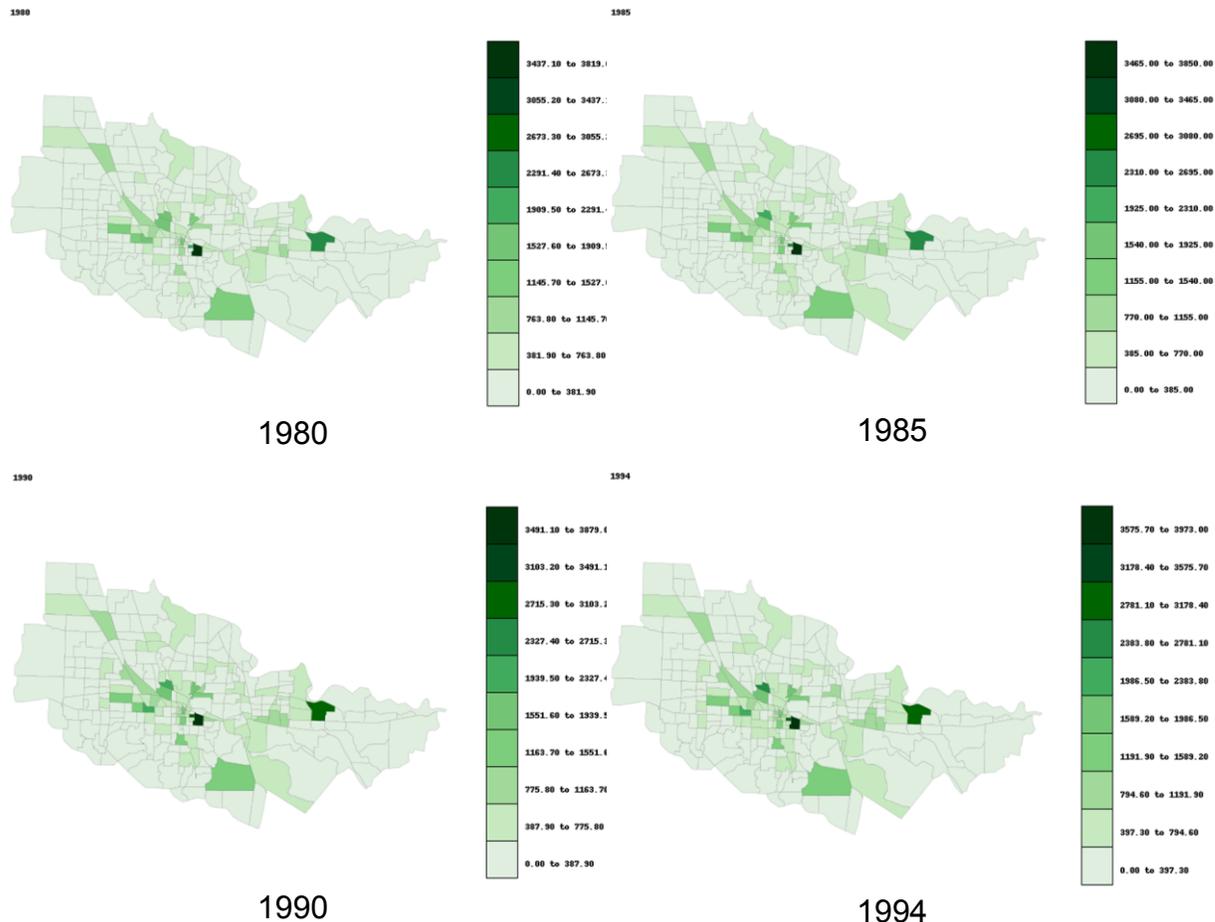


Figure 2.7: Un exemple de simulation du nombre d'emplois disponibles avec UrbanSim sur une période de 15 ans [URBANSIM 2011]

Plusieurs outils adressant des problèmes spécifiques en design urbain ont également été développés au fil des années. On retrouve par exemple des outils adressant le problème spécifique de la congestion routière. Grâce à l'analyse spatiale possible grâce au SIG, cet outil permet de premièrement de mesurer différents paramètres des routes problématiques et deuxièmement, d'analyser l'impact des mesures visant à réduire la congestion routière [RANDALL 2005]. Un autre des besoins central à l'analyse de l'espace en design urbain consiste en la détermination de l'impact de l'implantation d'un nouveau projet sur les percées visuelles du paysage urbain, un des indicateurs de la qualité de l'espace. Pour ce faire, certains chercheurs ont utilisés une approche visant à calculer un index de visibilité du ciel basé sur les technologies SIG [YANG 2007, SOUZA 2003]. L'intégration du calcul de cet index dans un outil SIG est pratique car il permet de le calculer selon différentes perspectives. Évidemment, tous ces outils possèdent des utilités très spécifiques mais ne constituent pas des outils complets supportant l'analyse, ils devraient être considérés comme des aspects à intégrer à un outil plus global.

2.3.3 De nouvelles tendances en géomatique et design

Depuis une dizaine d'années, une tendance se dégage face à l'intégration de la capacité de conception aux outils géospatiaux, et plus particulièrement, face aux SIG. C'est en janvier 2001 qu'un premier atelier de travail fut organisé dans le but d'amorcer cette réflexion et c'est à l'occasion du deuxième atelier en 2008, que le terme *GeoDesign* fut défini et adopté par la communauté. Ce terme est maintenant utilisé pour signifier l'étude des points communs entre les SIG et le design, avec une emphase sur le domaine géographique et les échelles géographiques [GOODCHILD 2010]. En janvier 2010, le premier Sommet du GeoDesign eu lieu en Californie réunissant plus de 150 chercheurs et professionnels des SIG et du design [ESRI 2011]. Considérant que cette tendance commence à se concrétiser, il n'est pas surprenant que les définitions pour le GeoDesign abondent, en voici quelques-unes des plus intéressantes [ESRI 2010A]:

« GeoDesign is the thought process comprising the creation of entities in geographic space »

- Bill Miller, GeoDesign Summit 2010

« GeoDesign is changing geography by design »

- Carl Steinitz, GeoDesign Summit 2010

« GeoDesign is a design and planning method which tightly couples the creation of design proposals with impact simulations informed by geographic contexts »

- Michael Flaxman, Geodesign Summit 2010

« GeoDesign is a set of techniques and enabling technologies for planning built and natural environments in an integrated process, including project conceptualization, analysis, design specification, stakeholder participation and collaboration, design creation, simulation and evaluation (among other stages). »

- Wikipedia, 2011

En considérant ces définitions, nous pouvons aisément comprendre comment le GeoDesign s'annonce comme un domaine de recherche et développement qui établira un lien plus concret entre le design urbain et la géomatique. Dans les années à venir, lorsque les principes du GeoDesign seront bien formalisés et acceptés par la communauté scientifique et l'industrie, nous verrons certainement l'apparition d'outils mieux adaptés aux besoins des designers. Ces outils, basés sur de nouveaux principes de développement, offriront de nouvelles façons de supporter les processus de design urbain. D'ailleurs, certains types d'outils s'annoncent déjà comme des candidats prometteurs. Par exemple, le logiciel d'ESRI, ArcSketch et celui de Google, SketchUp offrent certaines capacités de croquis et permettent de les traduire en 3D. La simulation est un autre domaine intéressant pour les outils de GeoDesign. Ils permettent d'étudier les impacts de différents scénarios d'utilisation de l'espace en se basant sur des connaissances scientifiques. Il existe actuellement plusieurs outils de simulation de phénomènes environnementaux et sociaux mais la plupart d'entre eux ne sont pas standardisés et ne peuvent être intégrés aux SIG [GOODCHILD 2010]. La standardisation de ces outils est une piste de développement futur pour le GeoDesign.

2.4 La géomatique pour supporter la collaboration

De nos jours, la collaboration dans les processus de design urbain est devenue omniprésente. Ceci est largement dû au fait que la participation de la société dans les processus de design urbain est de plus en plus dynamique à l'égard des enjeux sociaux, économiques et de développement durable. Cette démocratisation des processus se traduit par une société qui exige que leur environnement soit une réflexion de leurs besoins [BARENDSE 2007]. La collaboration à différents niveaux de la société s'annonce comme étant la solution naturelle à ces changements de société. Dans la section précédente, nous avons abordé le rôle de la géomatique dans les processus de design urbain en laissant délibérément de côté l'aspect collaboratif du design urbain. Nous avons réservé la discussion sur la collaboration pour cette section qui discutera de la capacité de la géomatique à fournir une plateforme de collaboration dans les processus de design urbain identifiés à la section précédente. Mais avant de procéder à cette discussion, nous discuterons d'abord de la collaboration en design urbain, de façon générale, afin de ressortir les éléments clés d'un outil supportant la collaboration.

2.4.1 Définir la collaboration

La collaboration, peu importe son domaine d'application est un concept complexe qui fait l'objet de multiples recherches approfondies et soutenues dans la communauté scientifique. Dans le contexte limité de cette présente recherche, nous ne pouvons prétendre que nous l'avons étudié de façon complète et aussi approfondie qu'une multitude d'autres auteurs, experts de ce domaine. L'objectif de cette section est donc de fournir une base permettant de comprendre cet aspect important des processus de design urbain et sur laquelle nous serons en mesure d'évaluer la capacité de collaboration des différents outils existants.

La compréhension de la collaboration passe d'abord par sa définition. Une grande quantité de définitions ont été mises de l'avant par divers groupes de recherche au fil des années. L'une des plus robustes et plus répandues est celle proposée par

Barbara Gray en 1989 qui énonce que la collaboration est un procédé par lequel les partis impliqués analysent différents aspects d'un problème, explorent leurs différences de façon constructive et recherchent des solutions qui vont au-delà de leur propre vision limitée de ce qui est possible [GRAY 1989]. À partir de cette définition, il est déjà possible d'entrevoir certains obstacles de la collaboration. En effet, nous pouvons en dégager que les différents partis prenant part au processus collaboratif possèdent chacun leur propre vision, basée sur leurs propres intérêts et expertises qui peuvent être bien différents de ceux des autres partis impliqués. Ceci est particulièrement évident lorsque nous considérons les processus de design urbain qui peuvent faire intervenir un spectre élargi de participants allant des citoyens jusqu'au politiciens municipaux, en passant par une variété d'experts, professionnels et promoteurs. Jeanne Mengis, une chercheuse intéressée à la collaboration dans les processus décisionnels, identifie au total quatre défis centraux face à la communication en situation collaborative [MENGIS 2007] :

- **Participation égale** : Dans les groupes, la contribution des participants peut être inégale pour plusieurs raisons, par exemple la présence de cadres supérieurs ou la peur d'être critiqué. Il faut favoriser la participation égale afin d'offrir une valeur égale à toutes les perspectives de solution.
- **Vision d'ensemble** : Il est important de posséder une vision d'ensemble à tout moment du processus collaboratif afin de ne pas isoler certains éléments du problème. Pour obtenir une vision d'ensemble, il faut comprendre comment un aspect précis et technique entre en relation avec l'ensemble du problème.
- **Établir un terrain d'entente** : Il est nécessaire d'établir un terrain d'entente afin que tous les participants puissent communiquer en se comprenant. Plusieurs facteurs peuvent y faire obstacle, les différences au niveau de la formation professionnelle, des différences sociales, culturelles ou même émotives.
- **Conflit constructifs** : Les processus collaboratifs entraînent quasi-inévitablement des conflits entre les participants, il est important d'en soutirer des apprentissages à l'égard de la situation problématique. Il est

important que ces conflits se situent au niveau des idées et non au niveau des personnes impliquées.

Face aux défis existants dans les processus collaboratifs, la conception et le développement d'outils facilitant la collaboration est devenu un enjeu central de la recherche en collaboration. Beaucoup de chercheurs qui étudient ce sujet proposent leur propre série de principes de développement d'outils collaboratifs visant à faciliter l'intégration et la participation de tous les acteurs impliqués [MAYER 2005, GROSS 2007, LOMAS 2008]. En effet, un outil supportant la collaboration, lorsque mal conçu, peut ralentir dramatiquement un processus de conception ou de décision collaboratif. Il est donc important de définir et d'adhérer à certains principes facilitant le travail entre différents acteurs qui, la plupart du temps, possèdent chacun leur propre vision d'un projet et des objectifs visés par celui-ci. Plusieurs auteurs ont identifié et proposé des séries de principes visant à diriger le déroulement d'un processus collaboratif réussi et efficace. Quoique ces séries de principes varient selon les auteurs qui les ont proposés, il est toutefois possible d'identifier certains de ces principes qui se répètent dans la littérature. Suite à une étude des différentes séries de principes proposés par les auteurs, nous en avons dégagé les quatre principaux :

- **L'utilisabilité** : Un outil doit être facilement utilisable par tous les participants afin de faciliter leur intégration au processus collaboratif. Ceci implique une interface intuitive, simple d'apprentissage et des fonctionnalités efficaces ciblant des besoins précis relatifs au processus en question.
- **La capacité de communication** : L'outil doit faciliter et encourager la discussion et les interactions entre les participants tout en traduisant la problématique d'une façon simple à comprendre pour tous les participants. L'outil doit communiquer efficacement avec les participants et aussi permettre aux participants de communiquer entre eux.
- **La transparence** : Les résultats doivent être présentés de façon évidente et facilement compréhensible pour tous les participants impliqués. Les

attentes envers et entre les participants doivent également être mis en évidence.

- **L'interactivité et le dynamisme** : L'outil doit permettre la modification rapide des solutions et démontrer leur performance face à la problématique et à la vision des participants. Il doit encourager la participation en offrant les moyens aux acteurs d'avoir un impact sur la solution.

L'implémentation de ces principes de collaboration dans le développement d'un outil supportant les processus de collaboration en design urbain permet d'adresser les défis énoncés plus haut. De surcroit, la façon d'intégrer ces principes au développement de l'outil doit considérer la nature du processus visé. Par exemple un outil devant être utilisé par un groupe restreint peut favoriser une discussion approfondie entre les participants alors qu'un outil visant un groupe élargi peut exiger une communication limitée à une plateforme de vote seulement. Bref, nous pouvons comprendre que le développement d'un outil de collaboration est complexe et doit considérer une quantité élevée de facteurs, besoins et principes.

2.4.2 La géomatique comme plateforme de collaboration

L'utilisation de la géomatique en tant que plateforme de collaboration pour diverses applications est un champ de recherche qui a donné naissance à une très grande quantité d'outils de collaboration. La collaboration est présentement une des préoccupations centrales à la recherche et au développement d'outils de géomatique. Plusieurs raisons peuvent expliquer cet intérêt croissant envers la collaboration, par exemple la dynamique croissante de la société ou la démocratisation et la familiarisation aux données géospatiales à tous les niveaux de la société. Mais la raison principale expliquant cet intérêt est sans doute le raffinement des outils géomatiques traditionnels qui sont devenus accessibles à toutes les catégories d'utilisateurs, qu'ils soient experts ou non. Il existe, en conséquence, une très grande quantité d'outils géomatiques supportant la collaboration qui ont été développés depuis quelques années. Comme nous l'avons fait pour les sections précédentes, nous aborderons les grandes catégories

d'outils de collaboration en mentionnant les travaux les plus intéressants. Avant de poursuivre, notons que la plupart des outils collaboratifs développés s'appliquent plutôt aux processus décisionnels du design urbain puisqu'ils sont axés sur l'analyse des données. En effet, les outils traditionnels étant demeurés longtemps peu concernés par la gestion du 3D, ils se prêtent difficilement aux phases de conception où la manipulation de composantes 3D est primordiale. Bien que la tendance se renverse de nos jours, les outils spécialisés en conception demeurent beaucoup plus performant au niveau des phases de conception en design urbain.

La technologie géomatique se prêtant le mieux à la collaboration est certainement celle des SIG participatifs. Le SIG est un outil particulièrement propice au travail de groupe dans un contexte décisionnel puisqu'il permet de représenter les données géospatiales de plusieurs façons, d'intégrer différents types de données et d'analyser en profondeur les données. Jankowski et Nyerges, dans un de leur plus importants articles, proposent une gradation des outils participatifs [JANKOWSKI 2001]:

- **Communication** : Permet l'échange d'idées entre les utilisateurs. Ce niveau de participation est celui de base.
- **Coopération** : Les participants s'entendent sur les contributions à apporter mais peuvent retourner travailler chacun de leur côté.
- **Coordination** : Les participants coopèrent et s'entendent sur une séquence d'activités favorisant une synergie profitable pour tous les participants.
- **Collaboration** : Les participants travaillent simultanément ou presque sur une même problématique. Tous les participants ont la possibilité d'affecter la solution finale. Ce niveau de participation est le plus poussé.

Évidemment, nous remarquons que, selon Jankowski et Nyerges, la collaboration, telle que définie à la section précédente est le cas où la participation est à son maximum. Cette gradation nous permet également de comprendre que l'atteinte de la collaboration totale est plus complexe que l'atteinte de la participation de façon générale. En conséquence, les outils de SIG participatifs existants sont plus rarement complètement collaboratifs. Néanmoins, ils doivent être abordés dans le

sens où ils font partie du cheminement vers la collaboration complète. Plusieurs auteurs ont étudié et proposé des prototypes de SIG participatifs [BOROUSHAKI 2009, VOSS 2004, PENG 2001]. Nous discuterons ici des SIG participatifs principaux et de ceux qui présentent des caractéristiques particulières.

Le SIG délibératif est un des outils participatifs le plus intéressant qui a fait l'objet de recherches approfondies par Claus Rinner et son équipe depuis plus d'une dizaine d'année déjà [RINNER 2009, KEBLER 2005, RINNER 1999]. De façon résumée, ce type d'outil intègre une plateforme de discussion web à un logiciel de SIG de façon à ce que plusieurs utilisateurs puissent discuter des différentes alternatives proposées pour un projet de design urbain par exemple (Voir figure 2.8). Ceci permet aux utilisateurs d'exprimer leur opinion face à une alternative et aux décideurs de prendre en considération les réflexions des participants. Ce type d'outil vise généralement une participation très nombreuse, de façon similaire aux consultations publiques. Conséquemment, ils ne permettent pas une collaboration complète dans le sens où les participants ne contribuent pas à l'élaboration d'une solution concertée, mis à part les réflexions qu'ils émettent. En évaluant l'outil selon les quatre principes énoncés à la section précédente, nous comprenons qu'il est surtout axé sur la communication. En effet, grâce aux forums de discussions, il permet la communication efficace entre les utilisateurs. Cependant, il ne permet pas aux utilisateurs de manipuler la solution, ce qui fait obstacle à l'interaction et au dynamisme nécessaire à la collaboration. Il comporte également plusieurs lacunes au niveau de l'utilisabilité et de la transparence, dues à l'interface SIG traditionnelle utilisée pour présenter la situation aux utilisateurs. En effet, les interfaces SIG traditionnelles demeurent complexes et nécessitent une formation. De plus, la présentation en 2D exclusivement limite la compréhension de l'espace. Ceci concorde d'ailleurs avec les conclusions tirées par les auteurs, lors de l'application de l'outil à un cas d'étude [RINNER 2009].

Ciobanu propose également une implémentation particulière d'un SIG participatif [CIOBANU 2006, CIOBANU 2005]. En associant une base de données utilisée pour stocker les commentaires des designers lors du processus de conception de

la solution, il obtient ainsi un SIG participatif permettant aux utilisateurs d'analyser l'espace en considérant les réflexions de ceux qui l'ont conçu. Cet outil a été conçu de façon à ce que des utilisateurs non-experts puissent réviser le processus de conception, de façon à comprendre les décisions. À priori, cet outil n'implémente pas de fonctionnalités permettant l'utilisation simultanée par plusieurs utilisateurs. Ils se retrouvent donc en situation de plusieurs utilisateurs pour un seul moniteur, ce qui limite grandement la collaboration mais n'empêche pas la participation. À la différence du SIG délibératif mentionné précédemment, l'outil de Ciobanu porte une attention particulière à l'interface qui a été développée de façon à être simple à utiliser. Cependant, il présente les données en 2D seulement, ce qui peut être un obstacle à la collaboration, particulièrement pour un outil destiné à l'utilisation par des non experts. En effet, cet outil vise à communiquer les solutions des designers à des non experts hors, ces solutions sont pratiquement toujours conçues en 3D. L'abstraction du 3D vers le 2D entraîne une perte d'information qui risque d'influencer la prise de décision subséquente. Nous en dégageons que cet outil est surtout situé au niveau de la communication dans l'échelle de participation. Cependant, utilisé dans le cadre d'un processus de conception, il pourrait permettre à plusieurs designers de réviser le processus de conception et de s'entendre sur la suite du processus de conception, ramenant l'outil au niveau de coordination.

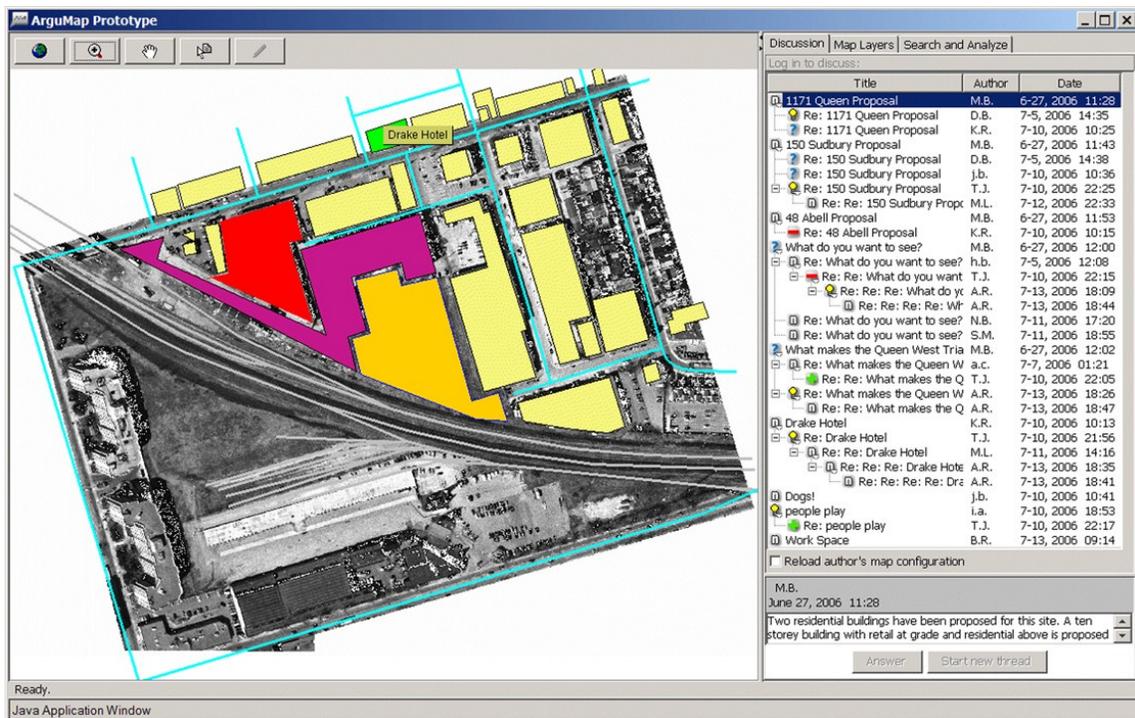


Figure 2.8 : Le SIG délibératif de Claus Rinner et son équipe [RINNER 2009]

Les deux outils mentionnés précédemment sont limités exclusivement aux processus de décision en design urbain puisqu'ils ne permettent pas la conception de solutions. Un outil a été développé par Wolfgang Stuerzlinger et son équipe visant à adresser cette limite et permettre les processus de conception collaboratif [STUERZLINGER 2006]. *CoVid*, pour *Collaborative Virtual 3D Design*, est un outil qui permet la conception en groupe d'une solution 3D (Voir figure 2.9). Cet outil est une continuation de *SESAME*, mentionné plus haut, auquel des capacités de collaboration ont été additionnées. La collaboration dans *CoVID* repose sur une architecture de système particulière qui intègre des grands écrans et des tables interactives pour permettre à plusieurs utilisateurs de simultanément interagir avec le produit de la conception (Bien que cet outil comporte certains aspects de réalité virtuelle et augmentée, nous avons choisi d'en discuter ici car il s'agit plus d'un outil de conception collaboratif que d'un outil de RV). Par l'ajout de méthode d'interactions tactiles à un outil de conception déjà intuitif, cet outil vise à augmenter son utilisabilité auprès d'utilisateurs non-experts. Il réunit les utilisateurs autour d'une table de travail, ce qui rend la communication naturelle et

évite le recours à des fonctionnalités de communication telle les forums de discussion web. *CoViD* est axé sur le processus de conception, il n'offre pas de capacités d'analyse typiquement présentes dans les SIG

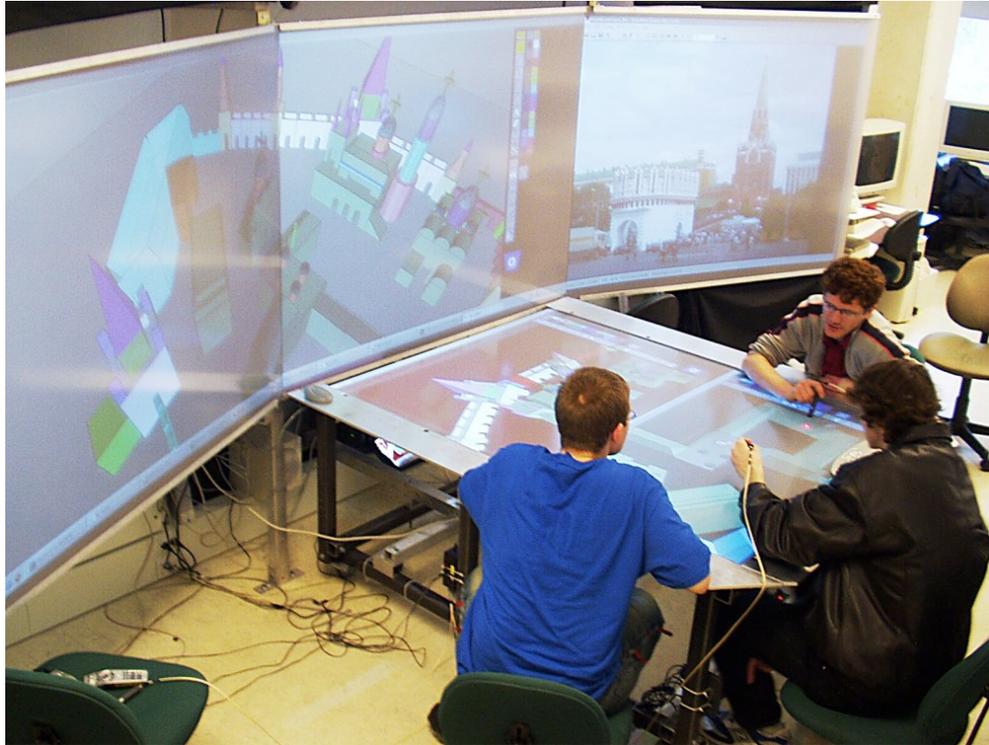


Figure 2.9 : Le système *CoViD* en action [STUERZLINGER 2006]

L'architecture du système *CoViD* rappelle celle du système *Dave_G* développé par Alan MacEachren et son équipe de recherche [MACEACHREN 2003]. *Dave_G* est un système qui utilise également le principe de réunir les utilisateurs au même endroit au même moment afin de permettre la collaboration. Cependant, il est plutôt axé sur les processus décisionnels puisqu'il implémente des fonctionnalités d'analyses similaires à celles des SIG. Comme *CoViD* il intègre des méthodes d'interaction intuitives et multimodales basées sur la gestuelle et les commandes vocales. Il permet aussi une communication naturelle puisque les utilisateurs sont tous réunis au même endroit et travaille sur le même système. Cet outil comporte également quelques lacunes. Notamment, il ne permet pas la visualisation 3D des solutions, ce qui limite la compréhension des utilisateurs et diminue la transparence du processus décisionnel. De plus, il ne permet pas la conception de

solution. Mentionnons toutefois que cet outil n'a pas été développé avec une optique de design urbain mais plutôt afin de répondre à des situations d'urgence.

2.5 Concevoir une solution aux limites des outils existants

Dans les sections précédentes, il a été démontré que le design urbain, de par sa nature collaborative, peut bénéficier grandement de supports technologiques afin de faciliter les processus collaboratifs de conception et de décision. La littérature scientifique discutée jusqu'à présent démontre bien que la géomatique peut être utilisée efficacement comme support collaboratif en design urbain. Nous avons également discuté des lacunes que présentent les outils géomatiques conçus jusqu'à présent, face aux processus du design urbain. Dans la plupart des cas, ces outils étaient conçus avec l'intention de supporter certaines étapes spécifiques d'un ou l'autre des processus du design urbain. Concevoir un outil pouvant supporter l'entièreté des processus de design urbain nécessite de porter une attention particulière aux besoins de chacun des processus ainsi qu'aux principes de la collaboration efficace. Cette section vise d'abord à identifier clairement les besoins auxquels doivent répondre un outil supportant le design urbain collaboratif. Il proposera ensuite le concept retenu pour la conception de notre prototype.

2.5.1 Identifier les besoins auxquels répondre

Afin d'offrir un maximum de flexibilité tout au long des processus de design, le développement de notre prototype doit être conçu de façon à répondre aux besoins de l'ensemble des processus de design urbain, de la conception jusqu'à la décision. De plus, il doit être conçu de manière à supporter la collaboration lors de ces processus. Pour ce faire, il doit également satisfaire les principes de collaboration énoncés à la section 2.4.

En abordant les étapes du processus de design urbain global une à une, telles que définies à la section 2.2.3, nous pouvons dégager plusieurs besoins devant être satisfaits par l'outil conçu. La première étape qui consiste à se renseigner sur l'espace d'intervention, passe d'abord par la détermination des éléments du diagnostic, ce qui implique entre autre, la sollicitation du public. Il est donc important que cet outil possède un niveau d'utilisabilité élevé, facilitant son utilisation par un public non-expert. Cependant, ceci renvoie à un principe de collaboration et sera discuté plus loin. Ensuite, les designers procèdent à l'analyse de l'espace d'intervention selon différentes perspectives. C'est-à-dire que l'espace d'intervention doit être décomposé et analysé de façon locale, en considérant seulement une portion de l'espace total. Pour cela, l'outil doit permettre les changements de perspectives simples et rapides, de façon à faciliter l'analyse locale de l'espace et des éléments qui le composent tels que la végétation, les bâtiments, les rues, etc. De plus, à cette étape, le diagnostic de l'espace se fait en trois dimensions. La représentation et la manipulation de l'espace en 3D est donc primordiale afin d'évaluer certains facteurs comme l'impact sur le paysage urbain existant, la visibilité du ciel ou l'ensoleillement par exemple. Lors de l'étape de conception, l'outil doit permettre de concevoir des solutions locales et par la suite de les assembler en une solution complète. Pour ce faire, l'outil doit implémenter des fonctionnalités similaires à celles des logiciels CAD qui permettent la modification en 3D de la solution conçue. La dernière étape du processus vise à analyser la solution complète et sa capacité à répondre aux exigences, aux contraintes et aux buts du projet en question. À cet effet, l'outil devrait implémenter des fonctionnalités similaires à celles d'un SIG traditionnel qui permettrait de considérer la solution conçue dans son environnement plus global. Ainsi, l'outil devrait offrir la gestion des informations descriptives, l'exécution de requêtes sur les informations spatiales, l'analyse spatiale, etc.

De plus, l'outil doit être développé de façon à supporter la collaboration entre plusieurs utilisateurs de façon simultanée et tout au long du processus de design urbain. En se basant sur la définition proposée pour la collaboration, les quatre principes énoncés à la section 2.4.1 pour une collaboration efficace deviennent les

besoins auxquels l'outil doit répondre face à la collaboration. Il doit premièrement permettre une communication entre les multiples utilisateurs qui interagissent avec l'outil. Bien que plusieurs outils explorés implémentent la capacité de communication grâce à un intermédiaire web, il ne faut pas oublier la communication naturelle, plus dynamique, qui a lieu lorsque les utilisateurs sont réunis au même endroit, au même moment. Il doit également permettre aux utilisateurs d'interagir dynamiquement avec les données et les solutions qui doivent leur être présentées de façon transparente, c'est-à-dire facilement compréhensible. À cet effet, la représentation en 3D, déjà nécessaire pour répondre aux capacités de conception de l'outil, permettrait de faciliter la compréhension de l'espace par des utilisateurs non experts. Enfin, l'outil doit répondre au principe qui est sans doute le plus important, il doit être facilement utilisable afin de pouvoir profiter à des utilisateurs ayant reçu un minimum de formation. Afin d'augmenter l'utilisabilité, une attention particulière doit être apportée aux méthodes d'interaction ainsi qu'à l'interface présentée aux utilisateurs. Le tableau suivant résume les besoins auxquels doit répondre un outil géospatial supportant le processus de design urbain collaboratif :

	Besoins identifiés
Processus de conception	<ul style="list-style-type: none"> • Visualisation rapide de différentes perspectives • Manipulation et représentation de l'espace en 3D • Modification de la solution en 3D • Sollicitation du public
Processus de décision	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse du contexte élargi de la solution conçue • Gestion d'informations descriptives • Capacité d'analyse spatiale
Collaboration	<ul style="list-style-type: none"> • L'utilisation de l'outil doit être simple et intuitive • Il doit offrir la possibilité de communication entre les utilisateurs • La représentation de l'espace doit être facilement compréhensible • L'outil doit permettre l'interaction avec l'espace

Tableau 2.1 : Résumé des besoins auxquels doit répondre un outil collaboratif de design urbain

2.5.2 Concevoir une solution en fonction des besoins

Les besoins auxquels doit répondre un outil supportant les processus de design urbain de groupe étant identifiés, il est maintenant possible d'établir une conceptualisation préliminaire d'un outil pouvant y répondre. Comme nous pouvons en conclure du tableau résumé présenté en 2.5.1, un outil supportant l'entièreté du processus de design global doit combiner de façon optimale les capacités des outils de types SIG et de type CAD. En effet, le processus de conception nécessite des capacités semblables à celles d'un logiciel CAD afin de manipuler, représenter et modifier l'espace 3D dans le but de créer une solution lors de projets quelconques. D'un autre côté, le processus décisionnel nécessite des capacités semblables à celles des outils SIG afin d'analyser la solution conçue dans son contexte étendu. Ainsi, l'ajout de capacités similaires à celles des CAD à un outil de type SIG consiste déjà en un outil qui répond à plusieurs besoins identifiés et qui peut être utilisé tout au long du processus global de design urbain. De plus, la capacité de gestion du 3D permet également de répondre à un des

besoins identifiés face à la collaboration puisqu'elle facilite la représentation de l'espace et sa compréhension par les utilisateurs non-experts.

Toutefois, cette première définition d'outil est loin de satisfaire toutes les exigences relatives à la collaboration. Tout d'abord, un outil intégrant SIG et CAD, implémenté de façon traditionnelle, c'est-à-dire à la façon d'un logiciel exécuté sur un ordinateur et affiché sur un moniteur, limite le travail de groupe de façon simultanée. De plus, il est bien reconnu que ces deux types d'outils sont difficiles d'utilisation pour des personnes n'ayant pas reçu de formation préalables. Ces deux facteurs sont critiques à la capacité de collaboration offerte par l'outil, il faut donc que l'outil proposé intègre une façon de permettre le travail simultané, par plusieurs utilisateurs n'ayant aucune expertise avec les outils CAD et SIG. Pour ce faire, nous proposons de concevoir un outil s'inspirant des méthodes traditionnellement utilisées par les designers afin de concevoir leur solution et de la présenter au public. De façon typique, les designers se réunissent en table de discussion où différents produits géospatiaux sont utilisés, par exemple des plans 2D ou des photographies aériennes, afin d'analyser l'espace d'intervention [CIOBANU 2006]. Les designers ont également souvent recours aux maquettes physiques et virtuelles afin de premièrement, analyser la solution dans son contexte 3D et deuxièmement, la présenter au grand public de façon simple et claire. Nous proposons donc d'adopter le concept de maquette 3D virtuelle interactive et de la table de discussion afin de créer l'environnement de travail collaboratif de notre outil. Un tel outil réunirait d'abord les concepteurs autour de la maquette virtuelle afin qu'ils puissent concevoir et analyser une solution et, dans un deuxième temps, pourrait réunir des membres du public afin de discuter de la solution proposée. En réunissant les participants à un même endroit au même moment, ce concept possède un avantage majeur, à savoir la communication naturelle et dynamique entre les participants, ce qui élimine ainsi le besoin de recourir à un intermédiaire web ou autre. De plus, la familiarité avec la représentation en maquette offre une visualisation simple et facilite la compréhension de l'espace pour tous les membres impliqués.

Il demeure que certains des besoins identifiés n'ont toujours pas été adressés. En effet, c'est dans la concrétisation du concept de l'outil que son utilisabilité et les méthodes d'interaction qu'il permettra seront définies. Pour réaliser un effet similaire à celui d'une maquette physique traditionnelle, il faut envisager l'exploitation de technologies de visualisation innovatrices. L'utilisation d'un moniteur traditionnel afin de présenter l'espace d'intervention aux participants comporte plusieurs lacunes évidentes. Elle ne permet pas l'interaction simultanée par plusieurs utilisateurs, n'offre pas une visualisation qui traduit bien le 3D et rend difficile l'interaction en 3D avec les éléments virtuels. Face à cette problématique, nous proposons d'utiliser une méthode de visualisation immersive, la réalité augmentée (RA), afin de faciliter la représentation et l'interaction avec l'espace 3D. La réalité augmentée, discutée en profondeur au chapitre suivant, permet d'intégrer des éléments virtuels à l'environnement physique réel et d'interagir avec ceux-ci. De cette façon, nous pouvons arriver à superposer la maquette virtuelle de la solution proposée dans un contexte physique de table de discussion réunissant les acteurs concernés par le processus de design urbain. Les méthodes d'interaction en RA, lorsque bien implémentées, permettent une interaction qui se rapproche fortement de l'interaction naturelle utilisée lorsque nous regardons un plan ou une maquette physique. Elles permettent, par exemple, de naviguer à travers la maquette virtuelle grâce à un mouvement naturel de la tête ou en se déplaçant autour de la table sur laquelle la maquette est posée. De plus, cette façon d'interagir avec la maquette virtuelle favoriserait grandement l'analyse de l'espace selon différentes perspectives, une opération importante lors des premières étapes du processus de conception. Finalement, notons qu'une attention particulière doit être portée au développement de l'interface et des méthodes d'interaction afin que l'utilisation de l'outil développé ne nécessite qu'un minimum d'instructions préalables.

Comme nous pouvons le constater, le développement d'un outil répondant à l'entièreté des besoins identifiés, est une entreprise large dont la réalisation dépasse le cadre d'un travail de maîtrise. En conséquence, nous avons choisi de premièrement laisser de côté la capacité de solliciter le public à grande échelle.

Bien que le concept proposé permette une certaine sollicitation du public, il se prête difficilement à une sollicitation de grande envergure, telle que le permettent les outils SIG délibératifs. En effet, une collaboration implémentée par un intermédiaire web possède l'avantage de pouvoir réunir plusieurs personnes situées à des endroits différents, ce qui évite les contraintes d'espace et d'infrastructure. Il serait impossible de réunir plusieurs centaines de personnes autour d'une table et de mettre à la disposition de chacun l'équipement nécessaire pour opérer l'outil. En conséquence, nous considérons l'application de l'outil dans un contexte de sollicitation restreinte, où seulement les acteurs principaux seraient impliqués, par exemple les promoteurs, les politiciens et les designers. Toutefois, nous avons tout de même réalisé une réflexion conceptuelle sur l'implantation de la collaboration dans un tel outil, afin de préparer les travaux futurs qui pourraient se concentrer exclusivement sur la capacité de collaboration.

Dans un deuxième temps, nous avons aussi choisi de laisser de côté le développement d'une capacité d'analyse spatiale poussée, pour plutôt se limiter à la possibilité d'effectuer des requêtes descriptives sur les données. L'analyse spatiale en 3D constitue actuellement une branche de recherche très complexe qui mériterait un travail de recherche indépendant de celui-ci. De plus, la recherche actuelle portant sur l'analyse spatiale 3D se situe plutôt au niveau conceptuel que pratique. Conséquemment, il serait inconcevable de penser implémenter des fonctions d'analyses spatiales alors qu'elles n'ont pas encore été développées par la communauté scientifique.

Chapitre 3 La réalité augmentée géospatiale : une solution potentielle aux limites des outils géospatiaux actuels

3.1 Introduction

Suite à l'élaboration des principes fondamentaux des systèmes de réalité augmentée par Ivan E. Sutherland en 1968, la RA est demeurée une technologie discrète et peu exploitée, autant par le public en général que par la communauté scientifique [SUTHERLAND 1968]. C'est grâce à différentes avancées technologiques relatives aux ordinateurs mobiles et aux systèmes d'affichage que la RA a connu une rapide popularisation au fil des dernières années. En ajoutant à ceci la disponibilité croissante des données géospatiales 3D, nous assistons de nos jours à l'apparition des premiers systèmes de réalité augmentée géospatiale.

Face à toutes ces avancées technologiques, plusieurs librairies *open-source* de développement d'applications de RA, telles *ARToolkit* ou *GoblinXNA*, ont également vues le jour [ARTOOLKIT 2010, ODA 2010]. La combinaison de ces facteurs a donné lieu à une prolifération d'applications de type « gadget » dont les démos se retrouvent facilement au travers des nouveaux médias sociaux (*YouTube* par exemple) et qui ne manquent pas d'impressionner leur public. Bien que ces applications témoignent de l'intérêt de ce public face à la technologie, elles ne traduisent pas le potentiel profond de la RA pour élaborer des applications de qualité professionnelle. Contrairement à ces SRA simples, le développement d'un SRA de type professionnel consiste en une tâche complexe qui requiert au préalable une réflexion approfondie face aux besoins, au public cible et aux ressources disponibles. De plus, l'addition d'une dimension géospatiale à ces SRA

nécessite des considérations particulières en ce qui a trait à l'exploitation de ces données 3D par les moteurs 3D qui ne sont pas adaptés à ce type de données spécialisées.

Ce chapitre vise d'abord à définir les différents SRA et quelques concepts clés de cette technologie. Par la suite, une revue des SRA existants sera présentée afin de situer la solution proposée dans ce domaine de recherche. Nous nous intéresserons ensuite à l'étude des différents types de SRA, des composantes de bases constituant ces systèmes ainsi que des méthodes d'interaction possibles avec cette technologie. Enfin, nous discuterons de ville numérique 3D, concept essentiel pour l'exploitation de grandes quantités de données géospatiales 3D. En effet, nous devons repenser la structure des données géospatiales puisque la forme 2D traditionnelle, organisée en couches d'informations, n'est pas compatible avec les technologies impliquées dans les SRA.

3.2 Concepts et définitions

3.2.1 Réalité augmentée

À ce jour, la réalité augmentée n'est pas définie de façon formelle, différents groupes de recherche œuvrant dans ce domaine offrent chacun leur variation sur la définition de ce concept. Cependant, chacun d'eux s'entendent sur les principes de base de cette technologie. L'Office québécois de la langue française a d'ailleurs adopté, en 1998, une définition « officielle » de la RA qui, selon nous, comporte une lacune sérieuse :

« Technique d'imagerie numérique, issue de la réalité virtuelle, permettant, grâce à un dispositif d'affichage transparent, de superposer à une image réelle des informations provenant d'une source numérique, telles les images de synthèse. [OQLF 1998] »

Nous considérons que cette définition comporte une lacune pour la raison qu'elle limite les SRA aux systèmes d'affichage optique ou transparent, sans considérer les affichages vidéo qui sont pourtant les plus répandus. Il faut noter par contre

qu'à l'époque où la définition fut adoptée, les systèmes d'affichage optique étaient plus répandus. En surcroît, nous croyons que la définition de la RA ne devrait pas inclure de restrictions sur les systèmes d'affichage. En effet, il existe présentement plusieurs systèmes d'affichage permettant de concevoir des SRA et le futur en amènera sans doute de nouveaux. Considérant cette réflexion, nous croyons que les définitions proposées par les chercheurs du domaine sont plus appropriées. En 1994, Paul Milgram a émis une définition simple voulant que la RA soit « le procédé par lequel la réalité physique est augmentée d'objets virtuels » [MILGRAM 1994]. Malheureusement, cette définition comporte la lacune évidente d'utiliser le terme qu'il définit, soit le mot « augmentée ». Cependant, le plus intéressant des travaux de Milgram réside dans le fait qu'il situe la RA relativement à la RV dans le spectre de la réalité mixte :

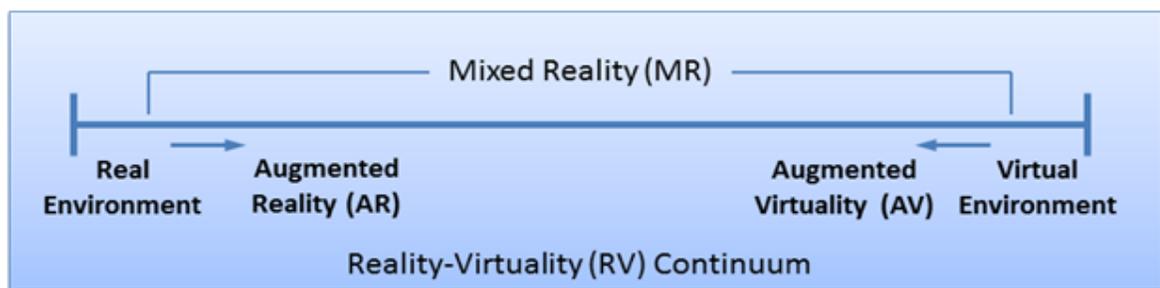


Figure 3.1 : Représentation simplifiée du continuum de réalité mixte [MILGRAM 1994]

Dans ce continuum de réalité-virtualité, nous observons que la RA se situe près de l'extrême « environnement réel » alors que la RV se situe à l'autre extrême du spectre sous la désignation « environnement virtuel », souvent employé comme équivalent à la RV. En d'autres mots, ceci indique que la RA implique une forte présence de la réalité physique avec une faible intégration de la réalité virtuelle, au contraire de la réalité virtuelle qui elle fait plutôt une abstraction totale de la réalité physique. En 1997, Ronald T. Azuma a proposé que la RA, « contrairement à la RV, permet à l'utilisateur d'observer la réalité avec des objets virtuels superposés ou intégrés au monde réel » [AZUMA 1997]. De plus, il propose que la RA doive répondre aux trois exigences suivantes :

1. Combiner le réel et le virtuel

2. Permettre l'interaction en temps réel.
3. Être enregistrée en 3D

Cette définition plus claire, inclut la RA comme un cas particulier de réalité virtuelle et définit plus clairement le procédé d'augmentation. Cependant, au niveau sémantique, elle semble donner un caractère réel aux objets virtuels en les intégrant au monde réel plutôt qu'à la perception de la réalité de l'utilisateur, ce qui est naturellement impossible. De plus, elle limite la possibilité d'enregistrement au 3D seulement alors qu'il est possible d'enregistrer un objet virtuel en 2D seulement, de façon à ce qu'il demeure fixe par rapport à la perception de l'utilisateur. Par exemple, on peut enregistrer une interface sur un plan fixe, donc en 2D, devant les yeux de l'utilisateur afin que celui-ci puisse interagir avec le système. À la lumière de ces variations sur la définition de la RA, nous croyons qu'elle ne consiste pas à un cas spécifique de la RV mais plutôt à un cas spécifique de la réalité mixte, située à égalité avec la RV, tel qu'exprimé par le spectre de la réalité mixte de Milgram.

Enfin, nous proposons et adoptons la définition suivante pour la suite de ce mémoire :

« La réalité augmentée est un procédé d'imagerie numérique par lequel des données virtuelles sont superposées et enregistrées à la perception de la réalité d'un utilisateur de façon à s'intégrer naturellement à la réalité physique et à permettre une interaction en temps réel. »

3.2.2 Systèmes de réalité augmentée

Comme tout nouveau domaine scientifique, la RA possède une terminologie qui mérite d'être discutée préalablement à la poursuite de ce document. Notamment, il est important de distinguer deux grands types de technologies de réalité augmentée et de proposer une variation qui correspond plus adéquatement à notre utilisation de cette technologie. Cependant, puisque la distinction entre ces variations de RA se situe au niveau des systèmes permettant d'exploiter cette technologie, commençons par définir clairement ce qui constitue un système de

réalité augmentée. Un système, selon l'OQLF, est un ensemble d'appareils qui ont des fonctions différentes et agencés de façon à remplir une fonction donnée [OQLF 1996]. Ainsi, un système de réalité augmentée (SRA) est un ensemble de composantes agencé de façon à exploiter la technologie de la RA. Comme en témoignent les SRA créés par différents groupes de recherches, trois composantes de base sont nécessaires afin de concevoir un SRA fonctionnel, un système d'affichage (*Display*), un système de positionnement (*Tracking*) et une unité de calcul (*CPU*) [FEINER 1997, JULIER 2000, BROLL 2004]. Ces trois composantes seront abordées plus en détails à la section 3.4.1 portant sur ce sujet.

Nous avons mentionné précédemment que la configuration des SRA varie selon le type de RA qu'ils doivent exploiter. Les deux grands types de RA acceptés sont la RA traditionnelle et la RA spatiale. La différence entre ces variations de RA se situe au niveau de la disposition du ou des systèmes d'affichage. En effet, dans un SRA traditionnel, le système d'affichage est consigné à l'utilisateur alors que sur un SRA spatial (SRAS), les systèmes d'affichage sont inclus à l'espace dans lequel l'utilisateur évolue [BIMBER 2005], ce qui permet la possibilité d'utiliser plusieurs dispositifs d'affichage. Les dispositifs d'affichage les plus fréquemment utilisés par les SRAS sont les systèmes de projection. Le *CAVE Automatic Virtual Environment (CAVE)*, bien qu'il se situe plutôt du côté de la RV que de la RA, est un des systèmes plus connu qui fait intervenir des affichages de type spatial [CRUZ-NEIRA 1993]. Il utilise un ensemble de quatre projecteurs afin de projeter un environnement virtuel sur les trois murs devant l'utilisateur ainsi que sur le plancher, ce qui permet à celui-ci d'être immergé dans un monde augmenté d'informations numériques. Une technologie de suivi permet de modifier l'environnement en fonction du mouvement de l'utilisateur, simulant le déplacement naturel.

Face à ces deux formes de RA, nous avons choisi d'en définir un troisième répondant mieux à nos besoins et à notre utilisation, soit la RA géospatiale. Ce terme fut introduit par le laboratoire REGARD de l'Université Laval lors de la 1^e

conférence internationale sur la réalité géospatiale augmentée tenue en 2006, mais ne fut pas clairement défini [REGARD 2006]. Répondant à cette lacune, nous proposons que la RAG soit une forme spécifique de la RA qui sert à visualiser, manipuler et analyser les données géospatiales sous toutes leurs formes. En ce sens, les SRAG sont des systèmes de RA permettant à un utilisateur de visualiser, manipuler et analyser des données géospatiales. Contrairement aux SRAS, nous ne considérons pas de configuration spécifique aux SRAG, le critère principal étant l'utilisation de données géospatiales. En conséquence, le système d'affichage peut être conscrit à l'utilisateur ou à l'espace dans lequel l'utilisateur évolue.

3.2.3 Concepts de réalité augmentée

Avant de poursuivre avec cette étude de la réalité augmentée, il est important de présenter quelques concepts clé caractérisant les SRA. Les caractéristiques présentées ici sont celles qui méritent d'être définie plus précisément, puisque elles sont nouvelles et complexes.

Enregistrement

L'enregistrement (*Registration*) des informations virtuelles à la réalité physique est le concept central de la RA. Afin de permettre à un utilisateur d'observer le monde réel augmenté d'informations virtuelles, il est nécessaire d'employer un système d'affichage artificiel agissant comme intermédiaire entre le monde physique et virtuel. Puisqu'il n'existe pas de connexion naturelle entre le virtuel et le réel, une méthode d'enregistrement doit être établie entre ces deux mondes. C'est ce qui permet de référencer les informations numériques au monde réel et de les présenter à l'utilisateur de façon à les intégrer naturellement à sa perception de la réalité.

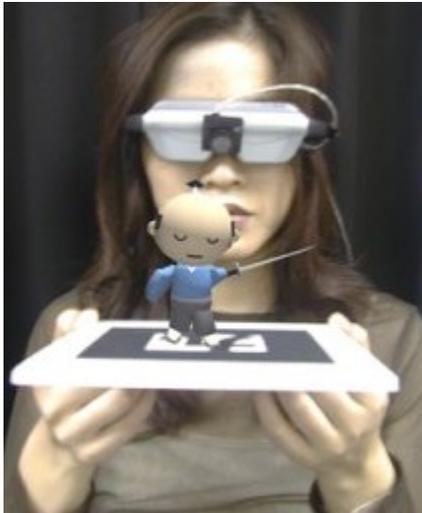


Figure 3.2 : Enregistrement par détection de formes [ARToolKit 2010]



Figure 3.3 : Enregistrement par GPS [MYNAV 2010]

Pour obtenir un enregistrement fonctionnel, deux problèmes doivent être solutionnés. La position et l'orientation de l'utilisateur doit d'abord être déterminée. Pour ce faire, on emploie un système de positionnement (*Tracking*). Ensuite, les valeurs calculées doivent être transmises dans un délai convenable. En effet, si la latence de la transmission est trop élevée, les valeurs transmises seront celles d'une ancienne position de l'utilisateur, occasionnant ainsi un effet de trainée qui peut causer des inconforts dans l'expérience visuelle [ZLATANOVA 2002].

Depuis les débuts de la RA cet aspect suscite beaucoup d'intérêt au sein de la communauté scientifique. L'équilibre entre la précision du positionnement utilisé et la transmission de celle-ci au système est difficile à atteindre et requiert une attention particulière au champ de vision, à la calibration, à la précision et à plusieurs autres facteurs du matériel utilisé. L'atteinte d'un enregistrement parfait est un problème très complexe qui déborde largement du cadre de cette recherche, certains auteurs y ont consacré plusieurs années de recherche [HOLLOWAY 1995, MACINTYRE 2002, LIVINGSTON 2008].

Engagement, Immersion et Présence

Dans les applications de RV, on cherche à fournir à l'utilisateur un sentiment de présence. La présence peut être qualifiée comme le sentiment d'exister à l'intérieur d'une simulation numérique ressentie comme aussi réelle que le monde physique [MORIE 2005]. La présence est fonction de deux autres phénomènes, l'engagement et l'immersion. Ces trois termes sont fortement liés, souvent confondus et font toujours l'objet de débats animés [GAGGIOLI 2003]. Wittner et Singer, en 1998, ont proposé les définitions suivantes pour les termes d'engagement et d'immersion [WITTNER 1998] :

Engagement : Un état psychologique vécu lorsqu'une personne concentre ses énergies et son attention sur un ensemble cohérent de stimuli.

Immersion : Un état psychologique caractérisé par la perception de faire partie d'un environnement qui fournit un flux continu de stimuli.

L'engagement, en RV comme en RA, peut être considéré de la même façon, dans les deux cas on cherche à capter l'attention de l'utilisateur et à susciter son intérêt en utilisant des stimuli virtuels. Il existe tout de même une différence, en RV les stimuli sont d'origine strictement virtuelle alors qu'en RA, ils proviennent de la réalité mixte. Par contre, nous croyons que l'immersion mérite une évaluation différente. En RV on vise à intégrer l'individu à un monde complètement virtuel et ainsi atteindre ce qui est qualifié d'immersion totale. À l'inverse en RA, on vise à intégrer les stimuli virtuels au monde de l'individu de façon à ce que la distinction entre le réel et le virtuel soit impossible. Ainsi, une immersion totale en RA en est une où les éléments virtuels du monde augmenté paraissent comme faisant partie intégrante et naturelle de la réalité perçue par l'utilisateur. Le niveau d'immersion d'un système est fonction d'une variété de facteurs, par exemple les méthodes d'interaction, la qualité du système d'affichage, le nombre de sens stimulés, le niveau de détail du monde virtuel présenté et ce qui est sans doute le facteur le plus important dans le cas des SRA, la qualité de l'enregistrement du monde virtuel au monde réel.

La difficulté de cette terminologie en RA se situe au niveau de la présence. Puisqu'en RA le monde physique n'est pas supprimé, il est improbable qu'un SRA ne fournisse pas à son utilisateur le sentiment de présence. Celui-ci se sentira à tout moment comme existant dans le monde augmenté vu la présence de repères réels avec lequel il est familier. Considérant ceci et par souci de simplicité, nous proposons d'utiliser plutôt le terme immersion pour référer au terme présence.

Occlusion

La gestion des occlusions en RA est un autre défi de cette technologie. Afin d'intégrer naturellement les éléments virtuels à la perception de la réalité de l'utilisateur, il est nécessaire de considérer les relations spatiales entre les éléments des deux mondes. La gestion des occlusions consiste à dissimuler en partie ou en totalité les objets virtuels ou réel lorsqu'ils se situent derrière un objet réel ou virtuel, respectivement. La complexité de ce problème varie selon certains facteurs comme la configuration matérielle du système, la nature des éléments à dissimuler ou le niveau de préparation de l'environnement d'opération.



Figure 3.4 : Un exemple d'occlusion. La vache brune et les arbres sont virtuels, le restant est réel. [LEPETIT 2000]

Dans la plupart des SRA, l'occlusion d'un élément réel par un virtuel est inhérente au système et ne cause pas de difficultés. C'est plutôt la situation inverse qui mérite une attention particulière. Plus précisément, nous verrons à la section 3.4.1

que la nature du problème varie selon la disposition du système d'affichage par rapport à l'utilisateur.

Dans un système où le monde réel n'est pas entièrement numérisé et inclut dans le logiciel d'exploitation du SRA, il est difficile de reconnaître les objets réels devant occlure les virtuels. Cette situation est la norme plutôt que l'exception. En effet, la numérisation d'un grand espace comme une ville entière, implique l'utilisation de grandes quantités de données 3D qui, plus souvent qu'autrement, ne sont pas disponibles. Dans le passé, certains chercheurs se sont intéressés à la résolution de ce problème en adoptant diverses stratégies. Lepetit et Berger par exemple, ont proposé une méthode semi-automatique basée sur les silhouettes des objets [LEPETIT 2000] alors que Wloka et Anderson ont proposé une approche basée sur l'analyse de la profondeur à partir de vidéos stéréoscopiques [WLOKA 1995]. Plus récemment, Ryu et al. ont proposé une méthode en temps-réel qui, de façon simplifiée, combine les deux approches mentionnées précédemment pouvant être utilisée [RYU 2010].

Il est intéressant de réfléchir à ce problème d'une perspective géomatique. La gestion des occlusions devient triviale lorsqu'on dispose d'une connaissance numérique 3D complète de l'environnement d'opération du SRA. Dans le passé, la disponibilité des données géospatiales 3D permettant la création de ces modèles 3D était pratiquement inexistante alors que de nos jours, elle est en pleine croissance. Considérant ceci, il est fortement probable que le problème des occlusions, en ce qui a trait aux applications géospatiales de la RA, deviendra une chose du passé.

3.3 Évolution de la réalité augmentée

Cette section vise à faire état de l'évolution de la RA comme technologie depuis que ses fondements ont été lancés lors des années 1960 jusqu'à ce jour, en 2010. À cet effet, cette section présente d'abord les débuts de la technologie de RA pour ensuite discuter plus en détail des développements récents ayant eu lieu lors des

dernières années. La section 3.3.3 est dédiée à faire état de la situation actuelle en RA collaborative et plus particulièrement de ses applications en design urbain. Notre revue de la RA est basée en partie sur l'historique de la réalité augmentée mobile compilé par Daniel Wagner et le *Christian Doppler Laboratory for Handheld Augmented Reality* [WAGNER 2010]. Nous y avons cependant rajouté plusieurs éléments.

3.3.1 Les débuts de la réalité augmentée

Le terme réalité augmentée a été prononcé pour la première fois en 1993 par Tom Caudell et David Mizell alors qu'ils discutaient des avantages de superposer des images numériques à la réalité face à l'utilisation d'un monde complètement virtuel en RV traditionnelle [CAUDELL 1992]. Cependant, plusieurs concepts qui ont mené à la naissance de la RA sont apparus bien avant le terme lui-même. C'est d'ailleurs entre les années 1957 et 1962 que le premier système de réalité mixte fut développé par Morton Heilig, un cinéaste qui aujourd'hui, serait sans doute considéré comme spécialiste en RV. Ce système, baptisé *Sensorama*, consistait en un théâtre virtuel multimodal qui plongeait l'utilisateur dans un monde virtuel en lui présentant des images stéréoscopiques 3D, en diffusant des odeurs et des sons ainsi qu'en émettant des vibrations grâce au siège [HEILIG 1962].



Figure 3.5 : Le *Sensorama* développé par Morton Heilig

Le *Sensorama* était encore loin de convenir aux besoins de la RA qui requiert, de façon générale, des composantes plus portables. De plus ce système ne permettait que de présenter un monde virtuel sans l'intégrer au monde réel comme doivent le faire les SRA. C'est d'ailleurs pour cette raison que certaines sources ne citent pas les travaux de Heilig comme étant l'origine de la RA [WAGNER 2010]. Il existe un consensus plus largement accepté attribuant l'origine spécifique de la RA à Ivan E. Sutherland qui, en 1968, proposa un concept de casque d'affichage 3D mieux connu sous son nom anglais, le *Helmet Mounted Display* (HMD) [SUTHERLAND 1968]. Ce HMD utilisait un principe de tubes cathodiques et de miroirs semi-argentés afin de présenter le virtuel en conservant la vision du monde réel. Dans ce système, la position de l'utilisateur était déterminée grâce à un appareil externe, ce qui limitait la mobilité de l'utilisateur. De plus la faible puissance des ordinateurs de l'époque ne permettait que l'affichage des squelettes 3D des objets virtuels. C'est avec le HMD de Sutherland qu'apparu le concept de fenêtre sur le monde virtuel qui dirigea une grande partie des développements subséquents en RA.

Vers le milieu des années 70, Myron Krueger mis en place un laboratoire de réalité mixte qu'il nomma *VIDEOPLACE*. Dans ce laboratoire, il réalisa un système de réalité mixte spatial qui permettait aux utilisateurs de se transporter dans un environnement virtuel. *VIDEOPLACE* était composé de plusieurs projecteurs afin d'afficher le monde mixte ainsi que de plusieurs caméras qui capturaient les silhouettes et mouvements des utilisateurs. Il permettait environ une cinquantaine de méthodes d'interaction différentes. L'aspect le plus intéressant de ce système est certainement la possibilité de collaboration et interaction entre plusieurs utilisateurs. Bien que *VIDEOPLACE* fût un des premiers systèmes utilisant des concepts de RAS, il ne répond pas totalement aux critères modernes de RA, notamment, il n'offrait qu'une représentation en 2D [WIKIPEDIA 2010].

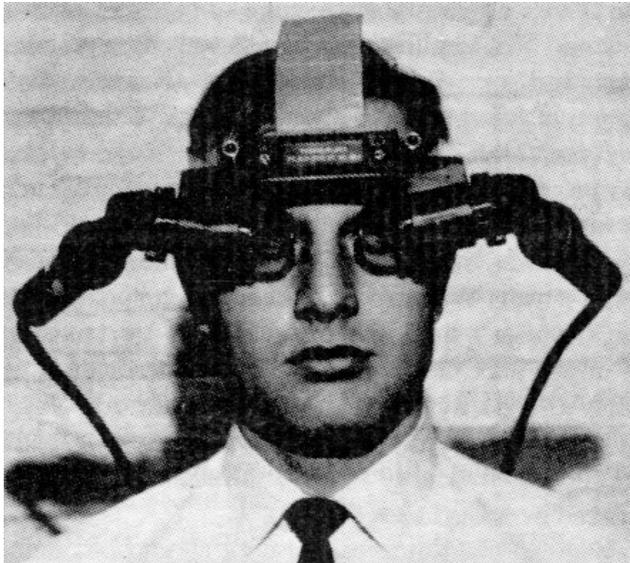


Figure 3.6: Le HMD de Sutherland



Figure 3.7: Un exemple du VIDEOPLACE

Jusqu'à ce point de l'histoire, il n'existait toujours pas de terminologie classifiant ces systèmes. C'est donc en 1989 que le terme réalité virtuelle fut introduit par Jaron Lanier [KELLY 1989] et, comme mentionné au début de cette section, en 1992 que Tom Caudell et David Mizell introduisent le terme réalité augmentée [CAUDELL 1992]. C'est à partir de cette période que la distinction entre la RV et la RA s'est établie et que chacune de ces technologies est devenue un champ de recherche à part égale. Suite à l'apparition de cette nouvelle terminologie, un effort de définition et de précision des deux technologies eu lieu. En 1993, en se basant sur un prototype de SRA utilisant un HMD, Feiner et al. explorent le concept de « fenêtres sur le monde » et définissent trois types d'interfaces permettant de présenter le monde augmenté à l'utilisateur, les fenêtres fixées à la réalité, à l'affichage et à l'espace entourant l'utilisateur [FEINER 1993]. Suite à la parution de cet article, ces trois types de « fenêtres » devinrent la base des interfaces possibles entre l'utilisateur et le monde augmenté dans les SRA. En 1995, Paul Milgram et Fumio Kishino proposèrent le continuum de la réalité et virtualité, tel que discuté à la section 3.1.1 [MILGRAM 1995]. Ce continuum apporta une distinction claire entre la RV et la RA et positionna également ces deux technologies l'une par rapport à l'autre. Deux années plus tard, en 1997, Ronald T. Azuma publia un article charnière intitulé *A Survey of Augmented Reality*. Cet

article qui est la première revue compréhensive et exhaustive de ce qui existait en RA au moment de sa publication, agit maintenant comme point de départ pour tous les chercheurs en RA [AZUMA 1997]. Il est considéré comme aussi important que celui de Milgram et leur combinaison constitue actuellement la définition la plus répandue et acceptée de la RA.

Entre la parution de ces deux articles, en 1996, est apparu pour la première fois la notion d'enregistrer le virtuel au réel grâce à des *markers*. C'est Jun Rekimoto qui proposa cette idée permettant l'utilisation de caméras vidéos afin d'obtenir les 6 paramètres nécessaires à l'enregistrement [REKIMOTO 1996]. Cette idée fut reprise par d'autres groupes de chercheurs et est actuellement une des méthodes les plus fiables, robustes et populaires d'enregistrement. C'est en se basant sur ce concept qu'en 1999, une équipe de deux chercheurs, Hirokazu Kato et Mark Billinghurst, développa et mis à la disposition du public une librairie de développement d'application de RA qu'ils baptisèrent ARToolKit [KATO 1999]. Cette librairie open-source et distribuée sous licence générale publique est très répandue dans la recherche et développement en RA par *markers*.

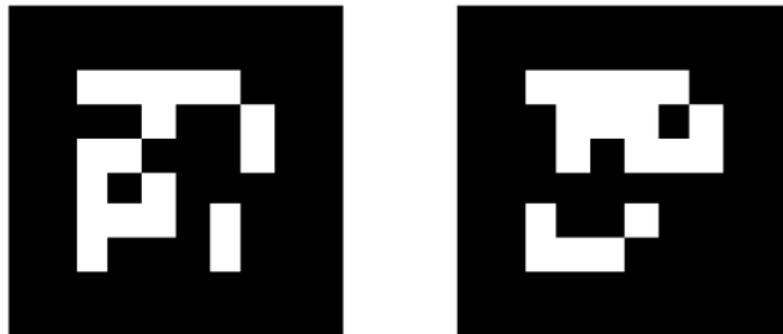


Figure 3.8: Un exemple de *markers* ARToolKit

C'est également vers cette période que le premier prototype de système complet de RA mobile (SRAM) fit son apparition. En 1997, Steven Feiner, Blair McIntyre, Tobias Höllerer et Anthony Webster présentèrent un prototype qu'ils nommèrent *A Touring Machine* [FEINER 1997]. Ce système, combinant pour la première fois un ordinateur portable en format sac-à-dos, une antenne GPS et un casque HMD avec un système inertiel intégré, visait à faciliter la navigation sur le campus de

l'Université Columbia à New York. Bien que son objectif était d'offrir un maximum de portabilité et mobilité, la technologie limitée à ce moment faisait en sorte que son poids total atteignait environ 40 livres. Néanmoins, ce système fut une réussite et marqua le début de l'apparition des SRAM. D'ailleurs, plusieurs chercheurs s'en sont inspirés pour leurs travaux futurs, et l'article référencé est devenu un incontournable dans le domaine de la RA. Suite au développement de ce prototype, on assista à une prolifération des applications de SRAM au sein de la communauté scientifique. Les travaux de Bruce Thomas et son équipe, une année plus tard en est un exemple. Cette équipe mis au point un système similaire qui, à la différence du système de Feiner, permettait la navigation sur de plus grandes distances et dans les zones plus densément urbanisée [THOMAS 1998].



Figure 3.9 : Une comparaison entre les SRAM de Feiner (gauche) et celui de Thomas (droite). On remarque les similitudes évidentes au niveau de la configuration matérielle.

En 1999, Tobias Höllerer et Steven Feiner raffinèrent leur prototype sur plusieurs aspects. Ils introduisirent le GPS RTK qui permettait une meilleure précision et conséquemment, un meilleur enregistrement à l'extérieur. Ils ajoutèrent des métadonnées, attachées aux bâtiments d'intérêt, qui servaient à visualiser des articles historiques associés aux bâtiments. Ils étudièrent également différentes

modalités de communication entre un utilisateur situé à l'intérieur et un autre évoluant à l'extérieur [HÖLLERER 1999A, HÖLLERER 1999B].

En 2000, on assiste au premier jeu en réalité augmentée mobile extérieure, *ARQuake* développé par Bruce Thomas et son équipe [THOMAS 2000]. Ce jeu fût bâti à partir du jeu de *Quake*, un jeu de tir subjectif (*First Person Shooter*) populaire dont le code-source est public. *ARQuake* utilisait la même configuration matérielle que celle qu'ils avaient développée auparavant mais, afin de résoudre le manque de précision associé à l'utilisation de GPS pour le positionnement à l'extérieur, il intégrait également *ARToolKit* et le principe d'enregistrement par *markers*. Ainsi, le mouvement traditionnel du personnage du jeu par clavier et souris fut remplacé par le mouvement réel de l'utilisateur portant le SRA. La combinaison des méthodes d'enregistrement permettait au jeu de se dérouler dans trois milieux différents, à l'intérieur, à l'extérieur dans un grand espace libre ou à l'extérieur près de bâtiments.



Figure 3.10 : Un exemple du jeu *ARQuake*



Figure 3.11 : La configuration matérielle du BARS

La même année, un autre SRAM orienté vers des applications militaires fut développé par Simon Julier et son équipe de recherche. Baptisé *Battlefield Augmented Reality System* (BARS), son objectif était d'apporter une solution aux lacunes présentes dans les méthodes traditionnelles de navigation militaire, soient la carte, boussole et radio [JULIER 2000]. Ce système possédait une configuration matérielle similaire à ceux mentionnés précédemment et permettait à l'utilisateur

de visualiser des informations supplémentaires relatives aux infrastructures environnantes. Il visait également à prédire les positions possibles d'embuscades ennemies et de tireurs d'élite. Un nouvel aspect de ce système fut l'addition de la possibilité d'exploiter un réseau sans fil afin de communiquer avec la chaîne de commandement. Cette équipe de recherche a aussi développé et implémenté un nouveau concept en RA, le filtrage d'information visant à limiter les informations présentées à l'utilisateur de façon à favoriser les informations de première importance [JULIER 2000, JULIER 2002].

3.3.2 La réalité augmentée moderne

Dans les années menant à aujourd'hui, les progrès technologiques rapides en informatique eurent pour conséquence que le domaine de la RA connut une véritable explosion du nombre d'applications développées. Plusieurs facteurs sont à l'origine de ce phénomène, par exemple la croissance rapide des capacités de stockage d'information, l'augmentation de la vitesse des processeurs graphiques et les progrès technologiques des ordinateurs de type assistants digitaux personnels (*Personal Digital Assistant* ou PDA en anglais). Afin de ne pas encombrer le lecteur, la suite de cette section couvrira seulement les applications ayant apporté des innovations majeures ainsi que celles que nous jugeons particulièrement intéressantes.

En 2001, Freund et son groupe de recherche présentèrent un des premiers concepts de SRA utilisant un PDA [FRUEND 2001]. Le but de ce SRA était d'assister l'utilisateur dans les tâches quotidiennes. La même année, le premier SRA collaboratif et mobile est présenté par Reitmayr et Schmalstieg. Ce SCRA, basé sur leur propre environnement de développement, *Studierstube*, permettait à plusieurs utilisateurs d'occuper le même espace augmenté et d'interagir simultanément avec les éléments virtuels [REITMAYR 2001]. Bien que les opérations disponibles soient de base, ils ont démontré qu'il était possible de collaborer efficacement entre plusieurs utilisateurs, en utilisant des composantes matérielles peu dispendieuses et disponibles au grand public. La même année,

une application innovatrice voit également le jour, le *Archeoguide*, un guide en RA pour le site d'héritage culturel d'Olympie en Grèce [VLAHAKIS 2001, VLAHAKIS 2002]. Ce SRAM sert à visualiser des scènes augmentées sur des sites d'héritage culturel, démontrant comment les lieux étaient utilisés à des époques anciennes. Ce système vise deux publics cibles, soient les visiteurs du site et les archéologues y œuvrant. *Archeoguide* est une application impressionnante par la quantité de fonctionnalités qu'elle offre, par exemple, l'aide à la navigation, l'affichage de bâtiments historiques disparus, la représentation d'événements sportifs virtuels et la consultation d'une librairie multimédia.



Figure 3.12 : Un exemple du SRA collaboratif basé sur Studierstube de Reitmayr et Schmalstieg

Figure 3.13 : Un exemple du Archeoguide, le bâtiment virtuel est superposé à des ruines réelles.

C'est également en 2001 qu'une application fut présentée qui marqua une tendance à venir par rapport aux applications de RA commerciales que nous voyons aujourd'hui. Bell et al. présentent, à travers un article concernant la gestion efficace du champ de vision de l'utilisateur dans les SRA, un prototype permettant d'annoter le monde réel en lui apposant des étiquettes virtuelles [BELL 2001, BELL 2002]. Suivant les principes qu'ils énoncent, ils développent un SRA agissant comme guide de restauration à New York. Ce type d'application orientée vers la navigation touristique est actuellement un des plus populaires et des plus simples à réaliser grâce aux appareils mobiles portatifs du genre *iPhone* et *Android* [ACROSSAIR 2009, URBANSPOON 2009, MOBILIZY 2010].



Figure 3.14 : L'application de guide de restauration de Bell et al. en 2001



Figure 3.15 : L'application Wikitude développée par Mobilizy en 2010

À partir de 2003, une nouvelle tendance vers le développement de jeux vidéos en RA apparaît. On voit par exemple le *Human Pacman*, un jeu permettant à l'utilisateur de prendre le rôle du célèbre *Pacman* et qui transforme le monde réel en environnement de jeu collaboratif ou d'autres joueurs prennent le rôle des fantômes. Ce jeu repose sur une combinaison de positionnement GPS, de senseurs inertiels et de technologie *Bluetooth* afin de situer le joueur dans le monde augmenté et de rendre possible le multi-joueur [CHEOK 2003]. En 2005, un jeu de tennis en RA, *AR-Tennis*, est développé par Henrysson et son équipe de recherche afin d'étudier la collaboration en RA utilisant les téléphones cellulaires [HENRYSSON 2005]. C'est en 2009 qu'un jeu en RA de qualité commerciale est développé par le Georgia Institute of Technology. *ARhrrm!*, un jeu de tir, est basé sur l'utilisation de marqueurs afin d'enregistrer un monde 3D dans lequel le joueur doit tirer des cible en visant à l'aide d'un téléphone [GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY 2009]. Ce jeu est sans doute le plus avancé jusqu'à maintenant, utilisant la pleine puissance des moteurs 3D disponibles avec les nouveaux téléphones cellulaires.



Figure 3.16 : Le jeu AR-Tennis



Figure 3.17 : Le jeu ARhrrrr!

L'accessibilité grandissante de la RA et les progrès technologique des systèmes informatiques fait en sorte qu'une grande variété de domaines d'applications s'ouvre à cette technologie. Au cours de la première décennie du XXI^e siècle, la technologie de la RA connaît un développement rapide et diversifié. Par exemple, l'entreprise *Siemens Corporate Research*, spécialisée dans le domaine de la RA appliquée dans les usines, développe quelques applications visant à faciliter la maintenance d'infrastructure [NAVAB 2003]. Behzadan et Kamat proposent en 2005 une application plus raffinée que celles développées lors des années 1990 d'un SRA supportant la construction à l'extérieur [BEHZADAN 2005]. Leur application permet de visualiser des simulations d'opérations de construction sur le terrain. Un prototype d'application botanique visant à faciliter l'identification de plantes est développée par White et al [WHITE 2006]. Ce système permet de comparer les plantes sur le terrain avec des plantes recensées dans une base de données exhaustive grâce à une interface en RA. En 2007, la première application publicitaire est développée par le *Human Interface Technology Laboratory New Zealand (HITLab)*, un des groupes de recherche le plus prolifique en RA. Grâce à des markers distribués dans un journal ayant un tirage de 750 000 personnes, les utilisateurs peuvent visualiser différents animaux du zoo grâce à leur téléphone cellulaire. La RA fait ainsi ses preuves en matière d'outil publicitaire puisque le zoo

connait une hausse de 32% de son achalandage suite à ce coup publicitaire. En 2008, le *HITLab* a développé un SRA très poussée ayant pour objectif de faciliter le travail des médecins en radiothérapie pour le traitement de tumeurs cancéreuses. Ce système sert à mettre en évidence la zone d'intervention en superposant son contour sur une vidéo du patient pendant la procédure et ainsi fournir un guide au médecin [TALBOT 2008]. Un autre domaine d'application de plus en plus répandu concerne l'éducation par les jeux en RA. Toujours en 2008, Buchanan et al, inspiré par les engins de simulation physiques de plus en plus disponibles, développent un SRA visant l'apprentissage de la physique des corps rigides [BUCHANAN 2008]. Même si le principe du jeu est simple, l'utilisateur doit construire un parcours en interagissant avec différents objets augmentés qui permet à un objet de se rendre du point de départ à la fin, il démontre la versatilité de la RA face à différents domaines d'applications.



Figure 3.18 : L'application de White et al. en botanique

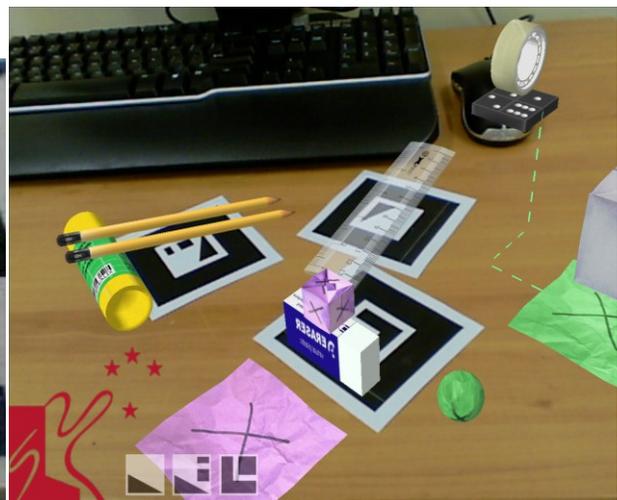


Figure 3.19 : L'application de Buchanan et al. en éducation

En parallèle au développement d'applications de RA à tous ces domaines, les dix dernières années ont donné lieu à plusieurs percées technologiques. En 2002, une application de RA facilitant la navigation à l'intérieur d'un bâtiment inconnu de l'utilisateur est présentée par Kalkusch et son groupe de recherche. Pour ce faire, il enregistre un modèle 3D du bâtiment au monde réel grâce à l'utilisation de markers disposé à intervalles sur les murs du bâtiment et indique ensuite le

chemin à suivre pour se rendre à destination [KALKUSCH 2002]. On assiste également en 2003 à la présentation d'un SRAS qui, plutôt que d'augmenter la vision de l'utilisateur, augmente directement les objets du monde réel. Pour ce faire, un appareil en main capte l'image de l'objet à augmenter grâce à une caméra et projette ensuite une image augmentée selon la forme de l'objet capté [RASKAR 2003]. En 2006, un premier système d'enregistrement hybride à l'extérieur permet de déterminer la position et l'orientation de l'utilisateur grâce aux arrêtes de bâtiments et à un système inertiel [REITMAYR 2006]. Ce système, faisant partie de la catégorie de RA sans markers (*marker-less AR*), est le premier permettant un enregistrement robuste à l'extérieur sans l'utilisation de GPS ou de *markers* prédisposés. Cependant, il dépend toujours de l'utilisation d'un système inertiel. En 2007, une autre méthode hybride d'enregistrement est développée par DiVerdi et Höllerer [DIVERDI 2007]. Elle consiste à utiliser une caméra positionnée dans le dos de l'utilisateur, pointant vers le sol, qui détermine l'orientation de l'utilisateur. Combinée à une méthode traditionnelle de positionnement comme les récepteurs GPS, cette méthode d'enregistrement limite le phénomène de dérive existant dans les systèmes inertiels. Enfin, en 2008, Wagner et al proposent la première méthode d'enregistrement à six degrés de liberté reposant sur la reconnaissance et l'analyse d'éléments connus dans l'environnement [WAGNER 2008]. Cette méthode destinée à être utilisée sur un téléphone cellulaire est très avancée et requiert une grande capacité de calcul informatique. Ce développement mènera certainement à de nouvelles applications et contribuera à la prolifération des applications de RA puisqu'elle diminue les besoins technologiques en éliminant le rôle des récepteurs GPS et des systèmes inertiels.

Bien que l'évolution de la RA fût lente à ses débuts, elle a rapidement pris de la vitesse grâce aux avancées technologiques et de nos jours, on ne compte plus les innovations dans ce domaine. Il est très difficile de faire l'état complet de la recherche courante en RA de façon succincte car elle se déroule à un rythme fulgurant. Cette revue de son évolution a fait l'état des développements majeurs et des domaines auxquels la RA a été appliquée au fil des années. Considérant l'omniprésence des téléphones cellulaires nouvelle génération tel les *iPhones* et

Android dans notre société, il est évident que dans les années à venir, la RA sera appelée à poursuivre son évolution de façon encore plus rapide. De plus, la disponibilité de bibliothèques de RA *open-source* et gratuites contribuera certainement à la démocratisation et la popularisation de la RA, ce qui favorisera l'implication du public dans le développement d'applications. De plus, ces applications deviendront plus accessibles auprès des utilisateurs de tous les domaines qui se familiariseront avec cette technologie. Ceci facilitera sans doute l'adoption future de tels outils dans des contextes plus complexes tels que le design urbain.

3.3.3 La réalité augmentée en design urbain

La section précédente visait à faire l'état général de l'évolution et de la situation actuelle des technologies de la RA. De façon délibérée, elle n'abordait pas la RA appliquée au domaine du design urbain. Cette section est consacrée spécifiquement au rôle de la réalité augmentée en design urbain et aux travaux réalisés par la communauté scientifique à ce sujet. Nous détaillerons ici différents SRA ayant été développés dans le but de supporter les processus de design urbain.

Nous pouvons retrouver une variété de concepts d'outils visant à répondre aux besoins du design urbain grâce aux technologies de la RA. Il existe cependant un aspect commun à la plupart de ces concepts d'outils, soit l'objectif de favoriser la collaboration entre plusieurs participants en facilitant la communication des résultats entre ceux-ci. Pour ce faire, ils visent généralement à établir un espace de travail collaboratif où chacun des participants peut contribuer à l'élaboration d'une solution de façon simultanée. Un concept assez répandu est celui de la table de visualisation collaborative, utilisant un enregistrement par *marker*, qui permet une certaine interaction avec la scène 3D [WANG 2007, SEICHTER 2005]. Ce type d'outil permet d'assembler une solution virtuelle en déplaçant un ensemble de *marker* auxquels sont associés différents éléments de la scène. Il permet également d'observer la scène sous différentes perspectives en se déplaçant autour de celle-ci. D'après une étude conduite par une équipe australienne, ce

type d'outil comporte des avantages évidents du point de vue des designers, dont les principaux sont la facilitation de la compréhension de l'espace et de la communication entre les participants [WANG 2008]

Nous pouvons également retrouver un deuxième type d'outil permettant une interaction plus poussée, axée sur la reproduction de fonctionnalités de logiciels de type CAD. Par exemple, Broll et son équipe de recherche ont conçu *ARTHUR*, un système de RA dont l'objectif est de permettre la conception collaborative de solution dans un contexte de design urbain [BROLL 2004]. Ce système permet l'exécution de certaines fonctionnalités CAD de bases telles l'ajout de formes géométriques, le changement d'échelle des éléments, la modification des propriétés graphiques, etc. Les aspects les plus intéressants d'*ARTHUR* sont sans doute les différentes méthodes d'interaction possibles ainsi que le casque de RA qu'il utilise. En effet, il permet l'interaction grâce à trois mécanismes, soient la gestuelle manuelle, les *markers* basés sur la couleur et l'utilisation d'un pointeur. L'affichage du système est un casque HMD technologiquement supérieur à tous ceux dont nous avons eu la chance de manipuler. Il permet d'abord la capture vidéo en stéréoscopie, ce qui permet de reproduire la vision 3D réelle. Il permet également un affichage vidéo ainsi qu'un affichage *see-through* (Voir section 3.4.1). De plus, il offre une résolution d'écran et un champ de vision élargi relativement aux casques de RA communs. Il faut cependant noter que le casque en question se détaille à plusieurs dizaines de milliers de dollars, le rendant ainsi inaccessible pour la plupart des applications communes. Malgré que ce système soit très avancé par rapport aux systèmes existants, nous pouvons remarquer que l'implémentation de fonctionnalités aussi complètes que celles d'un CAD traditionnel est bien loin d'être possible. Enfin, comme ce système a été développé de spécifiquement pour le processus de conception, il n'implémente aucune fonctionnalité d'analyse des données 3D, nécessaire afin de supporter la décision en design urbain.



Figure 3.20: La table de visualisation collaborative de Wang et al. (Gauche) et le système ARTHUR de Broll et al. (Droite)

Certains auteurs ont également réussi à tirer profit de la RA de façon plus novatrice, toujours dans l'optique de supporter les processus de design urbain. Par exemple, Sareika et Schmalstieg ont proposé un outil utilisant un système d'affichage spatial qui permet de dessiner virtuellement sur des images prises de la réalité [SAREIKA 2008]. L'affichage spatial du système permet à plusieurs utilisateurs de se réunir autour d'un écran large afin de visualiser la solution qui doit être élaborée par un seul utilisateur à la fois. Évidemment ce système est destiné à une utilisation spécifique et ne permettrait pas de supporter l'entièreté du processus de design urbain puisqu'il offre un outil de conception limité et aucune possibilité d'analyse. Cependant, l'utilisation étant ciblée précisément, l'implémentation est simple et possède un niveau d'utilisabilité élevé.

Le système *SiteLens* développé par White et Feiner est un autre exemple d'outil novateur qui permet de visualiser virtuellement et sur place certaines propriétés d'un site d'implantation futur [WHITE 2009]. Dans les projets de design urbain, il est fréquent pour les designers de se rendre sur place avant l'implantation du projet afin d'obtenir une meilleure compréhension de leur espace de travail. L'objectif de *SiteLens* est de permettre à l'utilisateur de maximiser la quantité d'information obtenue lors de ces visites en affichant des données qui ne sont pas physiquement visibles. Dans le cas d'étude proposé par ce groupe de recherche, il permet de visualiser les émissions de monoxyde de carbone telles que relevées

par l'*Environmental Protection Agency* des États-Unis. Cet outil est axé sur une dynamique différente de celle des outils énoncés précédemment puisqu'il ne vise pas un travail collaboratif et n'est pas axé sur le processus de conception mais plutôt celui d'analyse.

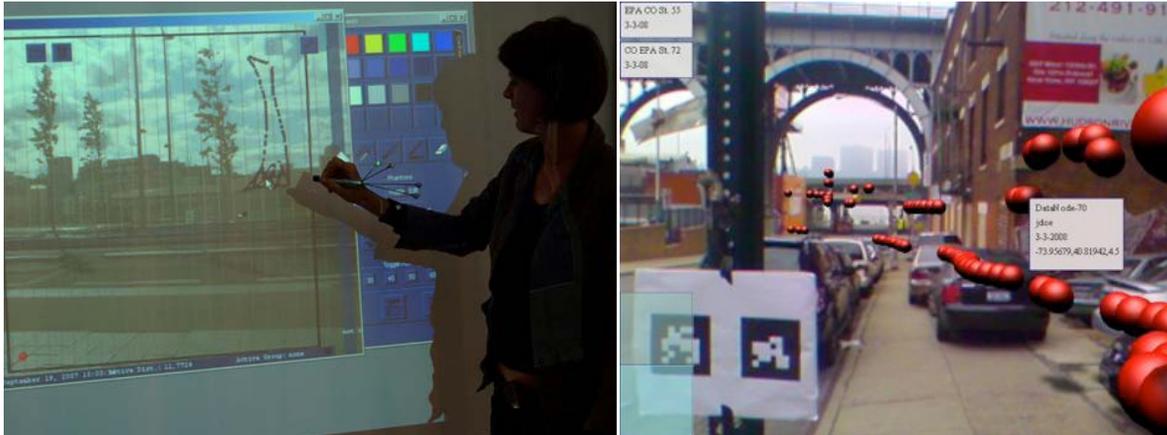


Figure 3.21 : Le système UrbanSketcher (Gauche) et le SiteLens (Droite)

3.4 Les composantes de base d'un SRA

Depuis l'apparition des premiers prototypes de SRA, notamment le « Touring Machine » de Feiner et al en 1997, et de la parution de l'article charnière de Azuma la même année, tous les chercheurs du domaine de la RA s'entendent pour identifier trois composantes de bases permettant la construction d'un SRA, soient le système d'affichage, le système d'enregistrement et l'unité calcul [FEINER 1997, AZUMA 1997, HÖLLERER 2004, WIKIPEDIA 2010]. Cependant, depuis cette période, le nombre composantes de base disponibles se sont multipliées et ont connues des innovations majeures. Au fil des développements en RA, les composantes de bases ont été développées et se sont transformées en fonction des besoins des applications pour lesquels ils étaient destinés. De nos jours, il existe une grande variété de composantes disponibles et elles ne se prêtent pas toutes à l'ensemble des applications possibles de la RA. Cette section abordera chacune de ces composantes de base et discutera des différentes alternatives existantes.

Il faut noter ici que l'étendue des possibilités face aux composantes de base est plus large que celle présentée ici. Par souci de concision, nous nous sommes limités aux systèmes d'affichage que nous avons considéré et étudié pour l'élaboration de notre prototype. Comme l'orientation de cette recherche est d'étudier la possibilité qu'offre la RA aux applications géospatiales en design urbain, nous nous sommes limités aux types d'affichages les plus communs qui offriraient une possibilité de développement réaliste considérant notre expertise limitée en RA.

3.4.1 Systèmes d'affichage

Dans un SRA, le système d'affichage est la composante qui a l'impact le plus important sur l'immersion de l'utilisateur dans son expérience de réalité augmentée [ZLATANOVA 2002]. Dans une expérience de RA complètement immersive, le système d'affichage parfait devrait être intuitif dans son utilisation et intégré à l'utilisateur de façon à ce que celui-ci arrive à en faire l'abstraction totale. Les technologies d'affichage n'ont évidemment pas encore atteint ce niveau. Cependant, pour la plupart des applications visées par les SRA, il existe des systèmes d'affichage qui répondent plus que suffisamment aux besoins des utilisateurs. En 1994, Milgram s'est penché sur la classification des systèmes d'affichage en RA, définissant deux catégories de systèmes d'affichage possibles, les appareils de type *see-through* et les moniteurs traditionnels. [MILGRAM 1994]. Bien que cette classification demeure pertinente, elle ne pouvait évidemment pas prendre en compte les développements qui sont survenus par la suite, notamment au niveau de l'affichage par projecteurs et l'arrivée des PDA. Depuis cet effort initial de classification des affichages en RA, d'autres auteurs ont offert différentes classifications des systèmes d'affichage, notamment Bimber et Raskar en 2005 qui ont élaboré 3 catégories, soient les affichages par HMD, les affichages spatiaux et les affichages de type PDA. Dans cette classification, les moniteurs traditionnels sont inclus dans les affichages spatiaux. Dans cette section, nous utiliserons la classification de Bimber et Raskar puisqu'elle englobe celle de

Milgram afin de définir les trois catégories et proposer ensuite une comparaison des différents affichages.

Casques de RA (HMD) de type « see-through »

Le *helmet mounted display* (HMD), affichage monté sur casque en français, est un type d'affichage qui n'est pas exclusivement réservé à la RA. En effet, il existe également des HMD servant à la RV. Par contre, les HMD utilisés en RV, ne sont pas de type « *see-through* », c'est-à-dire qu'ils ne permettent pas à l'utilisateur d'observer la réalité au travers de l'appareil. Par souci de simplicité, nous considérerons le terme HMD comme faisant référence aux HMD de type « *see-through* ». Jusqu'à tout récemment, les HMD étaient les principaux types d'affichage utilisés en RA. De nos jours, ils sont en voie d'être détrônés, si ce n'est pas déjà fait, par les affichages de type PDA. Le HMD est l'affichage offrant la plus grande immersion à l'utilisateur puisqu'il s'intègre directement à sa personne et est opéré par les mouvements naturels de la tête de ce dernier. Ces deux caractéristiques font en sorte que l'utilisateur arrive à faire abstraction du SRA plus facilement, contribuant ainsi à sa sensation d'immersion. Bien sur, ces avantages viennent avec des désavantages, les HMD sont les types d'affichage les plus complexes d'utilisation et les plus dispendieux.

Les HMD peuvent être sous catégorisés selon qu'ils reposent sur un affichage de type vidéo ou optique. Le HMD vidéo consiste en un casque muni d'une ou plusieurs caméras captant une vidéo de la réalité, laquelle est ensuite augmentée et retransmise à l'utilisateur grâce à des affichages situés devant ses yeux. Le HMD optique consiste en un casque muni d'une lentille transparente sur laquelle sont projetées les informations numériques qui augmentent la réalité. Dans le premier cas, on considère l'affichage comme étant indirect et dans le deuxième comme étant direct, ceci a des conséquences sur le procédé d'augmentation. Dans le cas vidéo, le procédé d'enregistrement est plus facilement réalisable puisque l'affichage de la réalité et du digital est gouverné par l'ordinateur. Ainsi, on peut ralentir l'affichage de la réalité au rythme des calculs et du rendu graphique, ce qui permet d'éviter les effets de trainée. Dans le cas optique, il est impossible

de ralentir l'affichage de la réalité puisque l'utilisateur l'observe directement. Comme les calculs et le rendu graphique ne se fait pas à la même vitesse que l'affichage, on peut assister à un effet de trainée. Considérant ceci, il est plus complexe d'atteindre un bon enregistrement en utilisant un système optique. Par contre, le système optique a l'avantage de ne pas être limité par la résolution de la caméra utilisée.

Les affichages de type HMD est un sujet très vaste qui a été exhaustivement étudié par le passé et qui n'a certainement pas terminé de dévoiler des innovations. Puisque l'intention ici n'est pas d'étudier les HMD mais bien les SRA, nous avons fait le choix de discuter seulement des HMD plus conventionnels. Il existe également d'autres types de configurations moins communes pouvant être considérés comme des HMD, par exemple le *Helmet Mounted Projection Display* et le *Retinal Display*. Pour de plus amples informations, nous référons le lecteur à [MILGRAM 1994, ROLLAND 1994, ROLLAND 2005, LIVINGSTON 2006, BIMBER 2005]

Affichage spatial (Spatial displays)

À la différence des autres systèmes d'affichage, les affichages spatiaux ne sont pas opérés par l'utilisateur mais font plutôt partie de l'environnement dans lequel l'utilisateur évolue. Bimber et Raskar, un équipe de chercheur à l'avant-garde de la recherche en RAS, proposent trois catégories d'affichages spatiaux, soient l'affichage vidéo, optique et par projecteur [BIMBER 2005]. L'idée d'augmenter directement l'espace plutôt que la perception de l'espace au niveau de l'utilisateur est récente en RA et donne lieu à des applications intéressantes quoique limitées, particulièrement en ce qui a trait à la collaboration en RA. Les SRAS permettent aux utilisateurs d'être libérés des encombrants SRA conventionnels, de leur poids et de leur câblage qui peut restreindre la mobilité de l'utilisateur.

L'affichage spatial par vidéo utilise les moniteurs traditionnels afin de créer ce qui pourrait être qualifié de stations de visualisation statiques. Ce type d'affichage est celui qui est le plus facilement intégrable aux SRA mais qui est le moins immersif

de toutes les alternatives possibles puisqu'il n'augmente qu'une petite portion du champ de vision de l'utilisateur. D'un autre côté, les moniteurs sont très abordables et permettent à n'importe qui de réaliser sa propre application de RA. Dans la littérature, ces systèmes sont qualifiés de « fenêtré sur le monde » puisqu'ils permettent d'observer le monde augmenté de façon externe à celui-ci, sans y prendre part [FEINER 1993, MILGRAM 1994]. Dans ce type d'affichage, le processus d'augmentation est simple, à partir d'une vidéo en temps-réel ou non, on superpose des informations numériques de façon analogique ou digitale. Ce type d'affichage se prête bien à des applications où le côté *see-through* ou mobile n'est pas requis.

La deuxième catégorie, les affichages optiques de type *see-through* nécessitent une architecture matérielle beaucoup plus complexe. Plusieurs types d'équipement permettent ce type de RAS dont les écrans transparents, des combineurs optiques ou des miroirs combineurs de rayon électro-magnétiques. Les résultats obtenus grâce à ces affichages s'observe plus aisément par les utilisateurs, c'est-à-dire qu'ils occasionnent moins de fatigue de la part de ceux-ci. L'enregistrement à la réalité est également plus facile qu'avec les affichages vidéo et ils offrent la possibilité d'une meilleure résolution d'affichage. Grâce à ces avantages, le monde augmenté résultant est généralement plus réaliste qu'avec les autres affichages spatiaux. Cependant, outre leur complexité d'intégration à un SRAS, ces systèmes comportent beaucoup de désavantages. Ils ne se prêtent pas aux applications mobiles, il est très difficile d'implémenter des méthodes d'interaction entre l'utilisateur et le monde augmenté, ils ne gèrent pas les occlusions et les considérations optiques de ces affichages peuvent restreindre le nombre d'utilisateurs maximal.

Enfin, la troisième catégorie englobe les affichages spatiaux de type projecteur qui repose sur le concept d'augmentation directe des objets du monde réel. Pour ce faire, un projecteur frontal est utilisé et projette les informations numériques sur les objets qui doivent être augmentés. Dans ce type d'affichage, la représentation de la profondeur est facilement atteinte puisque les objets augmentés sont

physiquement présent dans l'espace. De plus, ces systèmes permettent une mobilité naturelle puisqu'aucun câblage ou autre équipement ne fait obstacle à l'utilisateur. Ce type d'affichage comporte plusieurs désavantages notamment, les utilisateurs peuvent obstruer la projection si le projecteur est positionné derrière ceux-ci, la surface de projection est restreinte à l'objet augmenté, l'augmentation d'une surface non-planaires occasionne un flou de l'image.

Affichage de type PDA

L'affichage de poche de type PDA, devenu populaire au courant de la dernière décennie, est l'interface de SRA qui est la plus accessible au public général. Les appareils de type *Tablet PC*, PDA et certains téléphones cellulaires comme le *iPhone* et plus récemment *l'Android* s'inscrivent dans cette catégorie. Ces systèmes d'affichage ont l'avantage majeur de combiner ordinateur, affichage et souvent récepteur GPS et système inertiel ce qui facilite grandement le développement d'applications de RA. C'est pour cette raison que ces modes d'affichage ont été rapidement adoptés par la communauté publique afin de développer une panoplie d'applications de RA. De plus, les écrans tactiles qui sont de plus en plus communs sur ces appareils, permettent une méthode d'interaction simple, intuitive et facile à implémenter. Cependant, ces types d'affichages sont les moins immersifs puisqu'ils ne sont pas intégrés à l'utilisateur ou à l'espace, en conséquence, l'utilisateur doit faire un effort conscient afin d'observer le monde augmenté. La grosseur limitée de leur écran est un autre facteur limitant l'immersion de l'utilisateur dans le monde augmenté. Un autre désavantage majeur de ces appareils consiste en leur capacité restreinte de traitement d'image et de manipulation de graphismes 3D due aux processeurs qu'ils utilisent. Enfin, les affichages de poche ne permettent pas les applications mains libres, ce qui limite les domaines d'application des applications développées avec ces affichages.

	Immersion	Mobilité	Avantages	Limites
HMD Optique	Élevée	Moyenne	La réalité est observée sans intermédiaire, champ de vision plus large	Différence de rafraîchissement entre l'œil et l'affichage graphique, nécessite un système d'enregistrement externe, manque de contraste
HMD Vidéo	Élevée	Moyenne	Système d'enregistrement peut-être intégré (caméra), contrastes élevés	Champ de vision restreint, procédé d'enregistrement exigeant, possibilité d'effet de trainée.
Affichage spatial	Variable	Faible	Possibilité de multi-utilisateurs, utilisateurs non encombrés	Visionnement limité à l'espace occupé par l'affichage, sujet aux occlusions, qualité d'affichage dépend des matériaux utilisés, difficulté d'interaction
PDA	Faible	Élevée	Interaction facile, développement d'applications facile, peu encombrant	Impossible de changer les autres composantes de base, sujet aux droits de propriété, méthodes d'interaction limitées au toucher.

Tableau 3.1 : Tableau comparatif des systèmes d'affichage

3.4.2 Système d'enregistrement

Dans un SRA, le système d'enregistrement est la composante qui vise à établir une référence entre le monde virtuel et le monde réel de façon à ce que les informations numériques, lorsque superposées à la perception du monde réel, semblent en faire partie intégrante et naturelle. L'enregistrement est sujet à deux problèmes majeurs, le bruit (*Jitter*), qui réfère à l'oscillation de l'enregistrement autour de la position souhaitée et la latence (*Latency*) qui réfère à la vitesse de transmission de la position à laquelle on assigne les informations numériques [THEATER 2009]. Ces deux problèmes ont un impact direct sur la qualité de l'expérience de l'utilisateur. En effet, un mauvais enregistrement contenant beaucoup de bruit et une longue latence peut occasionner un effet similaire au mal des transports pour l'utilisateur. L'enregistrement est un des défis le plus important des SRA et fait l'objet d'études intensives depuis que l'idée de la RA a été lancée par Sutherland en 1968. Dans son SRA, Sutherland utilisait un système d'enregistrement mécanique suspendu au plafond au-dessus de l'utilisateur d'une telle envergure qu'il était surnommé l'épée de Damoclès, référant humoristiquement au risque de chute du système. Bien sûr les systèmes d'enregistrement ont grandement évolué depuis ce temps et il existe de nos jours

une très grande variété de stratégies possibles qui comportent chacune leur avantages et désavantages.

De façon résumée, un système d'enregistrement utilise une technologie de suivi (*Tracking*) qui permet d'obtenir la position et l'orientation de l'utilisateur pour ensuite calculer la transformation à appliquer aux données numériques 3D de façon à ce qu'elles soient enregistrées au monde réel. Selon la technologie de suivi utilisée, le calcul de la position et de l'orientation de l'utilisateur est différent. La méthode de suivi employée a un impact direct sur le temps de traitement nécessaire pour effectuer les calculs et sur la précision de l'enregistrement obtenu. Le fonctionnement détaillé des différentes méthodes d'enregistrement est complexe et déborde du cadre de cette section. Il existe plusieurs ouvrages exhaustifs consacrés entièrement à ce sujet qui offrent des explications détaillées des différentes méthodes [ROLLAND 2001, KLEIN 2006]. Dans cette section, nous aborderons les trois catégories de méthodes d'enregistrement, parmi les sept détaillées par Rolland en 2001, que nous avons jugées être les plus susceptibles de répondre aux besoins des SRA.

Par Temps de vol (Time-of-Flight)

Les systèmes d'enregistrement basés sur un suivi par temps de vol (TOF) reposent sur la mesure du temps de propagation d'un signal pulsé émis par une source et réfléchi sur un objet dont on cherche la position et l'orientation. Pour ce faire, le signal doit avoir une vitesse constante et connue. Un système d'enregistrement par TOF est composé d'un ou plusieurs émetteurs qui envoient le signal et d'un ou plusieurs récepteurs qui le réfléchissent vers la source. En mesurant le temps de propagation de l'aller-retour du signal, on arrive à calculer la distance parcourue par le signal. La redondance des émetteurs ou des récepteurs est requise afin de calculer l'orientation de l'objet ciblé. En mesurant les différences des temps de propagation d'un émetteur à chacun des récepteurs, on arrive à calculer les trois angles d'orientation (*roll*, *pitch*, *yaw*) de l'objet à référencer. Différentes configurations des réseaux d'émetteurs et récepteurs sont possibles mais, dans tous les cas, une redondance est requise du côté récepteur,

du côté émetteur, ou des deux côtés. Il existe une bonne variété de signaux suffisamment bien contrôlés pouvant être utilisés afin de déterminer les six degrés de liberté nécessaires au positionnement d'un objet dans l'espace.

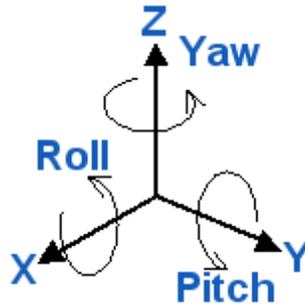


Figure 3.22 : Les trois angles d'orientation (*roll, pitch, yaw*)

Le positionnement acoustique est une des premières méthodes de suivi par TOF développée. Elle consiste à exploiter des signaux ultrasoniques grâce à deux réseaux de trois émetteurs et trois récepteurs, chacun disposés en triangle et dont les positions relatives sont connues. Chacun des émetteurs envoie un signal ultrasonique séquentiellement qui est reçu et réfléchi par chacun des récepteurs. Grâce aux neuf distances mesurées, on arrive à trianguler la position des trois émetteurs et par la suite à calculer la position et l'orientation des trois récepteurs, donc de l'objet ciblé. L'équipement nécessaire au suivi acoustique a l'avantage d'être léger et non-encombrant. De plus, ce système n'est pas sujet aux distorsions. Cependant, il comporte beaucoup de désavantages. Premièrement, la précision de ce système est dépendante des conditions atmosphériques puisque la vitesse du son varie en fonction de paramètres comme l'humidité, la température et la pression. Deuxièmement, la portée utile de ce système est limitée car les signaux acoustiques ont tendance à se dissiper rapidement en fonction de la distance parcourue. Troisièmement, ce système est très sensible aux bruits ambiants de l'environnement d'opération. L'ensemble de ces facteurs font en sorte que ce système est instable et peu propice au positionnement pour des applications de RA. De plus, l'architecture matérielle nécessaire à ces systèmes est complexe à configurer donc nécessite une expertise à priori.

Le positionnement d'un utilisateur par GPS est une autre technologie de suivi reposant sur le temps de propagation qui peut être utilisée comme système d'enregistrement partiel. Actuellement, les 32 satellites composant la constellation américaine NAVSTAR assurent une couverture permanente offrant un positionnement global à tout moment [NAVCEN 2010]. Afin de déterminer la position d'un utilisateur il est nécessaire que son récepteur capte les signaux provenant d'au minimum quatre satellites, ce qui permet une triangulation de la position avec une surabondance de données [SANTERRE 2006]. Cette surabondance de données permet une compensation de la position afin de minimiser l'imprécision du positionnement. Ainsi, plus la quantité de satellites disponibles est élevée, plus le positionnement sera de bonne qualité. De façon similaire aux autres systèmes TOF, le temps de propagation des signaux GPS, du satellite jusqu'au récepteur, permettent le positionnement de celui-ci. Nous qualifions cette méthode de suivi partiel puisqu'elle ne permet pas d'obtenir l'orientation de l'utilisateur. En conséquence, il est nécessaire de jumeler le suivi par GPS à une méthode de détermination de l'orientation, par exemple l'utilisation d'un capteur inertielle. Le suivi par GPS possède l'avantage majeur de permettre un positionnement à l'extérieur en tout temps en utilisant un équipement minimal, soit un seul récepteur GPS. Ainsi, il est possible d'obtenir un suivi robuste sans avoir besoin de préparer l'environnement comme c'est le cas dans les SRA intérieurs. Cependant, le positionnement par GPS demeure relativement imprécis et sujet aux obstructions de signaux ainsi qu'aux multi trajets. Ceci fait en sorte que les SRA utilisant le suivi par GPS doivent implémenter des stratégies inhabituelles de modélisation 3D de l'environnement d'opération. Par exemple, plutôt que de modéliser intégralement un bâtiment et de le superposer à la réalité, seulement son centroïde sera modélisé. Ainsi, la précision offerte par les récepteurs GPS des appareils mobiles de type *iPhone* (de 5-10 mètres) peut être suffisante pour que l'utilisateur ne remarque pas le décalage entre le virtuel et le réel. Notons qu'il est tout de même possible d'utiliser un récepteur GPS de meilleure qualité qui permettrait le développement d'applications plus diversifiées.

Balayage Spatial (Spatial Scan)

Le suivi par balayage spatial repose sur la détermination de la position et de l'orientation d'un objet à partir d'une prise de vue captée par un senseur optique, mieux connu sous le nom de caméra vidéo ou infrarouge. Cette méthode détermine les six degrés de libertés (6DOF) nécessaires à l'enregistrement des informations numériques en faisant appel à des algorithmes de reconnaissance de forme dont la géométrie est connue à priori. En analysant la déformation de la géométrie, ces algorithmes issus du domaine de la vision numérique, parviennent à extraire la transformation à appliquer aux informations numériques. Tel que mentionné, il est nécessaire de disposer d'une référence dont la géométrie est parfaitement connue, c'est ce qui est désigné comme *marker*. Les méthodes optiques, puisqu'elles reposent sur la propagation de la lumière, offrent un rafraichissement plus rapide que les méthodes TOF. Elles sont cependant susceptibles aux variations d'éclairage et leur précision diminue lorsque la distance de la caméra au *marker* augmente. Ainsi, pour utiliser un suivi par balayage spatial, il est nécessaire d'abord de préparer l'environnement d'opération en disposant les *markers* dans l'espace et d'ensuite contrôler l'éclairage tout au long de l'opération du système. Ceci constitue la plus grande limite de cette méthode d'enregistrement puisqu'elle rend difficile, voire impossible son utilisation à l'extérieur. Il existe plusieurs bibliothèques de développement disponibles gratuitement sur le web qui permettent l'implémentation relativement aisée des méthodes d'enregistrement par balayage spatial, *ARToolKit*, *Studierstube* et *LayAR* en sont quelques exemples.

Les systèmes d'enregistrement par balayage spatial peuvent être classés en deux catégories, les systèmes extérieur-intérieur (*Outside-In*) ou les systèmes intérieur-extérieur (*Inside-Out*). Dans la première configuration, les caméras sont fixées sur un objet de référence et les *markers* sont situés sur l'objet mobile. Cette méthode requiert typiquement l'utilisation de plusieurs caméras disposées dans l'environnement où l'utilisateur évolue. En conséquence, elle peut être complexe à implémenter et limitative au niveau de la mobilité de l'utilisateur. Dans la configuration intérieur-extérieur, les caméras sont fixées sur l'objet mobile (le plus souvent l'utilisateur même) et les *markers*, sur un objet de référence. Cette

méthode permet une plus grande mobilité à l'utilisateur ainsi qu'une meilleure précision d'enregistrement. Cependant, elle est plus susceptible à l'oscillation (*Jitter*) occasionné par les mouvements de la caméra. Selon le choix du système d'affichage, l'une ou l'autre des configurations peut apparaître plus naturelle. Par exemple, l'utilisation d'un HMD vidéo fait intervenir une caméra afin de représenter le monde augmenté à l'utilisateur. Puisqu'une caméra est déjà intégrée au casque qui se déplacera avec l'utilisateur, le choix de la configuration intérieur-extérieur est plus naturel et sera plus facilement implémenté.

La technologie de balayage spatial la plus répandue actuellement consiste à utiliser des *markers* 2D sous forme d'image en noir et blanc dont la géométrie est connue d'avance et facilement analysable par des algorithmes de reconnaissance de forme [KATO 1999]. Dans ce cas, la forme enregistrée par la caméra est fonction de la position et de l'orientation du *marker* [KLEIN 2006]. Puisque cette technologie est la plus répandue, il existe une grande communauté de développement sur le web et la documentation est abondante ce qui facilite beaucoup le développement. L'asymétrie prononcée de ce type de *marker* fait en sorte que l'enregistrement est robuste et précis, mais fortement dépendant de la distance entre la caméra et le *marker*. Une autre technologie de balayage spatial consiste à utiliser une configuration connue d'émetteurs infrarouges, par exemple des diodes électroluminescentes (DEL). Dans ce cas, l'orientation et la position est calculée d'après la déformation spatiale de la configuration des émetteurs. Cette technique a l'avantage d'être peu sensible aux variations d'intensité lumineuse. D'un autre côté, la détermination des six degrés de liberté peut être ambiguë lorsqu'un émetteur est obstrué par un autre. Cette limite peut être surmontée en utilisant un réseau de plusieurs caméras infrarouges, ce qui augmente la précision du positionnement mais qui diminue la portabilité du système résultant et augmente les coûts impliqués [PINTARIC 2007]. De plus, l'utilisation de caméras infrarouges fait en sorte que le flux capté n'est pas présentable à l'utilisateur, ceci nécessite l'addition d'un autre système d'affichage. Enfin, l'enregistrement peut être effectué grâce à des *markers* basé sur la couleur uniquement. Cette façon de faire repose sur un simple calcul du nombre de pixels de la couleur choisie captés

par la caméra. Cette méthode est certainement la plus facile à implémenter mais elle présente de gros désavantages, elle est fortement susceptible aux variations d'intensité lumineuse et à l'interférence occasionnée par des objets de la couleur choisie. De plus, elle détermine difficilement l'orientation puisque l'asymétrie du *marker* n'est pas considérée. Ces limites des *markers par* couleur peuvent être surmontées en multipliant le nombre de *markers* [SYKORA 2008]. Dans cette situation, on se retrouve essentiellement avec le même principe que l'utilisation de plusieurs émetteurs infrarouges.

Par senseurs inertiels

Une autre stratégie possible permettant l'enregistrement du virtuel au monde réel consiste à utiliser une combinaison de gyroscopes et d'accéléromètres. Le gyroscope est un appareil qui mesure l'orientation dans un axe en faisant appel aux principes de conservation de la vitesse angulaire. Dans sa forme la plus simple, un gyroscope mécanique consiste en une roue qui effectue des révolutions dans un seul plan de l'espace en utilisant un système de support pivotant afin de le conserver dans cet axe. Le gyroscope mécanique est un des premiers types de gyroscope à avoir été conçu, il en existe plusieurs autres. Par exemple, on retrouve des gyroscopes reposant sur l'interférence lumineuse, sur les structures vibratoires ou sur les principes de mécanique quantique. La détermination de l'orientation par gyroscopes implique l'utilisation de trois appareils, un pour chacun des trois axes de rotation dans l'espace. L'avantage évident de ce type de système est qu'il ne requiert aucune référence extérieure afin de déterminer l'orientation puisque les axes de rotation des roues internes du gyroscope servent de référence [ROLLAND 2001]. Son désavantage principal consiste en l'accumulation des erreurs de mesure occasionnées par les forces de frictions résiduelles entre la roue et le tourillon (*bearing*). L'accumulation des erreurs est la cause du phénomène de dérive associé aux gyroscopes. L'intégration de gyroscopes à un système de suivi par GPS se présente comme la solution naturelle aux limites du GPS qui ne permet pas la mesure de l'orientation. C'est d'ailleurs cette configuration qui se retrouve dans les appareils de type PDA.



Figure 3.23 : Mécanisme interne d'un gyroscope (gauche) et le senseur inertiel MTx de XSens (droite)

Puisque l'emploi de trois gyroscopes ne fournit que les trois orientations d'un objet, il ne permet pas un enregistrement complet du virtuel à la réalité. Pour ce faire, il est nécessaire d'intégrer une combinaison de trois accéléromètres, mesurant les variations d'accélération dans les trois axes de l'espace. Un accéléromètre détermine l'accélération d'un objet en mesurant son accélération relative à la gravité terrestre. Pour ce faire, un accéléromètre est généralement constitué d'une masse reposant sur un appareil mesurant la pression appliquée, par exemple un cristal piézoélectrique. Lorsque l'objet mesuré accélère, la pression appliquée sur le cristal piézoélectrique fait augmenter le voltage et, conséquemment la mesure d'accélération. En considérant la position initiale de l'objet, la double intégration des mesures d'accélération dans le temps permet de déterminer la position de l'objet mesuré. Comme pour les gyroscopes, l'avantage principal des accéléromètres est qu'ils ne nécessitent pas de référence externe. Cependant, l'intégration double fait en sorte que le bruit dans la mesure initiale est transporté et accumulé dans le calcul de la position, ce qui entraîne un phénomène de dérive semblable à celui des gyroscopes.

	Précision	Latence	Rafraichissement	Avantages	Limites
Acoustique	0,5 à 6 mm	40 ms	25 – 200 Hz	Peu encombrant, léger	Sensible aux variations atmosphériques
GPS	0,05 à 5 m	Var.	Var.	Aucune préparation de l'environnement, opération à l'extérieur	Sensible aux multi trajets, aux occlusions de signal
Balayage optique (<i>outside-in</i>)	0,1-0,45 mm	Élevé	50 – 400 Hz	Rafraichissement rapide, précision élevée, simple	Sensible au bruit optique, à la lumière et aux occlusions
Balayage optique (<i>inside-out</i>)	2-25 mrad	N/D	N/D	Meilleure résolution que <i>Outside-in</i>	Sensible au bruit optique, à la lumière et aux occlusions
Senseur inertiel	0,2 degrés	N/D	50 Hz	Aucune référence nécessaire	Sujet à l'accumulation d'erreur

* Les valeurs sont tirées de [ROLLAND 2001]

Tableau 3.2 : Tableau récapitulatif des systèmes d'enregistrement

La combinaison de trois accéléromètres et trois gyroscopes fournit un système de suivi de six degrés de libertés qui ne nécessite aucune référence externe, permettant son utilisation autant à l'extérieur qu'à l'intérieur. La présence du phénomène de dérive est la limite principale de ce système. Bien qu'il existe des méthodes permettant de réduire le bruit occasionnant la dérive, elles sont complexes à implémenter. L'utilisation de systèmes d'enregistrement uniquement basé sur une combinaison de senseurs inertiels est peu répandue dans les SRA. La combinaison GPS et gyroscopes est, quant à elle, beaucoup plus populaire.

3.4.3 Unité de calcul

L'unité de calcul, ou l'ordinateur, d'un SRA est la composante qui permet le traitement des données 3D, l'exécution des algorithmes d'enregistrement et toutes les autres opérations d'exploitation du SRA. De façon résumée, cette composante sert à effectuer le lien entre l'utilisateur et les différentes composantes du système. Il est important d'utiliser un ordinateur qui possède une puissance de traitement suffisante afin de minimiser la latence des opérations impliquées dans les SRA. Cette composante est souvent abordée dans la littérature, mais rarement discutée

en profondeur puisque de nos jours, la plupart des ordinateurs sont suffisamment puissant pour les besoins de développement de SRA. Cette composante est donc celle dont le choix est le plus trivial dans la composition d'un SRA. Dans cette section nous présentons trois types d'unité de calcul, catégorisés selon notre étude des SRA existants dans la littérature.

Ordinateurs de bureaux

Les ordinateurs de bureaux sont des ordinateurs personnels destinés à être utilisé régulièrement à partir d'un seul endroit [WIKIPEDIA 2010]. Ceci permet à ce type d'ordinateur de disposer d'une architecture matérielle plus volumineuse, versatile et puissante puisque son alimentation en énergie est stable et constante. Cependant, les besoins en alimentation, les câblages impliqués et le poids des appareils restreignent la mobilité à des utilisations à l'intérieur seulement. Ils se prêtent bien au développement d'applications de SRA puisqu'ils permettent facilement les modifications de configurations matérielles et logicielles. Malgré les restrictions que présentent les ordinateurs de bureau, ils sont généralement retenus afin de développer les applications permettant d'exploiter tous les types de SRA. Une fois le développement finalisé, l'application peut être transférée au système final, peu importe sa forme, qui sera ensuite prêt à être mis en opération.

Ordinateurs portables

Les ordinateurs portables sont des ordinateurs compacts de faible poids et de petite taille qui permettent une plus grande mobilité que les ordinateurs de bureaux. Contrairement à ceux-ci, ils sont destinés à être déplacés et peuvent fonctionner indépendamment d'une alimentation fixe grâce à des batteries qui permettent une autonomie de quelques heures. Cette mobilité accrue n'est pas sans conséquence. En effet, comme ils sont compacts, leurs composantes miniaturisées sont limitées en puissance. Ainsi, leur capacité de traitement de données est réduite comparée aux ordinateurs de bureaux. De plus, ils sont moins versatiles, c'est-à-dire qu'il est plus difficile de changer certaines composantes

internes d'un ordinateur portable afin de répondre à un besoin particulier. Par exemple, il est difficile, voir impossible de changer la carte graphique d'un ordinateur portable afin de permettre un meilleur affichage de graphismes 3D. Par contre, comme pour les ordinateurs de bureau, ils permettent facilement l'utilisation de périphériques externes tels les casques de RA ou les récepteurs GPS branchés par port USB. Ces ordinateurs ont été largement utilisés dans les 20 dernières années pour le développement d'applications mobiles en RA mais de nos jours, ils sont en voie de se faire surpasser par les ordinateurs de type PDA.

Ordinateurs de type PDA

Les ordinateurs de type PDA sont de plus en plus populaires pour le développement de SRA. Bien que les PDA existent sous formes variées, la plupart sont de taille assez petite pour être transportés en poche. L'avantage principal de ces appareils est qu'ils intègrent les trois composantes nécessaires aux SRA, c'est-à-dire un système de positionnement à six degrés de libertés afin d'effectuer l'enregistrement à l'extérieur, un système d'affichage et bien sûr, une unité de calcul. Ceci rend très simple le développement d'applications de RA mobiles et c'est pourquoi on assiste présentement à une multiplication d'applications développées par le public en général pour les appareils comme le *iPhone* ou le *Android*. Par contre, leur miniaturisation extrême rend impossible la modification de la configuration matérielle de ces appareils. Il est donc impossible par exemple de changer le système d'affichage pour un casque de RA ce qui limite les possibilités d'immersion. Leur capacité de traitement est également limitée et rend difficile le traitement de gros volumes d'information, particulièrement lorsqu'il s'agit de traiter le 3D. Bref, le développement de SRA sur un appareil de type PDA doit être réalisé dans les limites technologiques strictes imposées par l'appareil.

	Puissance de traitement	Poids et volume	Mobilité	Extérieur	Autonomie	Flexibilité
Ordinateur de bureau	Élevée	Élevé	Non	Non	Faible	Élevée
Ordinateur portable	Moyen	Moyen	Oui	Oui	Moyenne	Moyenne
Ordinateur type PDA	Faible	Faible	Oui	Oui	Élevée	Faible

Tableau 3.3 : Tableau récapitulatif des unités de calcul

3.5 Une classification des SRA

À la section précédente, il a été établi que les composantes de bases d'un SRA peuvent prendre différentes formes ayant chacune leurs avantages et désavantages. Cette variété de composantes possibles pour la mise au point d'un SRA peut facilement confondre le développeur et complexifier la suite du développement. Selon leurs propriétés, les composantes de bases se prêtent mieux au développement de types spécifiques de SRA. Il est donc important de préalablement poser une réflexion sur les besoins visés par le SRA avant de débiter la phase de développement. Par exemple, la mobilité à l'extérieur est un besoin fréquent dans le développement des SRA qui restreint fortement les possibilités au niveau des composantes de bases. Considérant ceci, il apparaît naturel que le choix des composantes d'un SRA souhaité devrait être effectué en fonction du type de ce SRA. Bien que ce processus de réflexion ait inévitablement eu lieu dans tous les travaux où un SRA fut développé, il n'existe pas de travaux qui comparent conceptuellement les types de composantes matérielles en fonction des besoins visés par les SRA. Cependant, on retrouve, dans la plupart des ouvrages, les réflexions techniques qui ont mené aux choix effectués par les auteurs concernant leurs besoins spécifiques, par exemple face à la mobilité [FEINER 2004] ou à la collaboration [BROLL 2004, REITMAYR 2001]. Cette section vise à dégager les différents types de SRA qui peuvent diriger la réflexion à poser au sujet des composantes de bases à sélectionner pour le développement d'un système.

3.5.1 L'environnement d'opération

La première classification des SRA peut se faire selon l'environnement d'opération dans lequel l'utilisateur du système évoluera. Il est possible d'identifier trois environnements soient à l'intérieur, à l'extérieur et l'environnement mixte. Chacun d'eux exerce des restrictions particulières sur le choix des trois composantes de base, particulièrement au niveau de l'enregistrement. De façon générale, les restrictions des composantes dans le cas extérieur ou intérieur sont imposées par

le niveau de contrôle que nous possédons sur l'environnement. Par exemple, il est possible de prévoir un réseau de senseurs ou de marqueurs permettant l'enregistrement du virtuel à la réalité dans le cas d'un SRA mobile à l'intérieur d'un bâtiment [KALKUSCH 2002] ce qui est difficilement réalisable à l'extérieur où on procèdera plutôt par GPS.

Dans son article portant sur les défis de la RA extérieure, Azuma analyse les différences majeures entre les systèmes intérieur et extérieur au niveau des trois composantes de base [AZUMA 1999]. Le premier avantage que possède la RA intérieure sur l'extérieure concerne la possibilité d'utiliser une architecture matérielle plus volumineuse, lourde et fournissant une alimentation plus puissante. À l'intérieur, la plus grande limite face à l'ampleur du SRA est la contrainte financière du développeur tandis qu'à l'extérieur, des considérations ergonomiques doivent être prises en compte. Dans le premier cas, on peut envisager que le seul appareil que l'utilisateur doit transporter soit le système d'affichage ce qui permet d'utiliser un ordinateur de bureau fixe alors que dans le deuxième, il doit transporter l'ordinateur, la source d'alimentation et tout autre appareil sur sa personne ce qui peut rapidement rendre difficile l'utilisation du système. Cependant, les développements récents face à la miniaturisation des ordinateurs portables et des PDA rendent cette problématique de moins en moins actuelle. Il faut toutefois prendre en considération que ces deux types d'ordinateurs permettent une moins grande puissance de traitement ce qui vient limiter les possibilités d'exploitation de gros volumes de données, ce qui est fréquemment le cas pour les applications géospatiales.

La deuxième différence concerne le niveau de contrôle de l'éclairage qui vient imposer des restrictions pour les systèmes d'affichages possibles à l'extérieur. En effet, à l'intérieur, il est facile de contrôler l'éclairage ce qui assure une bonne visibilité pour l'utilisateur et un bon enregistrement dans le cas où l'enregistrement est effectué par balayage spatial. Dans cette situation, on peut facilement intégrer tout type d'affichage au SRA développé puisque l'infrastructure n'impose pas de restrictions. Dans le cas d'un SRA extérieur, le manque de contrôle de l'éclairage

viendra soit restreindre les affichages utilisés ou les périodes d'opération possibles. Les HMD optiques dont l'usage semble plus naturel à l'extérieur qu'à l'intérieur, sont particulièrement assujettis aux différents niveaux d'éclairage. En effet, un soleil éblouissant empêchera l'utilisateur de bien apercevoir les objets virtuels affichés sur l'écran transparent. Pour contrer cet effet, la tendance est à l'utilisation de HMD vidéos qui permettent un meilleur contrôle sur l'éclairage en modifiant l'exposition de la caméra. Par contre, l'utilisation d'un HMD vidéo entraîne d'autres désavantages telle la diminution de la résolution de l'affichage et l'augmentation des besoins en alimentation et de la capacité de traitement. Il apparait donc que les systèmes d'affichage les plus appropriés à l'extérieur sont les affichages de type PDA qui comportent une bonne autonomie et qui sont très légers. Par contre, leur capacité de traitement d'informations est très limitée relativement aux ordinateurs portables et leur mode d'affichage est beaucoup moins immersif que les casques de RA. En ce qui a trait aux affichages spatiaux, ils sont, de par leur nature, peu propice à leur utilisation à l'extérieur puisqu'ils requièrent une infrastructure complexe, volumineuse et la plupart du temps fixe. Il serait quand même envisageable de concevoir un SRAS extérieur par exemple dans le cas d'une campagne publicitaire en RA ou pour la réalisation d'un projet artistique.

Enfin, Azuma note que l'enregistrement, qui est déjà difficile à l'intérieur, est beaucoup plus complexe à l'extérieur pour deux raisons principales, le manque de contrôle sur l'environnement et le manque de ressources face à la puissance de traitement. Ceci fait en sorte que plusieurs possibilités d'enregistrement à l'intérieur sont impossibles à l'extérieur. Cependant, il faut noter que les applications extérieures, souvent pour la navigation, nécessitent une précision d'enregistrement beaucoup moins grande que pour les applications intérieures. Par exemple, pour des besoins de navigation à l'extérieur, une erreur de quelques mètres lorsqu'on affiche seulement une annotation sur un bâtiment est acceptable. Dans ce cas, l'utilisation d'un récepteur GPS fournit un enregistrement de précision suffisante. Pour les applications intérieures, les besoins en précision d'enregistrement sont typiquement beaucoup plus élevés, de l'ordre du centimètre

ou du millimètre. Les méthodes d'enregistrement possibles à l'extérieur se limitent donc aux récepteurs GPS ou à l'utilisation de senseurs inertiels, avec les désavantages qu'ils comportent tel que discuté précédemment. À l'intérieur, la plupart des méthodes d'enregistrement sont possibles, à l'exception évidente du GPS qui ne permet pas le positionnement intérieur vu les obstructions de signaux. Mentionnons toutefois que des travaux prometteurs visant à réaliser un enregistrement par comparaison de structures artificielles à des modèles numériques 3D ont été réalisés et semblent fournir un enregistrement satisfaisant pour des SRA en milieu urbain [REITMAYR 2006]. Il permet par exemple d'enregistrer des éléments 3D par détection des arrêtes des bâtiments du monde réel et en les comparant au modèle 3D. Il permet aussi d'effectuer un enregistrement en reconnaissant les textures des bâtiments du monde réel et en les comparant à des extraits de textures comprises dans le modèle 3D.

3.5.2 La mobilité du système

Les SRA peuvent également être classifiés selon qu'ils soient statiques ou mobiles (SRAM). Par SRAM, nous entendons les SRA qui permettent à l'utilisateur de se déplacer librement, loin des environnements contrôlés en laboratoire ou des environnements spécialement préparés pour une application de RA [FEINER 2004]. Ceci implique que toute l'architecture matérielle nécessaire au fonctionnement du système doit être transportée par l'utilisateur. Cette classification est fortement liée à la précédente. En effet, les systèmes développés pour l'opération à l'extérieur sont pratiquement tous de nature mobile alors que ceux développés pour l'intérieur sont plus souvent de nature statique. Il existe toutefois des efforts visant à développer des SRAM intérieurs, comme en témoignent les travaux de Kalkusch et son groupe de recherche qui ont développé un réseau de marqueurs afin de permettre la navigation à l'intérieur grâce à un enregistrement par balayage optique [KALKUSCH 2002]. Cette méthode, bien qu'elle permette une navigation libre à l'intérieur, exige une préparation de l'environnement, ce qui va à l'encontre de la définition proposée.

Dans un SRAM, les restrictions au niveau des unités de calculs possibles sont sensiblement les mêmes que pour les SRA extérieurs c'est-à-dire que le système doit être transporté par l'utilisateur. En conséquence des considérations ergonomiques doivent être prises en compte et le système développé doit être de volume et de poids restreint. Les ordinateurs de bureaux ne conviennent donc pas pour le développement de SRAM. Pour ce qui est des systèmes d'affichage, l'utilisation de HMD ou de PDA dans un SRAM sont toutes deux des approches satisfaisantes qui ne comportent aucun inconvénient majeur liés à la mobilité. Notons cependant que l'approche par HMD optique est généralement favorisée par rapport aux HMD vidéo puisqu'ils n'occasionnent pas de perte d'information due à la restriction du champ de vision ce qui facilite les déplacements de l'utilisateur. Enfin, l'utilisation d'affichages spatiaux est possible mais peu répandue puisqu'elle requiert une préparation de l'environnement au préalable et implique une architecture élaborée fixée dans l'espace. Ainsi, un SRAM utilisant un affichage spatial permettrait aux utilisateurs de se déplacer dans l'espace augmenté sans devoir transporter le matériel mais l'environnement d'opération et les applications possibles sont limitées.

La différence majeure entre les SRA mobiles et ceux statiques se situe donc au niveau des méthodes d'enregistrement possibles. Dans les SRA statiques, il n'y a pratiquement aucune restriction quant aux méthodes d'enregistrements possibles puisque l'environnement d'opération peut être préalablement préparé. L'enregistrement statique implique généralement le déploiement d'infrastructures imposantes et fixées à l'environnement tel les systèmes par TOF ou ceux par balayage spatial. Ces méthodes ne se prêtent pas aux SRAM puisqu'il est difficilement envisageable de couvrir tout l'espace d'opération possible. L'exception dans les systèmes TOF est évidemment le GPS qui est le système de positionnement par excellence à l'extérieur qui, une fois combiné à des senseurs inertiels permet l'enregistrement complet avec une précision satisfaisante. Le GPS est un cas particulier car la disposition des satellites en orbite autour de la terre consiste en fait en une préparation de l'environnement sur une échelle globale. En considérant la définition admise pour les SRAM, nous pourrions argumenter qu'un

SRAM intégrant le GPS comme méthode d'enregistrement ne consiste pas vraiment en un SRA mobile puisque l'environnement n'est pas sans préparation. Ceci étant dit, l'entièreté de la littérature scientifique à ce sujet s'accorde pour affirmer que le positionnement par GPS est la méthode de choix pour la conception de SRA en mobilité extérieure. En ce qui concerne la mobilité intérieure sans préparation de l'environnement, les possibilités d'enregistrement se limitent pour le moment à l'utilisation de senseurs inertiels, incluant les problèmes de dérives qui y sont associés. Il serait toutefois envisageable d'utiliser un système d'enregistrement reposant sur la reconnaissance d'éléments et leur association à un modèle numérique 3D afin d'atteindre l'enregistrement comme il a été mentionné à la section précédente. En résumé, nous pouvons constater que les SRAM intérieurs sont, pour le moment, difficilement réalisables sans préparation préalable alors que les systèmes extérieurs sont naturellement mobiles.

3.5.3 La capacité de collaboration

La dernière classification que nous proposons porte sur la capacité d'un SRA à supporter la collaboration entre utilisateurs. La collaboration en RA consiste en un partage de l'espace augmenté qui permet aux utilisateurs de visualiser et interagir avec les éléments réels et virtuel [REITMAYR 2001]. Dans la littérature scientifique, seule la distinction entre les systèmes collaboratifs et non collaboratifs est effectuée. Cependant, suite à nos expérimentations, il nous est apparu évident qu'il était possible de distinguer la collaboration locale où les utilisateurs évoluent dans un espace restreint, de celle à distance qui permet aux utilisateurs d'évoluer dans un espace plus large. Ces deux niveaux de collaboration différents impliquent des différences majeures au par rapport à l'architecture matérielle permise. C'est pourquoi nous proposons une classification en trois niveaux de collaboration, soient l'absence de capacité de collaboration, la collaboration locale et celle à distance. Chacune de ces configurations implique une architecture matérielle particulière à l'exception du cas où la collaboration est inexistante. Bien sûr, un système ne supportant pas la collaboration ne nécessitera pas de protocoles de réseautage et n'exercera aucune restriction sur les composantes de

bases possibles pour la conception du SRA. Ce type de collaboration, ou plutôt d'absence de collaboration, ne sera donc pas discuté plus en détail. Comme nous verrons dans la section portant sur la réalisation du prototype de notre système de RA, la collaboration en RA est un défi qui se situe plutôt au niveau de l'implémentation logicielle que du côté matériel.

Dans les deux cas possibles de collaboration, l'implémentation logicielle des protocoles de communication réseau est similaire mais impose des différences concernant les ordinateurs permis. Puisque la collaboration locale est plus propice aux SRA fixes la communication entre plusieurs utilisateurs peut être effectuée grâce à un seul ordinateur de bureau. Dans ce cas, le nombre d'utilisateurs possibles est limité par la ou les cartes graphiques de l'ordinateur car chacun des utilisateurs doit disposer d'une sortie vidéo au minimum pour son système d'affichage. De nos jours, la plupart des cartes graphiques supportent la connexion de deux écrans et il existe des cartes spécialisées permettant la connexion d'une plus grande quantité d'affichages. Il est également possible d'utiliser plusieurs ordinateurs branchés directement en réseau et supportant chacun un certain nombre d'utilisateurs afin de multiplier le nombre d'utilisateurs permis. L'avantage de la collaboration locale est qu'elle permet de limiter la multiplication du matériel nécessaire et de conséquemment limiter les coûts associés aux SRA collaboratifs. Elle permet d'abord de limiter le nombre d'ordinateurs impliqués mais peut également minimiser l'infrastructure nécessaire à l'enregistrement. Il est possible, par exemple, pour deux utilisateurs de profiter d'un même système d'enregistrement par balayage optique infrarouge où un seul réseau de caméras infrarouges servirait à déterminer les six degrés de liberté de chacun des utilisateurs. Dans ce cas, il suffirait d'identifier les utilisateurs grâce à une configuration différente d'émetteurs infrarouges.

Dans le cas de la collaboration à distance, la communication entre les utilisateurs est assurée par des protocoles réseau sans-fil. Dans ce cas, la multiplication complète du matériel impliqué est inévitable. En effet, chacun des utilisateurs devra disposer de son propre système d'affichage, d'enregistrement et ordinateur.

Cette technologie se prête naturellement aux SRAM puisque dans ces systèmes, les utilisateurs évoluent dans de grands espaces et disposent déjà chacun de leur propre architecture matérielle complète. Par contre, il peut également être intéressant de développer des SRA collaboratifs statiques à distance comme en témoigne le SRA développé par Billinghamurst et Kato qui vise à fournir un environnement de conférence à distance pour plusieurs participants [BILLINGHURST 2002]. Les SRA collaboratifs à distance sont sujets à des contraintes inexistantes dans le cas des systèmes locaux. Ils doivent disposer d'une connexion sans fil offrant une bande passante et un débit suffisant pour la communication entre les utilisateurs. Cette limite a le potentiel de devenir un problème majeur face à la transmission de gros volumes de données ce qui risque d'être le cas dans les SRAG.

Les SRA spatiaux face à la collaboration méritent une mention spéciale. Dans ces systèmes, la collaboration est souvent intrinsèque au système puisque les utilisateurs ne sont pas contraints à utiliser des systèmes d'affichage différents. Puisque les affichages dans le SRAS sont intégrés à l'environnement, il est possible pour plusieurs utilisateurs de visualiser une scène simultanément. Cependant, l'intégration de méthodes d'interaction permettant d'interagir simultanément avec le monde augmenté peut s'avérer beaucoup plus complexe.

	Avantages	Limites
Intérieur	Aucune contrainte de volume ou de poids, contrôle et préparation de l'environnement d'opération, grande puissance de traitement	Mobilité restreinte, diversité d'applications très limitée.
Extérieur	Applications diversifiées, avec meilleur potentiel commercial, pleine mobilité possible	Contrainte de poids et volume, autonomie limitée du système, impossibilité de contrôler ou préparer l'environnement d'opération, puissance de traitement limitée
Statique	Aucune limite pour l'architecture matérielle, possibilité d'utiliser des systèmes d'enregistrement variés, environnement d'opération contrôlé	Diversité d'applications très limitée, peu utile à l'extérieur
Mobile	Applications diversifiées avec meilleur potentiel commercial, permet les applications extérieures	Architecture matérielle plus complexe ou limitée aux composantes légères, système d'enregistrement souvent limité au GPS, puissance de traitement limitée
Individuel	Architecture matérielle simple et peu coûteuse, développement simple	Diversité d'applications plus limitée, limité à un seul utilisateur

Collaboratif	Applications diversifiées avec meilleur potentiel commercial, permet l'utilisation par plusieurs utilisateurs	Architecture complexe et coûteuse, développement d'application complexe
--------------	---	---

Tableau 3.4 : Tableau récapitulatif des classes de SRA

3.6 L'interaction en RA

Un des intérêts principaux de la RA consiste à fournir à l'utilisateur des méthodes novatrices lui permettant d'interagir avec le monde augmenté. Les méthodes traditionnelles d'interaction, telles le clavier et la souris, ne conviennent pas à la manipulation du monde augmenté puisqu'elles introduisent une interface intermédiaire qui limite l'expérience immersive vécue par l'utilisateur. Le développement de méthodes d'interaction en RA peut être vu selon deux perspectives différentes. Cela peut tout d'abord être considéré comme un obstacle puisqu'elles peuvent s'avérer complexes à implémenter de façon simple et efficace. À l'inverse, cela peut être considéré comme un avantage puisque les méthodes développées ne sont possibles que grâce à la nature particulière du monde augmenté et parce qu'elles permettent une interaction naturelle et intuitive. Évidemment, la plupart des développeurs spécialisés en RA considère les méthodes d'interaction de RA comme étant un avantage malgré les difficultés qu'elles entraînent. Pour un développeur non spécialisé dans ce domaine, comme ceux issus de la géomatique, ces méthodes peuvent devenir un obstacle dans l'interaction vu les difficultés qu'elles entraînent. Malgré cette division, les méthodes d'interaction ont été largement étudiées, plusieurs alternatives ont été proposées depuis les débuts de la RA et les désavantages de l'interaction en RA disparaissent peu à peu. Cette section vise à faire état des différentes méthodes d'interaction existantes en RA que nous avons catégorisées en deux classes, les méthodes d'interaction indirectes et celles directes.

Les méthodes d'interaction que nous qualifions d'indirectes sont celles qui nécessitent l'intervention d'un intermédiaire entre l'utilisateur et le monde augmenté avec lequel celui-ci souhaite interagir. Dans cette catégorie, nous retrouvons par exemple les méthodes traditionnelles d'interaction telles le clavier

et la souris ainsi que le « pointé-cliqué » par écran tactile, particulièrement répandu dans les appareils de types PDA. Dans ces deux cas, un utilisateur voulant sélectionner un objet virtuel du monde augmenté ne peut pas le faire directement dans l'espace réel mais doit utiliser l'interface graphique 2D du SRA. En conséquence, ces méthodes impliquent naturellement une certaine distance entre l'utilisateur et le monde augmenté, réduisant ainsi le niveau d'immersion de l'expérience. En contrepartie, ce type d'interaction comporte deux avantages indéniables, sa simplicité d'implémentation et d'utilisation. Tout d'abord, ils sont simples d'implémentation car ils n'exigent pas que le périphérique d'interaction utilisé soit situé dans l'espace réel ce qui évite le besoin d'un système d'enregistrement pouvant considérer plusieurs éléments de l'espace. Par exemple afin de permettre une interaction directe dans un SRA enregistré par GPS, il faut employer une deuxième méthode d'enregistrement pour situer le périphérique d'interaction dans le monde augmenté, ce qui n'est pas nécessaire lorsqu'une méthode d'interaction indirecte est utilisée. Deuxièmement, elles sont simples d'utilisation car ces méthodes d'interaction sont précises, c'est-à-dire qu'elles ne présentent pas d'erreur d'enregistrement qui peuvent rendre l'interaction difficile pour les utilisateurs inexpérimentés. De plus, les utilisateurs sont généralement familiers avec ces périphériques d'interaction ce qui évite le besoin de formation préalable afin qu'ils soient en mesure de composer avec le comportement de la méthode d'interaction retenue. Il faut noter que cet inconvénient est une conséquence des limites technologies actuellement existantes au niveau des systèmes d'enregistrement.

Les méthodes d'interaction directes sont les méthodes qui ne nécessitent par l'utilisation d'un intermédiaire entre l'utilisateur et le monde augmenté avec lequel celui-ci souhaite interagir. Ces méthodes nécessitent l'enregistrement du périphérique d'interaction, ce qui est à l'origine des inconvénients mentionnés précédemment. Présentement, les méthodes d'interaction directes sont majoritairement basées sur un enregistrement par vision numérique de l'outil d'interaction, donc par balayage optique, tel que discuté à la section 3.3.2. En utilisant un élément dont la configuration spatiale est connue, on détermine

d'abord sa position et son orientation ce qui nous permet de le situer dans l'espace. Par la suite, on utilise un algorithme qui détermine l'intersection de l'objet suivi avec les objets virtuels du monde augmenté. Il existe différents algorithmes bien établis pouvant être utilisés pour calculer cette intersection, notamment ceux basés sur l'intersection du plan image [PIERCE 1997] et ceux reposant sur le *Ray Casting* (jet de rayon) [ROTH 1982]. De façon résumée, la méthode d'interaction par intersection du plan image consiste à utiliser la projection 2D d'un objet 3D afin d'obtenir un effet similaire à celui d'une souris traditionnelle. La méthode du *Ray Casting* consiste à produire un rayon virtuel entre le point de vue de l'utilisateur et l'objet suivi et déterminer son intersection avec le premier objet virtuel de la scène rencontré. Les avantages principaux de ces méthodes d'interaction est qu'elles sont simples à implémenter et ne requièrent pas plus de composantes matérielles que celles déjà impliquées dans le système d'enregistrement.

Tel que mentionné, l'interaction par balayage optique peut être obtenue en effectuant un suivi de la même façon que dans les systèmes d'enregistrement, soit par suivi infrarouge, de formes [KATO 2000], ou de couleur [SYKORA 2008]. En conséquence, nous observons les mêmes inconvénients que ceux mentionnés à la section 3.3.2. Cependant, l'interaction par balayage optique donne lieu à une alternative intéressante et de plus en plus étudiée par la communauté scientifique, soit la gestuelle [SONG 2009, BUCHMANN 2004, HEIDEMANN 2004]. L'interaction par la gestuelle consiste à effectuer le suivi des mains ou des doigts de l'utilisateur et de reconnaître ses mouvements afin de poser des actions d'interaction. Par exemple, la sélection d'un objet virtuel pourrait se faire en « écrasant » l'objet virtuel entre l'index et le pouce. Le suivi de la gestuelle est très complexe à implémenter mais offre des avantages remarquables. Cette méthode offre l'interaction qui est sans doute la plus naturelle et intuitive de toutes les méthodes d'interaction par vision numérique puisqu'elle ne nécessite pas la manipulation d'un objet de sélection tel une baguette de couleur (*wand*) ou un *marker*. De plus elle permet une flexibilité des modes d'interaction selon les mouvements de la main effectués par l'utilisateur, ce qui est communément nommé interaction multimodale [KÖLSCH 2006]. Notons que certains efforts de

simplification ont eu lieu afin de concevoir des méthodes hybrides d'interaction par la gestuelle grâce à la considération des occlusions de *markers*. Cette méthode, bien que plus simple à implémenter, est pratique dans un cas restreint de scénarios d'applications, notamment dans les SRA fixes à l'intérieur [LEE 2004].

Enfin, notons une tendance actuelle dans la recherche concernant les méthodes d'interaction en réalité mixte, soit l'intégration de mécanismes de retour haptique sur l'interaction entre l'utilisateur et le monde virtuel ou augmenté. Les technologies haptiques permettent de transmettre un retour de force à un utilisateur lorsqu'il manipule un objet virtuel. Par exemple, un utilisateur qui soulève un objet virtuel pourrait sentir une pression sur ses mains visant à reproduire l'effet senti lorsque nous soulevons un objet physique. L'objectif de l'intégration de ces technologies est de reproduire l'expérience physique réelle afin de maximiser le niveau d'immersion de l'utilisateur dans le monde virtuel ou augmenté. Ces technologies existent depuis déjà plusieurs années mais se sont dernièrement raffinées de façon à pouvoir être intégrées aux SRA [VALLINO 1999, BIANCHI 2006]. Le retour sur l'interaction de l'utilisateur doit être effectué à l'aide d'appareils haptiques tels que des gants qui utilisent des mécanismes exerçant une pression sur la main de l'utilisateur afin de simuler l'objet virtuel manipulé. Bien que cet aspect soit intéressant, son utilité demeure limitée face aux SRAG puisque les interactions dans les SRAG ne visent pas la manipulation physique d'objets virtuels. Par exemple, nous ne voulons pas soulever un bâtiment mais plutôt le sélectionner afin de visualiser ses données descriptives ou le modifier, à la façon d'un SIG ou d'un CAD. Le retour haptique est plus approprié dans le cas d'applications non-géospatiales telles que les jeux vidéo ou la réhabilitation physique.

Chapitre 4 Conception d'un prototype de système de réalité augmentée geospatial

4.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons argumenté que les SCRAG sont des outils qui permettent de supporter les processus de design urbain collaboratifs plus adéquatement que les outils géospatiaux traditionnels puisqu'ils répondent à plusieurs lacunes de ces derniers. Principalement, ils offrent une meilleure compréhension de l'espace grâce à la représentation 3D, il permet des méthodes d'interaction naturelles et intuitives et permettent la communication entre les utilisateurs. Afin d'explorer le potentiel de ce type d'outil à supporter les processus de design urbain, nous avons opté de procéder par la réalisation d'un prototype de SCRAG. Pour ce faire, nous avons choisi de suivre le concept de la maquette virtuelle interactive telle que discutée à la fin du deuxième chapitre.

Ce chapitre fait état de la conception de l'architecture matérielle et logicielle du prototype. Il abordera d'abord les motivations ayant justifié le choix du scénario d'application retenu pour le développement du prototype. Il présentera ensuite le système sous ses deux aspects, soit celui de l'architecture matérielle et celui de l'architecture logicielle. Dans chacun des cas, les modèles conceptuels, ainsi que les composantes choisies seront présentés et discutés.

4.1.1 Choix du scénario d'application

Tel qu'il a été discuté lors du troisième chapitre, les SRA sont des outils versatiles qui peuvent profiter à toutes sortes de domaines d'application. Bien que plusieurs autres domaines d'application auraient pu être retenus afin de guider le

développement de notre prototype, nous avons choisi de retenir celui du design urbain car il possédait des intérêts évidents relativement à notre situation. Tout d'abord, la nature même de cette discipline nécessite l'intervention d'une grande quantité d'informations spatiales qui doivent généralement être de format 3D, contrairement à plusieurs autres domaines d'applications pour lesquels les données 2D peuvent être suffisantes. En design urbain, l'intérêt des données spatiales 3D est en grande partie justifié par le fait que la visualisation de l'espace est primordiale à la prise de décision face aux solutions conçues. Évidemment, ce besoin de visualisation 3D cadre parfaitement avec la technologie de RA qui offre justement des méthodes de visualisation et d'interaction en 3D avec les informations spatiales. Enfin, la collaboration, qui est centrale au design urbain moderne, est un axe de recherche comportant présentement un grand intérêt dans la communauté scientifique en RA, ce qui contribuait à la pertinence de nos travaux.

Le choix du design urbain comportait également des avantages financiers et logistiques face à notre situation. En effet, la conception d'outils géospatiaux innovateurs supportant le design urbain consiste présentement en un intérêt spécifique d'un groupe de recherche multidisciplinaire qui a été rassemblé peu avant que notre projet de recherche démarre. Ce projet d'initiatives de développement de la recherche (IDR) subventionné par le conseil de recherches en science humaines du Canada (CRSH) et piloté par un groupe de chercheurs multidisciplinaire du Département de géomatique et de l'École d'architecture de l'Université Laval, vise à étudier le potentiel de la géomatique au service des consultations publiques ayant trait au patrimoine religieux. Les besoins de ce groupe se rapprochant de nos propres intérêts de recherches, nous avons établi un partenariat mutuellement bénéfique. Ceci nous a permis de profiter d'une expertise en design urbain, architecture et aménagement du territoire que nous ne possédions pas au départ et de concrétiser l'application de notre prototype. De plus, ce projet CRSH-IDR s'est donné comme région d'étude l'arrondissement Sillery de la Ville de Québec, une zone géographique pour laquelle nous disposions gratuitement de données géospatiales 3D détaillées, provenant du

Centre d'information géographique et statistique (GEOSTAT) de l'Université Laval. Bien sûr, la disponibilité de données géospatiales 3D consistait en un facteur critique pour la réalisation de nos propres recherches et, comme il est encore difficile de nos jours de se procurer des données 3D gratuites de bonne qualité, cette opportunité était idéale pour notre propre recherche. Enfin, la collaboration avec ce groupe de recherche nous a permis de disposer d'un public cible spécialisé en design urbain afin de valider l'outil qui a été conçu à l'issue de nos travaux. Considérant tous les facteurs mentionnés, la combinaison du design urbain, de la géomatique et de la RA nous semblait naturelle et s'est avérée être un scénario idéal pour l'étude des SCRAG.

4.1.2 Notre position face à la réalité augmentée

Bien qu'il suscite beaucoup d'intérêt à travers le monde, la réalité augmentée demeure un sujet qui fait présentement l'objet de très peu d'études à l'Université Laval. Bien que les départements de génie électrique et d'informatique s'intéressent à certains sujets connexes à la réalité augmentée telle la réalité virtuelle ou les méthodes d'enregistrement, le département des sciences géomatiques demeure le département qui regroupe le plus grand groupe de chercheurs s'intéressant à la RA et au développement d'applications géospatiales de cette technologie. C'est également le seul département qui dispose d'un laboratoire consacré spécifiquement à la recherche et au développement basé sur cette technologie, soit le laboratoire REGARD mis sur pied en 2008. Malgré la position avantageuse du Département face à cette technologie, peu de travaux sur la RA avaient été concrétisés en date d'écriture de ce document. En conséquence, les connaissances sur la RA dont nous disposions au départ étaient très limitées par rapport à d'autres laboratoires internationaux, notamment le *Four Eyes Laboratory* (dir. Matthew Turk & Tobias Höllerer) de l'Université de Californie Santa Barbara et le *Computer Graphics and User Interface Laboratory* (dir. Steven Feiner) de l'Université Columbia de New York. Ceci a donc entraînée une longue période de mise à niveau préalable au développement du prototype.

Au cours de la réalisation de ce travail, une collaboration fut établie avec Nicolas Dedual, un chercheur du *Computer Graphics and User Interface Laboratory* afin de faciliter notre familiarisation avec cette technologie. En séjournant dans leur laboratoire pendant quelques jours, cette collaboration nous a permis de nous familiariser rapidement avec plusieurs projets marquants de l'histoire de la RA, dont le *Touring Machine* [FEINER 1997] et le *MARS* [FEINER 1999] ainsi que plusieurs autres projets courants. Cependant, ils approchent la RA sous un aspect purement informatique, délaissant en grande partie l'exploitation de données géospatiales 3D au profit de l'élaboration d'interfaces utilisateurs et de méthodes d'enregistrement.

Le laboratoire REGARD, mis sur pied en 2008, dispose d'une grande variété d'équipement destinée au développement de SRA qui a permis de réaliser ce projet de recherche. Compte tenu de la jeunesse de ce laboratoire, le matériel disponible n'avait pas été exploité de façon substantielle auparavant. Nous avons dû procéder à une longue période de test avant d'être suffisamment confortable avec les équipements, notamment les casques HMD, senseurs inertiels et caméras, pour sélectionner une architecture de système adéquate permettant le développement de notre prototype. Cette période d'expérimentation préliminaire a été réalisée en parallèle avec l'exploration de la littérature scientifique au sujet de la RA. Nous avons profité de cette période pour étudier différentes composantes de bases d'un SRA. Nous avons entre autre étudié des casques de RA optiques et vidéos, des méthodes d'enregistrement par balayage spatial optique, infrarouge, par récepteurs GPS et senseurs inertiels ainsi que différents types d'ordinateurs, dont les traditionnels, les PDA et les ordinateurs de type *Tablet*.

4.2 Architecture matérielle du prototype

Au deuxième chapitre, nous avons défini le concept général d'un outil collaboratif supportant les processus de design urbain en agissant comme maquette virtuelle interactive. Nous avons également discuté de plusieurs besoins auxquels doit

répondre cet outil afin de supporter efficacement le processus de design urbain dans son entièreté. Au troisième chapitre nous avons abordé en détail la technologie de RA, les différentes formes que les SRA peuvent prendre et discuté des composantes de bases permettant d'implémenter chacun des types de système. Il est maintenant possible d'élaborer un SRA implémentant le concept de la maquette virtuelle interactive élaboré auparavant. Pour ce faire, nous avons précisé le concept de l'outil pour ensuite sélectionner les composantes matérielles de base du système. La conceptualisation du système s'est réalisée de façon parallèle à l'étude de la littérature scientifique et a nécessité quelques périodes de test préliminaires afin de bien comprendre le fonctionnement de ces pièces d'équipement. La conceptualisation du système nous a, par la suite, permis de choisir l'architecture matérielle du système de façon à produire l'outil répondant le mieux possible aux besoins identifiés au chapitre 2. Cette section présente d'abord le modèle conceptuel du système et ensuite une discussion sur le choix des composantes de bases de notre SCRAG.

4.2.1 Modèle conceptuel du système

Le modèle conceptuel de notre système (voir la figure 4.1) traduit le concept de la maquette 3D virtuelle interactive élaboré à la section 2.5.2. Il représente l'ensemble de l'architecture matérielle et des relations entre ses composantes. Nous pouvons constater que ce modèle est divisé en deux parties. La partie gauche comprend l'ensemble des composantes nécessaires pour l'utilisateur administrateur des données géospatiales 3D. La partie droite comprend l'ensemble des composantes nécessaires pour les autres utilisateurs. Elle contient également des composantes qui se répètent, ceci sert à illustrer le fait que pour chacun des utilisateurs additionnels, il est nécessaire d'ajouter un ensemble de composants utilisateurs à l'architecture matérielle du SCRAG.

Afin de faciliter la compréhension du modèle conceptuel et des relations entre les composantes, un survol du système complet ainsi que des rôles de chacun des acteurs est de mise. L'administrateur du système est celui qui est en charge de

générer et de configurer la scène 3D grâce à une interface et des méthodes d'interaction spécifiquement conçue pour ces besoins. De l'autre côté, les utilisateurs sont ceux qui visualisent la scène et qui peuvent interagir avec elle grâce à d'autres modes d'interaction. Ceci implique donc une communication réseau basée sur le modèle client-serveur où l'utilisateur côté serveur envoie les informations mises à jour aux utilisateurs (L'implémentation du réseautage sera abordée plus en détail à la section suivante). En ce qui a trait à la configuration matérielle, précisons que tous les utilisateurs, assis autour de la table, observent le même *marker* format géant, disposé sur la table et sur lequel la scène 3D est enregistrée. Chacun des utilisateurs possède également un système de plus petits *markers* destinés à l'interaction avec les données virtuelles (l'implémentation de ces interactions sera également discutée à la section suivante). Finalement, tous les participants sont reliés à une seule unité de calcul prenant la forme d'un ordinateur de bureau. Précisons ici que le nombre d'utilisateurs est limité par les spécifications de l'ordinateur utilisé. Dans notre cas, le prototype a été développé en considérant un utilisateur administrateur et un utilisateur général. Pour un système impliquant plus de deux utilisateurs, il est nécessaire d'envisager l'ajout d'un deuxième ordinateur afin de permettre le branchement de périphériques additionnels.

Du côté administrateur, des périphériques traditionnels tels une souris, un clavier, ainsi qu'une caméra web sont mis à sa disposition afin qu'il puisse interagir avec les données géospatiales 3D. Il se sert d'abord de la caméra web afin de capter le flux vidéo de la réalité qui est ensuite transmis au logiciel. À son tour, le logiciel effectue l'enregistrement du virtuel au réel et compose la scène augmentée, représentant les données virtuelles superposées à la réalité. Cette scène augmentée est ensuite retransmise au moniteur de l'administrateur qui reçoit la scène du point de vue de la caméra web. Pour effectuer les modifications aux données, l'administrateur utilise les périphériques traditionnels afin d'interagir avec l'interface de gestion. Lorsque les modifications sont confirmées, la scène 3D originale est transmise au logiciel qui applique la mise à jour à la scène avant de la rediffuser à tous les utilisateurs. À ce point, tous les utilisateurs disposent de la

scène 3D mise à jour et enregistrée au marker de façon à être visualisée selon la perspective de chacun d'eux. Selon cette façon de procéder, l'administrateur est le seul utilisateur qui peut modifier la scène 3D (ajouter ou enlever des éléments par exemple) alors que les autres sont limités à la visualisation des données seulement (voir figure 4.1).

Du côté client, les utilisateurs sont munis de casques HMD vidéos afin de visualiser et interagir avec la scène 3D. La caméra web intégrée au casque de RA de l'utilisateur capte un flux vidéo de la réalité et le transmet au logiciel qui effectue ensuite l'enregistrement du virtuel au réel. La scène est ensuite retournée aux écrans des casques et l'utilisateur peut finalement visualiser la scène de son point de vue personnel. Pour interagir avec la scène, l'utilisateur dispose d'une interface non-conventionnelle, basée sur la technologie de la RA, qui sera détaillée à la section suivante. Cette interface lui permet, entre autres, de sélectionner des éléments virtuels de la scène et de visualiser ses propriétés descriptives. L'opération réalisée par l'utilisateur est alors transmise au logiciel qui exécute les fonctionnalités associées à l'opération avant de retourner la scène mise à jour à l'utilisateur.

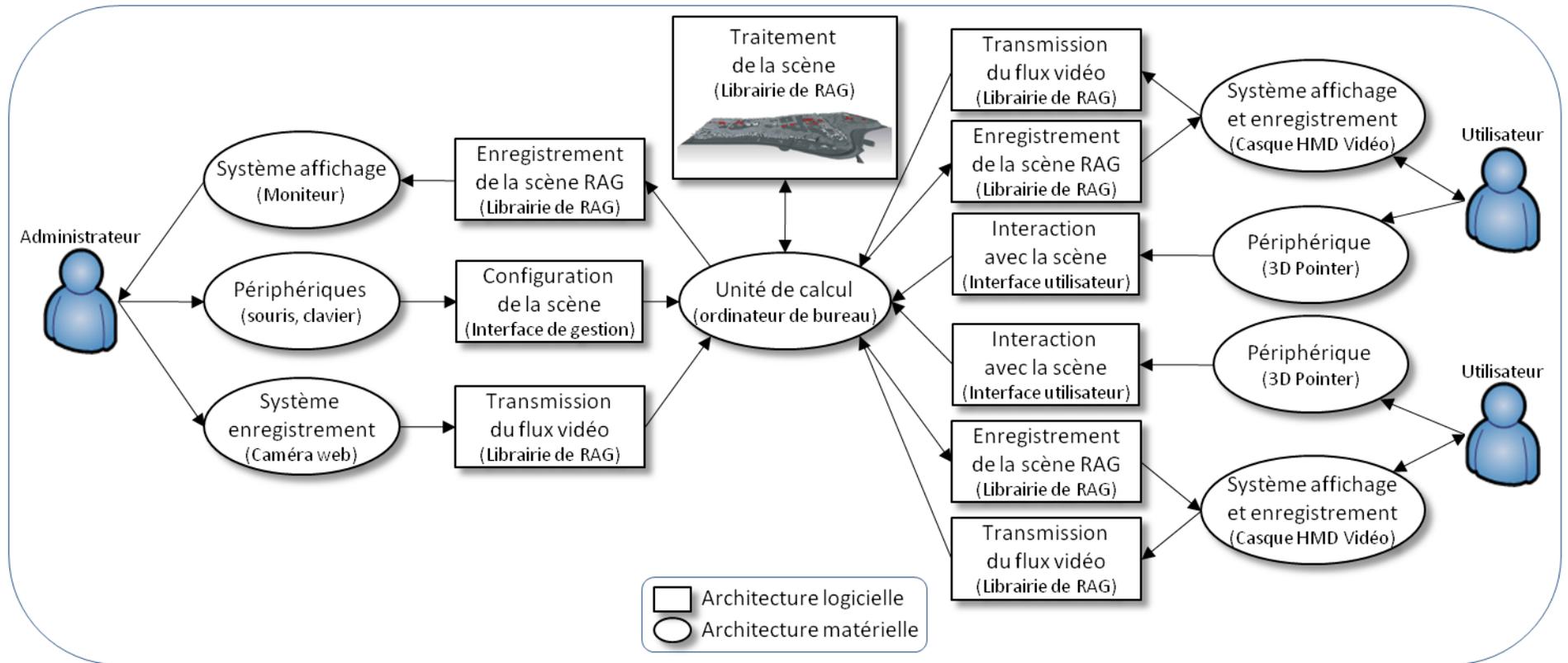


Figure 4.1 : L'architecture matérielle et le fonctionnement du prototype de SCRAG

4.2.2 Choix des composantes de bases

En considérant le concept discuté à la section précédente, nous pouvons identifier un type de SRA susceptible de répondre le mieux possible aux besoins. En effet, le choix de créer un SRA agissant comme table de visualisation collaborative et permettant aux utilisateurs d'interagir simultanément avec la maquette virtuelle implique que les utilisateurs seront réunis au même endroit et au même moment. Ceci a plusieurs répercussions sur le choix du type de SRA qui répondra le mieux possible aux besoins des processus de design urbain collaboratifs. Premièrement, nous pouvons en déduire que le système peut être développé dans un environnement intérieur donc contrôlé, ce qui a des conséquences majeures sur les méthodes d'enregistrement et le type d'ordinateur utilisé permis. Deuxièmement, le système peut être implémenté de façon statique puisque la table de visualisation demeure au même endroit tout au long de l'utilisation du système. Ceci a également une incidence majeure sur le choix du type d'ordinateur et des systèmes d'affichage permis. Enfin, le concept retenu favorise l'implémentation d'une collaboration locale puisque les utilisateurs doivent être réunis au même endroit afin de favoriser la communication directe entre ceux-ci. Cet aspect du système entraîne des conséquences majeures tant sur l'architecture matérielle que logicielle. Au niveau de l'architecture matérielle, la collaboration locale exigera l'intégration de plusieurs systèmes d'affichages tout en permettant l'utilisation d'un seul ordinateur. Ayant établi que le SCRAG à concevoir et développer sera statique, opéré à l'intérieur et implémentera la collaboration locale, nous pouvons maintenant choisir concrètement le matériel qui composera le système.

Unité de calcul

Compte tenu du type de SRA retenu, nous avons choisi de n'utiliser qu'un seul ordinateur de bureau auquel tous les participants seront branchés afin d'interagir simultanément avec le système. Ceci comporte plusieurs avantages, le principal étant la grande flexibilité du système face aux autres composantes matérielles et au logiciel qui sera développé. En effet, un ordinateur de bureau permet par exemple de brancher plusieurs systèmes d'affichage ou d'implémenter la collaboration directe ou à distance,

ce que permettent difficilement les ordinateurs portables et pas du tout ceux de type PDA. De plus, ces ordinateurs possèdent une plus grande puissance de traitement ce qui peut s'avérer utile lorsque plusieurs utilisateurs interagissent simultanément avec un grand volume de données, comme c'est le cas lors de l'utilisation de SIG 3D collaboratifs. L'utilisation d'un ordinateur de bureau nous permet également d'éviter les limitations en alimentation du système puisqu'il demeure branché à une source fixe tout au long de sa mise en opération. Enfin, mentionnons également que nous étions davantage familiers avec ce type d'ordinateur que les PDA par exemple, ce qui a simplifié le développement par la suite.

Système d'affichage

Pour la conception du prototype, nous avons choisi d'utiliser deux types d'affichages, soient un moniteur traditionnel pour l'administrateur de l'outil et plusieurs casques de RA vidéo pour les utilisateurs. Comme nous le verrons dans la section suivante, nous avons conçu le logiciel de façon à ce que l'administrateur interagisse avec une interface différente de celle des utilisateurs, lui permettant un contrôle plus détaillé mais moins intuitif de la scène. La conséquence de cette interface plus détaillée est qu'elle nécessite des méthodes d'interaction plus précises que pour les utilisateurs qui utilisent une interface simplifiée et intuitive. Ainsi, l'administrateur du système, responsable de la configuration des scènes 3D pour les utilisateurs, dispose d'un écran traditionnel pour visualiser la scène. Du côté utilisateur, nous avons choisi d'utiliser des casques de RA afin de maximiser l'immersion des utilisateurs dans l'environnement 3D. Ceci leur permet une compréhension et une interaction plus naturelle et intuitive de l'espace, facilitant l'utilisation du système par un public non-expert. En effet, les casques permettent aux utilisateurs d'utiliser les mouvements naturels de leur corps afin d'interagir avec la scène. Par exemple, un utilisateur peut simplement déplacer sa tête afin de modifier son point de vue de la scène 3D.



Figure 4.2 : Le système d'affichage retenu,
le Vuzix iWear VR920

Comme casque de RA, nous avons choisi d'utiliser le modèle iWear VR920 produit par la compagnie Vuzix. Ce modèle possède plusieurs avantages majeurs dont son faible prix d'environ 600\$ (Canadien) qui le rend aisément accessible pour la recherche académique. De plus, le casque est conçu de façon à pouvoir monter une caméra web adaptée sur le cadre pour en faire produit compact qui est très ergonomique et léger. Ceci nous évite de devoir amalgamer nous-même une caméra web à un casque, ce qui constituerait un système plus fragile et moins ergonomique que le casque de Vuzix. Enfin, le branchement du casque et de la caméra à l'ordinateur se fait très simplement, grâce à des prises USB standard, ce qui a grandement facilité le développement de notre librairie de RAG. Pour une fiche technique plus complexe, nous invitons le lecteur à consulter un extrait de la brochure publicitaire, en Annexe A.

Systeme d'enregistrement

Afin d'enregistrer la maquette virtuelle à l'environnement physique réel et de permettre certaines méthodes d'interactions intuitives, nous avons opté de procéder par balayage optique basé sur la reconnaissance de formes géométriques (Voir section 3.4.2). Il est possible d'utiliser cette méthode dans notre situation car le prototype à développer est statique et sera utilisé exclusivement à l'intérieur, donc dans un environnement d'opération contrôlé. L'enregistrement par reconnaissance de formes possède plusieurs avantages qui nous ont incités à le retenir. C'est une méthode qui est particulièrement efficace lorsque les *markers* n'ont pas être déplacés brusquement, ce qui est le cas avec la table de visualisation où le *marker* principal est celui qui couvrira la table afin d'y

superposer la scène 3D. Elle traduit bien le concept de la maquette virtuelle interactive puisque les utilisateurs n'ont qu'à se déplacer autour de la table afin de visualiser la scène 3D sous différentes perspectives, de façon similaire aux maquettes physiques conventionnelles. Notons également que cette méthode d'enregistrement est une des plus simples à implémenter puisqu'il existe plusieurs bibliothèques de fonctions implémentant cette méthode et la documentation les concernant est généralement abondante. De plus, elle offre un enregistrement robuste et très peu dispendieux, lorsqu'on la compare aux autres méthodes comme l'enregistrement par infrarouge par exemple.

4.3 Architecture logicielle du système

Disposant d'une architecture matérielle fonctionnelle, nous avons ensuite procédé à la conceptualisation d'un logiciel permettant d'exploiter le SCRAG conçu. De façon similaire à l'élaboration de l'architecture matérielle du système, il a été nécessaire de sélectionner nos composants logicielles avant d'établir un modèle conceptuel de notre logiciel. Avant d'arrêter notre choix d'architecture logicielle, nous avons dû tester plusieurs différentes composantes logicielles possibles avant d'arrêter notre choix. Dans cette section, nous présenterons seulement l'architecture logicielle retenue pour le développement de notre logiciel ainsi que le modèle conceptuel élaboré. L'implantation du logiciel fera l'objet de la section 4.4.

Nous avons choisi de nommer le logiciel conçu *GeoGoblinXNA* puisqu'il est basé sur une bibliothèque de fonctions déjà existante nommée *GoblinXNA*, qui sera abordée plus en détail à la section suivante. Cette bibliothèque, développée par le *Computer Graphics and User Interface Laboratory* de l'Université Columbia de New York consiste en une intégration de différentes bibliothèques nécessaires à l'implantation d'applications de RA et RV collaboratives. En conséquence de ce choix, le langage de programmation *Microsoft Visual C#* a dû être retenu puisque *GoblinXNA* est développé exclusivement dans ce langage. *C#* s'est tout de même avéré un langage de programmation exceptionnellement pratique par rapport aux autres langages avec lesquels nous étions

familiers (*Visual Basic, C, C++*). C'est un langage de très haut niveau et fortement orienté objet qui met plusieurs outils à la disposition du développeur afin de faciliter sa tâche. Il offre notamment de très bonnes capacités de débogage, un mécanisme de « ramasse-miette » qui récupère la mémoire non utilisée d'un logiciel ainsi que des mécanismes tels les interfaces, classes et délégués de fonctions.

4.3.1 Choix des composantes logicielles

Une fois les composantes de bases choisies, plusieurs choix technologiques doivent être effectués avant de pouvoir développer le logiciel d'exploitation. En effet, la mise en opération du système doit se faire par l'intermédiaire d'un logiciel permettant aux utilisateurs d'interagir avec le système et les données. Évidemment, le développement de ce logiciel sera fortement dépendant des composantes logicielles qui seront retenues. Au moment où nous avons débuté nos travaux de recherche, il n'existait pas de standards pour le développement de logiciels de RA. À ce jour, certaines démarches ont été entreprises afin de définir des standards pour rendre la technologie de la RA plus facilement accessible et commercialisable [PERCIVALL 2011, HILL 2010]. Cependant, le développement de ces standards en est encore aux étapes préliminaires, ils sont encore bien loin d'être adoptés par la communauté scientifique élargie. En conséquence, il existe toujours plusieurs options possibles dont certaines sont mieux documentées ou plus susceptibles de répondre aux besoins que d'autres. Avant de choisir les composantes de notre logiciel, nous avons dû procéder à une étude des différentes possibilités et évaluer celles qui nous permettraient de répondre le mieux possible à nos besoins, soit la représentation en 3D des données géospatiales, la capacité de collaboration entre plusieurs utilisateurs et une grande utilisabilité à travers des mécanismes d'interaction intuitifs.

Enregistrement, moteur 3D et réseautage

Tel que mentionné, nous avons choisi d'utiliser *GoblinXNA* comme base pour développer le logiciel d'opération de notre prototype. *GoblinXNA* est une plateforme de développement dont l'objectif est de faciliter la recherche en RV et RA. Elle intègre toutes les composantes qui nous permettaient de répondre aux besoins visés par le

système, soient un moteur 3D pour gérer les données 3D, une librairie d'enregistrement par balayage optique et une librairie de réseautage pour permettre la collaboration entre les utilisateurs. Le choix d'utiliser cette plateforme de développement peut sembler être évident de prime abord, ce qui ne fut pourtant pas le cas. En effet, une longue période de recherche et d'essais avec d'autres composantes possibles a été nécessaire avant de trouver cette plateforme de développement. Ceci est sans doute dû au fait que *GoblinXNA* est d'abord le fruit de quelques chercheurs seulement et est surtout utilisé à l'interne par ce groupe de recherche. En conséquence, ce n'est qu'après une longue période de consultation des travaux d'autres groupes de recherche et d'essais avec d'autres composantes possibles que nous avons découvert *GoblinXNA*. Le fait que cette plateforme intègre déjà moteur 3D, réseautage et enregistrement nous a permis de nous concentrer plus en détails sur d'autres considérations telles les interfaces et les méthodes d'interaction. Il aurait été possible d'intégrer nous-même chacune des composantes nécessaires, ce qui nous aurait permis d'utiliser les composantes de notre choix, par exemple, un moteur 3D plus commun tel que Direct 3D ou OpenGL. Il aurait également été possible d'utiliser un autre système d'enregistrement comme l'enregistrement par infrarouge ou par couleur. Ceci aurait toutefois impliqué un temps de développement beaucoup plus long. Comme l'intention était plutôt de valider la capacité de la RA géospatiale à supporter le processus de design urbain, nous avons choisi l'option nous permettant le développement d'une application plus poussée.

Pour effectuer l'enregistrement des éléments virtuels à la réalité, *GoblinXNA* permet l'utilisation d'une de deux librairies d'enregistrement, chacune basées sur la reconnaissance de formes [KLEIN 2006, MALIK 2002, KATO 1999]. La première *ARToolKit*, est une des librairies d'enregistrement les plus populaires et les mieux documentées sur le web. Cette librairie offre une seule méthode d'enregistrement, soit celle par la reconnaissance de *markers* en noir et blanc. La deuxième librairie, ALVAR est une librairie développée par le *VTT Technical Research Center of Finland* est une récente addition à *GoblinXNA* et permet un enregistrement beaucoup plus flexible selon différentes méthodes. Cette deuxième librairie s'est cependant avérée plus difficile à utiliser qu'*ARToolKit*. Nous avons donc choisi d'utiliser cette dernière, en raison de sa simplicité et de toute la documentation existante.

Le fonctionnement d'*ARToolKit* repose sur des principes bien établis de vision numérique permettant d'effectuer la reconnaissance de formes géométriques sous le format de *marker*. En utilisant un *marker* dont la géométrie est connue, il est possible de déterminer la transformation à appliquer afin d'enregistrer une scène 3D au *Marker*. Il faut noter ici que le procédé d'enregistrement par *marker* varie en complexité selon l'architecture matérielle retenue. En effet, l'enregistrement dans un SRA utilisant un système d'affichage de type *Video See-Through* est plus simple que celui utilisant un système d'affichage de type *Optical See-Through*. Dans le premier, il suffit de déterminer la relation entre la caméra et le *marker* alors que dans le deuxième, les relations entre les yeux de l'utilisateur, la caméra, l'écran optique et le *marker* doivent être déterminées. De plus, l'utilisation d'un affichage *Optical See-Through*, implique également une phase de calibration du système. L'encadré suivant résume le processus d'enregistrement vidéo, pour de plus amples informations, nous référons le lecteur aux travaux de Rekimoto pour l'approche vidéo [REKIMOTO 1996] et à ceux de Kato et son équipe de recherche pour l'approche optique [KATO 1999].

L'enregistrement d'une scène virtuelle au monde réel, par l'intermédiaire de *markers*, se définit par les relations entre les différentes composantes du système :

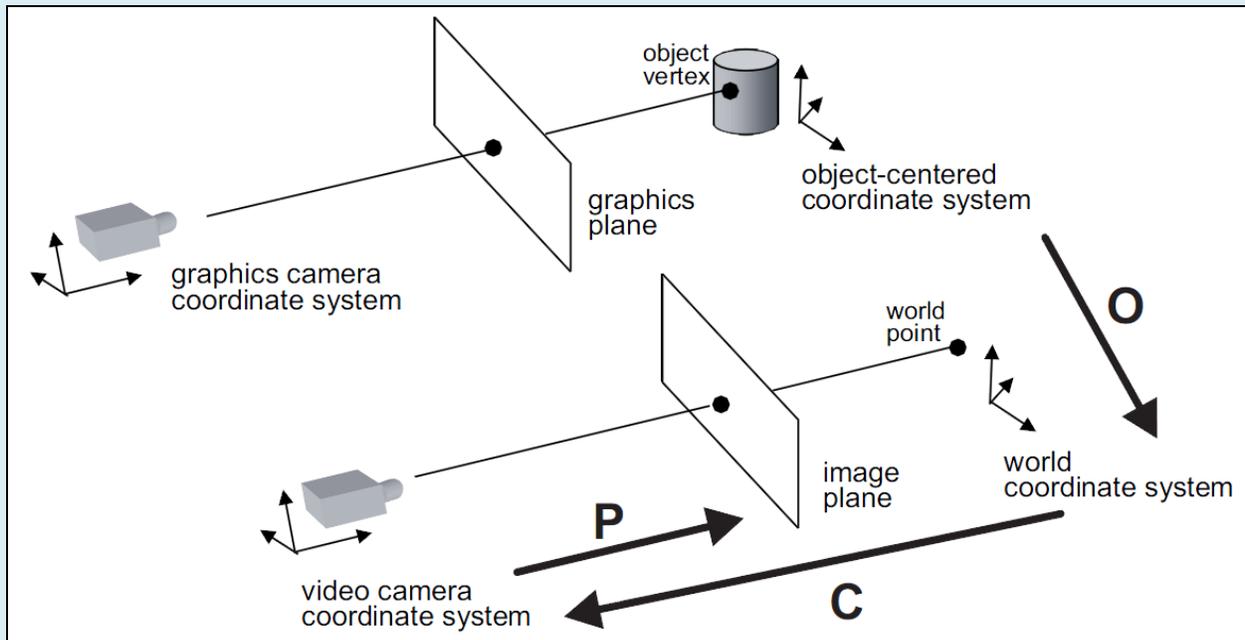


Figure 4.3 : Schéma illustrant les relations entre les objets virtuels et le monde réel [VALLINO 1998]

- M_o : Matrice de transformation qui permet de passer du référentiel de l'objet virtuel à celui du *marker*, situé dans le monde réel.
- M_c : Matrice de transformation (rotation, translation) qui permet de passer du référentiel du *marker* à celui de la caméra.
- M_p : Matrice qui permet de projeter le monde 3D sur l'écran 2D où le monde augmenté est affiché.

Ainsi, le système d'équation permettant d'ajouter l'objet virtuel au système d'affichage HMD vidéo s'exprime de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = M_p M_c M_o \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \\ W_v \end{bmatrix} = T_{iv} \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \\ W_v \end{bmatrix}$$

Où les indices V et W signifient respectivement les coordonnées de l'objet virtuel et les coordonnées dans le plan image, affiché sur l'écran du HMD. Pour obtenir les composantes des matrices, divers paramètres de la scène doivent être connus :

M_o : Les composantes de cette matrice sont définies par l'utilisateur. C'est celui-ci qui détermine la position et l'orientation de l'objet virtuel dans la

scène augmentée.

M_C : Les paramètres extrinsèques de la caméra doivent être connus pour définir cette matrice. Dans notre cas, nous les obtenons en évaluant la déformation du *marker*.

M_P : Les paramètres intrinsèques (ex : longueur focale) de la caméra doivent être connus pour définir cette matrice. Nous les obtenons par calibration de la caméra.

Pour la gestion et la représentation de modèles 3D, *GoblinXNA* fait appel à *Microsoft XNA Game Studio Express*, un environnement de développement gratuit axé envers la création de jeux vidéo pour la console *XBox*. C'est un moteur 3D de très haut niveau qui fait l'abstraction de détails de base et offre une librairie exhaustive de classes et fonctions qui simplifient le développement d'applications graphiques 3D. Dans notre cas, l'avantage principal d'utiliser XNA est sa simplicité. En effet, la programmation avec moteurs 3D est une branche de programmation qui devient rapidement complexe et avec laquelle nous n'étions pas familiers au départ. Si nous avions opté pour un moteur 3D de base, tel *OpenGL*, nous aurions dû investir beaucoup plus de temps avant d'obtenir des résultats satisfaisants. Un autre avantage important de XNA Game Studio est la prise en charge de formats de graphismes 3D standardisés (les fichiers de format *.x* et *.fbx*). Ceci nous a permis de rapidement convertir nos données 3D en modèles 3D grâce à un logiciel de dessin spécialisé comme *Autodesk* pour ensuite les utiliser dans notre logiciel. Cet avantage est déterminant puisque la création de graphismes 3D exige beaucoup de temps (et de talent artistique).

Enfin, *GoblinXNA* fait appel à la librairie de réseautage *Lidgren* qui permet la communication entre applications clients et serveurs. *Lidgren* est basée sur l'envoi et la réception de messages entre les utilisateurs. Ainsi, l'application serveur doit communiquer un message de mise à jour aux applications clients qui peuvent ensuite appliquer la mise à jour. Elle permet de réaliser des applications multi utilisateurs connectés à distance ou localement, sur le même ordinateur. C'est par défaut que nous avons choisi d'utiliser cette librairie, parce qu'elle était déjà disponible dans la plateforme *GoblinXNA*.

En résumé, nous comprenons que l'aspect que nous recherchions, pour chacune des composantes, était la simplicité. L'utilisation de composantes faciles à implémenter a grandement simplifié notre apprentissage et nous a permis de concentrer nos efforts sur le développement de la capacité SIG 3D de notre outil plutôt que sur des apprentissages de base en RA.

4.3.2 Modèle conceptuel du logiciel

L'ensemble des composantes logicielles choisies nous permet de conceptualiser un logiciel d'exploitation de notre SCRAG. La figure 4.3 représente graphiquement l'architecture du logiciel ainsi que les relations entre les différentes composantes de celui-ci. Le développement du logiciel a occupé la majeure partie du temps de développement du SCRAG. Dans ce cas-ci, le développement du logiciel s'est réalisé de façon incrémentale, c'est-à-dire que chacune des composantes a été implantées une à la fois, question de se familiariser avec chacune d'elle. Une fois confortable avec l'ensemble de *GoblinXNA*, nous avons procédé à la construction de *GeoGoblinXNA* qui a, par la suite, permis de développer notre logiciel d'exploitation.

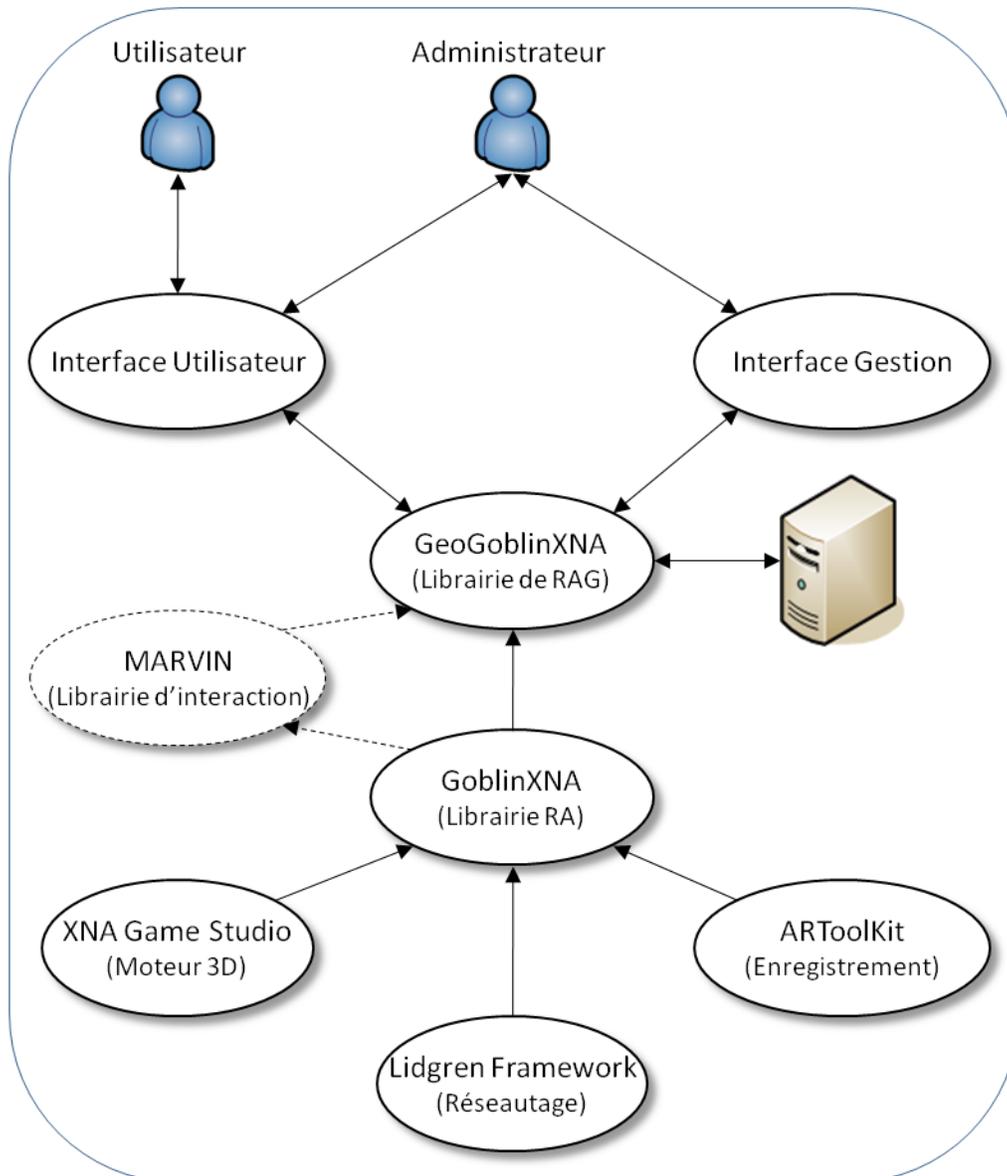


Figure 4.4 : Architecture logicielle du prototype de SCRAG

L'objectif de *GeoGoblinXNA* était d'abord de simplifier l'utilisation de *GoblinXNA*, ensuite d'offrir des capacités géospaciales similaires à celles que l'on retrouve dans les logiciels de type SIG et enfin d'implémenter des méthodes d'interaction et de collaboration en RA. Ainsi, *GoblinXNA*, qui est composé de la librairie d'enregistrement *ARToolKit*, du moteur 3D *Microsoft XNA Game Studio Express* et de la librairie de réseautage *Lidgren*, constitue la base de notre librairie *GeoGoblinXNA*. Par la suite,

GeoGoblinXNA s'est inspiré de l'application *MARVIN* afin d'implémenter des méthodes d'interaction de RA basée sur la manipulation de *markers*. *MARVIN* est une application développée antérieurement par un collaborateur, Nicolas Dedual, dans le but d'explorer des méthodes d'interaction en RA. Son intégration a nécessité une transformation majeure et a fait l'objet d'un travail collaboratif intensif entre ce chercheur et notre équipe sur une période d'environ un mois. Grâce à *GeoGoblinXNA*, nous avons conçu notre logiciel d'exploitation qui comprend deux interfaces d'utilisation soit celle destinées aux administrateurs et celle destinée aux utilisateurs généraux. De façon résumée, la première permet d'effectuer des modifications à la scène, la deuxième permet l'interaction avec les données. L'administrateur peut accéder à chacune alors que l'utilisateur général n'a accès qu'à l'interface utilisateur.

Chapitre 5 Implémentation et expérimentation de la solution retenue

5.1 Introduction

Au chapitre précédent, nous avons détaillé le concept de l'architecture matérielle et logicielle de notre SCRAG. L'implantation de notre solution, qui a été réalisée au cours de la troisième étape de notre méthodologie, vise à concrétiser nos concepts et créer un prototype de notre système. Dans cette section, nous présentons les axes majeurs de développement ayant dirigé l'étape d'implantation de la solution. Bien que nous les présentions de façon séquentielle, le développement s'est plutôt déroulé de façon itérative. C'est-à-dire que nous implantions d'abord chacun des aspects de la solution de façon parallèle afin de disposer d'un système complet, nous permettant ensuite d'évaluer sa capacité à répondre à nos besoins et identifier les prochaines pistes de développement. Par la suite, nous reprenions une autre itération de développement, suivant le même déroulement.

Tout au long de cette étape, nous avons suivi une approche fortement orientée objet afin de construire le logiciel d'exploitation de notre prototype. Ainsi, nous avons développé une des classes d'objets qui constituent la base fondamentale de notre logiciel et qui permettent le développement de tous les éléments du logiciel telles les interfaces, les méthodes d'interaction ou le réseautage. De très nombreuses classes d'objets inter reliées ont dû être développées afin de bien répondre aux besoins identifiés précédemment. En raison la grande quantité de celles-ci, nous avons choisi de seulement présenter les classes d'objets les plus importantes dans la construction de notre prototype. Nous avons également choisi de les aborder selon les différents aspects du logiciel, de façon à simplifier la compréhension du lecteur. Ce chapitre détaillera d'abord le développement du prototype qui s'est déroulé sur une période d'environ un an et demi, soit de septembre 2008 à mars 2010. Par la suite, nous ferons

état d'une phase d'expérimentation ayant été réalisée auprès de différentes catégories d'utilisateurs et nous discuterons des résultats obtenus.

5.2 Implémentation de la solution

5.2.1 La structure de données de base

Tel qu'il a été mentionné précédemment, la librairie que nous avons développée afin de supporter notre logiciel, *GeoGoblinXNA*, est basée sur une librairie déjà existante, *GoblinXNA*. Les structures de données utilisées par *GoblinXNA* afin de stocker une scène 3D reposent sur un concept similaire à celui d'*OpenSceneGraph*, c'est-à-dire un arbre hiérarchique où chacun des nœuds en aval est affecté par ceux en amont. Ce type d'arbre est très répandu dans les applications de graphisme 3D et particulièrement dans le cas des jeux vidéo. C'est une structure de données qui permet le regroupement d'objet reliés qui partagent certaines caractéristiques. Ceci permet de spécifier les caractéristiques d'un groupe à partir d'un seul endroit [OSG 2010]. La structure de données de *GoblinXNA* comprend plusieurs nœuds, calqués sur ceux d'*OpenSceneGraph*, dont les principaux sont les suivants (figure 4.4, 4.5) :

- Nœud de géométrie : Contient les modèles graphiques 3D à visualiser
- Nœud de transformation : Contient la transformation à appliquer en aval
- Nœud de *marker* : Contient les informations associées au *marker*
- Nœud Racine : Contient la racine du graphe de scène

Cette structure de données est particulièrement pratique lorsque les objets doivent être positionnés relativement à d'autres objets, comme c'est généralement le cas dans les jeux vidéo. Par exemple, si nous souhaitons modéliser un bras humain, nous aurons un nœud de transformation associé à chacune des articulations de celui-ci. Ainsi, lorsqu'une transformation est appliquée au coude, la main et les doigts seront également affectés. Cette façon de fonctionner est particulièrement adaptée aux besoins d'animations d'objets mais n'est pas adaptée à la modélisation d'objet contenant des références spatiales. En effet, elle implique que chacun des modèles soit

centré à l'origine contrairement aux données géospatiales qui sont généralement construites en intégrant directement la référence spatiale. Considérant ceci, nous avons conçu une nouvelle structure de données simplifiée qui intègre directement les nœuds de transformations aux éléments géospatiaux, de façon à permettre la référence spatiale. La figure 5.1 résume les modifications apportées à la structure de données originale, nous y retrouvons deux exemples de scènes équivalentes dans chacune des bibliothèques. La figure 5.2 détaille la structure spécifique de deux nouveaux objets conçus, soient les *GeoMarker* et les *GeoFeature*

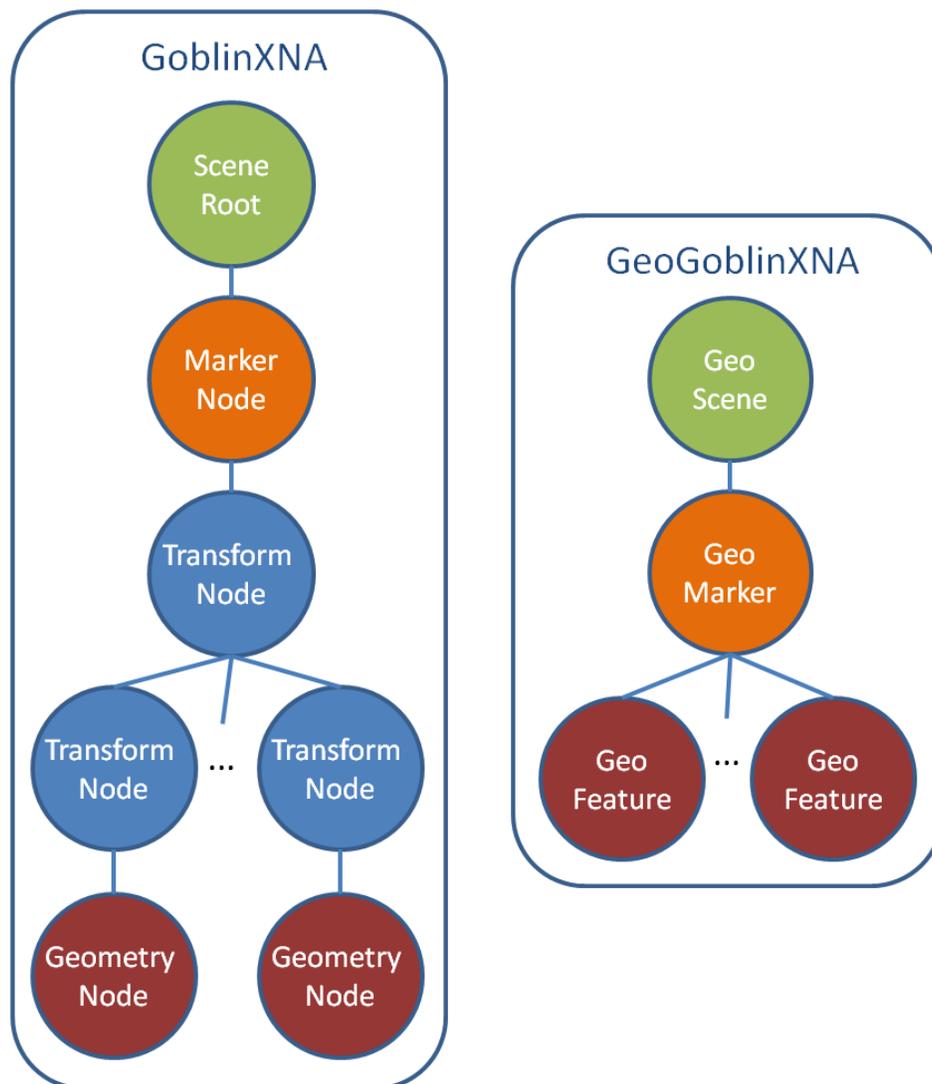


Figure 5.1 : La structure d'une scène de *GoblinXNA* et celle de *GeoGoblinXNA*

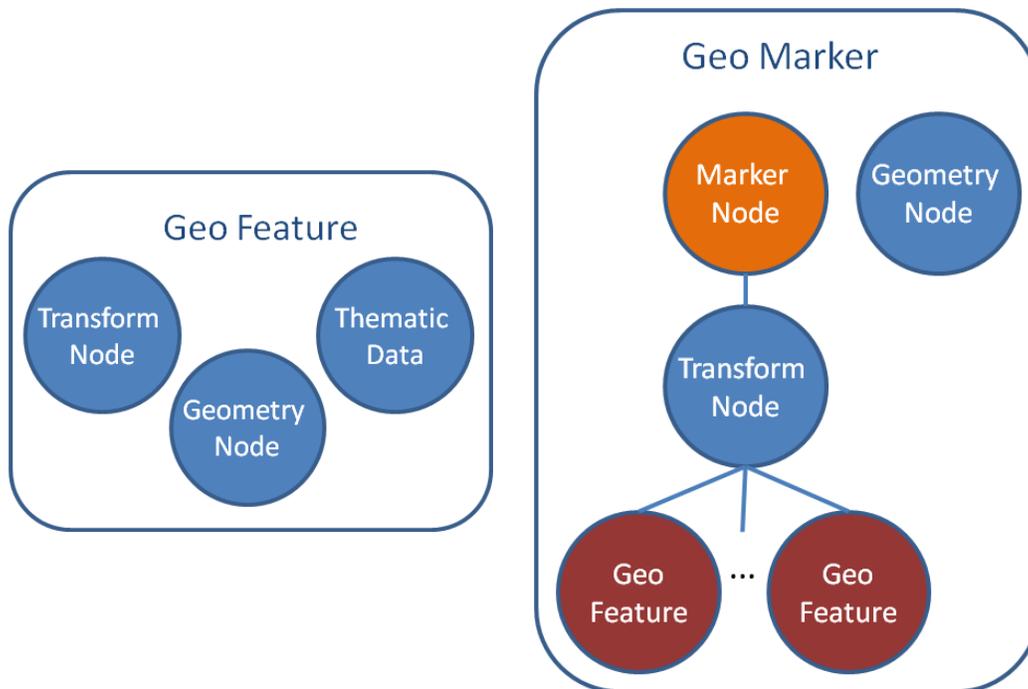


Figure 5.2 : La structure des objets GeoFeature et GeoMarker

Le nœud *GeoMarker* de *GeoGoblinXNA*, consiste en un nœud *marker* de *GoblinXNA* auquel est connecté un nœud de transformation. Ceci permet d'appliquer facilement des transformations à une scène 3D entière, par exemple un changement d'échelle ou une translation. Il intègre également une liste de *GeoFeature* qui contient tous les éléments géospatiaux de la scène tels que le terrain, les bâtiments ou les routes, et qui est superposée au *marker*. Les nœuds *GeoFeature*, quant à eux, contiennent d'abord un nœud de transformation auquel est connecté un nœud de géométrie. Ceci permet de conserver la référence spatiale d'un objet en appliquant des transformations locales aux objets. Les *GeoFeatures* contiennent également un nouvel objet, que nous avons nommé *GeoAttribute* et qui permet de stocker les données thématiques associées à l'élément. Évidemment, nous avons dû programmer le comportement de chacun de ces nouveaux objets en prévoyant des fonctions de création, d'initialisation, d'ajout, de destruction, de chargement, de sauvegarde, etc. Bien que ceci ait exigé l'investissement de beaucoup de temps de développement au départ, la création du logiciel a été grandement simplifiée par la suite.

De façon résumée, la structure de données résultante est plus rigide que celle de *GoblinXNA* mais permet de stocker plus simplement les données géospatiales 3D en faisant abstraction de nœuds de transformation intermédiaires. Cette structure offre deux avantages principaux face à la manipulation des données géospatiales 3D. Tout d'abord, elle permet de conserver les informations de bases d'un SIG, soient la référence spatiale et les données thématiques. Deuxièmement, l'abstraction des nœuds de transformation permet de simplifier grandement la structure de données. En effet, la gestion des nœuds de transformation, dans une scène 3D, peut rapidement confondre le programmeur qui n'est pas familier avec le principe des graphes de scène. Cet avantage a été particulièrement évident lors du développement de l'interface, où une équipe d'étudiants de baccalauréat a participé. Ces étudiants, ont pu bénéficier de ces nouvelles classes d'objets afin de construire une partie de l'interface permettant d'ajouter et d'enlever des éléments de la scène. Il leur suffisait alors de créer des objets de type *GeoFeature* et de les ajouter aux *GeoMarker*. L'ajout d'un objet équivalent au *GeoFeature*, avec *GoblinXNA*, aurait impliqué une multitude d'étapes dont la création d'un nœud de transformation, la création d'un nœud de géométrie, l'initialisation de chacun d'eux et enfin le rattachement au nœud de transformation associé au *marker*.

Dans cette section, seulement les changements majeurs ayant été apportés à la structure de donnée de *GoblinXNA* ont été résumés. La discussion détaillée de tous les changements que nous avons apportés à la structure originale nécessiterait beaucoup plus d'explications qui deviendraient rapidement lourdes et inintéressantes. Pour plus de détails, les lecteurs intéressés sont invités à communiquer avec l'auteur de ce document (Bruno.St-Aubin.1@Ulaval.ca).

5.2.2 Création des interfaces

Une fois les composantes logicielles sélectionnées et la structure de données bien définie, nous avons tourné notre attention vers le développement des interfaces permettant aux différentes catégories d'utilisateurs d'opérer le système. Afin de permettre l'interaction entre l'utilisateur, le système et les données géospatiales 3D, nous avons choisi de concevoir une interface divisée en deux parties, la première

destinée à l'administrateur du système et la deuxième pour les utilisateurs généraux. Le développement de l'interface a été facilité par l'utilisation de la structure de données que nous avons détaillée à la section précédente. En effet, comme nous avons adopté une approche fortement orientée objet, la structure de données, une fois développée possédait toutes les fonctions nécessaires à sa manipulation et configuration par les utilisateurs. Il suffisait donc de prévoir une interface graphique facilement utilisable et permettant de faire appel à ces fonctions de façon logique et conviviale. Dans cette optique, nous avons tenté de prendre en considération le niveau de connaissance et de familiarité moyen de chacune des catégories d'utilisateur énoncées. Cette section aborde les détails de la création des deux volets de l'interface tout en discutant des raisons ayant motivés la conception de l'interface.

Interface administrateur

Dans notre concept de système, nous avons choisi d'implémenter une interface spécifiquement destinée à l'administrateur du système dont la fonction est de créer et de configurer la scène 3D géospatiale avec laquelle les utilisateurs généraux pourront interagir grâce à une autre interface. Une fois la scène créée, l'administrateur peut la transférer aux utilisateurs qui verront leur propre scène 3D mise à jour selon les modifications apportées par l'administrateur. Ainsi, c'est l'administrateur qui possède la capacité de concevoir et modifier une scène 3D, si les utilisateurs veulent une modification à la scène, ils doivent demander à l'administrateur de l'appliquer. Nous avons choisi de procéder ainsi pour deux raisons principales, dont la première est la complexité élevée de l'opération de création et configuration de scène 3D. En effet, la création d'une scène implique l'intervention d'une grande quantité de fonctions (résumées au tableau 5.1). Ces opérations, doivent être possibles afin de favoriser une bonne visualisation et interprétation des données 3D mais comportent peu d'intérêt pour les utilisateurs généraux. Deuxièmement, en limitant la capacité de modifier la scène à l'administrateur seulement, ceci permet d'assurer un contrôle sur la scène 3D et d'éviter les conflits qui pourraient survenir lorsque plusieurs utilisateurs tenteraient de modifier la scène. L'interface administrateur a donc été conçue dans le but de permettre la configuration d'une scène 3D géospatiale de façon simple et rapide par

l'administrateur. Considérant la complexité de l'opération de création et configuration d'une scène 3D en RA, il est nécessaire de disposer d'une interface permettant l'affichage d'un maximum d'information sur les données géospatiales. Nous avons donc choisi de procéder en utilisant une interface traditionnelle *Windows* puisque les interfaces utilisateurs en RA ne permettent pas un affichage assez riche pour les besoins de l'administrateur. Ceci nous permet donc d'utiliser un moyen d'interaction basé sur les périphériques conventionnels tels le clavier et la souris. L'utilisation de périphériques conventionnels était nécessaire puisque l'interface administrateur est beaucoup plus complexe que l'interface des utilisateurs généraux et requiert des moyens d'interaction plus précis, qui ne sont pas sujets au bruit de l'interaction en RA.

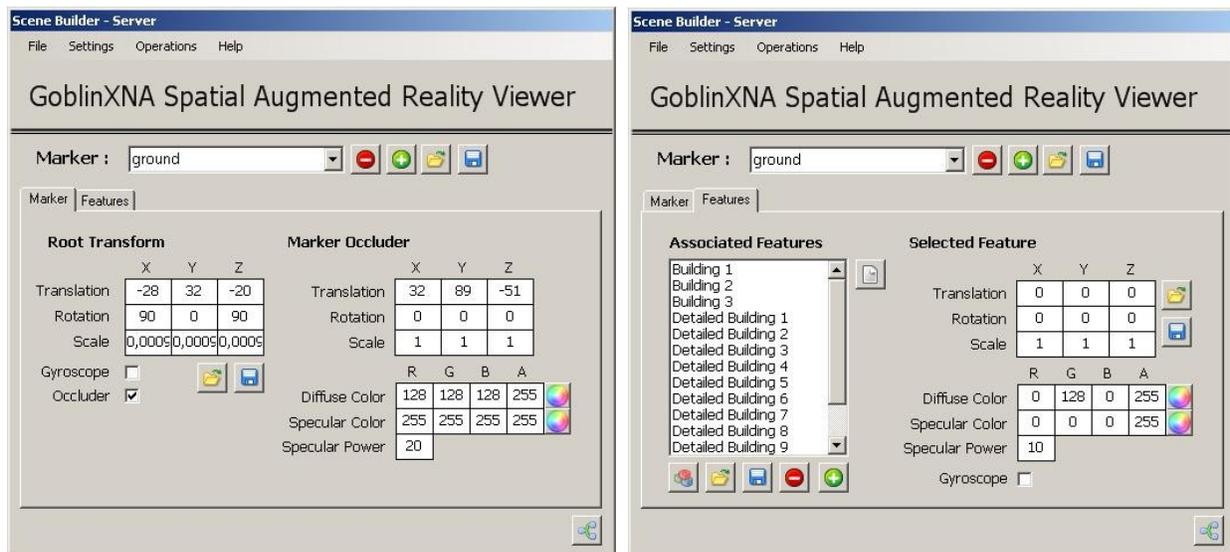


Figure 5.3 : L'interface administrateur, l'onglet permettant de configurer un *marker* (gauche) et l'onglet permettant de configurer les *GeoFeatures* associées (droite)

Cette interface permet d'effectuer une variété d'opérations sur les données, à l'image des SIG traditionnels. Elle permet d'abord de positionner la scène et ses composantes de façon relative au *marker* afin que l'utilisateur puisse disposer d'une visualisation satisfaisante. Elle permet aussi d'ajouter et modifier les données descriptives associées à chacun des éléments de la scène. Elle permet également de configurer plusieurs *marker* de façon à afficher différentes scènes 3D géospatiales sur différents *markers*, ce qui pourrait s'avérer particulièrement utile dans le cas où plusieurs alternatives doivent être présentées aux utilisateurs. Elle permet ensuite de modifier la couleur de

tous les modèles représentés, de façon à mettre en évidence certaines parties de la scène. Elle donne aussi l'accès à plusieurs opérations que nous ne pouvons pas apercevoir sur la figure 5.3, notamment la configuration de la source lumineuse virtuelle de la scène, la configuration de la caméra utilisée, la préparation de requêtes descriptives pour visualisation future ou le transfert de données entre différents *markers*. Enfin une autre capacité importante de l'interface est celle de sauvegarder et de recharger une scène 3D, soit en partie ou en totalité. Pour ce faire, nous avons choisi de procéder en sauvegardant des paramètres de la scène dans un fichier .xml, ce qui permet de la reconfigurer lors du rechargement d'une scène existante. Ceci nous a permis de contourner une lacune importante de notre système, soit l'absence d'une base de données pour conserver nos données. Notons que c'est consciemment que nous avons choisi cette approche puisque l'intérêt de cette recherche est d'étudier le potentiel de la RA pour l'exploration de données géospatiales 3D et non de s'attarder sur les bases de données géospatiales en 3D. Il serait possible et même souhaitable d'intégrer une base de données géospatiale 3D concrète à notre système. Ceci permettrait une gestion des données plus rigoureuse, sécuritaire et efficace.

Bien que cette interface soit beaucoup plus complexe que celle de l'utilisateur général, comme nous le verrons dans la section suivante, elle demeure relativement simple par rapport à celles que l'on retrouve dans les outils traditionnels de géomatique. D'ailleurs, la période d'expérimentation, qui fera l'objet de la section 5.4, démontre que des utilisateurs non-experts sont en mesure de l'utiliser sans trop de difficultés. Néanmoins, plusieurs modifications visant à optimiser l'interaction devraient y être apportées avant de pouvoir considérer l'outil vraiment apte à supporter la création et la configuration d'une scène 3D. Faute de temps et parce que l'objectif n'était pas de créer un outil de qualité professionnel mais bien démontrer le concept, nous avons préféré consacrer plus d'énergie à d'autres aspects du logiciel.

Fonction	Description
GeoScene.addMarker	Ajouter un <i>GeoMarker</i> initialisé à la scène géospatiale 3D
GeoScene.removeMarker	Retirer un <i>GeoMarker</i> de la scène géospatiale 3D
GeoScene.initScene	Initialiser un <i>GeoScene</i>
GeoScene.transferModel	Transférer un modèle d'un <i>GeoMarker</i> vers une autre
IOHelper.xmlWriteScene	Sauvegarder le <i>GeoScene</i> dans un fichier <i>.xml</i> externe
IOHelper.xmlReadScene	Charger un <i>GeoScene</i> à partir d'un fichier <i>.xml</i> externe
QueryHandler.executeQuery	Exécuter une requête descriptive sur les données géospatiales qui composent le <i>GeoScene</i>
GeoMarker.addChild	Ajouter un nœud de type <i>GeoFeature</i> à un <i>marker</i> déjà existant
GeoMarker.removeChild	Retirer un nœud de type <i>GeoFeature</i> d'un <i>marker</i> déjà existant
GeoMarker.addGround	Ajouter un fond de style « feuille de papier » qui vient cacher le <i>GeoMarker</i> lors de la visualisation
GeoFeature.setMaterial	Modifier la couleur d'un objet de type <i>GeoFeature</i> faisant partie de la scène 3D géospatiale
GeoFeature.setModel	Associer un modèle 3D à un <i>GeoFeature</i> de la scène 3D géospatiale
GeoFeature.copyGF	Générer une copie « dure » d'un <i>GeoFeature</i> de la scène 3D géospatiale
FrmSettings.updateMarkerData	Modifie la configuration d'un <i>GeoMarker</i>
FrmSettings.updateFeatureData	Modifie la configuration d'un <i>GeoFeature</i>
FrmSettings.refreshMarkerData	Mettre à jour l'interface administrateur selon la configuration d'un <i>GeoMarker</i>
FrmSettings.refreshFeatureData	Mettre à jour l'interface administrateur selon la configuration d'un <i>GeoFeature</i>

Tableau 5.1 : Résumé des fonctions principales de l'administrateur

Interface utilisateur

Tel que décrit par notre concept de système, l'interface que nous avons conçue pour les utilisateurs généraux vise un maximum d'utilisabilité en intégrant des méthodes d'interaction naturelles et intuitives permettant de naviguer dans la scène, de sélectionner des éléments de celle-ci et de visualiser les données descriptives des éléments sélectionnés. Afin de limiter le niveau d'expertise nécessaire de ces

utilisateurs non-experts, la scène 3D doit d'abord être créée et configurée à priori par un administrateur du système et ensuite transmise aux utilisateurs. Par la suite, les utilisateurs généraux utilisent l'interface basée sur les technologies de RA qui permet de visualiser et d'interagir avec la scène 3D mise à jour. Ainsi, les utilisateurs ne possèdent pas directement la capacité de concevoir une scène géospatiale 3D, ils doivent communiquer avec l'administrateur de la scène pour demander des changements à la scène. L'interface conçue n'utilise pas de périphériques traditionnels mais plutôt un système de *markers* afin de mettre tous les outils d'interaction nécessaires à la disposition de l'utilisateur. L'intérêt principal de cette méthode est de permettre à l'utilisateur d'interagir physiquement, grâce aux mouvements naturels du corps humain, avec la scène 3D. Dans cette section, nous décrivons d'abord les composantes de l'interface utilisateur et ensuite la technique utilisée afin de permettre l'interaction entre le virtuel et le réel. La figure 5.4 est une capture d'écran de la perspective d'un utilisateur à partir du casque de RA qu'il porte sur la tête. Elle nous permet d'apercevoir les outils dont dispose l'utilisateur afin d'interagir avec la scène 3D.

Le premier mécanisme d'interaction existant, et le plus simple, est celui qui permet de déplacer la perspective de la scène en déplaçant la caméra autour du *marker* de grand format disposé sur la table de visualisation. Selon le système conçu, l'utilisateur dispose d'un casque de RA vidéo qui lui permet d'utiliser ce mécanisme afin de changer de perspective en effectuant un déplacement de la tête. Puisque la scène demeure toujours au même endroit relativement au *marker* de grand format disposé sur la table de visualisation, la perspective de l'utilisateur du modèle change. Grâce au *marker*, dont la disposition des formes est connue, *ARToolKit* permet de déterminer la transformation à appliquer au modèle afin d'obtenir l'angle de vue correspondant à la position approximative des yeux de l'utilisateur. C'est ce mécanisme qui permet de reproduire le concept de la maquette énoncé à la fin du deuxième chapitre.

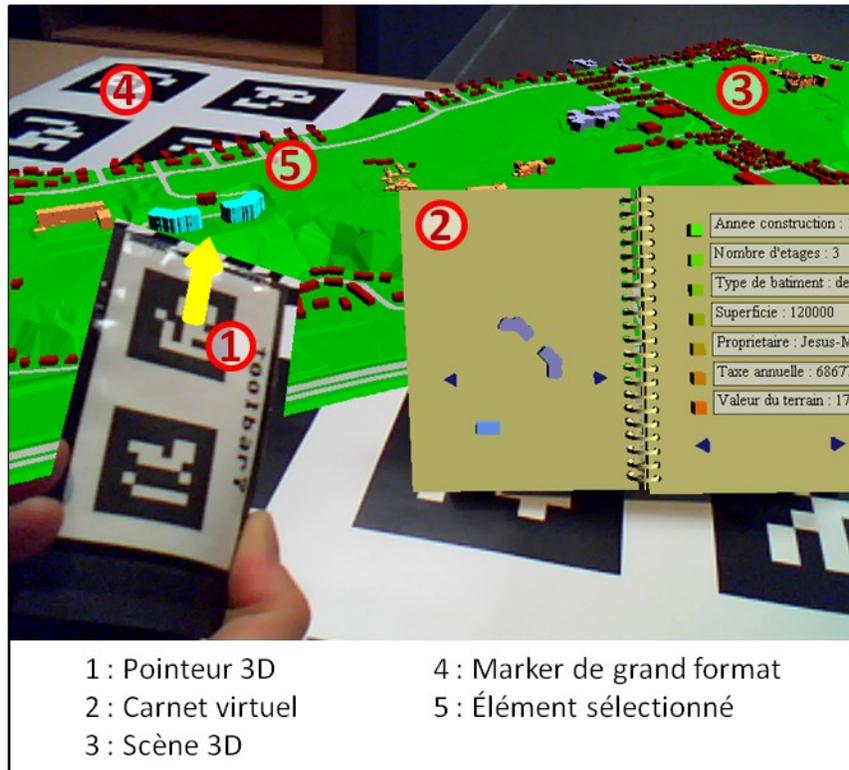


Figure 5.4 : L'interface utilisateur

Le second mécanisme d'interaction permet de sélectionner les éléments de la scène grâce à un système de pointeur 3D et de visualiser les données descriptives associées à ceux-ci. Pour ce faire, l'utilisateur doit tenir un *marker* collé à l'endos d'une souris conventionnelle. La souris est nécessaire ici afin de pouvoir utiliser l'événement *click* déclenché lorsqu'un bouton est pressé. Le déclenchement de cet événement permet de lancer les fonctionnalités nécessaires à la sélection d'objets. Sur le *marker*, une flèche agissant de curseur 3D est superposée afin de donner un guide visuel à l'utilisateur pour la sélection d'objets. L'utilisateur dispose également d'un carnet de notes virtuel, lui aussi associé à un autre *marker* de petite taille. Dans ce carnet virtuel, l'élément présentement sélectionné est affiché sur la page de gauche alors que ses données descriptives sont affichées sur la page de droite. Sur chaque page de droite est affiché jusqu'à sept attributs descriptifs différents, pour changer de page, il suffit de cliquer, avec le pointeur virtuel, sur la flèche bleue de droite ou de gauche (voir la figure 5.4). Enfin, sur la page de gauche se situe un bouton bleu non-identifié qui sert à afficher les résultats de la requête, telle que préparée par l'administrateur ainsi que deux flèches

qui permettent d'appliquer une rotation au modèle du livre pour des besoins de visualisation. Afin de concrétiser ces deux outils d'interaction, nous avons dû concevoir et implémenter des structures de données qui décortiquent chacun des outils en leurs composantes élémentaires, tel qu'on peut voir à la figure 5.5. Le système du carnet de notes et du pointeur virtuel est le résultat d'une fusion avec une application développée par Nicolas Dedual, un collaborateur de ce projet provenant du *Computer Graphics and User Interface Laboratory* de l'Université Columbia à New York. Cette application nommée MARVIN visait à étudier spécifiquement les méthodes d'interaction basées sur les *markers*. Son intégration à notre système a nécessité une période de travail collaboratif de quelques semaines où des changements majeurs ont dû être apportés à l'application initiale afin de la rendre compatible avec *GeoGoblinXNA*.

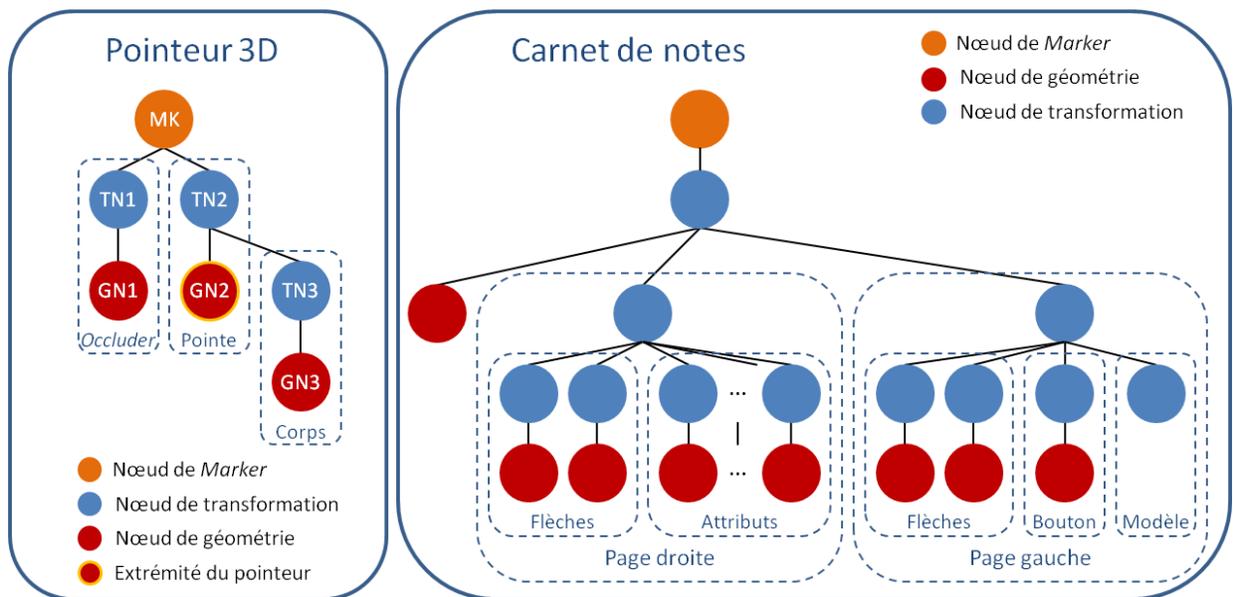


Figure 5.5 : Les structures de données du pointeur 3D et du carnet de notes virtuel

Sélection d'un objet de la scène 3D

Afin de pointer et sélectionner, le pointeur 3D utilise le principe que nous avons rapidement abordé au chapitre 3, soit celui de l'intersection avec le plan image. On arrive à déterminer s'il y a intersection entre le pointeur et un objet de l'image en appliquant les étapes suivantes pour chacun des éléments de la scène :

1. On détermine les coordonnées du point 0,0,0 d'un objet de la scène dans le système de coordonnées global de la scène.
2. On projette le résultat obtenu en 1, depuis le système global de la scène (3D) vers le système de coordonnées écran (2D). Ceci nous permet d'obtenir la position X et Y à l'écran du point 0,0,0 de l'objet de la scène.
3. On détermine les coordonnées du point 0,0,0 de la pointe de la flèche du pointeur dans le système de coordonnées global de la scène.
4. On projette le résultat obtenu en 3, depuis le système global de la scène (3D) vers le système de coordonnées écran (2D). Ceci nous permet d'obtenir la position X et Y à l'écran du point 0,0,0 de la pointe de la flèche.
5. On calcule la distance X,Y entre les deux points projetés. Si elle est en dessous du seuil choisi, une intersection a lieu.

Voici un extrait du code permettant d'obtenir les coordonnées écran d'un *GeoFeature* de la scène :

```
public Vector3 getGeoFeatureScreenCoords(int[] index)
// *****
// Entrée : int[] index, l'index du marker et du geofeature dont on cherche
//          les coordonnées écran
// Objectif : Calculer la position écran d'un GeoFeature
// Sortie : homog_ScreenCoords, La position écran du GeoFeature identifié
//          par index en coordonnées homogènes
// *****
{
    Vector3 homog_buildingScreenCoords = new Vector3();
    Vector3 inhomog_buildingWorldCoords = new Vector3();
    Vector4 homog_buildingWorldCoords;

    homog_buildingWorldCoords = Vector4.Transform(ORIGIN,
        geoScene.Markers[index[0]].Children[index[1]].WorldTransformation *
        geoScene.Markers[index[0]].WorldTransformation;

    inhomog_buildingWorldCoords = new Vector3(homog_buildingWorldCoords.X,
        homog_buildingWorldCoords.Y, homog_buildingWorldCoords.Z);

    homog_buildingScreenCoords =
        graphics.GraphicsDevice.Viewport.Project(inhomog_buildingWorldCoords,
            State.ProjectionMatrix, State.ViewMatrix, Matrix.Identity);

    return homog_buildingScreenCoords;
}
```

Figure 5.6 : Extrait de code permettant d'extraire les coordonnées écran d'un *GeoFeature*

En procédant de façon similaire, nous pouvons obtenir les coordonnées écrans de n'importe quel élément de la scène, incluant ceux qui composent le carnet de note virtuel ainsi que tous les *GeoFeatures*. Par la suite, il suffit de procéder de la même façon afin de déterminer les coordonnées de la pointe de la flèche du pointeur 3D et vérifier s'il y a intersection avec l'élément pointé. Une fois qu'il y a intersection, plusieurs événements peuvent se produire, selon l'objet sélectionné. Par exemple, lorsqu'un nouveau *GeoFeature* est sélectionné, le carnet de notes virtuel est mis à jour afin d'afficher les informations du *GeoFeature* en question. Lorsqu'une des flèches de la page gauche est sélectionnée, le modèle du *GeoFeature* qui est affiché dans le carnet de note virtuel effectue une rotation, permettant de le visualiser sous différents angles. C'est grâce à ce mécanisme que l'utilisateur arrive à interagir avec la scène.

Dans cette procédure de sélection, nous avons déterminé le seuil de distance d'intersection de façon empirique, suite à plusieurs essais avec le pointeur 3D. Il faut noter que cette distance doit être sélectionnée en considérant les données géospatiales contenues dans la scène 3D. En effet, plus le seuil de distance d'intersection fixé est petit, plus la précision de sélection sera élevée. En contrepartie, un seuil de distance fixé trop bas pourrait rendre la sélection d'éléments difficile, voir impossible. En conséquence, il faut le fixer en considérant la complexité de la scène, le nombre d'éléments géospatiaux qu'elle contient, la dimension et la distribution spatiale de ceux-ci. Par exemple, une scène où il y a peu d'éléments géospatiaux qui sont éloignés ne nécessiterait pas un seuil aussi petit que celui d'une scène où il y a une grande quantité d'éléments géospatiaux rapprochés. Ainsi, dans un contexte de navigation à l'extérieur, le seuil pourrait être fixé plus bas pour faciliter la sélection puisque dans cette situation la modélisation est typiquement limitée aux centroïdes des éléments géospatiaux.

5.2.3 Implantation de la capacité de collaboration

Selon le concept de l'outil élaboré au chapitre 2, la collaboration entre les utilisateurs doit être implantée de façon à ce que ceux-ci soient réunis au même endroit et au même moment. Ce contexte d'opération nous permet de profiter d'une première condition qui vient simplifier l'implantation de cet aspect de notre prototype. Puisque les

utilisateurs sont au même endroit, il est possible de procéder par connexion directe des utilisateurs à l'ordinateur du système. Ceci nous évite de passer par des intermédiaires plus complexes d'implantation et moins stable tels la communication par internet mais ne nous empêche pas d'évaluer la capacité de la RA à supporter le travail collaboratif. Nous avons également choisi de construire un système où seul un utilisateur, l'administrateur de la scène, possède les moyens pour créer et configurer une scène 3D. Ce mode de collaboration fait en sorte qu'il est possible d'utiliser des protocoles de communication réseau simple, basés sur une transmission unidirectionnelle des mises à jour, du côté serveur vers celui du client. Nous avons choisi de procéder ainsi afin de faciliter notre introduction à cette branche de programmation. Ceci nous a permis de limiter les ressources utilisées, tant au niveau du temps de développement que du matériel nécessaire. De plus, nous avons créé deux modes d'interaction basés sur le rôle respectif des utilisateurs administrateurs et généraux. Dans le premier cas, l'administrateur possède une interface lui permettant de créer et configurer une scène alors que l'utilisateur général possède une interface lui permettant de visualiser la scène et analyser les données qu'elle contient. Il suffit donc d'implanter une façon de transmettre la scène aux utilisateurs afin qu'ils puissent ensuite la visualiser. Il aurait été nécessaire d'investir beaucoup de temps afin permettre d'autres modes de collaboration, par exemple une collaboration horizontale entre les utilisateurs ou une collaboration bidirectionnelle où les utilisateurs peuvent configurer la scène et transmettre les mises à jours à tous les utilisateurs (Voir figure 5.7). L'inclusion de cette capacité pourrait être envisagée dans les itérations futures de développement de notre système.

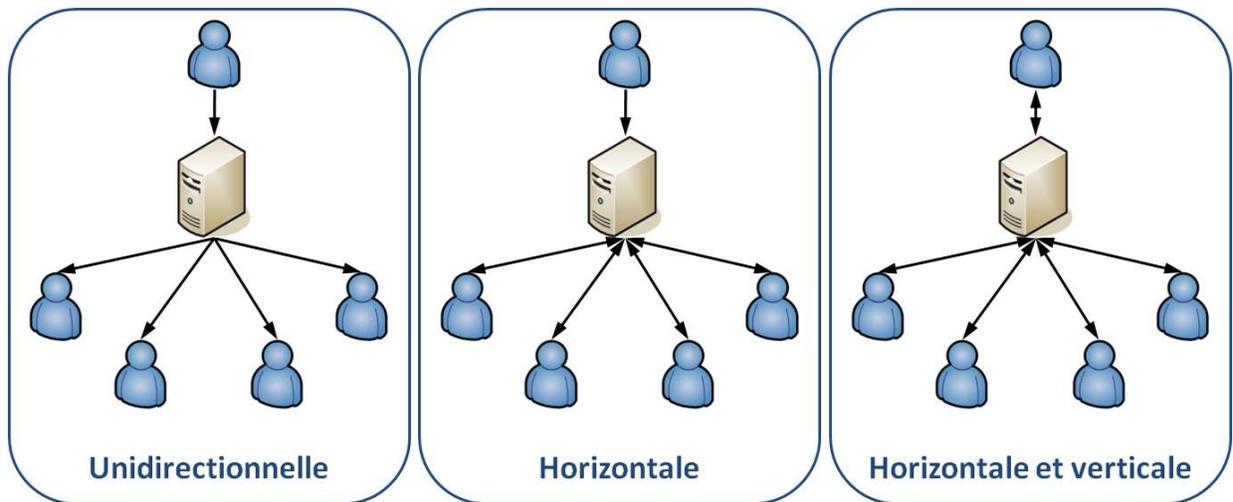


Figure 5.7 : Trois modes de communication réseau possibles

GoblinXNA prévoit un objet interface destiné à faciliter la communication réseau entre une application serveur et une application client (*INetworkObject*). Un objet interface est une classe d'objet partielle, où seulement une partie des propriétés et méthodes d'un type d'objet sont définies. Ce type d'objet peut donc servir de base pour l'implantation de différents types d'objets dérivés de la classe partielle. Nous avons donc utilisé cette classe d'objet partiel afin de définir notre propre classe d'objet destinée à faciliter la communication réseau entre les utilisateurs.

Afin d'expliquer comment nous avons intégré la communication réseau dans notre logiciel, nous procéderons en résumant de façon conceptuelle les détails d'implémentation. La première étape est d'initialiser le logiciel selon que l'utilisateur soit administrateur ou non. Ceci a nécessité l'ajout d'une interface de lancement où l'utilisateur pouvait spécifier son rôle. Par la suite, le logiciel est initialisé à l'état client ou serveur grâce à la librairie de réseautage *Lidgren* incluse dans *GoblinXNA*. Elle permet de créer un objet serveur qui attend les connexions client, et un objet client qui attend d'être connecté à un serveur. Une fois l'initialisation effectuée, on crée l'objet facilitant la communication réseau et on lui assigne la fonction à exécuter lorsque l'administrateur souhaitera transmettre la scène aux clients. La transmission de la scène s'effectue lorsque l'administrateur appuie sur un bouton de son interface qui lance la fonction de transfert de scène aux utilisateurs clients. Une fois cette fonction exécutée, les

utilisateurs clients reçoivent la scène mise à jour et peuvent visualiser les changements effectués par l'administrateur du côté serveur.

La communication réseau entre plusieurs applications s'effectue par la transmission de messages codés par *byte*. Ainsi, les objets à transmettre doivent être convertis dans ce format de donnée de base avant d'être transmis. Concevoir une fonction permettant de transformer une scène 3D complète en *byte* est une opération complexe qui dépasse nos compétences et surtout, le temps que nous disposons. Au départ, nous comptions profiter de la capacité qu'offre *C#* de définir les classes d'objets comme étant *serializable*. La *serialization* d'un objet sert à le convertir automatiquement en format *byte* dans le but de le transmettre à un autre utilisateur. Dans *C#*, pour qu'un objet soit *serializable*, tous ceux qui le composent doivent également l'être. En conséquence, il a été impossible de créer nos objets comme étant *serializable* puisque ceux sur lesquels ils sont basés, soient les objets de graphes de scène en *GoblinXNA*, n'ont pas été créés de façon à supporter la *serialization*. Nous avons donc été contraints de contourner cette limite en utilisant une stratégie peu élégante. Lorsque le serveur lance la fonction de transmission des mises à jour de la scène, une sauvegarde de la scène est effectuée. Par la suite le chemin d'accès à cette scène, un *string*, est transformé en *byte* et envoyé au client. Enfin le client reçoit le chemin d'accès, efface la scène courante et recharge la sauvegarde de la scène mise à jour par le serveur.

Bref, malgré toutes les considérations prises afin de simplifier l'implémentation de la collaboration, elle est demeurée complexe à intégrer à notre prototype et les résultats obtenus n'ont pas été à la hauteur de nos attentes. Cette limitation de notre prototype sera abordée plus en détail à la section 5.5 qui portera un regard critique sur le système développé.

5.3 Conception d'une ville numérique 3D

Jusqu'à maintenant, nous avons porté peu d'attention aux données utilisées afin d'implanter notre prototype car nos intérêts principaux se situent au niveau des méthodes d'interaction et de la collaboration entre les utilisateurs. Cependant, nous

avons tout de même du consacrer une bonne partie du temps de développement à préparer les données afin qu'elles soient compatibles avec le moteur 3D du prototype ainsi que son concept général de SIG 3D. La problématique de modélisation géospatiale 3D de façon générale et plus spécifiquement pour les applications de RA sont des sujets à part entière qui ne font pas partie du sujet d'étude de ce projet de recherche. Toutefois, nous présentons dans cette section les données que nous avons utilisées, les motivations du choix de ces données ainsi que les raisons pourquoi leur intégration fut complexe.

En raison du contexte du design urbain et du projet CRSH-IDR auquel nous avons contribué, nous avons choisi comme zone de test le secteur de Sillery de la Ville de Québec. Ce secteur d'étude se prêtait bien à nos besoins car le Centre Géo/Stat de l'Université Laval possédait déjà un jeu de données 3D le couvrant. Cependant, très peu d'informations étaient disponibles sur l'origine de ce jeu de donnée et des méthodes employées pour le modéliser. Nous avons tout de même réussi à apprendre que les données 3D avaient été captées et traitées par le Groupe Trifide et pour la Ville de Québec. C'est donc la Ville de Québec qui a fourni l'extrait du jeu de données concernant Sillery au Centre Géo/Stat de l'Université. D'après Benoit Fiset, technicien géomatique de la Ville de Québec, l'acquisition des données 3D aurait été réalisée par captage stéréoscopique sur une longue période débutant en 1994. De plus, le jeu de données qui nous a été fourni serait un modèle de niveau de détail (*Level of Detail*) minimal de façon comparée aux modèles couramment utilisés par la Ville.

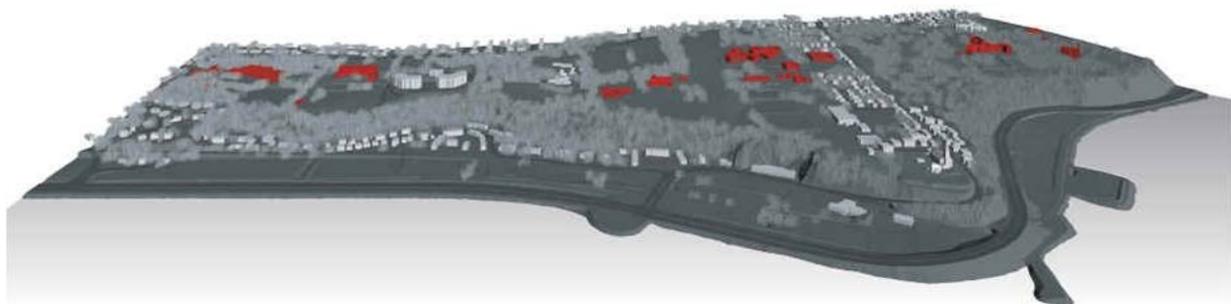


Figure 5.8 : L'extrait du jeu de données couvrant le secteur Sillery

Afin d'en apprendre plus sur le jeu de données à notre disposition, nous les avons d'abord explorées grâce à un logiciel de dessin 3D professionnel, soit *AutoDesk 3Ds Max*. Nous avons premièrement remarqué que nos données étaient sous format *AutoCAD*, ce qui est facilement utilisable avec *3Ds Max* mais impossible à intégrer à notre prototype. Heureusement, *AutoDesk* permet de convertir facilement le format *AutoCAD* en format compatible avec XNA (*.fbx* ou *.x*). Nous avons ensuite remarqué que le jeu de données était géoréférencé alors que le moteur 3D retenu, *XNA Game Studio*, ne permet pas de gérer la référence spatiale. En effet, l'origine du moteur 3D, par défaut, est centré à 0, 0, 0, en conséquence, un modèle géoréférencé se retrouve à une très grande distance de l'origine et est très difficilement visualisable. De plus, compte tenu que nous n'avions aucune information sur le système de coordonnées et la projection cartographique utilisée dans le jeu de données original, nous avons opté de recentrer le jeu de données sur 0, 0, 0 afin de pouvoir facilement visualiser le modèle grâce à notre moteur 3D. La conséquence de cette décision est que la scène 3D de notre prototype ne sera pas géoréférencée. Ainsi la référence spatiale des objets de notre scène est relative à l'origine 0, 0, 0. Nous avons ensuite observé que le jeu de données était organisé en plusieurs couches thématiques, selon le type d'éléments qu'elles contenaient. Nous y retrouvons par exemple une couche pour les arbres, le terrain, les bâtiments, les courbes de niveau, les routes, etc. et chacune d'elles étaient modélisées en un seul objet. Dans le but d'expérimenter avec les fonctionnalités SIG 3D de notre système, nous avons choisi d'extraire seulement quelques-uns des éléments de la couche de bâtiments. Comme l'extraction des bâtiments est un procédé qui demande beaucoup de temps, ceci nous a permis de limiter le temps attribué à cette tâche pour plutôt nous concentrer sur le développement des fonctionnalités.

Finalement, cet aspect du développement de notre prototype nous a permis de comprendre le niveau de complexité de la modélisation géospatiale 3D. Dans notre cas, comme la Ville de Québec avait fait construire ce modèle 3D pour ses propres besoins et non les nôtres, la préparation des données pour l'utilisation avec notre système a été plus complexe. Cela nous a également permis de comprendre que la modélisation des données en 3D doit être abordée différemment que celle en 2D, en raison des outils de visualisation qui font appel à des technologies graphiques différentes.

5.4 Expérimentation de la solution

Au deuxième chapitre, nous avons identifié plusieurs principes et besoins auxquels un outil supportant le processus de design urbain collaboratif efficacement doit répondre. Pendant la période de développement de notre prototype, nous avons pu profiter du contexte du projet CRSH-IDR (Patrimoine religieux : La géomatique au service de la consultation publique) afin de procéder à une période d'expérimentation de notre prototype auprès d'utilisateurs potentiels en design urbain. Ainsi, nous avons pu solliciter des étudiants de cycles supérieurs en architecture, design urbain et aménagement du territoire de l'École d'architecture de l'Université Laval et de l'École supérieure d'aménagement du territoire et de développement régional de l'Université Laval (ESAD) afin de procéder à l'expérimentation de notre prototype. Nous avons orienté l'expérimentation de notre prototype selon les principes d'une collaboration efficace tels que définis à la section 2.4.1, c'est-à-dire son utilisabilité, son interactivité et la transparence des informations présentées. Cette section fait état de cette période d'expérimentation en détaillant d'abord le contenu du processus d'expérimentation ainsi que son contexte de réalisation. Nous discutons ensuite des résultats obtenus par les participants ainsi que des commentaires qu'ils ont exprimés à l'égard de l'outil lors de son utilisation.

5.4.1 Contexte d'expérimentation

La tenue d'une période d'expérimentation de notre prototype visait l'objectif général de confirmer la capacité de notre prototype à supporter les processus de design urbain. Elle visait également à dégager des avenues de développement futur du prototype, dans le but de le rendre plus facilement utilisable pour les utilisateurs ne possédant pas d'expertise en géomatique. Pour ce faire, nous avons élaboré un test en plusieurs étapes consistant en l'exécution de plusieurs tâches précises par les participants (Annexe A). Ceci nous a permis d'évaluer la capacité de l'outil à répondre aux besoins que nous avons identifiés au deuxième chapitre. La première partie du test visait à réaliser des tâches relatives à la création et configuration d'une scène géospatiale 3D de façon à simuler le rôle de l'administrateur du système. La deuxième partie visait à

réaliser des tâches de visualisation et d'analyse de la scène, de façon à simuler le rôle de l'utilisateur général. Enfin, nous avons prévu quelques questions spécifiques sur l'expérience des participants. Tout au long de la période d'expérimentation, nous avons recueilli tous les commentaires émis par les participants. Le test, d'une durée d'environ 45-60 minutes par participant, a été conduit auprès de trois étudiants de 2^e et 3^e cycle de l'ESAD et de l'École d'architecture de l'Université Laval. Nous avons conçu un test de nature qualitative puisque nous n'avons pas établi d'échelles quantitatives et nous n'avons pas sollicité assez de participants pour compiler des statistiques d'utilisation. La tenue d'une période de validation quantitative et rigoureuse aurait exigé un temps de préparation élevé qui n'était pas justifié, compte tenu du fait que le prototype est encore de niveau expérimental. De plus, la période d'expérimentation ne considérait pas l'aspect collaboratif puisqu'il n'était pas encore implémenté au moment de sa conduite. Lors de la période de développement suivant l'expérimentation de l'outil, nous avons implanté certaines des recommandations recueillies lors de l'expérimentation.

5.4.2 Expérimentation de l'interface administrateur

Pour la première partie de la période d'expérimentation, nous exigeons que les participants exécutent une série de manipulations avec le système de façon à simuler la création et la configuration d'une scène géospatiale 3D. Avant de procéder aux manipulations du système, nous avons émis quelques explications rapides aux participants afin de leur expliquer le concept de la RA et du prototype afin de faciliter leur compréhension de l'interface. Par la suite, les participants étaient appelés à manipuler la scène pour ajouter des *markers* à la scène, associer des éléments géospatiaux aux différents *markers*, changer certaines propriétés graphiques des éléments, ajouter des attributs descriptifs, composer des requêtes descriptives et ainsi de suite (Annexe A). De façon générale, les utilisateurs n'ont pas expérimenté difficultés majeures lors de cette partie de la manipulation, nous attribuons ceci à la familiarité de l'interface graphique *Windows* employées. Toutefois, nous avons tout de même pu recueillir plusieurs commentaires et suggestions visant à optimiser l'interface et d'en faciliter la compréhension. La figure suivante démontre l'interface du système, telle que vue par le participant dans le rôle administrateur lors de la période d'expérimentation.

L'interface a été modifiée considérablement par la suite, en considérant les recommandations faites par les participants.

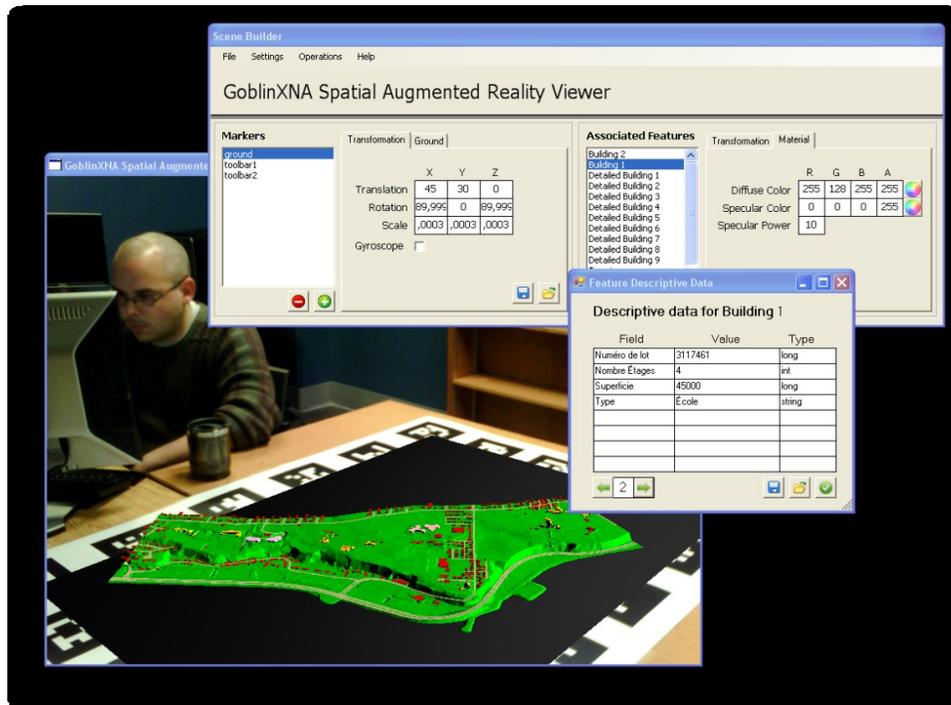


Figure 5.9 : L'interface du participant dans le rôle d'administrateur du système

L'exécution des fonctionnalités de bases telles l'ajout ou l'effacement de *markers* et *GeoFeature*, le chargement ou la sauvegarde de la scène en totalité ou en partie n'a pas causée de problèmes majeurs. Toutefois, les utilisateurs ont eu du mal à indiquer le type des objets qu'ils ajoutaient. Nous avons prévu que l'utilisateur spécifie si un objet est de type terrain ou bâtiment afin de différencier les éléments sélectionnables de ceux ne l'étant pas. La façon de différencier les deux types d'objets a été implantée de façon maladroite et mériterait d'être soit automatisée ou du moins, d'être révisée au niveau de la terminologie employée. La configuration de la caméra a posé problème à un des participants, citant que le menu offert contenait trop de paramètres dont certains étaient inutiles. Cet aspect de l'interface n'a pas pu être amélioré puisque ce menu provient de fonctionnalités externes à notre système et dépendant de la caméra. Le paramétrage de la caméra est donc différent pour chaque type de caméra web. La configuration des éléments de la scène, par exemple le changement de couleur ou la modification des transformations des éléments n'a également pas posé de problème à l'exception de la

rotation appliquée aux éléments. La rotation était problématique en raison de la façon que nous avons choisi de la faire appliquer aux objets. Nous avons choisi d'appliquer la rotation par *Yaw*, *Pitch*, *Roll*, une notation répandue dans le domaine de la programmation 3D mais peu répandue en architecture et géomatique. La création de requêtes descriptives a été bien réussie par chacun des participants qui ont cependant remarqué que la terminologie utilisée rendait la compréhension plus difficile. En effet, nous avons choisi d'implémenter un type général de données pour les propriétés descriptives des éléments géospatiaux. Ceci avait l'avantage de nous permettre de représenter tous les types de données possibles (entier, décimal ou autre) mais exigeait que l'utilisateur spécifie le type de la donnée de façon à pouvoir l'utiliser dans les requêtes par la suite.

Quelques commentaires sont survenus à répétition lors de cette première partie de l'expérimentation de l'outil. Les participants mentionnaient d'abord que la façon de sélectionner les éléments de la scène grâce à des *ListBox*, était peu naturelle. Ils suggéraient d'implémenter une méthode permettant de sélectionner les objets directement à partir de la scène en les cliquant à l'aide de la souris. Cette façon d'interagir avec les données se rapprocherait d'avantage des SIG traditionnels et mériterait d'être implantée. Ils mentionnaient également une confusion face à la disposition de la fenêtre d'interface qui limitait l'utilisabilité. Bien que nous ayons retravaillé la disposition des éléments de l'interface par la suite, une étude plus approfondie de l'ergonomie de l'interface et du côté cognitif de celui-ci serait de mise. Il existe des principes de construction d'interface graphique qui pourraient être appliqués afin de faciliter la compréhension des utilisateurs. Enfin, plusieurs ont notés que l'interface bénéficierait grandement de mécanismes assistés de configuration des éléments de la scène. Par exemple, faciliter la rotation ou la translation des objets grâce à des boutons d'incrémentations ou le choix des couleurs à l'aide d'une roue chromatique.

5.4.3 Expérimentation de l'interface utilisateur

Avant d'entreprendre la deuxième partie de la période d'expérimentation, nous avons d'abord observé la réaction initiale des participants lorsqu'ils utilisaient le prototype pour la première fois. Cette étape préliminaire visait à observer et évaluer l'utilisabilité du système en considérant la facilité d'apprentissage des méthodes d'interaction. Ceci nous a également permis de confirmer le côté naturel et intuitif des méthodes d'interactions en RA. En effet, la réaction immédiate de tous les participants est de visualiser la scène à partir de différents points de vue. De plus, nous avons remarqué que l'intérêt des gens est fortement stimulé et qu'ils tendent naturellement vers une visualisation détaillée du terrain et des différents éléments géospatiaux de la scène. Nous croyons que ceci est d'abord attribuable à l'immersion du participant dans le monde RA ainsi qu'à l'originalité de la technologie employée.

Par la suite, nous exigeons des participants qu'ils remplissent une série de tâches prédéfinies à l'aide de l'interface utilisateur et des méthodes d'interaction en RA de notre prototype. Ils devaient, par exemple, repérer des éléments spécifiques de la scène, sélectionner différents éléments de la scène, visualiser leur attributs dans le cahier de notes virtuel, changer la page du cahier de notes virtuel, afficher les résultats de requête, etc. (Annexe A). Comme nous avons anticipé, les manipulations impliquées dans cette partie de l'expérimentation se sont avérées plus ardues que celle de la première. Plusieurs raisons peuvent expliquer ceci, dont la principale est reliée au système d'enregistrement du prototype. En effet, bien que l'enregistrement par *marker* soit robuste et précis, il exige beaucoup de temps de calcul ce qui rend difficile l'enregistrement de petits *markers* mobiles comme celui utilisé pour pointer et sélectionner. Autre conséquence du système d'enregistrement, lorsqu'un *marker* est caché en trop grande proportion par un autre objet, l'enregistrement ne se fait pas et les objets virtuels associés au marker disparaissent. Ce problème est particulièrement encombrant lorsque l'utilisateur tente d'interagir avec le carnet de notes virtuel puisque celui-ci est associé à un petit *marker*. La marge de manœuvre pour pointer dans le cahier de notes virtuel en ne faisant pas occlusion au *marker* est très mince. Nous avons également remarqué un problème au niveau de l'interface de présentation

utilisée pour le cahier. Les boîtes de texte affichées à l'intérieur de celui-ci sont des objets 2D qui sont toujours au premier plan de l'image écran. Ainsi les boîtes de textes demeurent toujours de la même grosseur et dans une position horizontale, elles ne paraissent pas faire partie du livre. Ce problème est une conséquence de l'interface disponible dans *GoblinXNA* qui n'est pas encore en 2D. Enfin, le système de pointeur 3D s'est avéré très simple d'utilisation et d'apprentissage et n'a pas causé de difficultés majeures lorsqu'il s'agissait d'interagir avec des objets de la scène 3D associée au *marker* principal.

Cette expérimentation nous a permis de mieux comprendre à quel point l'enregistrement était primordial dans un SRA lorsqu'on veut permettre une interaction fluide et conviviale entre l'utilisateur et le monde augmentée. Nous avons également pu confirmer l'utilité et l'intuitivité de la RA comme méthode d'interaction entre l'être humain et les ordinateurs.

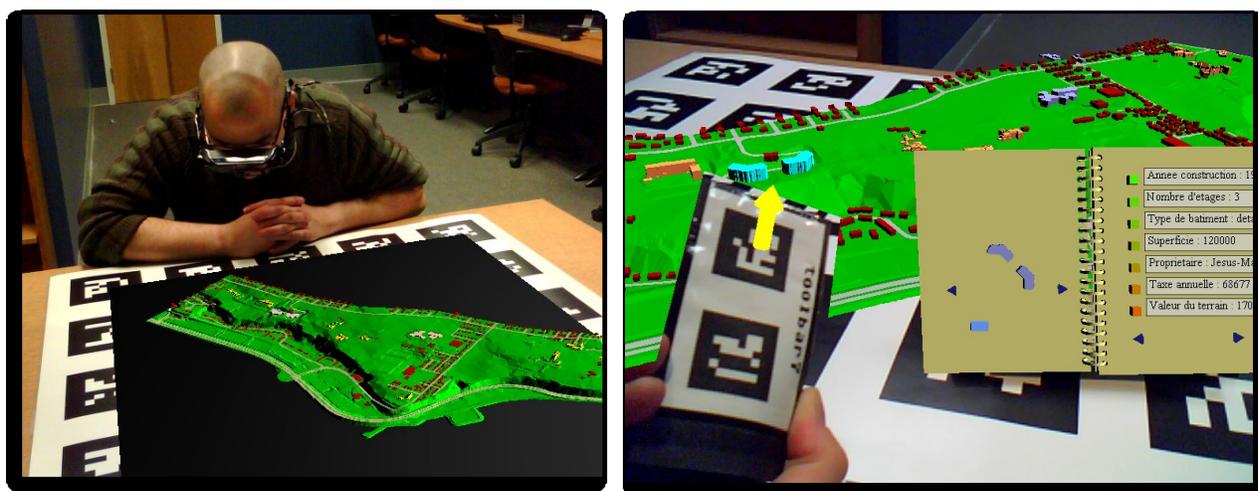


Figure 5.10 : Vue d'ensemble d'un utilisateur interagissant avec une scène géospatiale 3D (image de gauche) et la vue aperçue dans le casque de RA (image de droite)

5.5 Discussion des résultats

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté la conception, l'implantation et l'expérimentation d'un prototype d'outil collaboratif géospatial visant à supporter les processus de design urbain dans leur entièreté. L'outil capitalise sur les avantages de la

technologie de la RA afin de surmonter les limites des outils couramment utilisés en design urbain. Le prototype comporte toutefois certaines lacunes qui peuvent limiter son applicabilité aux scénarios de design urbain. Ces lacunes peuvent être attribuées à différents facteurs tels les limites technologiques de la RA ou les contraintes provenant du contexte de recherche académique dans lequel le projet s'est déroulé notamment le manque de financement qui aurait permis d'intégrer des composantes de meilleure qualité, plus dispendieuses. Dans cette section, nous porterons un regard critique sur le système que nous avons créé en discutant des points forts et des points faibles de celui-ci. Nous aborderons également les avenues de recherches possibles concernant le prototype afin de faciliter les travaux futurs.

5.5.1 Points forts du prototype

L'outil que nous avons conçu et développé visait à surmonter trois limites identifiées des outils géospatiaux conventionnels, soient l'incapacité de traiter les données 3D, l'impossibilité de supporter le travail collaboratif et le faible niveau d'utilisabilité. Il n'est donc pas surprenant que les avantages principaux du prototype se situent au niveau de la solution apportée à ces limites. Ainsi, nous pouvons identifier trois avantages principaux de l'outil développé soit premièrement sa capacité à visualiser et manipuler les données géospatiales 3D. Elle permet une visualisation plus familière de l'espace pour les utilisateurs inexpérimentés puisque la présentation en 3D comporte un minimum d'abstraction visuelle par rapport aux données géospatiales 2D. La donnée présentée en 3D à l'utilisateur est donc plus proche de la réalité que celle présentée en 2D et conséquemment, plus facilement compréhensible.

Le deuxième avantage identifié est son niveau d'utilisabilité élevé qui permet aux utilisateurs non-expérimentés de se servir du système sans avoir recours à une formation exhaustive au préalable. En effet, lors de l'expérimentation, les utilisateurs arrivaient à utiliser l'interface utilisateur efficacement sans avoir besoin d'explications à priori. Cet avantage est particulièrement important dans le cadre des processus de design urbain collaboratifs où des acteurs de différents domaines et niveaux d'expertises sont appelés à travailler sur un même projet.

Enfin, le troisième avantage principal consiste en sa capacité de permettre à plusieurs utilisateurs d'interagir simultanément avec les données géospatiales 3D. Nous avons implémenté une collaboration de type même endroit et même moment en utilisant une approche serveur et client afin de favoriser la collaboration et stimuler la communication entre les participants lors de projets de design urbain. Évidemment, ce dernier avantage est central à notre prototype puisque sans lui, la collaboration est difficile voire impossible.

Le système développé comporte également des avantages secondaires, dont le premier est son coût de réalisation très peu élevé. En effet, sans compter l'ordinateur impliqué dans le système, l'ensemble du matériel nécessaire se détaille à moins de mille dollars, dont la plus grande partie est attribuable au casque de RA utilisé. De façon générale, les casques de RA se détaillent à un prix beaucoup plus élevé que celui utilisé dans notre expérimentation et le système d'enregistrement par *marker* est un des moins dispendieux existants. Malgré le coût peu élevé des composantes utilisées, nous avons tout de même atteint un résultat qui démontre un enregistrement robuste du virtuel à la réalité ainsi qu'une visualisation intuitive des données 3D.

Enfin, la flexibilité du système conçu est un autre avantage secondaire mais important de notre système. Du côté logiciel, *GeoGoblinXNA*, la librairie supportant notre système a été créé de façon à être facile à utiliser et à réutiliser dans le but d'encourager le développement futur. D'un autre côté, l'architecture matérielle a été choisie de façon à être facilement modifiable. Il est donc possible de changer la caméra ou le système d'affichage sans conséquence sur le système.

5.5.2 Points faibles du prototype

Le prototype que nous avons développé, bien qu'il présente plusieurs avantages intéressants, n'est pas exempt de points faibles. La majorité de ces points faibles sont d'abord attribuables au contexte académique dans lequel le projet a eu lieu et au manque de ressources financières qu'il entraîne. Puisque notre intention était de démontrer que le concept d'un outil basé sur la RA était apte à répondre aux besoins identifiés, nous avons concentré nos efforts de développement en largeur plutôt qu'en

profondeur. C'est-à-dire que nous avons choisi d'implanter un maximum de fonctionnalités plutôt que d'en implanter quelques-unes de façon détaillées et optimisées. Deuxièmement, nous attribuons une part des lacunes de notre système aux limites technologiques auxquelles la RA est actuellement assujettie. En effet, la RA est une technologie qui est présentement en effervescence pour laquelle plusieurs difficultés restent à surmonter. L'étude et la solution des limites actuelles de la RA exigent une connaissance profonde de la technologie que nous ne possédons pas actuellement et elles sont certainement mieux laissées aux groupes de recherche dont l'intérêt principal est le raffinement de la technologie de RA. Cet objectif aurait dépassé nos compétences ainsi que les limites de ce travail.

Du côté de l'architecture matérielle, la première difficulté majeure rencontrée, déjà abordée à la section précédente, concerne l'enregistrement par *marker* du virtuel à la réalité. Ce type d'enregistrement est sujet au phénomène du bruit d'enregistrement qui donne un effet d'oscillation dans la représentation. C'est également une méthode qui est fortement dépendante de l'environnement d'opération qui doit être préparé d'avance et contrôlé lors de l'utilisation. De plus, l'enregistrement par *marker*, parce qu'il utilise un intermédiaire vidéo, nécessite beaucoup de temps de calcul ce qui entraîne une latence dans le rendu des scènes 3D.

Le système d'affichage comporte également certaines limites technologiques au niveau de la qualité de la représentation visuelle. En effet, la résolution de l'affichage utilisé est limité par la résolution maximale de la caméra utilisée, il est impossible de présenter une image de meilleure qualité que celle captée par la caméra. Deuxièmement, il fausse la perception de l'utilisateur puisque le champ de vision de la caméra est beaucoup plus petit que celui de l'œil humain. Enfin, comme il n'y a qu'une caméra fixée au casque, le flux vidéo n'est pas stéréoscopique, ce qui fausse la perception de profondeur de l'utilisateur.

Du côté logiciel, les lacunes observées sont d'ordre plutôt mineur et pourraient être corrigées dans le futur, moyennant un certain temps de développement additionnel. Nous notons d'abord certaines difficultés au niveau de la collaboration qui n'a pas été implantée de façon aussi complète que nous l'avions espéré à l'origine. Par manque de

temps, nous avons choisi d'implémenter un type de collaboration simple, axé sur une communication serveur client unidirectionnelle. Cette façon de procéder a nécessité un minimum de temps de développement mais nous a tout de même permis de démontrer la possibilité de la collaboration en RA. En raison de limites surmontables de GoblinXNA, nous avons implanté ce mode de collaboration de façon détournée et non optimisée afin de transmettre les mises à jour du serveur aux clients. Il serait possible et souhaitable qu'une capacité de collaboration plus riche, permettant l'échange bidirectionnel d'informations entre utilisateurs et administrateur, soit implémentée dans le futur.

La période d'expérimentation nous a permis de dégager certaines limites de l'interface de gestion de la scène géospatiale 3D telles la modification des transformations, la terminologie informatique parfois employée, la sélection des objets de la scène, l'application impossible de textures, l'absence de mécanismes facilitant le choix de couleur ou l'application de rotation, etc. Afin de la rendre plus facilement utilisable, particulièrement pour les utilisateurs familiers avec les logiciels de dessin assisté, certains mécanismes facilitant la manipulation des objets pourraient être implémentés, par exemple l'utilisation d'une roue chromatique pour le changement de couleurs d'un objet ou l'ajout de la possibilité de sélectionner un objet en le pointant dans la scène. La terminologie du logiciel serait également à revoir dans le futur. Tous ces changements sont mineurs et relativement facile à ajouter au logiciel.

Enfin, nous notons une lacune au niveau de la conservation des données qui ne fait pas intervenir de base de données externe au logiciel. Par souci de temps et parce que nous n'étions pas familier avec l'environnement de développement au départ, nous avons choisi d'utiliser une approche basée sur l'enregistrement des paramètres de la scène en XML plutôt qu'en sauvegardant les objets complets. De cette façon, l'enregistrement et le chargement de scène a été simplifié mais la composition et l'exécution de requêtes a été complexifiée. L'ajout d'une base de données externe afin de conserver la scène simplifierait grandement la composition de requêtes et permettrait d'assurer des règles d'intégrité de données.

Nous considérons les limites logicielles identifiées comme des avenues de développements futurs potentiels. Nous croyons que l'étude des limites face au matériel impliqué, à l'enregistrement et à la technologie de la RA en général dépasse le champ d'intérêt et de compétence de la recherche scientifique en géomatique. En conséquence, nous ne considérons pas qu'elles constituent une avenue de recherche et de développement sérieuse pour le domaine de la géomatique, ce sujet devrait plutôt relever du domaine de la vision numérique, en informatique. L'intérêt de la géomatique devrait se limiter à tirer profit des dernières avancées en RA afin d'apporter de nouvelles méthodes d'interaction entre l'utilisateur et les données géospatiales.

Chapitre 6 Conclusion

6.1 Résumé du travail effectué

Dans un contexte où la collaboration et les données géospatiales sont devenues centrales aux processus de conception et de décision dans divers domaines, les technologies de gestion de l'information spatiale se sont présentées comme des outils naturels permettant de supporter ces processus. Néanmoins, ils demeurent complexes et leur usage est généralement réservé à des utilisateurs experts ayant été formés pour leur utilisation. Ils ne permettent pas une interaction naturelle avec les données, ni une représentation visuelle facilement compréhensible de celles-ci. De plus, ils ne sont pas adaptés à la collaboration entre utilisateurs qui est devenue inévitable considérant la société actuelle dont la complexité ne cesse de s'accroître.

Ce mémoire visait à faire état de nos travaux de recherche réalisés dans le but de concevoir et développer un nouveau type d'outil basé sur la technologie de la RA répondant aux problématiques identifiées. Pour ce faire, nous avons choisi de créer un outil basé sur le concept d'une maquette virtuelle interactive réunissant plusieurs acteurs au même endroit et au même moment afin de supporter la collaboration lors des processus conception et de décision dans le contexte spécifique du design urbain. Bien qu'un tel outil pourrait être appliqué à différents domaines, nous avons choisi le design urbain parce qu'il comportait de nombreux avantages face à notre situation, tel que décrit précédemment (voir section 4.1.1).

Afin de concevoir et développer un outil innovateur en considérant notre contexte d'application, nous avons d'abord procédé à une étude des processus de conception et de décision en design urbain. Nous avons d'abord résumé et défini les processus centraux au design urbain, soient celui de conception et celui de décision pour ensuite aborder l'aspect de la collaboration dans ce domaine. Nous avons également fait état

des différents types d'outils géospatiaux conçus et utilisés dans ce contexte spécifique ainsi que de leurs limites face au processus de design urbain. Nous avons enfin identifiés certains besoins auxquels devaient répondre un outil supportant la collaboration en design urbain et avons proposé un concept préliminaire basé sur la technologie de la RA. Cette réflexion au sujet du domaine d'application choisi nous a permis d'établir une direction conceptuelle pour le développement subséquent de notre outil.

Par la suite, afin de nous familiariser avec la RA, qui était originalement étrangère à nos connaissances et compétences, nous avons procédé à une étude détaillée de cette technologie. Nous avons premièrement pris le soin de définir certains concepts clés de cette technologie et avons effectué une revue générale de l'évolution de cette technologie dont la popularité croissante des dernières années a donné lieu à de nombreuses innovations. Deuxièmement, nous avons présenté et discuté de façon détaillée les trois composantes matérielles de bases d'un SRA et avons proposé une classification des différents types de SRA basé sur leur environnement d'opération, leur capacité de collaboration et celle de mobilité. Nous avons finalement abordé les méthodes d'interaction entre l'utilisateur, l'ordinateur et les données virtuelles que rend possible cette technologie. Cette étude approfondie de la RA nous a permis de concevoir un système permettant de répondre le mieux possible aux besoins identifiés précédemment face aux processus de design urbain.

Ce cheminement en deux temps a par la suite, guidé le choix d'une architecture matérielle et logicielle permettant d'implanter un prototype que nous avons conçu dans le but de surmonter les limites des outils géospatiaux existants identifiées au premier chapitre. Afin de développer un outil dont le but est de supporter les processus du design urbain, le prototype a été conçu de façon à fournir aux utilisateurs des méthodes de visualisation et d'interaction qui sont à la fois intuitives et naturelles. Notre système s'inspire des outils géospatiaux traditionnels tels que les SIG et les CAD et permet à plusieurs participants de visualiser et d'interagir simultanément avec des données géospatiales 3D. Grâce à l'intégration d'interfaces faciles à utiliser, il favorise la participation d'acteurs ne possédant pas d'expertise avec ce type d'outil. Nous avons

par la suite procédé à une période d'expérimentation auprès d'un public limité provenant du domaine du design urbain qui nous a permis d'identifier les points forts et les points faibles de notre prototype et de proposer des voies de développement futur. Notre prototype, bien qu'il comporte toujours certaines limites face à son utilisation, nous a permis de démontrer que la RA est une technologie qui possède le potentiel de répondre à certaines limites des outils géospatiaux conventionnels.

Bien que nous ayons confirmé que la RA possède les moyens de surmonter les limites des outils géospatiaux actuellement utilisés en design urbain, elle comprend elle-même des limites technologiques non-négligeables qui ne risquent pas de disparaître avant plusieurs années. Ainsi, notre prototype n'échappe pas à la limite principale de la RA, soit l'impossibilité d'atteindre un enregistrement parfait, c'est-à-dire rapide, précis, sans la présence de bruit dans l'enregistrement et indépendant de son environnement d'opération. Les travaux réalisés nous ont également permis de saisir la grande complexité de la RA ainsi que les défis relevant de l'interaction entre l'homme et la machine. Suite à nos travaux, il est évident que le développement de la technologie de la réalité augmentée géospatiale et de ses outils dérivés, tel que le prototype développé lors de ce projet, fait intervenir un éventail large de connaissances multidisciplinaires. .

6.2 Apprentissage scientifique et contribution à la recherche

La réalisation de ce projet de maîtrise à été une bonne occasion de s'introduire et de se familiariser au monde de la recherche scientifique en milieu académique. Cette démarche a donné lieu à bon nombre d'apprentissages scientifiques et de contributions à la recherche dont nous ferons état dans cette section.

Ce projet fut lancé en 2008, et s'inscrit dans un cadre de recherche exploratoire. En conséquence, nous avons donc du faire preuve d'initiative, de sens critique et de beaucoup de volonté afin que notre projet réponde aux attentes en matière de qualité de recherche scientifique. Face à cela, nous avons pris les mesures nécessaires afin de mettre sur pied un projet de recherche sérieux qui apporterait une contribution claire à la recherche scientifique au Département de sciences géomatiques.

Ainsi, nous avons commencé par établir une collaboration avec un groupe de recherche comportant des chercheurs du Département des sciences géomatiques et de l'École d'architecture de l'Université Laval. Cette collaboration, s'inscrivant dans le cadre d'un projet CRSH-IDR, nous a d'abord donné accès à un contexte d'étude nous permettant de valider les résultats de nos travaux et a été une source d'apprentissage face à la recherche multidisciplinaire. En effet, la collaboration avec des chercheurs provenant d'autres domaines, dans ce cas-ci de l'architecture, du design urbain et de l'aménagement du territoire nous a encouragés à étudier notre projet d'un deuxième point de vue. De plus, le design urbain s'établissant plutôt du côté des sciences humaines, nous avons pu bien observer deux différentes philosophies de recherche. Cette collaboration, qui se poursuit toujours, a donné lieu à l'écriture d'une revue de littérature devant supporter une demande de subvention pour la poursuite du projet CRSH-IDR.

Par la suite, dans le but de nous familiariser avec la RA, une technologie pour laquelle nous ne disposions d'aucune connaissance au départ, nous avons établi un partenariat avec le laboratoire *Computer Graphics and User Interface Laboratory* de l'Université Columbia de New York. Ce laboratoire, dirigé par Steven Feiner, un des chercheurs les plus importants en RA, est à l'origine de la librairie *GoblinXNA* qui a servi de base fondatrice à notre système. C'est suite à plusieurs échanges avec Ohan Oda et Nicolas Dedual, deux doctorants de cette université, que ce partenariat s'est concrétisé lors d'une visite d'une semaine dans leur laboratoire afin de se familiariser avec la recherche de pointe en RA et d'implémenter les méthodes d'interaction de notre prototype. Cette collaboration a également donné lieu à la rédaction d'un article scientifique, accepté et présenté lors de la Conférence Canadienne de Géomatique ayant eu lieu en juin 2010 à Calgary [ST-AUBIN 2010].

Ce projet fut également une occasion de se familiariser avec la gestion d'une équipe de recherche puisque de septembre 2009 à mai 2010, nous avons pu bénéficier de l'aide d'un groupe d'étudiants au baccalauréat dans le cadre de leur cours Projet de génie géomatique. Nous avons donc dû encadrer leur travaux, leur préférer de l'aide et des explications lorsque nécessaire et effectuer le suivi de l'équipe de façon hebdomadaire.

Ceci a donc été une source d'apprentissage importante face à la gestion de personnel, aux difficultés qu'ils peuvent rencontrer face aux tâches à accomplir et à la transmission de connaissances entre chercheurs.

Enfin, notons que les contributions de ce projet à la recherche scientifique ne se limitent pas seulement à ce qui a déjà été réalisé. En effet, au moment d'écrire ces lignes, nous collaborons avec Viasat GéoTechnologies afin de préparer un rapport technique visant agissant comme étude de faisabilité dans le but éventuel de lancer un projet de développement de SRA en collaboration avec Hydro Québec. De plus, nous prévoyons rédiger un second article dans les prochains mois pour lequel nous visons la publication dans une revue scientifique.

6.3 Atteinte des objectifs

Le projet de recherche réalisé avait pour but principal de concevoir et développer un outil géospatial supportant le travail collaboratif dans les processus de conception et de décision en design urbain. Plus précisément, cet outil devait premièrement permettre la gestion et la manipulation des données géospatiales 3D de façon similaire à un SIG 3D. Deuxièmement, il devait offrir un niveau d'utilisabilité élevé en permettant l'interaction naturelle et intuitive avec les données géospatiales 3D. Enfin, il devait permettre le travail collaboratif en favorisant l'intégration de participants provenant de différents domaines. Pour atteindre notre objectif, nous avons choisi de développer un système basé sur le concept de la maquette virtuelle interactive.

Pour atteindre notre premier objectif, nous avons conçu un système reposant sur l'utilisation d'un moteur 3D afin d'afficher les données géospatiales 3D dont nous disposons. Pour pouvoir profiter de ce moteur 3D, il a été nécessaire de préalablement concevoir une structure de données, basée sur le concept des graphes de scène, permettant de conserver nos données 3D. Nous avons conçu cette structure de données de façon à permettre de facilement gérer la référence spatiale, les propriétés graphiques et les données descriptives. Par la suite, nous avons créé une interface graphique dans le but de faciliter la manipulation et configuration de la structure de

données. Le résultat final est un logiciel s'apparentant aux SIG traditionnels mais permettant la représentation de données géospatiales 3D.

Afin d'atteindre notre deuxième objectif spécifique, nous avons conçu une interface naturelle et intuitive destinée aux utilisateurs généraux ne possédant aucune expertise avec les outils géospatiaux traditionnels. Cette interface vise à faciliter l'interaction avec la scène grâce à des mécanismes issus de la RA qui permettent d'interagir physiquement avec les données virtuelles. Ainsi, par un simple mouvement de tête, il est possible de se déplacer dans la scène 3D. L'interface intègre également un pointeur 3D et un carnet de note virtuel qui permettent de pointer, sélectionner et visualiser les données géospatiales 3D contenues dans la scène. L'utilisabilité élevée des modes d'interaction implémentés a été démontrée lors de la période d'expérimentation où les participants n'ont nécessité qu'une formation minimale avant d'être en mesure d'utiliser le système adéquatement. Toutefois, il faut noter que bien que le système soit facilement utilisable, il nécessiterait encore des efforts substantiels de développement afin qu'il réponde adéquatement à une plus grande proportion des besoins de la pratique du design urbain. Pour le moment, notre prototype démontre qu'il est possible de construire un outil de RA pouvant supporter la pratique du design urbain, mais en lui-même, ne constitue pas cet outil. De plus, nous avons pu remarquer qu'en raison des limites technologiques du système, notamment l'effet d'oscillation, il peut parfois devenir difficile de correctement accomplir une opération sur la scène 3D. Des travaux devraient être menés afin d'améliorer la qualité de l'enregistrement ainsi que la précision des mécanismes d'interaction.

Enfin, nous avons atteint notre troisième objectif spécifique grâce à l'implémentation de protocoles de communication réseau basés sur une architecture serveur-client. En respectant le concept que nous avons élaboré auparavant, nous avons choisi d'implémenter la collaboration de façon à réunir tous les participants au même endroit et au même moment. Le mode de collaboration implémenté permet à l'administrateur de la scène, situé du côté serveur, de transmettre les mises à jour aux utilisateurs généraux, situés du côté client. Ainsi, un utilisateur peut créer et configurer une scène 3D grâce à l'interface administrateur et les autres utilisateurs peuvent la visualiser grâce

à l'interface utilisateur. Cependant, nous considérons qu'en raison des limites technologiques rencontrées, cet objectif a été atteint dans une moindre mesure que les deux premiers. Conséquemment, l'aspect collaboratif de notre prototype mériterait d'être développé et optimisé davantage afin de permettre une collaboration entre utilisateurs qui serait plus stable et robuste dans les versions subséquentes de notre système.

En résumé, nous pouvons affirmer avoir atteint chacun des objectifs que visait ce projet de recherche qui, somme toute, s'est révélé être d'ampleur plus vaste que nous l'avions imaginé au départ. En effet, il nous apparaît, après coup, que la création d'un logiciel de type SIG 3D, le développement de méthodes d'interaction en RA ainsi que la collaboration entre plusieurs utilisateurs sont trois capacités d'un système qui exigent chacune un haut niveau de connaissances afin d'être implémentées de façon stable et robuste. Bien que nous ayons exploré et intégré tous ces aspects au niveau de notre prototype, nous croyons qu'ils pourraient chacun faire l'objet de projets de recherche individuels lors de travaux futurs.

6.4 Travaux futurs

Au fil des dernières années, et de façon particulièrement remarquable pendant les deux années sur lesquelles se sont étalées ce projet de recherche, la RA a connu une évolution très rapide. Elle est maintenant devenue plus facilement accessible et sa popularité n'a cessé de croître, comme en témoignent la multitude d'applications de RA disponibles sur les appareils cellulaires nouvelle génération. Toutefois, l'utilisation de la RA afin d'interagir avec les données géospatiales est un phénomène qui demeure peu exploré et il existe en conséquence, un large spectre de perspective de recherches futures possibles. Suite à la réalisation de ce projet de recherche, nous sommes en mesure d'identifier plusieurs avenues de recherche qui, selon notre point de vue, possèdent un potentiel de recherche particulièrement intéressant.

Tout d'abord, mentionnons qu'il serait intéressant de procéder à une période de validation formelle du prototype auprès d'un public plus diversifié que celui qui a été

sollicité dans notre démarche. Nous arriverions ainsi à dégager plusieurs avenues de développement qui nous permettraient d'augmenter l'utilisabilité du système. L'outil que nous avons prototypé pourrait également servir de base afin de poursuivre la recherche au niveau des différentes méthodes d'interaction possibles grâce à la RA. La possibilité d'interagir grâce à la gestuelle manuelle permettrait une forme de manipulation encore plus naturelle, se rapprochant de la manipulation d'objets physiques. Bien que la recherche face à ce mode d'interaction soit bien établie, son application à la manipulation de données géospatiales a été peu explorée. Elle apporterait certainement un changement de dynamique de l'interaction avec les données et permettrait une expérience immersive accrue.

Les travaux futurs pourraient également être orientés envers le développement et l'implémentation de nouveaux mécanismes de collaboration tels que la collaboration à distance où la collaboration horizontale entre les utilisateurs. Ceci permettrait, d'une part, d'améliorer la capacité de collaboration de notre prototype et d'autre part, de rendre l'outil apte à supporter les processus de design dans un contexte plus élargi. Par exemple, une capacité de collaboration horizontale, où les utilisateurs peuvent eux-mêmes modifier la scène, rendrait plus dynamique l'utilisation de l'outil à travers les processus de design urbain. La collaboration à distance pourrait aussi être explorée plus en profondeur afin de permettre une plus grande participation des utilisateurs lors de la mise en opération de l'outil.

Suite à notre collaboration au projet CRSH-IDR et à notre recension de la littérature portant sur les outils géospatiaux supportant les processus de design urbain complétée pour l'équipe CRSH-IDR, nous avons eu l'occasion de poser une réflexion sur les besoins existants dans ce domaine. Ceci nous a permis d'identifier deux types d'outils présentant un intérêt évident face aux processus de design urbain collaboratifs et comportant des défis de recherche intéressants en géomatique. L'intégration de fonctionnalités CAD à un logiciel de type SIG en un seul outil simplifié faciliterait le processus de conception de groupe en permettant de rapidement modifier les solutions proposées selon les suggestions des participants. Deuxièmement, un outil de type SIG 3D Web pourrait favoriser la délibération entre participants tout en réduisant les besoins

logistiques relatifs à la réunion de plusieurs personnes, comme c'est le cas lors de consultation publiques par exemple.

Enfin, nous remarquons un besoin face au développement de structures de données adaptées au stockage des données géospatiales 3D. Les structures de données traditionnellement utilisées dans les logiciels SIG ne suffisent plus à la réalité des données 3D. En effet, la plupart des moteurs 3D ont été développés dans le cadre de l'industrie du jeu vidéo et ne permettent pas la manipulation facile de gros volumes de données géospatiales 3D. De plus, peu d'études se sont concentrées sur la conception de structures de données spécifiquement destinées aux SRA. Une avenue de recherche intéressante consisterait donc en l'étude approfondie des moteurs 3D et au développement d'une structure de données permettant de facilement supporter un logiciel SIG 3D.

Bibliographie

- AcrossAir**, 2009, Nearest Tube, http://www.acrossair.com/acrossair_app_augmented_reality_nearesttube_london_for_iPhone_3GS.htm
- ARToolKit**, 2010, ARToolKit Homepage, <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>
- Azuma, R.T.**, 1997, A Survey of Augmented Reality, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 6, No. 4, pp 355-385
- Azuma, R.T.**, 1999, The Challenge of Making Augmented Reality Work Outdoors, *Mixed Reality: Merging Real and Virtual Worlds*, pp. 379-390
- Barendse, P., Duerink, S., Govaart, Y.**, 2007, A Multi Stakeholder Collaborative Urban Planning Model, *Proceedings of the International Conference on Sustainable Urban Areas*, 19 p
- Barnett, J.**, 2006, The Origins and Evolution of 'Urban Design': The Way We Were, The Way We Are, in *Harvard Design Magazine*, No. 24, 4 p
- Batty, M., Dodge, M., Jiang, B., Smith, A.**, 1998, *GIS and Urban Design*, UCL Centre for Advanced Spatial Analysis, 28 p
- Bédard, Y.**, 2007, Conception de bases de données *SIG*, Notes de cours SCG-64738-A, Département des sciences géomatiques, Université Laval
- Behzadan, A.H., Kamat, V.R.**, 2005, Visualization of Construction Graphics in Outdoor Augmented Reality, *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, 7 p
- Bell, B., Feiner, S., Höllerer, T.**, 2001, View Management for Virtual and Augmented Reality, *ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp 101-110
- Bell, B., Feiner, S., Höllerer, T.**, 2002, An Annotated Situation Awareness Aid for Augmented Reality, *ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 4 p
- Bentley**, 2010, Annual Report – May 2010, <http://www.bentley.com/en-US/Corporate/Publications/>

- Bentley, I.**, 1985, *Responsive Environments: A Manual for Designers*, Architectural Press, London, 153 p
- Bianchi, G., Jung, C., Knoerlein, B., Székely, G., Harders, M.**, 2006, High-fidelity Visuo-haptic Interaction with Virtual Objects in Multi-modal AR Systems, *Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp 187-196.
- Billinghamurst, M., Kato, H.**, 2002, Collaborative Augmented Reality, *Communications of the ACM*, Vol. 45, No 7, pp. 64-70
- Bimber, O., Raskar, R.**, 2005, *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds*, A K Peters Ltd., Wellesley, MA, 369 pp.
- Borning, A., Waddell, P., Forster, R.**, 2008, UrbanSim: Using Simulation to Inform Public Deliberation and Decision-Making, in *Digital Government: E-Government Research, Case Studies, and Implementation*, eds. Hsinchun Chen et al., Springer-Verlag, pp. 439-463
- Borouhaki, S., Malczewski, J.**, (en impression), *ParticipatoryGIS.com: A WebGIS-based collaborative multicriteria decision analysis*, in *Journal of the Urban and Regional Information Systems Association*, 22 p
- Broll, W., Lindt, I., Ohlenburg, J., Wittkämper, M., Yuan, C., Novotny, T., Schieck, A.F., Mottram, C., Strothmann, A.**, 2004, ARTHUR: A Collaborative Augmented Environment for Architectural Design and Urban Planning, *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, Volume 1, no. 1, pp. 1 – 10
- Buchanan, L., O'Connell, A.**, 2006, A Brief History of Decision Making, *Harvard Business Review*, January, 8 p
- Buchanan, P., Seichter, H., Billinghamurst, M., Grasset, R.**, 2008, Augmented Reality and Rigid Body Simulation for Edutainment, *Proceedings of ACE 2008*, 4 p
- Buchmann, V., Violich, S., Billinghamurst, M., Cockburn, A.**, 2004, FingARtips – Gesture Based Direct Manipulation in Augmented Reality, *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia*, pp. 212-221
- Carneiro, C.**, 2008, Communication and Visualization of 3D Urban Spatial Data According To User Requirements: Case Study of Geneva, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial information Sciences*, Vol. XXXVII, 6 p

- Caudell, T.P., Mizell, D.W.**, 1992, Augmented Reality: An Application of Heads-up Display Technology to Manual Manufacturing Processes, Proceedings of the Twenty-fifth Hawaii International Conference on Systems Sciences, pp 659-669
- Cheok A.D., Fong, S.W., Goh, K.H., Yang, W., Liu, W., Farzbiz, F.**, 2003, Human Pacman: A Sensing-Based Mobile Entertainment System with Ubiquitous Computing and Tangible Interaction, Proceedings of the 2nd Workshop on Network and System Support for Games, pp 71-81
- Ciobanu, D.L., Roche, S., Joerin, F., Edwards, G.**, 2005, Vers une intégration des SIG participatifs aux processus de design urbain délibératifs, Revue internationale de géomatique, vol. 16, no. 2, pp 249-267
- Ciobanu, L.D.**, 2006, Adaptation des SIG participatifs aux processus de design urbain délibératifs, Mémoire de maîtrise, Université Laval, 83 p.
- Cruz-Neira, C., Sandin, D.J., DeFanti, T.A.**, 1993, Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, SIGGRAPH 93, Anaheim, California, 8 p
- Davis, J., Lin, P., Borning, A., Friedman, B., Kahn Jr., P.H., Waddell, P.**, 2006, Simulations for urban Planning: Designing for Human Values, Computer, Vol. 39, No. 9, pp 66-72
- DiVerdi, S., Höllerer, T.**, 2007, GroundCam: A Tracking Modality for Mobile Mixed Reality, IEEE Virtual Reality Conference 2007, 8 p
- ESRI**, 2010A, Changing Geography by Design: Selected Readings in GeoDesign, <http://www.esri.com/library/ebooks/geodesign.pdf>
- ESRI**, 2010B, What's New in ArcGIS 10 – Simplify Your GIS Workflow, <http://www.esri.com/software/arcgis/brochures-whitepapers.html>
- ESRI**, 2011, GeoDesign Summit, <http://www.geodesignsummit.com/index.html>
- Feiner, S., MacIntyre, B., Haupt, M., Solomon, E.**, 1993, Windows on the World: 2D Windows for 3D Augmented Reality, ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp 145-155
- Feiner, S., MacIntyre, B., Höllerer, T.**, 1997, A Touring Machine: Prototyping 3D Mobile Augmented Reality Systems for Exploring the Urban Environment, International Symposium on Wearable Computing '97, pp 75-81

- Fruend, J., Geiger, C., Grafe, M., Kleinjohann, B.**, 2001, The Augmented Reality Personal Digital Assistant, Proceedings of the 2nd International Symposium on Mixed Reality (ISAR'01), 3 p
- Gaggioli, A., Bassi, M., DelleFave, A.**, 2003, Chapter 8: Quality of Experience in Virtual Environments, Being There: Concepts, effects and measurement of user presence in synthetic environments, los Press, Amsterdam, The Netherlands
- Georgia Institute of Technology**, 2009, ARhrrrr!, <http://www.augmentedenvironments.org/lab/research/handheld-ar/arhrrrr/>
- Goodchild, Michael F.**, 2010, Towards Geodesign: Repurposing Cartography and GIS?, Cartographic Perspectives, No. 66, p 7-21
- Gray, B.**, 1989, Collaborating: Finding Common Ground for Multiparty Problems, Jossey-Bass Publishers, 329 p
- Greenwald, M.J.**, 2000, Beyond City Limits: The Multi-Jurisdictional Applications of GIS, URISA Journal, Vol. 12, No. 1, pp 31-43
- Gross, M.D., Yi-Luen Do, E.**, 2007, Tools and Principles for Collaborative Design, Workshop on Tools in Support of Creative Collaboration, 4 p
- Haklay, M., Tobòn, C.**, 2003, Usability Evaluation and PPGIS: Towards a User-Centred Design Approach, International Journal of Geographical Information Science, Vol. 17, No. 6, pp 577-592
- Haklay, M., Zafiri, A.**, 2008, Usability Engineering for GIS: Learning from a Screenshot, The Cartographic Journal, Vol. 45, No. 2, pp 87-97
- Heidemann, G., Bax, I., Bekel, H.**, 2004, Multimodal Interaction in an AR Scenario, Proceedings of the 6th International Conference on Multimodal Interfaces, pp. 53-60
- Heilig, M.L.**, 1962, Sensorama Simulator, US Patent #3,050,870
- Henrysson, A., Billinghamurst, M., Ollila, M.**, 2005, Face to Face Collaborative AR on Mobile Phones, Proceedings of the 4th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 80-89
- Herold, M., Menz, G., Clarke, K.C.**, 2001, Remote Sensing and Urban Growth Models – Demands and Perspectives, Proceedings of Symposium on Remote Sensing of Urban Areas, Vol. 35, 10 p

- Hill, A., Macintyre, B., Gandy, M., Davidson, B., Rouzati, H.,** 2010, KHARMA: A KML/HTML Architecture for Mobile Augmented Reality Applications, Proceedings of ISMAR 2010, 9 p.
- Holistic City Limited,** 2005-10, CityCAD: Technology for Liveable Cities, <http://www.holisticcity.co.uk/index.php>
- Höllerer, T., Feiner, S.,** 2004, Chapter Nine: Mobile Augmented Reality, Telegeoinformatics: Location-Based Computing and Services (H Karimi and AHammad), Taylor & Francis Books Ltd., 39 p
- Höllerer, T., Feiner, S., Pavlik, J.,** 1999A, Situated Documentaries: Embedding Multimedia Presentations in the Real World, Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC 99), pp 79-86.
- Höllerer, T., Feiner, S., Terauchi, T., Rashid, G., Hallaway, D.,** 1999B, Exploring MARS: Developing Indoor and Outdoor User Interfaces to a Mobile Augmented Reality System, Computers and Graphics, pp 779-785
- Holloway, R.L.,** 1995, Registration Errors in Augmented Reality Systems, PhD Thesis, Department of Computer Science, University of North Carolina, 242 p.
- Jacobson, I., Booch, G., Rumbaugh, J.,** 1999, *The Unified Software Development Process*, Addison-Wesley Professional
- Jankowski, P., Nyerges, T.,** 2001, GIS-Supported Collaborative Decision Making: Results of an Experiment, Annals of the Association of American Geographers, Vol. 91, No. 1, pp 48-70
- Julier, S., Baillot, Y., Brown, D., Lanzagorta, M.,** 2002, Information Filtering for Mobile Augmented Reality, Computer Graphics and Applications, Vol 22, No 5, 6 p
- Julier, S., Baillot, Y., Lanzagorta, M., Brown, D., Rosenblum, L.,** 2000, BARS: Battlefield Augmented Reality System, NATO Information Systems Technology Panel Symposium on New Information Processing Techniques for Military Systems, 7 p
- Julier, S., Baillot, Y., Lanzagorta, M., Rosenblum, L., Feiner, S., Höllerer, T., Sestito, S.,** 2000, Information Filtering for Mobile Augmented Reality, Proceedings of International Symposium on Augmented Reality 2000, pp 3-11

- Kalkusch, M., Lidy, T., Knapp, M., Reitmayr, G., Kaufmann, H., Schmalstieg, D.,** 2002, Structured Visual Markers for Indoor Pathfinding, Proceedings of the First IEEE International Workshop on ARToolKit (ART02), 8p
- Kato, H., Billinghurst, M.,** 1999, Marker Tracking and HMD Calibration for a video-based Augmented Reality Conferencing System, Proceedings of the 2nd International Workshop on Augmented Reality (IWAR 99), 10 p
- Kato, H., Billinghurst, M., Poupyrev, I., Imamoto, K., Tachibana, K.,** 2000, Virtual Object Manipulation on a Table-Top AR Environment, Proceedings of IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, pp. 111-119
- Kelly, K.,** 1989, Virtual Reality: An Interview With Jaron Lanier, Whole Earth Review, pp 108-119
- Keßler, C., Rinner, C., Raubal, M.,** 2005, An Argumentation Map Prototype to Support Decision-Making in Spatial Planning, Proceedings of the AGILE - 8th Conference on Geographic Information Science, pp. 135-142
- Klein, G.,** 2006, Visual Tracking for Augmented Reality, PhD Thesis, University of Cambridge, Department of Engineering, 193 p
- Kölsch, M., Bane, R., Höllerer, T., Turk, M.,** 2006, Multimodal Interaction with a Wearable Augmented Reality System, Computer Graphics, Vol. 26, No 3., pp. 62-71
- Laboratoire REGARD,** 2006, First International Workshop on Mobile Geospatial Augmented Reality, Université Laval, Banff, Alberta, Canada
- Lee, G.A., Billinghurst, M., Kim, G.J.,** 2004, Occlusion Based Interaction Methods for Tangible Augmented Reality Environments, in Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual Reality and its Applications in Industry, pp. 419-426
- Lepetit, V., Berger, M.O.,** 2000, Handling Occlusions in Augmented Reality Systems: A Semi-Automatic Method, Proceedings of International Symposium on Augmented Reality 2000 (ISAR 00), pp. 137-146
- Lindquist, M., Danahy, J.W.,** 2006, Community Initiated Public Participation: Altering the Urban Design Decision Making Process with Real-Time Immersive Visualization, CORP 2006 & Geomultimedia06

- Livingston, M.A.**, 2006, Quantification of Visual Capabilities using Augmented Reality Displays, Proceedings of the Fifth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp 3-12
- Livingston, M.A., Ai, Z.**, 2008, The Effect of Registration Error on Tracking Distant Augmented Objects, International Symposium on Mobile Augmented Reality 2008, pp 78- 86
- Lomas, C., Burke, M., Page, C.L.**, 2008, Collaboration Tools, Educause Learning Initiative White Papers, 11 p
- Lynch, K.**, 1981, A Theory of Good City Form, The MIT Press, Cambridge Massachusetts, and London, England
- Lynch, K., Hack, G.**, 1984, Site Planning, The MIT Press 3rd Edition, Cambridge, MA
- MacEachren, A.M., Brewer, I., Car, G., Chen, J.**, 2003, Visually-Enabled Geocollaboration to Support Data Exploration & Decision-Making, Proceedings of the 21st International Cartographic Conference, 8 p
- MacEachren, M.A., Cai, G., Rauschert, I., Brewer, I., Bolelli, L., Shaparenko, B., Fuhrmann, S., Wang, H.**, 2005, Enabling collaborative geoinformation access and decision-making through a natural, multimodal interface, International Journal of Geographical Information Science
- MacIntyre, B., Coelho, E., Julier, S.**, 2002, Estimating and Adapting to Registration Errors in Augmented Reality Systems, IEEE Virtual Reality Conference 2002 (VR 2002), pp. 73-80
- Malik, S., McDonald, C., Roth, G.**, 2002, Hand Tracking for Interactive Pattern-Based Augmented Reality, Proceedings of ISMAR 2002, 10 p
- Mayer I.S., Van Bueren, E.M., Bots, P.W.G., Van der Voort, H., Seijdel, R.**, 2005, Collaborative Decisionmaking for sustainable urban renewal projects: a simulation – gaming approach, Environment and Planning B: Planning and Design, Vol. 32, pp 403-423
- Mayer, I.S., Bueren, E.M.V., Bots, P.W.G., Voort, H.V.D.**, 2005, Collaborative Decisionmaking for Sustainable Urban Renewal Projects: A Simulation – Gaming Approach, Environment and Planning B: Planning and Design, Vol. 32, pp 403-423

- Mengis, J., Eppler, M.**, 2007, Seeing Versus Arguing The Moderating Role of Collaborative Visualization in Team Knowledge Integration, *Journal of Universal Knowledge Management*, 12 p
- Milgram, P., Kishino, F.**, 1994, A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays, *IEICE Transactions on Information Systems*, Vol E77-D, No.12, 15 p
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., Kishino, F.**, 1994, Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum, *Telemanipulator and Telepresence Technologies*, SPIE Vol. 2351, pp 282-292
- Mobilizy**, 2010, Wikitude, www.wikitude.org
- Morie, J.F.**, 2005, Virtual Reality, Immersion and the Unforgettable Experience, *Proceedings of the 2005 Electronic Imaging Society Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems*, 10 p
- MyNav**, 2010, MyNav : Park, Tag & Go, <http://www.winfieldco.com/>, Winfield & Co.
- Navab, N.**, 2003, Industrial Augmented Reality (IAR): Challenges in Design and Commercialization of Killer Apps, *Proceedings of the Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 5 p
- Navigation Center**, 2010, GPS Constellation Status for 09/12/2010, U.S. Department of Homeland Security, United States Coast Guard, <http://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus>
- Nedovic-Budic, Z.**, 2000, Geographic Information Science Implications for Urban and Regional Planning, *URISA Journal*, Vol. 12, No. 2, pp 81-93
- Oda. O., Feiner., S.**, 2010, GoblinXNA: A Platform for 3D AR and VR Research and Education, *Columbia University Computer Graphics & User Interfaces Lab*
- Office Québécois de la Langue Française**, 1996, Grand dictionnaire terminologique – Système – Domaine : Appareil, <http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/gdt.html>, [Accédé le 8 Août 2010]
- Office Québécois de la Langue Française**, 1998, Grand dictionnaire terminologique - Réalité Augmentée – Domaine : Informatique, <http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/gdt.html>, [Accédé le 7 Août 2010]

- Oh, J.Y., Stuerzlinger, W., Danahy, J.**, 2005, Comparing SESAME and Sketching on Paper for Conceptual 3D Design, EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling, pp 8
- Oh, J.Y., Stuerzlinger, W., Danahy, J.**, 2006, SESAME: Towards Better 3D Conceptual Design Systems, ACM Designing Interactive Systems, pp 80-89
- OpenSceneGraph Community**, 2010 OpenSceneGraph Home Page, <http://www.openscenegraph.org/projects/osg>
- Peng, Z.R.**, 2001, Internet GIS for Public Participation, Environment and Planning B: Planning and Design, Vol. 28, pp 889-905
- Percivall, G.**, 2011, Increasing Market Opportunities for Augmented Reality Through Collaborative Development of Open Standards, A Position Paper for the International AR Standards Meeting, 4 p
- Pierce, J.S., Forsberg, A., Conway, M.J., Hong, S., Zeleznik, R., Mine, M.R.**, 1997, Image Plane Interaction Techniques in 3D Immersive Environments, in Proceedings of the 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics, pp. 39–43.
- Pintaric, T., and Kaufmann, H.**, 2007, Affordable infrared-optical pose-tracking for virtual and augmented reality, Proceedings of Trends and Issues in Tracking for Virtual Environments Workshop, IEEE VR 2007, 8 p
- Qiu, F., Woller, K.L., Briggs, R.**, 2003, Modeling Urban Population Growth from Remotely Sensed Imagery and TIGER GIS Road Data, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 69, No. 9, pp 1031-1042
- Ralph, P., Wand, Y.**, 2009, A Proposal for a Formal Definition of the Design Concept, in Design Requirements Workshop, Lecture Notes on Business Information Processing, (eds) Lytinen, K., Loucopoulos. P., Mylopoulos, J. et Robinson, W., Springer-Verlag, pp 103-136
- Randall, T., Churchill, C.J., Baetz, B.W.**, 2005, Geographic Information System (GIS) Based Decision Support for Neighbourhood Traffic Calming, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 32, pp 86-98
- Raskar, R., Baar, J.V., Beardsley, P., Willwacher, T., Rao, S., Forlines, C.**, 2003, iLamps: Geometrically Aware and Self-Configuring Projectors, Proceedings of ACM SIGGRAPH 2003 Conference, 10 p

- Raza, A., Kainz, W.**, 2002, An Object-Oriented Approach for Modeling Urban Land-Use Change, URISA Journal
- Reitmayr, G., Drummond, T.W.**, 2006, Going Out: Robust Model-Based Tracking for Outdoor Augmented Reality, Proceedings of the 5th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp 109-118
- Reitmayr, G., Schmalstieg, D.**, 2001, Mobile Collaborative Augmented Reality, Proceedings of the International Symposium on Augmented Reality, pp 114-123
- Rekimoto, J.**, 1996, Augmented Reality Using the 2D Matrix Code, Proceedings of the Workshop on Interactive Systems and Software (WISS'96), 10 p
- Rinner, C.**, 1999, Argumaps for Spatial Planning, Proceedings of First International Workshop on Telegeoprocessing, pp 95-102
- Rinner, C., Bird, M.**, 2009, Evaluating Community Engagement through Argumentation Maps - A Public Participation GIS Case Study, Environment and Planning B, Vol. 36, No. 4, pp 588-601
- Rolland J.P., Cakmakci O.**, 2005, The Past, Present and Future of Head Mounted Display Designs, Proceedings of SPIE, Optical Design and Testing II, Vol 5638. pp 368-377
- Rolland J.P., Holloway, R.L., Fuchs, H.**, 1994, A Comparison of Optical and Video See-Through Head-Mounted Displays, Proceedings of SPIE, Telemicroscopy and Telepresence Technologies, Vol 2351, 15 p
- Rolland, J.P., Baillot, Y., Goon, A.A.**, 2001, A Survey of Tracking Technologies for Virtual Environments, In Barfield, W. and Caudell, T., editors, Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality, Lawrence Erlbaum Assoc, 48 p
- Roth, S.D.**, 1982, Ray Casting for Modeling Solids, Computer Graphics and Image Processing, Vol. 18, No 2, pp. 109-144
- Roy, B.**, 1985, Méthodologie multicritère d'aide à la décision, Economica, Paris, 423 p
- Ryu, S., Han, J., Jeong, J., Lee, S.H., Park, J.**, 2010, Real-Time Occlusion Culling for Augmented Reality, Proceedings of the 16th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision, 6 p
- Santerre, R.**, 2006, Positionnement par satellites GPS, Notes de cours GMT-20845, Département des sciences géomatiques, Université Laval

- Sareika M., Schamlstieg D.**, 2008, Urban Sketcher: Mixing Realities in the Urban Planning and Design Process, Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems, 4 p
- Seichter, H., Schnabel, M.A.**, 2005, Digital and Tangible Sensation, Proceedings of Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, pp 193-202
- Simon, H.A.**, 1977, The New Science of Management Decision (Revised Edition), Prentice-Hall Inc., New Jersey, 175 p
- Simon, H.A.**, 1996, The Sciences of the Artificial : Third Edition, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 231 p.
- Song, P., Yu, H., Winkler, S.**, 2009, Vision-Based 3D Finger Interactions for Mixed Reality Games with Physics Simulation, The International Journal of Virtual Reality, Vol. 8, No 2, pp. 1-6
- Souza, L.C.L, Rodrigues, D.S, Mendes, J.F.G.**, 2003, A 3D-GIS Extension for Sky View Factors Assessment in Urban Environments, Proceedings of the 8th International Conference on Computer in Urban Planning and Urban Management, 13 p
- St-Aubin, B., Mostafavi, M., Roche, S., Dedual, N.**, 2010, A 3D Collaborative Augmented Reality System for Urban Design and Planning Purposes, Proceedings of the Canadian Geomatics Conference, 6 p.
- Stoter, J., Zlatanova, S.**, 2003, 3D GIS, Where we Are Standing, Joint Workshop on Spatial, Temporal and Multi-Dimensional Data Modeling and Analysis, 6 p
- Stuerzlinger, W., Zaman, L., Pavlovych, A., Oh, J.Y.**, 2006, The Design and Realization of CoViD: A System for Collaborative Virtual 3D Design, Virtual Reality, Vol. 10, No. 2, pp 135-147
- Sutherland, I.E.**, 1968, A Head Mounted Three Dimensional Display, Proceedings of the Fall Joint Computer Conference (AFIPS) 33:1, pp 757-764
- Sykora, D., Sedlacek, D., Riege, K.**, 2008, Real-time Color Ball Tracking for Augmented Reality, Proceedings of the Eurographics Virtual Environments Symposium, 8 p

- Talbot, J., Meyer, J., Watts, R., Grasset, R.,** 2008, A Patient Position Guidance System in Radiation Therapy Using Augmented Reality, Proceedings of the 23rd International Conference on Image and Vision Computing, 5 p
- Theater, R.J., Pavlovych, A., Stuerzlinger, W., MacKenzie, I.S.,** 2009, Effect of tracking Technology, Latency, and Spatial Jitter on Object Movement, Proceedings of IEEE Symposium on 3D User Interfaces, pp 43-50
- Thomas, B., Close, B., Donoghue, J., Squires, J., De Bondi, P., Morris, M., Piekarski, W.,** 2000, ARQuake : An Outdoor/Indoor Augmented Reality First Person Application, Proceedings of the Fourth International Symposium on Wearable Computers (ISWC'00), 8 p
- Thomas, B., Demczuk, V., Piekarski, W., Hepworth, D., Gunther, B.,** 1998, A Wearable Computer System with Augmented Reality to Support Terrestrial Navigation, Proceedings of the 2nd International Symposium on Wearable Computers (ISWC1998), 4 p
- Thomas, V.,** 2010, Modélisation 3D pour la réalité augmentée : Une première expérimentation avec un appareil mobile, Mémoire de maîtrise, Département des Sciences Géomatiques, Université Laval
- UrbanSim,** 2011, www.urbansim.org/Documentation/ScreenShots
- Urbanspoon,** 2009, Scope, www.urbanspoon.com
- Vallino, J.,** 1998, Interactive Augmented Reality, PhD Thesis, University of Rochester, Rochester, New York, 94 p
- Vallino, J., Brown, C.,** 1999, Haptics in Augmented Reality, Proceedings of the International Conference on Multimedia Computing and Systems, Vol. 1, pp. 195-200
- Vlahakis V., Ioannidis, N., Karigiannis, J., Tsotros, M., Gounaris, M., Stricker, D., Gleue, T., Daehne, P., Almeida, L.,** 2002, Archeoguide: An Augmented Reality Guide for Archaeological Sites, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol 22, No 5, pp 52-60
- Vlahakis V., Karigiannis, J., Tsotros, M., Gounaris, M., Almeida, L., Stricker, D., Gleue, T., Christou, I., Carlucci, R., Ioannidis, N.,** 2001, ARCHEOGUIDE: First Results of an Augmented Reality, Mobile Computing System in Cultural Heritage Sites, Virtual Reality, Archaeology, and Cultural Heritage International Symposium (VAST'01),pp 132-140

- Voss, A., Denisovich, I., Gatalsky, P., Gavouchidis, K., Klotz, A., Roeder, S., Voss, H.**, 2004, Evolution of a Participatory GIS, Computer Environment and Urban Systems, Vol. 28, pp 635-651
- Waddell, P.**, 2002, UrbanSim: Modeling Urban Development for Land Use, Transportation and Environmental Planning, Journal of the American Planning Association, Vol. 68 No. 3, pp 297-314
- Waddell, P., Wang, L., Liu, X.**, 2008, UrbanSim: An Evolving Planning Support System for Evolving Communities, Planning Support Systems for Cities and Regions, ed by Richard Brail, Cambridge Massachussets, pp 103-138
- Wagner, D.**, Christian Doppler Laboratory for Handheld Augmented Reality, 2009, History of Mobile Augmented Reality, <https://www.icg.tugraz.at/~daniel/HistoryOfMobileAR/>
- Wagner, D., Reitmayr, G., Mulloni, A., Drummond, T., Schmalstieg, D.**, 2008, Pose Tracking from Natural Features on Mobile Phones, Proceedings of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 10 p
- Wang, X., Gu, N., Marchant, D.**, 2008, An Empirical Study on Designers' Perceptions of Augmented Reality Within an Architectural Firm, Journal of Information Technology in Construction, Vol. 13, 17 p
- Wang, X., Gu, N., Marchant, D., Gong, Y., Kim, M.J.**, 2007, Perceptions of Augmented Reality in the Design Sector, Proceedings of the 7th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, pp 132-138
- Weiner, D., Harris, T.M., Craig, W.J.**, 2002, Community Participation and Geographic Information Systems, CRC Press, 416 p
- White, S., Feiner, S.**, 2009, SiteLens: Situated Visualization Techniques for Urban Site Visits, in Proceedings of the 27th International Conference on Human Factors in Computing Systems, 4 p
- White, S., Feiner, S., Kopylec, J.**, 2006, Virtual Vouchers: Prototyping a Mobile Augmented Reality User Interface for Botanical Species Identification, IEEE Symposium on 3D User Interfaces, pp 119-126
- Wikipedia**, 2010, Augmented Reality, http://en.wikipedia.org/wiki/Augmented_Reality
- Wikipedia**, 2010, Desktop Computer, http://en.wikipedia.org/wiki/Desktop_computer

Wikipedia, 2010, Videoplace, <http://en.wikipedia.org/wiki/Videoplace>

Wittner B.G., Singer, M.J., 1998, Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire, *Presence*, Vol. 7, No. 3, pp 225-240

Wloka M.M., Anderson, B.G., 1995, Resolving Occlusion in Augmented Reality, *Proceedings of the 1995 Symposium on Interactive 3D Graphics*, pp 5-12

Yang, P.P., Putra, S.Y., Li, W., 2007, Viewsphere: A GIS-Based 3D Visibility Analysis for Urban Design Evaluation, *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 34, pp 971-992

Zlatanova, S., 2002, *Augmented Reality Technology*, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, 75 p

Zlatanova, S., Abdul Rahman, A., Pilouk, M., 2002, 3D GIS: Current Status and Perspectives, in *Proceedings of Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications*, 6 p

Zlatanova, S., Abdul Rahman, A., Pilouk, M., 2002, Trends in 3D GIS Development, *Journal of Geospatial Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp 1-10

ANNEXE A : SPÉCIFICATIONS DU VUZIX IWEAR VR920



THE NEW VIRTUAL REALITY

Connects to PCs and laptops.

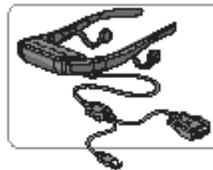
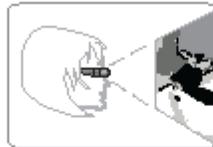
Just plug in and view extraordinary high resolution video on a virtual display equivalent to a 62-inch screen at 9 feet. iWear® 3D and integrated 3 Degree of Freedom (DOF) tracker and built-in microphone deliver the ultimate interactive online experience.

Supported Media:

- Plug and play video with virtually all PC applications
- Thousands of pre-existing applications in full 3D
- The VR920 will completely change the plethora of massively multiplayer online applications from World of Warcraft to Internet chat in virtual worlds

Features:

- 6-foot slim single-cable design with USB and VGA connectors
- Large field-of-view optics to allow a fully immersive experience
- iWear® 3D enabled for automatic 2D/3D control; no buttons required
- Built-in microphone allows users to communicate from anywhere in the world as if they are standing next to each other
- Integrated 3 DOF head-tracker lets users look around inside of virtual worlds as if they are actually there



User Adjustable:

- Removable, integrated speakers (no clumsy uncomfortable earbuds) can be upgraded or removed to allow the user to plug in their own headsets
- AccuTilt™ viewer pivots up to 15 degrees for comfortable viewing angle
- Soft, comfortable, hypo-allergenic nosepiece extends up to 3/8"
- Custom fit headstrap for extra secure fit

Advanced Optics:

- 32-degree field of view
- 3/4" eye relief and 5/16" eyebox
- 2-3/8" intraocular distance (IOD)
- Color corrected 10th order aspherical lens with diffractive surface

Technical Specifications:

- Twin high-resolution 640x480 (920,000 pixels) LCD displays
- Equivalent to a 62" screen viewed at 9 feet
- 24-bit true color (16 million colors)
- Visor weighs 3.2 ounces

- 60 Hz progressive scan display update rates

- Fully iWear® 3D compliant and supports NVIDIA stereo drivers
- Built-in noise-canceling microphone for internet VOIP communications
- Built-in 3 degree of freedom head-tracker
- USB connectivity for power, tracking and full duplex audio
- Analog VGA monitor input
- Support for up to 1024x768 VGA video formats

Box Contents:

- iWear VR920
- Headstrap
- Lens cleaning carrying pouch
- Drivers, manual and software disc
- Quickstart guide with warranty and safety instructions



CORPORATE HEADQUARTERS:

Vuzix Corporation
2166 Brighton Henrietta Townline Rd.
Rochester, NY 14623
P 800-436-7838
F 585-359-4172
www.vuzix.com

SALES OFFICE:

Vuzix Corporation
75 Town Centre Dr.
Rochester, NY 14623
P 800-436-7838
F 585-359-4172

© 2007 Vuzix Corporation (formerly Inall Corporation). All rights reserved. All trade names are registered trademarks of their respective owners. Vuzix patents and patents pending.

Designed by Vuzix in New York • Made in USA

FOR HOME OR OFFICE USE

ANNEXE B : DÉROULEMENT DE L'EXPÉRIMENTATION

Test #1 : Création et configuration d'une scène 3D

- a) Créer une nouvelle scène
- b) Ajuster les paramètres de la caméra
- c) Ajouter un *Marker* terrain à la scène
- d) Ajouter et positionner le relief, maisons et routes sur le *Marker* terrain
- e) Configurer la couleur des objets ajoutés
- f) Ajouter et positionner 3 bâtiments spécifiques
- g) Doubler la grosseur du deuxième bâtiment
- h) Effectuer une rotation au deuxième bâtiment
- i) Doubler la grosseur de la scène
- j) Effectuer une rotation à la scène
- k) Changer la couleur d'un bâtiment
- l) Ajouter un cache-marker
- m) Modifier les données descriptives d'un bâtiment
- n) Effacer un bâtiment
- o) Sauvegarder la scène
- p) Créer une requête

Test #2 : Interaction avec la scène

- a) Sélection d'un élément de la scène
- b) Visualiser ses attributs
- c) Changer de page du livre de note virtuel si possible
- d) Faire une rotation au modèle du livre virtuel
- e) Répéter a) à e) 3 fois
- f) Afficher la requête

Questions

- a) Quels sont les plus gros obstacles à son utilisation grand public?
- b) Voyez-vous une utilité à ce genre d'application?
- c) Qu'est-ce qui rendrait cette application plus pratique en consultation publique?

Commentaires, suggestions