



HAL
open science

Étude et analyses comparatives des solutions existantes sur les outils de réalité virtuelle et de réalité augmentée pour des applications de positionnement de réseaux enterrés

Axel Heiligenstein

► To cite this version:

Axel Heiligenstein. Étude et analyses comparatives des solutions existantes sur les outils de réalité virtuelle et de réalité augmentée pour des applications de positionnement de réseaux enterrés. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03562596

HAL Id: dumas-03562596

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03562596v1>

Submitted on 9 Feb 2022

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

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

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Axel HEILIGENSTEIN

Etude et analyses comparatives des solutions existantes sur les outils de
réalité virtuelle et de réalité augmentée pour des applications de
positionnement de réseaux enterrés.

Soutenu le 07/09/2021

JURY

Monsieur Christophe CHARLET	Président du jury
Monsieur Pierre GUERRA	Maître de stage
Monsieur Laurent MOREL	Enseignant référent

Remerciements

Je voudrais vivement remercier toutes les personnes qui ont permis le bon déroulement de mon stage de fin d'étude.

Tout d'abord je remercie mon tuteur de stage Monsieur Pierre GUERRA, de m'avoir proposé ce sujet captivant et innovant et de m'avoir aiguillé dans la recherche et l'acquisition des différentes technologies. Je remercie Monsieur Marc DAEFFLER d'avoir bien voulu m'accueillir chez Kadran Ingénierie.

Je remercie également Madame Claire CADIEU pour ses conseils techniques et ses critiques constructives sur les différentes manipulations que j'ai pu faire.

Je remercie Monsieur Laurent MOREL, mon professeur référent, pour ses précieuses recommandations rédactionnelles.

Je souhaite aussi remercier l'ensemble des membres de l'entreprise pour le savoir-faire et l'expérience qu'ils ont pu m'apporter au cours de ces cinq mois de stage.

Je remercie les différentes entreprises qui m'ont permis de tester leur matériel et qui ont pris le temps de répondre à mes questions.

Enfin je remercie mes parents et mes amis qui m'ont soutenu non seulement lors de ce stage mais aussi tout au long de mes études et qui m'ont permis d'avoir l'honneur de présenter ce mémoire.

Liste des abréviations

AFNOR : Association Française de NORmalisation.

AR : Réalité Augmentée.

BIM : Building Information Modeling.

DT-DICT : Déclaration de Travaux Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux.

GNSS : Géolocalisation et Navigation par un Système Satellites.

GPRS : General Packet Radio Service.

IGN : Institut National de l'Information géographique et forestière

IMU : Inertial Measurement Unit, centrale inertielle en anglais.

NRTK : Network Real Time Kinematic.

SLAM : Simultaneous Localization And Mapping.

VR : Réalité Virtuelle.

Glossaire

Hardware : L'ensemble des composants physiques d'un appareil informatique, un smartphone dans notre cas. L'écran tactile, le capteur photo ou le processeur sont des éléments hardware par exemple.

LiDAR : Pour Ligth Detection And Ranging. Technologie permettant la mesure de distance entre le capteur et un objet grâce aux impulsions de lumière infrarouge qu'il émet.

Photogrammétrie : Technique permettant d'obtenir des dimensions à partir de plusieurs images d'une même zone grâce à la différence de point de vue.

Réalité augmentée : Un système qui superpose des éléments fictifs à une visualisation du réel en temps réel.

Réalité virtuelle : Environnement totalement fictif dans lequel on peut se déplacer comme dans le monde réel.

Software : La partie software ou logicielle en français constitue l'ensemble des programmes permettant à un appareil de fonctionner.

Vidéogrammétrie : Principe identique à la photogrammétrie mais au lieu d'utiliser une série de photos on utilise une vidéo dont on extrait les photos. On gagne alors en vitesse d'acquisition au détriment de la qualité.

Table des matières

Remerciements	2
Liste des abréviations	3
Glossaire	4
Introduction	7
I ÉTAT DE L'ART	10
I.1 LA REGLEMENTATION EN VIGUEUR	10
I.1.1 La réforme anti-endommagement de 2012	10
I.1.2 Arrêté du 16 septembre 2003	11
I.1.3 Norme NF S70-003	12
I.1.4 Certification en géoréférencement	12
I.2 METHODES TOPOGRAPHIQUES UTILISEES DANS LE CADRE DES RESEAUX CHEZ KADRAN	13
I.2.1 Visualisation et matérialisation des réseaux par méthodes topographiques	13
I.2.1.1 Plan des réseaux	13
I.2.1.2 Marquage-piquetage	15
I.2.2 Les instruments utilisés dans l'entreprise pour le marquage ou le récolement de réseaux ..	15
I.2.2.1 Marquage-piquetage ou récolement par GNSS	15
I.2.2.2 Marquage-piquetage ou récolement par tachéomètre	16
II PRESENTATION DES SOLUTIONS DE REALITE AUGMENTEE ET DE LEUR FONCTIONNEMENT	17
II.1 LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES EMBARQUEES DANS LES SYSTEMES	17
II.1.1 Le smartphone et la tablette	17
II.1.1.1 La puce GNSS	17
II.1.1.2 La centrale inertielle	18
II.1.1.2.1 L'accéléromètre	18
II.1.1.2.2 Le gyromètre	18
II.1.1.2.3 Le magnétomètre	18
II.1.1.3 Le capteur photo	19
II.1.1.3.1 Rappel de la technique de photogrammétrie ou vidéogrammétrie	19
II.1.1.3.2 Algorithmes AR Core et AR Kit	19
II.1.1.4 Le capteur LiDAR d'Apple	21
II.1.2 Les capteurs externes	22
II.1.2.1.1 Un récepteur GNSS plus précis	22
II.1.2.1.2 Un distancemètre	22
II.2 LES DIFFERENTES SOLUTIONS DISPONIBLES SUR LE MARCHE	23
II.2.1 Inventaire non exhaustif des solutions	23
II.2.2 Modèle économique	24
II.2.3 Comparaison logiciel pour les 3 solutions testées	24
II.2.3.1 Au bureau	25
II.2.3.1.1 Conversion des données source	25
II.2.3.1.2 Plateforme en ligne	25
II.2.3.1.3 Export des données terrain	26
II.2.3.2 Sur le smartphone	26
III TEST DES SOLUTIONS RETENUES	28
III.1 PRESENTATION DES APPLICATIONS	28
III.1.1 Positionnement du modèle pour la visualisation	28
III.1.2 Mesure de la profondeur	30
III.1.2.1 Par mesure directe entre le plan estimé du sol et le modèle	30
III.1.2.2 Par visualisation à partir du plan estimé du sol	31
III.1.2.3 Par mesure entre un point sur le sol et un point sur le modèle	31

III.1.3	Marquage – piquetage des réseaux.....	32
III.1.3.1	À partir de la visualisation.....	32
III.1.3.2	À partir de leur projection	32
III.1.3.3	En utilisation classique du récepteur GNSS	33
III.1.4	Récolement ou levé de points	33
III.2	TESTS DES SOLUTIONS	34
III.2.1	Références des tests	34
III.2.2	Test de la visualisation en réalité augmentée	37
III.2.2.1	Méthode de mesure	37
III.2.2.2	Résultats pour le positionnement absolu	38
III.2.2.3	Résultats pour le positionnement relatif	38
III.2.2.4	Mesure de la profondeur.....	38
III.2.3	Marquage- traçage d'un réseau	39
III.2.3.1	Méthode de mesure	39
III.2.3.2	Résultats du marquage en positionnement absolu... ..	40
III.2.3.2.1	...directement à partir de la visualisation en 3D	40
III.2.3.2.2	... à partir de la projection manuelle ou automatique.....	40
III.2.3.2.3	...en utilisant classiquement le récepteur GNSS	41
III.2.3.3	Résultats du marquage en positionnement relatif... ..	41
III.2.3.3.1	...directement à partir de la visualisation en 3D	41
III.2.3.3.2	... à partir de la projection manuelle ou automatique.....	42
III.2.4	Levé de points	42
III.2.4.1	Résultat et classe de précision	42
III.2.4.2	Levé de réseau en tranchée ouverte.....	43
	Conclusion.....	45
	Bibliographie	47
	Liste des figures.....	49
	Liste des tableaux	50

Introduction

Les réseaux enterrés représentaient environ 2,7 millions de kilomètres en 2012 en France et plus de 400 accidents par jour se sont produits cette année-là, entraînant des conséquences plus ou moins graves sur la sécurité des personnes et des biens alentours ainsi que sur l'environnement.

Depuis la mise en place de la réforme « anti-endommagement des réseaux ¹ » entrée en vigueur le premier juillet 2012, le nombre d'accidents a été divisé par deux pour les réseaux dangereux comme le gaz et a diminué de trente pour cent pour les autres (eau, électricité)². La principale mesure portée par cette réforme concerne la localisation préalable des réseaux existants dans l'emprise d'un projet de travaux ; les exploitants des réseaux sont ainsi chargés de mettre à disposition du public et des collectivités, une cartographie des réseaux existants par l'intermédiaire d'un guichet unique³. Le maître d'ouvrage obtient ces informations à la suite d'une DT-DICT, il est alors dans l'obligation de matérialiser en surface les réseaux par un marquage ou un piquetage et de l'entretenir pendant toute la durée du chantier⁴. La précision de cette localisation est définie par l'arrêté du 15 février 2012 qui fixe trois classes de précision : A, B et C.

L'entreprise Kadran, qui par l'intermédiaire de sa filiale Géotopo possède la certification de prestataire en localisation de réseaux obligatoire depuis octobre 2018⁵, cherche à proposer à ses clients habituels ses services pour intervenir dans le cadre des réseaux, aussi bien du levé en tranchée ouverte que du marquage-piquetage afin de fluidifier les chantiers. Mais parfois la complexité des réseaux souterrains, ne facilite pas la visualisation des réseaux, en particulier en centre-ville où ils se sont accumulés au fur et à mesure des constructions. C'est pour cela que Kadran a souhaité prospecter dans les solutions innovantes d'AR et de VR. En effet ces solutions permettraient de « voir à travers le sol » si tant est qu'on ait suffisamment de données en amont.

¹ Articles L554 du Code de l'environnement.

² Site de la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement des Pays de la Loire.

³ Article L554-1 du Code de l'environnement.

⁴ Article R554-27 du Code de l'environnement.

⁵ Arrêté ministériel du 26 octobre 2018 modifiant l'arrêté du 15 février 2012.

Ce mémoire, bien que centré sur l'aspect visualisation, n'exclut pas les autres applications proposées par les différents systèmes existants sur le marché, que ce soit :

- Du récolement en tranchée ouverte par photogrammétrie, vidéogrammétrie ou par interface de réalité augmentée
- De l'implantation, pour le traçage de réseau en particulier
- Du levé de points pour compléter les données existantes
- De l'annotation, avec la possibilité d'enrichir les informations, de faire des corrections ou des remarques.

Les solutions de réalité augmentée se sont montrées beaucoup plus pertinentes puisqu'elles permettent de superposer directement les réseaux sur le sol, là où la réalité virtuelle nécessite à la fois d'acquérir les données des réseaux mais aussi de l'environnement pour en avoir une bonne représentation.

Les solutions existantes fonctionnent grâce à la coordination de plusieurs technologies, parfois couplées différemment, dans le but de positionner et de maintenir positionné le modèle 3D par rapport au réel.

La composante commune est le smartphone ou la tablette qui permet le calcul en temps réel ainsi que l'acquisition vidéo ou photo, une « centrale inertielle » et une puce GNSS. Ils peuvent être couplés à un GNSS professionnel, garantissant ainsi une plus grande précision de positionnement mais peut aussi utiliser un LiDAR.

Notre objectif est donc de comparer la précision des différentes solutions par rapport aux méthodes traditionnelles utilisées par le géomètre chez Kadran. Mais nous attacherons aussi une grande importance à l'intuitivité de l'interface, à la facilité et au temps requis pour fournir et pour exploiter les données. Et bien entendu nous étudierons le modèle économique proposé afin que le déploiement de cette technologie soit viable pour l'entreprise.

Ce mémoire présentera tout d'abord l'état de l'art des règles juridiques qui s'appliquent à la localisation des réseaux puis les méthodes actuellement utilisées dans l'entreprise. Cela permettra de définir un cahier des charges à respecter par les différentes solutions pour qu'elles puissent pleinement remplacer celles actuellement utilisées. Puis nous présenterons les systèmes existants, le fonctionnement des technologies qui les composent et l'adaptation des fichiers et des logiciels par rapport aux logiciels utilisés

chez Kadran. Enfin nous testerons les différentes applications et leur qualité afin de déterminer si elles respectent le cahier des charges défini précédemment et ainsi donner un avis sur la pertinence ou non d'investir dans cette technologie.

I État de l'art

Dans cet état de l'art nous allons étudier les exigences réglementaires en vigueur concernant les réseaux afin de s'assurer que les systèmes existants puissent les respecter. Nous présenterons aussi les méthodes topographiques utilisées dans l'entreprise et quelles sont les problématiques que les systèmes de réalité augmentée pourraient améliorer.

I.1 La réglementation en vigueur

I.1.1 La réforme anti-endommagement de 2012

Le législateur constatant que les réglementations applicables jusqu'ici pouvaient être améliorées afin de réduire le nombre d'accident lors de travaux à proximité de réseaux, il lance une nouvelle réforme qui est entrée en vigueur le 1^{er} juillet 2012. Elle fixe ainsi une série de mesure concernant principalement la documentation des réseaux et en particulier leur positionnement.

Ainsi, à compter de cette date, les nouveaux réseaux doivent être localisés dans le système géodésique légal français⁶ ; depuis le 1^{er} janvier 2020 les anciens réseaux sensibles en zone urbaine doivent aussi être géoréférencés et les gestionnaires de réseaux ont jusqu'au 1^{er} juillet 2032 pour que l'intégralité des plans soient repérés.

Le géoréférencement est soumis à 3 classes de précision⁷ qui correspond à l'incertitude entre la position réelle et la position théorique (planimétrique et altimétrique combinées) documentée de l'ouvrage :

- La classe A, soit au maximum 40 centimètres pour les ouvrages rigides, 50 centimètres lorsqu'ils sont flexibles et 80 centimètres « pour les ouvrages souterrains de génie civil attachés aux installations destinées à la circulation de véhicules de transport ferroviaire ou guidé lorsque ces ouvrages ont été construits antérieurement au 1er janvier 2011 ».
- La classe B si l'incertitude ne respecte plus la classe A, l'erreur étant portée à 1,5 mètre sauf pour les branchements où elle est de 1 mètre.
- Si l'exploitant n'est pas en mesure de fournir la localisation dans une incertitude de 1,5 mètre ou s'il ne connaît pas du tout leur position alors l'ouvrage est rangé dans la classe C.

⁶ Décret n°2000-1276 du 26 décembre 2000 modifié par l'arrêté du 5 mars 2019 et définissant le RGF93 comme système planimétrique de référence et l'IGN69 comme système altimétrique.

⁷ Article 1 de l'arrêté du 15 février 2012 qui définit les 3 classes de précision.

La mesure s'effectue au niveau de la génératrice supérieure pour un ouvrage souterrain ou subaquatique et de la génératrice inférieure pour les réseaux aériens. La génératrice correspond à la ligne formée par l'ensemble des points hauts ou bas dans le cas d'une canalisation circulaire. Le plan doit aussi mentionner le diamètre de l'ouvrage ou sa plus grande dimension orthogonale au tracé⁸, cela permet de modéliser correctement le réseau et de déterminer son emprise sur le sol.

Ces données de géolocalisation des réseaux permettent d'obtenir une position approximative des réseaux et ainsi d'éviter certains accidents en faisant attention lors des travaux, néanmoins les techniques topographiques actuelles permettent d'obtenir une meilleure précision.

I.1.2 Arrêté du 16 septembre 2003

C'est l'arrêté du 16 septembre 2003 qui fixe les classes de précision appliquées aux travaux topographiques réalisés par l'Etat, les collectivités locales ou exécutés pour leur compte⁹. Cet arrêté a pour but de contrôler l'erreur de positionnement des objets levés, elle correspond à la somme quadratique de trois erreurs individuelles¹⁰ :

- L'erreur interne qui correspond à l'erreur relative des mesures entre elles
- L'erreur propre au réseau légal de référence qui correspond à la précision des points géodésiques utilisés lors du rattachement
- L'erreur de rattachement correspond à l'écart entre les mesures du réseau légal et les mesures relatives.

Dans notre cas nous allons étudier directement la classe de précision totale puisque à l'avenir l'intégralité des réseaux seront géoréférencés dans le système légal. Celle-ci se détermine à partir d'un échantillon de points que l'on contrôle grâce à un dispositif fournissant une précision au moins 2 fois supérieure à la classe de précision recherchée¹¹. De plus il est essentiel de dissocier la planimétrie et l'altimétrie comme il existe 2 systèmes légaux distincts¹².

⁸ Article 7 de l'arrêté du 15 février 2012.

⁹ Article 1 de l'arrêté du 16 septembre 2003.

¹⁰ Article 6 de l'arrêté du 16 septembre 2003.

¹¹ Article 3 de l'arrêté du 16 septembre 2003.

¹² Décret n°2000-1276 du 26 décembre 2000 modifié par l'arrêté du 5 mars 2019 et définissant le RGF93 comme système planimétrique de référence et l'IGN69 comme système altimétrique.

Ainsi pour déterminer une classe de précision [xx], les écarts doivent vérifier 3 conditions :

- L'écart moyen en position doit être inférieur à : $T0 = [xx] * (1 + \frac{1}{2 * C^2})$ avec
 - C le coefficient de précision des mesures de contrôle (nous utiliserons 2 car c'est la valeur minimale).
- Le nombre d'écarts supérieur à T1 ne doit pas excéder N':

$T1 = k * [xx] * T0$ avec :

 - k un coefficient dépendant du nombre de coordonnées, k=2.42 pour la planimétrie (2 coordonnées) et k=3.23 pour l'altimétrie (1 coordonnée).
 - N' l'entier supérieur à $0,01 * N + 0,0232 * \sqrt{N}$ avec N le nombre de mesures dans l'échantillon.

N	De 1 à 4	De 5 à 13	De 14 à 44	De 45 à 85	De 86 à 132	De 133 à 184	De 185 à 240	De 241 à 298	De 299 à 359	De 360 à 422	De 423 à 487
N'	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Tableau 1: Valeur de N' en fonction du nombre de mesures de contrôle

- Aucun écart ne dépasse : $T3 = 1,5 * T2$.

I.1.3 Norme NF S70-003

Au 1er juillet 2012, l'AFNOR publie la norme NF S70-003, ajustée le 3 décembre 2019, dont la partie 3 concerne le géoréférencement des ouvrages. Cette norme, optionnelle, reprend les valeurs de la classe A de l'arrêté de 2003 mais des différences sont constatées et on obtient des valeurs moins contraignantes : 41 centimètres en planimétrie et 60 centimètres en altimétrie¹³.

Lors de nos tests des différentes solutions AR, nous utiliserons donc l'arrêté du 16 septembre 2003 pour calculer la classe de précision de chaque système.

I.1.4 Certification en géoréférencement.

Depuis le 1^{er} janvier 2018, les prestataires en localisation des réseaux doivent être détenteurs d'une certification telle que décrite dans l'arrêté du 19 février 2013 pour effectuer les plans de récolement des nouveaux réseaux. Ce texte propose 3 options de certification

¹³ LOUVET Sélim. Mise en place d'un dispositif de repérage de réseaux enterrés fondé sur la technologie RFID.

en fonction des activités couvertes, celle qui nous intéresse ici concerne le géoréférencement¹⁴ de relevés topographiques¹⁵, elle permet de relever les réseaux en tranchée ouverte.

Cette certification est délivrée à la suite d'un audit de l'entreprise, elle est valable 6 ans, renouvelable et nécessite un audit de surveillance tous les 3 ans. La procédure de certification a pour objectif de vérifier la capacité de l'entreprise à fournir des plans conformes à l'arrêté DT-DICT¹⁶. On vérifie ainsi les outils : une station totale pour les levés urbains ou les zones non couvertes, un système GNSS avec possibilité de post-traitement ainsi qu'un logiciel de topographie permettant les calculs. Les outils matériels doivent être correctement étalonnés. De même les personnes chargées des levés doivent être compétentes concernant l'utilisation de ces outils et respecte des procédures mises en place par l'entreprise.

I.2 Méthodes topographiques utilisées dans le cadre des réseaux chez Kadran

Les méthodes topographiques traditionnelles sont utilisées dans l'entreprise, que ce soit pour le marquage des réseaux ou pour le récolement de ceux-ci. Le géomètre intervient la plupart du temps dans une situation de chantier, c'est-à-dire dans un environnement qui change d'une intervention à l'autre, il est donc important que les méthodes puissent s'adapter facilement.

I.2.1 Visualisation et matérialisation des réseaux par méthodes topographiques

La visualisation de l'emplacement des réseaux est très importante pour le maître d'œuvre et pour les ouvriers qui vont travailler à proximité de réseaux enterrés. Cette connaissance passe d'abord par l'étude des plans de l'existant puis par un marquage piquetage avant le début des travaux.

I.2.1.1 Plan des réseaux

Les exploitants de réseaux répondent aux DT-DICT avec des plans topographiques, au minimum au 1 :200^{ème}. Ainsi si le maître d'ouvrage ou le chef de chantier souhaite

¹⁴ Toujours dans le système légal français défini par le décret n°2000-1276 du 26 décembre 2000 modifié par l'arrêté du 5 mars 2019 et définissant le RGF93 comme système planimétrique de référence et l'IGN69 comme système altimétrique.

¹⁵ Annexe II de l'arrêté du 19 février 2013.

¹⁶ Arrêté du 15 février 2012 dit arrêté « DT-DICT ».

rapidement visualiser l'emplacement du réseau sur le terrain, il va mesurer sur le plan avec une règle graduée dont l'estimation de la mesure au demi-millimètre permet d'arrondir correctement au millimètre ce qui représente une erreur de 20 centimètres sur le terrain à cette échelle. A cela s'ajoute l'erreur de chaînage et l'imprécision due à la position de l'élément à partir duquel il prend la côte. Si le fond de plan est uniquement le cadastre il risque d'y avoir une erreur plus importante au vu de la précision des limites dessinées. Certains plans arborent des côtes à partir d'éléments existants (Figure 1) dont la précision est garantie, le plus souvent, au centimètre mais il reste difficile de trianguler avec des côtes souvent prise à partir d'affleurants, c'est pour cela qu'il est obligatoire de matérialiser les réseaux tout au long du chantier.

Enfin, il est difficile de se représenter la profondeur à laquelle se situent les ouvrages, l'altitude du réseau étant obligatoirement mentionnée, puisque cela fait partie du géoréférencement, mais l'altitude du terrain naturel ou la profondeur par rapport à celui-ci ne l'étant pas. Cependant, les bases de données de l'IGN nouvellement disponibles comme



Figure 1: Extrait d'un ancien plan de récolement à l'échelle 1/200 dans le système planimétrique Lambert II et le système altimétrique IGN69. On retrouve en fond de plan une carte aérienne mais la taille pixel sol étant de 20 centimètres, il est impossible de prendre des mesures à partir de celui-ci (source : plan Kadran).

la RGE Alti, qui est un modèle numérique de terrain à l'échelle de la France et qui a « une précision variable portée à vingt centimètres dans les zones inondables ou littorales »¹⁷, permettrai d'effectuer ce calcul de la profondeur.

I.2.1.2 Marquage-piquetage

Conformément à l'article R554-27 du Code de l'environnement, « le marquage ou piquetage est obligatoire pour tout élément souterrain situé dans l'emprise ou à moins de 2 mètres, en projection horizontale, de l'emprise des travaux [...]. Il est effectué en tenant compte de l'incertitude de la localisation de l'ouvrage concerné ». Le marquage est utilisé en zone urbaine, c'est un traçage à la bombe de peinture, le piquetage est utilisé sur sol naturel à l'aide de piquets en bois. Cette opération doit répondre à la norme NF P98-332¹⁸ et un procès-verbal de marquage-piquetage est établi, en indiquant la nature de la matérialisation ainsi que des recommandations et indications techniques pour les ouvriers. La matérialisation comprend la position du réseau ainsi que la zone d'incertitude liée à la classe de positionnement. L'altitude doit aussi être indiquée. Le maître d'ouvrage a donc la responsabilité de procéder à cette matérialisation mais le plus souvent il fait appel à un géomètre certifié qui utilise des instruments plus précis¹⁹.

I.2.2 Les instruments utilisés dans l'entreprise pour le marquage ou le récolement de réseaux

L'entreprise possède un parc assez varié d'outils allant du niveau mécanique au scanner dynamique embarqué en passant par le tachéomètre et le GNSS. Ces deux derniers sont utilisés pour les travaux liés aux réseaux, que ce soit pour le marquage-piquetage ou pour le récolement en tranchée ouverte. Nous parlerons uniquement du levé en tranchée ouverte, le levé en tranchée fermée nécessitant des instruments propres à la détection de réseau que les systèmes AR étudiés dans la suite du rapport ne cherchent pas à concurrencer.

I.2.2.1 Marquage-piquetage ou récolement par GNSS

L'utilisation du GNSS avec la stratégie NRTK est priorisée pour les chantiers situés en dehors de zones urbaines. Le NRTK (précision de 2 à 5cm) permet d'assurer la classe A. Cette méthode nécessite une connexion GPRS afin de recevoir les corrections en temps réel

¹⁷ Information sur la RGE Alti disponible sur <https://geoservices.ign.fr/rgealti>

¹⁸ La norme NF P98-332 fournit un code couleur en fonction du type de réseau présent.

¹⁹ Cf paragraphe I.2.1.1 : la matérialisation à partir de mesure sur plan à une précision de l'ordre de 20 centimètres. Les instruments plus précis sont détaillés dans le paragraphe I.2.2.

néanmoins nous sommes de moins en moins sensibles au problème des zones blanches qui bloquent l'utilisation de cette méthode. Dans les zones urbaines, la présence de masques empêche la bonne répartition de la constellation de satellites et les bâtiments créent un phénomène de multi-trajet. Ces erreurs viennent dégrader la précision de la position calculée. Il est alors nécessaire de coupler l'utilisation du GNSS à une station totale.

I.2.2.2 Marquage-piquetage ou récolement par tachéomètre

Le tachéomètre est utilisé en zone urbaine ou forestière car il n'est pas sensible à son environnement (masque, multi-trajets) en revanche il est nécessaire d'obtenir les coordonnées dans le système légal. Pour cela, on utilise l'antenne GNSS pour placer des points connus au sol dans des zones dégagées et qui nous serviront de référence. Parfois, la polygonale du chantier étant connue et géoréférencée, nous n'avons pas besoin de faire cette manipulation et la précision relative entre le marquage des réseaux et les limites du chantier est améliorée. La précision des tachéomètres les moins performants étant d'environ 3 millimètres + 1,5 ppm en mesure de distance et 1,5 mgon en mesure d'angle²⁰ ce qui représente une erreur de 1,57 mm à 100 m. Au total l'erreur à 100 mètres de cette méthode est la somme quadratique de ces deux erreurs soit 3,5 mimi mètres, elle respecte largement les conditions de précision de la classe A.

En somme, la visualisation des réseaux par l'intermédiaire d'un plan n'est pas optimale sur le terrain, c'est pourquoi le marquage-piquetage est rendu obligatoire, les deux méthodes précédemment citées permettent de réaliser rapidement ces opérations avec une précision bien meilleure que celle requise par la classe A et ce quel que soit le terrain. En ce qui concerne le récolement de réseau en tranchée ouverte, les deux méthodes sont efficaces, mais lors de la présence de nombreux réseaux, les relevés sont moins visuels même s'il est possible d'agrémenter le plan de photos. L'utilisation du BIM permettrait donc de mieux rendre compte de l'état des infrastructure enterrées.

²⁰ Spécifications techniques du TPS1203+.

II Présentation des solutions de réalité augmentée et de leur fonctionnement

Les solutions de réalité augmentée permettent de superposer des éléments fictifs dans un environnement réel et ainsi de pouvoir faire des simulations de rendu ou dans notre cas, de visualiser les réseaux enterrés à travers le sol afin de voir leur position et leur complexité. Pour fonctionner, ces solutions utilisent des capteurs et des algorithmes de calcul complexe dont nous détaillerons le fonctionnement puis nous dresserons une liste non-exhaustive des solutions présentes sur le marché et expliquerons celles que nous avons choisi de tester.

II.1 Les différentes technologies embarquées dans les systèmes

II.1.1 Le smartphone et la tablette

Les solutions de réalité augmentée utilisent toutes une base commune : le smartphone ou la tablette. Cet appareil est en effet déjà assez complet au niveau hardware et permet d'implémenter les logiciels que l'on veut afin d'utiliser les capteurs présents. Il permet également d'utiliser des appareils complémentaires grâce à ses moyens de connexion (technologie avec ou sans fil) et aussi d'accéder à internet. Il dispose également d'un écran plus ou moins grand et très précis qui facilite son utilisation à une main. Le smartphone utilisé dans nos tests est un Samsung Galaxy S10+ sorti début 2019 et la tablette est un iPad Pro sorti en 2020, les deux sont compatibles avec les plateformes de réalité augmentée que nous détaillerons dans le paragraphe II.1.1.3.2 ci-dessous.

II.1.1.1 La puce GNSS

Aujourd'hui la majorité des smartphones embarque une puce GNSS multi constellations qui permet le positionnement en mode pseudo-distances. Afin de faciliter le calcul du positionnement, les puces utilisent la technologie A-GPS pour Assisted-GPS, le terme GPS étant utilisé à tort à la place de GNSS. L'avantage de cette technologie réside dans le téléchargement, par connexion mobile, en amont des éphémérides (position des satellites dans le ciel), au lieu que celle-ci provienne du signal du satellite. Ainsi sur un démarrage à froid, la position sera fixée au bout de quelques secondes seulement. La précision de cette méthode est de l'ordre de 5 à 10 mètres.

II.1.1.2 La centrale inertielle

A l'origine utilisée pour déterminer si le téléphone est en mode portrait ou paysage, la centrale inertielle s'est sophistiquée afin de permettre de déterminer les mouvements effectués entre deux positions successives. Pour cela elle est composée d'un accéléromètre, d'un gyromètre et d'un magnétomètre. On retrouve la même gamme de capteurs sur l'IPad.

II.1.1.2.1 L'accéléromètre

L'accéléromètre mesure l'accélération linéaire selon 3 axes orthogonaux, il permet de calculer le déplacement du smartphone. La précision est environ cinq fois moins bonne à celle présente dans une centrale inertielle professionnelle²¹.

II.1.1.2.2 Le gyromètre

Le gyromètre mesure la vitesse angulaire selon 3 axes et permet donc de calculer la rotation du téléphone. La précision est deux fois moins bonne à celle présente dans un IMU haut de gamme²².

II.1.1.2.3 Le magnétomètre

Le magnétomètre mesure la direction d'un champ magnétique sur 3 axes, il fait office de boussole sur le smartphone mais sa précision est largement inférieure à celle d'un gyrothéodolithe : 15° contre 0.003°.

La combinaison de ces trois capteurs permet une précision correcte au vu du prix d'un smartphone mais elle n'est pas suffisante pour une utilisation en topographie²³. Il est donc nécessaire d'utiliser plusieurs capteurs en parallèle afin de combiner les avantages de chacun. C'est ce qu'ont montré DEMEULE Vincent et LAVOIE Philippe²⁴ dans leurs TFE respectifs ; ils ont associé la centrale interpellée du smartphone à un GNSS professionnel. Mais les systèmes de réalité augmentée utilisent aussi le capteur photo.

²¹ PERRET Cyril. Mise en place d'une méthode de positionnement dynamique des réseaux, accessible via smartphone, répondant aux normes de la DT-DICT.

²² Idem.

²³ Idem.

²⁴ DEMEULE Vincent. Estimation des déplacements des piétons à partir des mesures inertielles et GPS d'un smartphone ; LAVOIE Philippe. Système de navigation hybride GPS/INS à faible coût pour la navigation robuste en environnement urbain.

II.1.1.3 Le capteur photo

Le capteur photo est utile pour le suivi de mouvement, on le verra dans le paragraphe suivant, mais il est aussi essentiel dans les systèmes de réalité augmentée car c'est sur l'image qu'il renvoie que la superposition d'éléments virtuels va être faite. De plus certaines solutions proposent de lever la tranchée ouverte par photogrammétrie ou vidéogrammétrie.

II.1.1.3.1 Rappel de la technique de photogrammétrie ou vidéogrammétrie

La photogrammétrie est une technique permettant de déterminer les coordonnées 3D d'un objet ou d'une scène à partir de plusieurs prises d'images en s'appuyant sur le principe de la stéréoscopie. Pour cela il faut calculer successivement l'orientation interne, relative, absolue, puis externe afin d'obtenir les coordonnées de chaque sommet de prise de vue dans le repère réel grâce à des points d'appuis connus en coordonnées ou grâce à la position et à l'orientation du système de prise de vue²⁵. La prise de vue par vidéo a l'avantage d'être plus facile à mettre en œuvre sur le terrain mais nécessite un traitement plus soigné puisque les images peuvent être floues.

II.1.1.3.2 Algorithmes AR Core et AR Kit

Les deux principaux systèmes d'exploitation pour smartphone et tablette, Android et IOS, proposent des bibliothèques de fonctions permettant d'exploiter les capteurs embarqués ainsi que de puissants algorithmes de traitement photographique destinés aux développeurs afin qu'ils puissent facilement créer des applications en réalité augmentée. Nous allons expliquer plus précisément comment fonctionne AR Core développé par Google, AR Kit fonctionnant sur le même principe mais étant moins documenté.

AR Core fonctionne en utilisant 3 techniques principales²⁶ :

- Le suivi de mouvement : c'est la technologie SLAM ou localisation et cartographie simultanées en français qui permet à partir du flux vidéo de l'appareil photo, de détecter des points d'intérêt identiques en chaque instant et à partir de leur déplacement il en déduit le déplacement de l'appareil²⁷. Ces informations sont combinées avec les données issues de la centrale inertielle embarquée et permettent d'estimer la pose (position et orientation par rapport au monde réel) de la caméra

²⁵ SIMONETTO Elisabeth, 2016. Photogrammétrie. Support de cours IG3, ESGT. 152p

²⁶ Site de documentation d'AR Core destiné aux développeurs. <https://developers.google.com/ar/discover/concepts>. (consulté le 30/06/2021).

²⁷ Principe SLAM identique à celui détaillé par CHANIER François en 2010.

embarquée environ 30 fois par seconde. Cette première technologie est essentielle puisqu'elle permet de maintenir la modélisation des réseaux à la bonne position pendant que l'on se déplace, il faut tout de même le faire lentement en filmant des zones texturées et avec un champ de vision assez large (Figure 2).



Figure 2: Représentation des points d'intérêt sur un sol relativement lisse, on s'aperçoit que si l'on ne filme pas les bâtiments aux alentours, leur nombre diminue drastiquement et la qualité du suivi de mouvement sera dégradée. (source : illustration provenant du forum dsp.stackexchange.com consulté le 02/06/2021).

- La compréhension de la profondeur : les algorithmes permettent aussi d'estimer la distance à laquelle se situent les objets à partir du flux vidéo, comme le font les techniques photogrammétriques mais en temps réel. Cela permet de créer des cartes de profondeur utiles pour modéliser l'environnement réel et donc de permettre une interaction réaliste entre le réel et le virtuel. Principalement se sont des surfaces



Figure 3: Détection du plan sol représenté par le quadrillage qui permet de poser des objets virtuels dessus. Un ombrage permet un rendu plus réaliste. (source : wikitude.com consulté le 02/06/2021).

planes (Figure 3) qui sont représentées, mur ou sol. Pour nos applications liées aux réseaux, cette fonctionnalité est très intéressante puisqu'elle permet de calculer une profondeur entre le sol estimé et la modélisation. AR Kit utilise en plus le capteur LiDAR présent afin d'avoir une estimation plus précise.

- L'estimation de la lumière : cette fonctionnalité a un rôle esthétique, elle permet de calculer, à partir des ombres, l'orientation de la source lumineuse et d'appliquer des effets d'ombre sur le modèle virtuel comme visible sur la Figure 3: Détection du plan sol représenté par le quadrillage qui permet de poser des objets virtuels dessus. Un ombrage permet un rendu plus réaliste. (source : wikitude.com consulté le 02/06/2021).. Cette fonctionnalité est peu utile pour les réseaux enterrés.

Ces technologies étant relativement nouvelles, il existe peu de documents comparant leur performance par rapport à des systèmes professionnels de positionnement dynamique. C'est pour cela que nous avons effectué des tests de positionnement dans le paragraphe III.

II.1.1.4 Le capteur LiDAR d'Apple

Afin d'augmenter la précision des estimations précédentes, AR Kit s'appuie sur le capteur LiDAR embarqué dans l'IPad. Cet outil agit comme un distancemètre multipoint qui peut faire une carte de profondeur avec une unique pose de l'appareil. Il m'a été néanmoins impossible de trouver les caractéristiques du système si ce n'est sa portée maximale : 5 mètres²⁸ qui est tout juste suffisante pour une utilisation liée à la visualisation des réseaux.

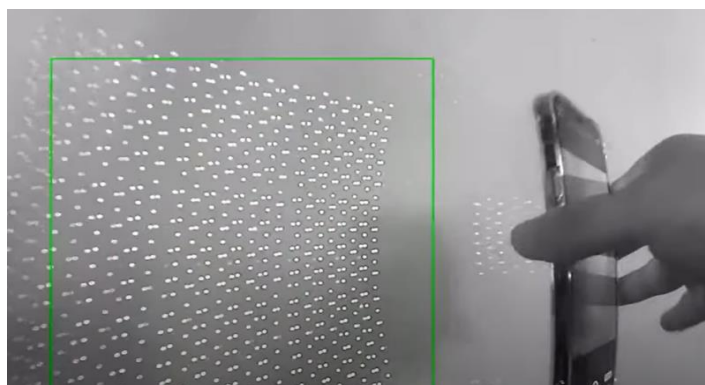


Figure 4: Illustration de la zone de points prise par le capteur LiDAR de l'iPhone 12 Pro. (source: vidéo de démonstration produite par Alan S et disponible en ligne sur [youtube.com/watch?v=9DQkGg49x08&ab_channel=AlanS](https://www.youtube.com/watch?v=9DQkGg49x08&ab_channel=AlanS) consulté le 02/06/2021).

²⁸ CNET France. In : L'équipe du CNET France. iPhone 12 : tout savoir sur le Lidar, une technologie prometteuse. [en ligne]. Disponible sur : [cnetfrance.fr/produits/iphone-12-tout-savoir-sur-le-lidar-une-technologie-prometteuse-39911969.htm](https://www.cnetfrance.fr/produits/iphone-12-tout-savoir-sur-le-lidar-une-technologie-prometteuse-39911969.htm). (consulté le 02/06/2021).

II.1.2 Les capteurs externes

Afin d'améliorer la précision ou d'ajouter de nouvelles fonctionnalités, le smartphone ou la tablette peut être couplé avec des capteurs externes. Ces capteurs communiquent en temps réel avec le smartphone.

II.1.2.1.1 Un récepteur GNSS plus précis

Nous l'avons vu précédemment, la puce GNSS d'un smartphone ne permet pas d'obtenir une précision suffisante pour atteindre la classe A. C'est pourquoi il est nécessaire d'ajouter un récepteur GNSS plus performant. La stratégie adoptée est le NRTK car il est obligatoire de se situer en temps réel sur le terrain, sa précision est de 2 à 5 centimètres à 1 sigma. Les données de correction sont directement reçues par la connexion internet du smartphone. Mais les problèmes liés à l'utilisation du GNSS en zones urbaines ou boisées sont toujours présents (masques et multi-trajets).

II.1.2.1.2 Un distancemètre

Bien que des algorithmes solides permettent de calculer la distance entre le capteur et une estimation du plan du sol, aucune solution ne permet de lever un point par l'intermédiaire de la caméra. Pourtant, en connaissant la position du capteur ainsi que son orientation il est tout à fait possible de calculer les coordonnées d'un point avec l'information de distance. C'est pourquoi le système SiteVision de Trimble possède un distancemètre EDM comme sur une station totale, celui-ci étant tout de même moins performant. Le constructeur annonce une précision de plus ou moins 3 millimètres sur une distance allant de 30 centimètres à 25m sur une surface sombre et jusqu'à 100 mètres sur un mur blanc²⁹. Cette différence de portée provient directement du principe de mesure EDM : un train d'onde laser est émis par le distancemètre, il va se réfléchir sur la surface (une surface sombre absorbe une partie de l'énergie) et revient dans le capteur, la distance se calcule en fonction du temps de trajet avec la formule $D = \frac{1}{2} * c * \Delta t$ avec c : la vitesse de la lumière dans le vide. Même s'il est possible de mesurer jusqu'à 100 mètres, une erreur d'orientation de 1 grade entraîne une erreur de 1,57 mètres.

L'ensemble des technologies présentes dans chaque solution est résumé dans le Tableau 2 ci-dessous.

²⁹ Fiche technique Trimble SiteVision.

	SiteVision de Trimble	Syslor	Bloc in Bloc
	 Source: sitevision.trimble.com	 Source: syslor.net	 Source: blocinbloc.com
Smartphone/ tablette	Samsung Galaxy S10+, écran de 6.1	Samsung Galaxy S10+, écran de 6.1	Ipad Pro 2020, écran de 12.9 pouces
Algorithmes AR	AR Core	AR Core	AR Kit
Solution GNSS	Trimble Catalyst, stratégie NRTK (2 à 5 cm de précision)	Antenne Syslor, stratégie NRTK (2 à 5 cm de précision)	Puce intégrée, pseudo-distance (5 à 10 m de précision)
Centrale inertielle	Intégrée	Intégrée	Intégrée
Camera	Grand angle de 12 Mpx	Grand angle de 12 Mpx	Grand angle de 12 Mpx
LiDAR	X	X	Oui
Distancemètre	Oui (précision de plus ou moins 3 mm)	X	X

Tableau 2: Récapitulatif des technologies embarquées dans les systèmes testés (production personnelle).

II.2 Les différentes solutions disponibles sur le marché

II.2.1 Inventaire non exhaustif des solutions

De nombreuses applications de réalité augmentée existent sur le marché, la plupart proposent des contenus ludiques mais certaines proposent déjà des fonctionnalités plus intéressantes comme de la décoration d'intérieur. Les solutions les plus viables sont développées par des personnes ayant une expérience en topographie. Pour les tests nous avons choisi parmi les solutions distribuées sans prendre en compte celles créées par des entreprises concurrentes à Kadran qui souhaitent évidemment en garder l'exclusivité. De plus, la majorité de ces solutions fonctionnent sur un principe de photogrammétrie/vidéogrammétrie similaire à celui de Syslor.

Nous avons pris contact avec différents distributeurs français, la seule entreprise américaine ne nous ayant pas donné de réponse. Les solutions avec lesquelles nous avons pu échanger sont : SiteVision de Trimble, Fouilles 3D de Géosystème, Syslor de Syslor, RezoProcess, Bloc in Bloc.

Nous avons eu une présentation de toutes les solutions par visio-conférence sauf RezoProcess qui ne nous a pas répondu à temps. Lors de ces entretiens, nous ont été présentés la méthodologie de fonctionnement, la plateforme d'échange des données ainsi que le modèle économique.

Seules les solutions SiteVision, Syslor et Bloc in Bloc ont pu être louées pour effectuer un test. Fouilles 3D ne proposant qu'une application de récolement plus destinée aux chefs de chantiers.

II.2.2 Modèle économique

Les solutions sont commercialisées selon deux modèles économiques distincts, parfois différents selon les applications embarquées :

- Un système d'abonnement mensuel ou annuel pour l'accès au logiciel et au matériel avec utilisation en autonomie de la solution. C'est ce que proposent SiteVision, Bloc in Bloc, RezoProcess et Syslor pour les applications de visualisation et implantation/levé de points.
- Une facturation en fonction de l'utilisation, soit au mètre linéaire de réseau soit au temps d'acquisition dans le cas de la videogrammétrie. Cependant, Kadran ne souhaite pas être dépendant de la société fournissant le système pour réaliser son travail, les tarifs appliqués étant susceptibles d'être modifiés plus fréquemment. Les solutions concernées sont Fouilles 3D, RezoProcess et Syslor pour leur application de récolement.

Il faut ajouter à cela le coût de l'abonnement aux corrections RTK dans le cas où le système comporte une antenne GNSS. Le smartphone ou la tablette faisant office d'interface, il n'est pas nécessaire de prendre un abonnement internet supplémentaire, la faible quantité de données téléchargées est supportable par un partage de connexion depuis un autre téléphone, le plus important étant la latence de la réception des corrections.

En dernier lieu, les entreprises distribuant SiteVision et Bloc in Bloc sont basées non loin de notre agence de Nantes ce qui peut être un avantage pour le service après-vente.

II.2.3 Comparaison logiciel pour les 3 solutions testées

Les trois solutions utilisent la même logique pour la gestion et l'utilisation des données : une fois les données des réseaux à visualiser converties dans le bon format de fichier, elles sont insérées sur la plateforme en ligne. Sur le terrain on accède à ces données via l'application dédiée qui permet leur visualisation mais aussi l'implantation des réseaux,

le levé de points ou le récolement vidéo. De retour au bureau, l'export des données se fait de nouveau via la plateforme en ligne.

II.2.3.1 Au bureau

II.2.3.1.1 Conversion des données source

Les plans des réseaux que nous traitons dans le bureau sont soit sous format « .pdf » s'ils proviennent de DT-DICT ce qui implique un recalage en utilisant AutoCAD pour le géopositionner soit directement des plans de levé en format « .dwg » ou « .dxf » (format AutoCAD). Sur ces plans sont représentés uniquement les génératrices des réseaux comme visible sur la Figure 1; pour en avoir une modélisation plus réaliste on utilise les données de diamètre pour générer manuellement un modèle soit directement sur AutoCAD dans le cas où ces formats sont acceptés sur la plateforme, soit en utilisant un logiciel dédié au BIM tel que Revit ou Sketchup afin d'obtenir un « .ifc ». Néanmoins le géoréférencement d'un fichier « .ifc » n'est pas facile ; Trimble qui distribue SiteVision fournit par l'intermédiaire de son logiciel Trimble Business Center une solution qui permet aussi d'optimiser le fichier de modélisation; cela donne un fichier « .tbc » lisible par SiteVision. Bloc in Bloc ne permettant pas un positionnement absolu, il n'a pas été nécessaire de faire cette manipulation. Ensuite il suffit de télécharger le fichier sur la plateforme en ligne et il est instantanément accessible sur l'application smartphone. Pour Syslor, le programme convertissant le fichier « .dwg » du modèle en un format lisible par l'application n'est pas encore automatique; nous avons dû envoyer par mail la modélisation afin qu'une personne de leur entreprise la traite manuellement ce qui prend plus de temps. Pour le mode implantation de point, la conversion se fait automatiquement mais nécessite de séparer le fond de plan au format « .dxf » et les points à implanter au format « .dxf ».

II.2.3.1.2 Plateforme en ligne

Chaque solution comporte une plateforme qui fait l'échange des données entre les logiciels sur l'ordinateur et la ou les applications sur le smartphone. Elle correspond en fait à un serveur en ligne qui permet la gestion des projets et la visualisation des données pour les utilisateurs qui y ont accès. Les projets sont en fait des dossiers qui contiennent les différentes données, il est important de les créer correctement avant d'aller sur le terrain puisqu'ils contiennent le système de coordonnées. SiteVision nécessite même d'importer un fichier spécifique. À ce niveau, les trois solutions sont similaires, Bloc in Bloc est peut-être plus fluide et plus intuitif que ces concurrents mais nous n'avons pas fait le tour de toutes

les options puisque nous n'avions qu'un seul compte de test. La plateforme sert aussi à l'export des données au retour du terrain.

II.2.3.1.3 Export des données terrain

Sur le terrain les données obtenues sont soit des points issus des différents modes de mesure pour SiteVision et Syslor, soit des photos et annotations dans le cas de SiteVision et Bloc in Bloc ou encore du nuage de point suite un récolement vidéo avec Syslor.

Avec Syslor, l'export est relativement simple, on obtient un fichier « .dxf » utilisable sous AutoCAD suite au levé de point ou on obtient un nuage de points ou encore un plan en 3 dimensions et une orthophoto mais sans fichier de géoréférencement malgré nos remarques.

Pour SiteVision l'export de points, lignes et surfaces est possible avec l'application mais plus fastidieux à traiter car il s'agit d'un fichier « .csv » duquel il faut extraire les colonnes d'information qui nous intéressent puis retracer les lignes ou les surfaces sur AutoCAD.

Pour l'export des photos et annotations, bien que les photos soient nommées sur la plateforme, à l'export elles retrouvent un nom générique ce qui implique de le modifier. Cet inconvénient est identique à SiteVision et Bloc in Bloc.

II.2.3.2 Sur le smartphone

Sur le smartphone on retrouve un accès à la plateforme qui permet de télécharger localement les modèles avant d'aller sur le terrain, dans le cas où le réseau serait faible. Une fois le modèle présent sur le smartphone, on peut contrôler via la visionneuse si tout fonctionne correctement.

Syslor comprend trois applications, une pour la visualisation et le marquage-piquetage, une pour l'implantation et le levé de points et la dernière pour le récolement vidéo ce qui empêche par exemple de faire un levé de points tout en visualisant les réseaux.

L'interface de SiteVision pendant l'affichage de la réalité augmentée permet de vérifier l'état du positionnement GNSS plus précisément que Syslor qui utilise uniquement un code couleur. En revanche Syslor affiche les coordonnées actuelles dans le système choisi et non en WGS84. Pour ce qui est de l'orientation du modèle, les trois systèmes affichent une icône verte si elle est estimée correcte, par le concepteur, ou rouge s'il faut refaire le positionnement. Cette simple icône ne permet pas de quantifier cette donnée or il est primordial pour le géomètre de connaître la précision à laquelle il travaille.

Au niveau logiciel, c'est donc SiteVision et Bloc in Bloc qui sont les plus faciles à prendre en main pour l'import de fichier. Syslor à l'avantage d'exporter les fichiers sous un format plus pratique pour le géomètre.

III Test des solutions retenues

Le but de ces tests est de vérifier la fiabilité des appareils sur les applications qu'ils proposent et bien entendu, de respecter la classe A de précision liée aux réseaux même si nous recherchons toujours à avoir les meilleurs résultats possibles.

Pour cela nous allons utiliser les différentes solutions en suivant la méthodologie préconisée par le constructeur et en se plaçant dans des situations usuelles de mission sur les réseaux.

III.1 Présentation des applications

Les solutions que nous avons testées permettent bien entendu de visualiser la modélisation des réseaux enterrés en temps réel sur le terrain, mais proposent aussi des applications complémentaires qui permettent par exemple d'exploiter le récepteur GNSS ou le distancemètre.

III.1.1 Positionnement du modèle pour la visualisation

Les 3 applications testées permettent donc, à partir d'un fichier inséré sur la plateforme et téléchargé dans le smartphone ou la tablette, d'afficher une modélisation des réseaux sur l'écran. Pour placer le modèle correctement sur le terrain, il existe 2 méthodes que nous appellerons positionnement absolu et positionnement relatif dans la suite du rapport.

La méthode de positionnement absolu est la plus pratique à mettre en œuvre sur le terrain puisqu'elle utilise le géoréférencement du modèle. Il suffit donc de se situer dans la zone de la modélisation pour la voir apparaître sur l'interface. Pour cela il faut attendre l'initialisation du GNSS, c'est-à-dire qu'il fixe les ambiguïtés entières qui est une étape indispensable pour obtenir un positionnement précis, puis le système nous demande de nous déplacer en ligne droite sur une distance de 3 à 10 mètres (variable selon le système utilisé). A partir de notre mouvement, calculé grâce aux positions GNSS successives et compensé grâce au couple recalage visuel/centrale inertielle, le système déduit notre orientation. On peut alors se déplacer sur le terrain tandis que le modèle reste à sa place, la position et l'orientation étant recalculées régulièrement (tous les 7 mètres pour Syslor, tous les 10 mètres pour SiteVision).

Le système Bloc in Bloc ne possède pas de récepteur GNSS précis (seulement la puce intégrée à l'IPad dont la précision est de 5 à 10 mètres) ; si l'on veut respecter la précision

de classe A, il faut placer le modèle d'une autre manière. On utilise donc le positionnement relatif. Cette méthode est aussi disponible sur les autres solutions afin de visualiser les mêmes données si on ne se trouve pas sur le chantier, pour vérifier que l'affichage est correct par exemple. De plus en centre-ville, cette solution permet de s'affranchir des contraintes liées au GNSS. Attention, les systèmes SiteVision et Syslor nécessitent toujours de connaître leur position pour se recalibrer. Il y a deux moyens de placer le modèle en relatif :

- Positionnement à partir de deux points connus, c'est-à-dire à la fois présents sur la modélisation et sur le chantier (Figure 5). Cela peut être un clou d'arpentage, l'angle d'un mur ou le bord d'un regard. Le système utilise la reconnaissance de plan (II.1.1.3.2) pour placer correctement le point du modèle sélectionné sur le sol.

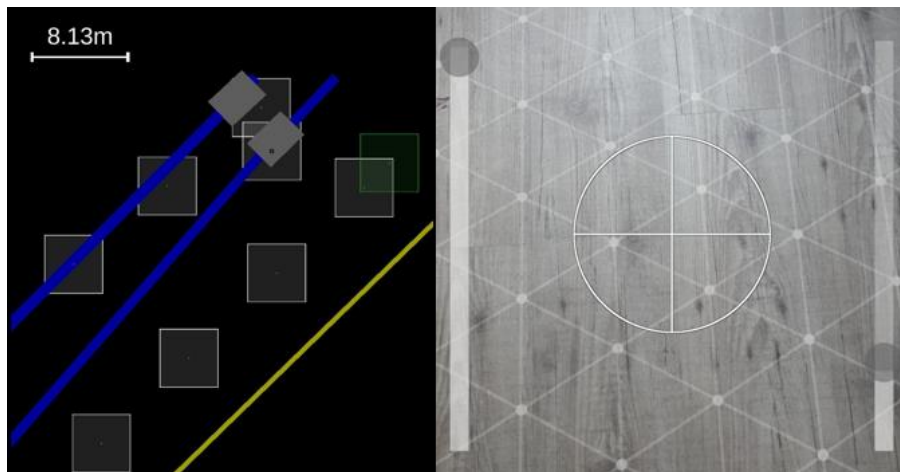


Figure 5: Mode de positionnement à partir de deux points : on sélectionne le point sur le modèle puis on le vise au travers de la caméra (source : brochure Syslor).

- Positionnement à partir d'un point et d'une orientation. De la même manière on sélectionne un point connu sur le modèle et sur le terrain, mais à la place d'utiliser un second point pour fixer l'orientation, il faut le faire manuellement. Il est déconseillé de faire l'orientation à partir d'un élément trop proche, comme en topographie classique, plus la référence est loin plus l'erreur angulaire est petite. Après avoir placé le premier point de calage, il est possible d'affiner la position horizontale et verticale du modèle ainsi que son orientation (Figure 6).

La méthode de positionnement relatif nécessite donc d'avoir des éléments connus du terrain sur le plan. Or les plans obtenus à la suite d'une DT-DICT ne contiennent pas souvent des points identifiables sans ambiguïté. Il est alors beaucoup plus simple d'utiliser la méthode de positionnement absolu mais nous verrons par la suite qu'il reste nécessaire de pouvoir contrôler la position et l'orientation du modèle régulièrement.

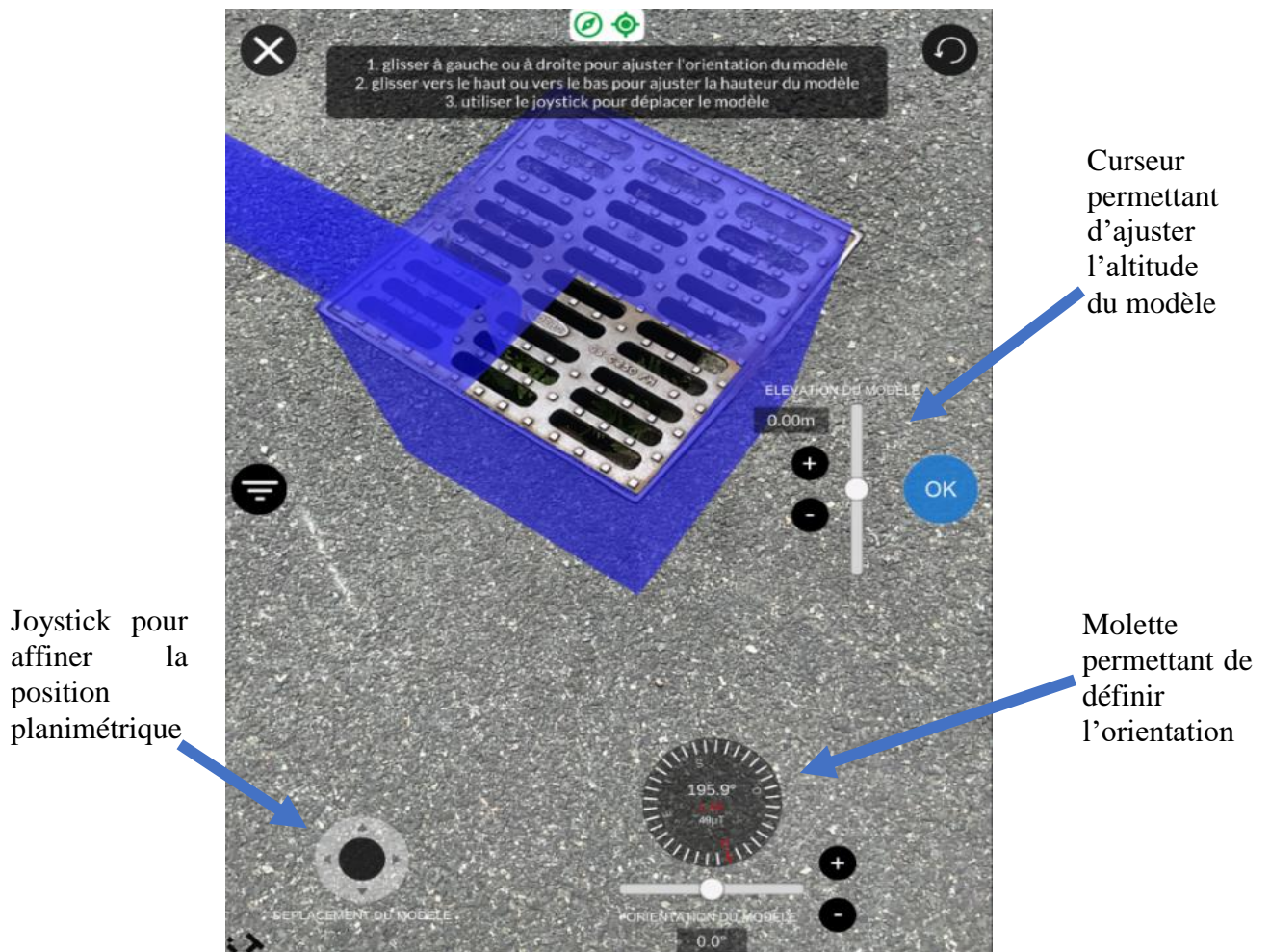


Figure 6: Positionnement manuel avec un point et orientation (source : capture d'écran de l'application Bloc in Bloc).

III.1.2 Mesure de la profondeur

La représentation étant en trois dimensions sur un écran en deux dimensions, il est relativement difficile de se rendre compte de la profondeur du modèle. Les solutions testées proposent différents outils pour afficher cette donnée.

III.1.2.1 Par mesure directe entre le plan estimé du sol et le modèle

En se plaçant à l'aplomb du réseau, il est possible d'afficher sa profondeur (Figure 7). Pour cela le système calcule la distance entre le plan estimé du sol et le modèle. Le problème de cette méthode est que le fait de viser directement le sol rétréci le champ de vision de la caméra et rend donc moins efficace le travail des algorithmes de réalité augmentée (voir Figure 2).

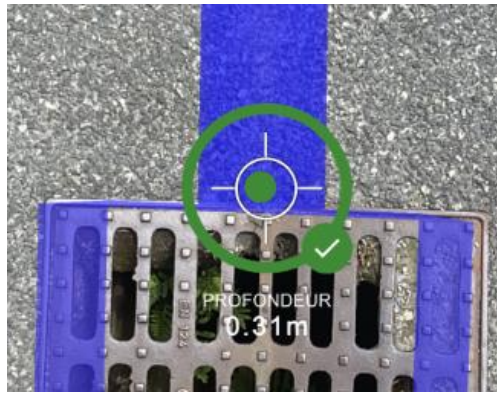


Figure 7: Mesure de la profondeur à la verticale du modèle. Une bulle permet de contrôler la verticalité (source: capture d'écran de l'application Bloc in Bloc).

III.1.2.2 Par visualisation à partir du plan estimé du sol

Pour avoir un champ de vision plus important et donc garantir le recalage en continu, Trimble a développé le mode « fosse » qui crée virtuellement un trou dans le sol. Il est possible de régler le diamètre et la profondeur de ce trou, ainsi, les réseaux apparaîtront en fonction de la profondeur de cette fosse.

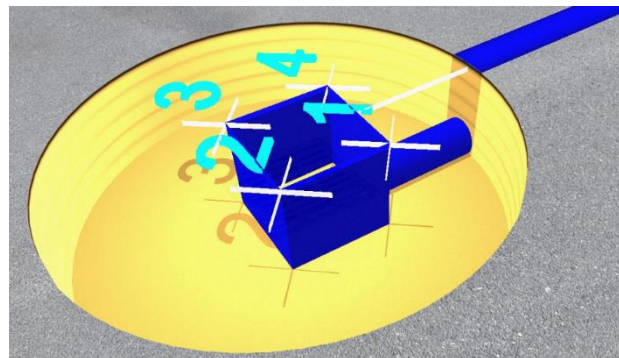


Figure 8: Fosse virtuelle dont la profondeur est graduée tous les 10 centimètres (source: capture d'écran de l'application SiteVision).

III.1.2.3 Par mesure entre un point sur le sol et un point sur le modèle

Cette dernière méthode, possible grâce au fait que la solution SiteVision utilise un distancemètre, permet de créer une ligne virtuelle entre un point pris sur le sol par mesure EDM et un point sur le modèle de réalité augmentée. Le logiciel calcule alors la distance entre les deux points ce qui correspond à la profondeur du réseau. La distance indiquée étant une distance horizontale, il faut arriver à prendre les deux points sur le même axe vertical.

III.1.3 Marquage – piquetage des réseaux

Conformément à l'article R 554-27 du Code de l'environnement, la matérialisation de la position des réseaux est obligatoire pendant toute la durée du chantier. Il est donc important, après avoir visualisé les réseaux, de pouvoir effectuer cette opération de marquage – piquetage conformément à la norme NF P98-332³⁰. Il y a, là aussi, plusieurs manières de procéder.

III.1.3.1 À partir de la visualisation

Une fois le positionnement de modèle effectué, il est donc possible de visualiser les réseaux enterrés et de marquer leur position sur le sol. Le réseau étant modélisé avec une profondeur, il est impératif de se placer dans son axe et à la verticale afin de corriger le problème de parallaxe (Figure 9). Cette solution est fonctionnelle dans toutes les situations. Dans le cas où plusieurs réseaux sont superposés, il est possible d'utiliser la fonction de calque présente sur les 3 applications afin de n'afficher que le réseau à implanter.

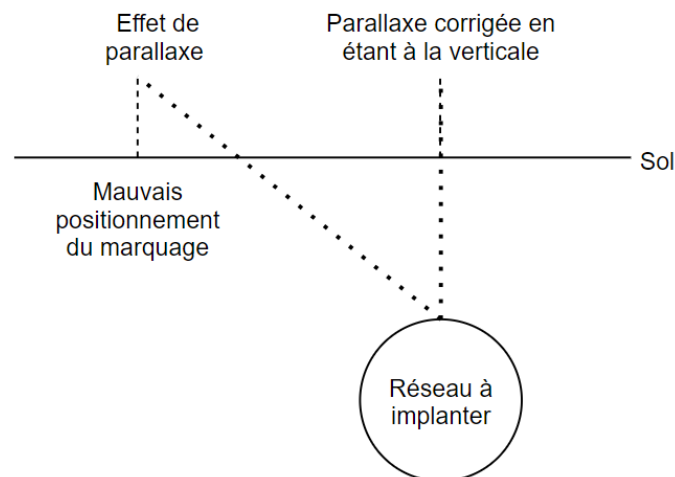


Figure 9: Schéma représentant le phénomène de parallaxe (production personnelle).

III.1.3.2 À partir de leur projection

Pour remédier au problème de parallaxe, il est possible d'effectuer le marquage à partir de la projection du réseau sur le sol. Pour effectuer cette projection il y a deux méthodes :

³⁰ Définissant mes règles de matérialisation, en particulier la couleur. Il est donc important que ces informations soient correctement traduites dans le modèle.

- Soit la profondeur du réseau est connue, dans ce cas il est possible d'effectuer au bureau en amont une projection manuelle de l'axe. Dans le cas où le terrain n'est pas plat il faut connaître la profondeur à chaque rupture ou alors connaître la topographie du terrain naturel.

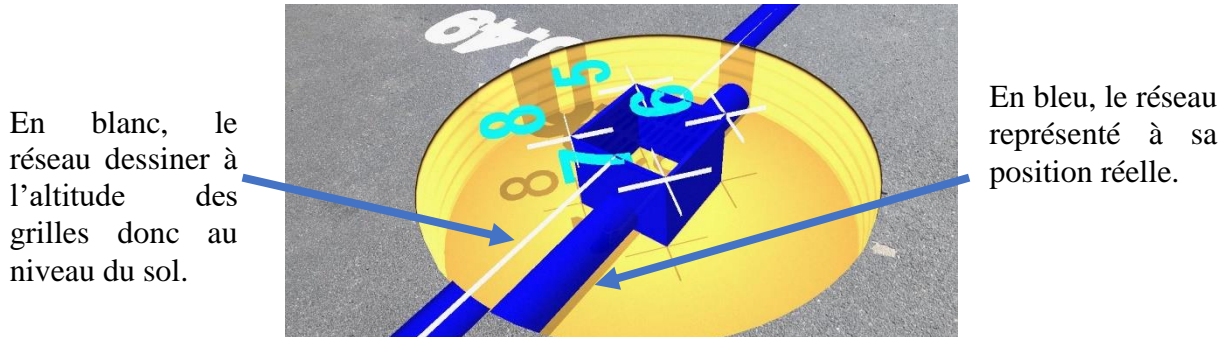


Figure 10: Projection manuelle du réseau (source : capture d'écran de l'application Site Vision).

- Soit le système permet une projection automatique sur le plan estimé (déterminé par les algorithmes vus au chapitre II.1.1.3.2).

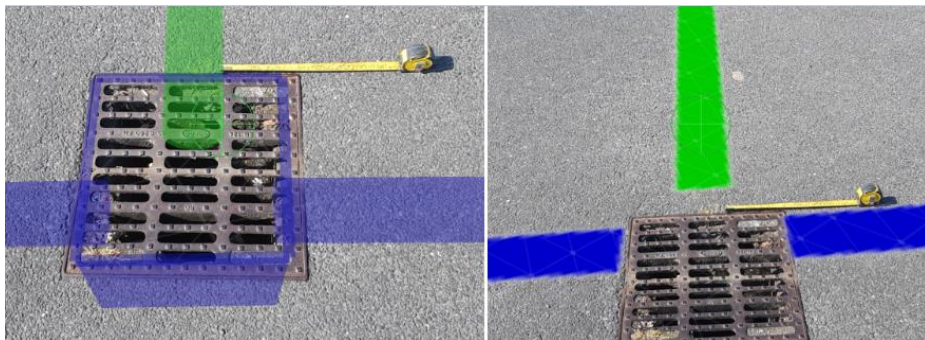


Figure 11: Projection automatique du réseau (source : capture d'écran de l'application Syslor).

III.1.3.3 En utilisation classique du récepteur GNSS

Les systèmes possédant une antenne GNSS fonctionnant avec la stratégie NRTK peuvent s'utiliser avec une canne de topographie avec bulle. L'implantation ou le levé de points s'effectue alors de la même manière que présenté au paragraphe I.2.2.1.

III.1.4 Récolement ou levé de points

En plus de l'utilisation classique du récepteur GNSS qui peut donc s'appliquer au levé de points, le système SiteVision permet d'utiliser le distancemètre pour lever des éléments réels. Il agit comme un distancemètre sur un théodolite et donc à partir de la mesure de distance et de son orientation il peut calculer les coordonnées du point.

Le Tableau 3 présente l'ensemble des fonctionnalités utiles pour les réseaux enterrés qui sont présentes dans les trois solutions acquises. Nous allons maintenant effectuer une série de tests pour voir si elles permettent de garantir la classe A de précision.

		SiteVision de Trimble	Syslor	Bloc in Bloc
Visualisation des réseaux	Positionnement absolu	Oui	Oui	Possible mais non pertinent
	Positionnement relatif	Oui, par deux points	Oui, par deux points	Oui, par un point et orientation
	Mesure de profondeur	Mode fosse et ligne entre AR et sol	Non	A l'aplomb du réseau
Marquage - piquetage d'un réseau	Implantation du réseau en 3D	Oui	Oui	Oui
	Implantation de sa projection sur le sol	Projection manuelle	Projection automatique	Projection manuelle
	Implantation classique sur canne	Oui	Oui	Non
Recollement	Par levé GNSS classique	Oui	Oui	Non
	Par mesures visuelles	Oui grâce au distancemètre	Non	Non

Tableau 3: Récapitulatif des fonctionnalités incluses dans les différents logiciels (production personnelle).

III.2 Tests des solutions

Les tests ont pour but de vérifier que la précision de classe A est atteignable pour les différents systèmes et leur application dans le cadre d'une intervention usuelle sur les réseaux. Afin de mettre en concurrence plus fortement les performances des systèmes, nous appliquerons l'arrêté du 16 septembre 2003 qui fixe les classes de précision pour les travaux topographiques. Pour cela nous avons effectué des tests à partir d'une modélisation fictive dont nous connaissons les paramètres. Nous avons aussi effectué un test sur une tranchée ouverte afin de se rendre compte des éventuels problèmes qui peuvent survenir.

III.2.1 Références des tests

Afin de faciliter les manipulations avec les appareils, la majorité des tests ont été effectués sur le parking de l'entreprise qui est un lieu qui ne présente que très peu de masques, et qui permet donc une utilisation de solutions GNSS sans souci.

Au préalable, nous avons effectué un levé au tachéomètre d'éléments caractéristiques du parking tel que les bordures ainsi que les grilles et les regards des réseaux existants. L'appareil utilisé pour cela est une station totale Leica TPS1203+ dont la précision angulaire

est de 1 mgon soit une erreur de 0.3 millimètres à 20 mètres et une précision sur la mesure de distance de 1 millimètre plus 1,5 ppm. Cette solution étant largement deux fois plus précise que nos systèmes fonctionnant avec un GNSS en stratégie NRTK (2 à 5 cm de précision), elle permet d'appliquer le coefficient $C = 2$ dans l'arrêté de 2003. Nous avons aussi utilisé la station totale pour effectuer les contrôles d'implantation.

Comme la réforme anti-endommagement des réseaux impose désormais le géoréférencement de ceux-ci, il est primordial de pouvoir s'assurer du bon positionnement des modèles en absolu. Pour cela nous avons géoréférencé le levé précédemment effectué à partir de plusieurs points levés en stratégie NRTK dont la précision théorique est de 2 à 5 centimètres, nous avons répété l'opération sur plusieurs jours et à des heures différentes afin de varier la répartition des satellites dans le ciel. En calculant notre recalage en planimétrie et en altimétrie à partir des différents points de référence, les erreurs moyennes quadratiques calculées sont d'environ 4 millimètres. Nous utiliserons donc cette précision pour caractériser les erreurs de mesure des différents systèmes.

A partir de ce plan géoréférencé, nous avons effectué une modélisation fictive des réseaux : les grilles, espacées d'environ 15 mètres, ont été considérées comme reliées entre-elles par des canalisations de 20 centimètres de diamètre (en bleu sur la Figure 12) et avec une pente de 2%, à partir de la grille centrale est raccordé un réseau qu'on imagine à construire (en vert) et enfin deux regards de réseau d'eaux usées en marron. Cette modélisation peut paraître assez succincte mais elle représente la majorité des plans obtenus après DT-DICT que j'ai pu observer. De plus la distance de la modélisation est d'environ 40

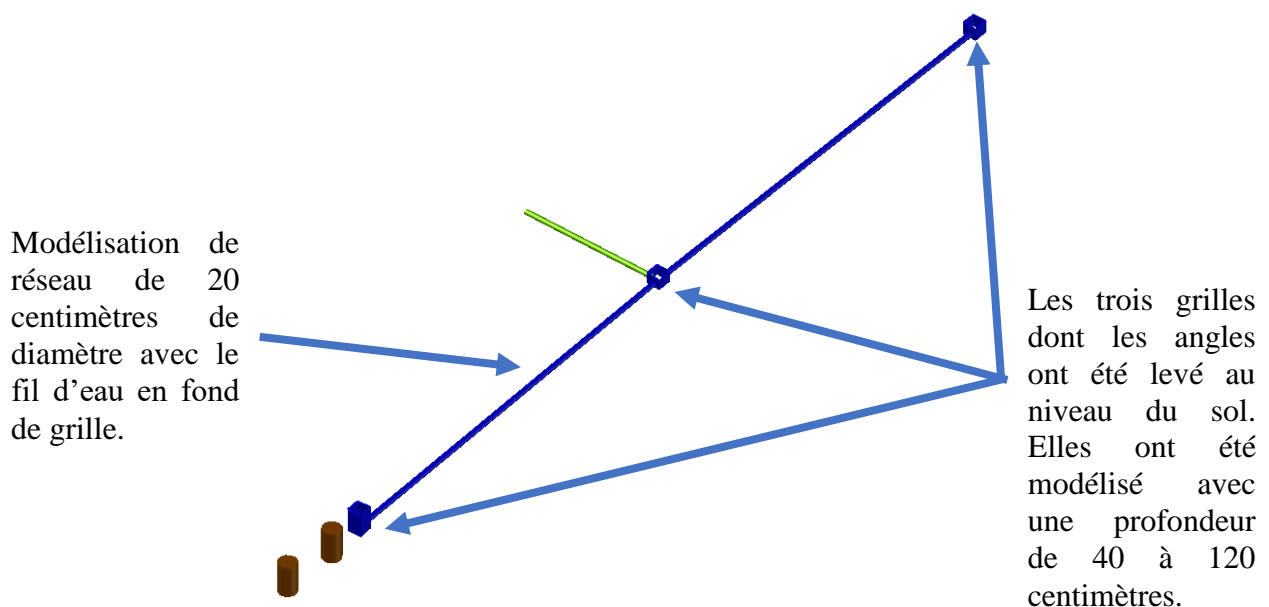


Figure 12: Modélisation fictive d'un réseau à partir des données du levé topographique (production personnelle)

mètres, ce qui est nécessaire pour tester convenablement les systèmes, ceux-ci se recalant tous les 10 mètres au maximum.

Sur ce chantier nous avons ainsi pu tester l'ensemble des applications sauf le récolement par vidéogrammétrie qui était plus intéressant à faire sur une réelle tranchée ouverte car elle présente des écarts d'altitude plus importants que sur le parking quasiment plat. Sur une même tranchée ouverte nous avons testé les différents modes de levé, malheureusement nous n'avons pas pu faire un levé de référence précis des canalisations levées à ce moment-là, nous les comparerons uniquement à un levé GNSS en NRTK donc la précision de 2 à 5 centimètres sera à prendre en considération dans l'analyse des résultats.



Figure 13: Aperçu de la tranchée ouverte d'une longueur d'environ 5 mètres pour 1,5 de profondeur (photo personnelle).

A chaque test, les mesures ont été prises à la suite d'une configuration des systèmes conformes à celles préconisées par les constructeurs et avec les indicateurs de recalage au vert comme sur la Figure 15, le système estime que le recalage est bon, qu'il reçoit correctement les signaux des satellites ainsi que les corrections s'il utilise un récepteur GNSS externe et que le recalage visuel et inertiel est constant. Cette donnée étant toujours imprécise pour le géomètre puisque la valeur de recalage nécessaire pour obtenir une icône verte est choisie par le constructeur et non connue par l'utilisateur.

III.2.2 Test de la visualisation en réalité augmentée

III.2.2.1 Méthode de mesure

Après avoir effectué le positionnement du modèle comme expliqué au paragraphe III.1.1, l'objectif a été de déterminer l'erreur de positionnement du modèle par rapport à la position réelle. Pour cela nous avons utilisé les 3 grilles puisque leur position est connue et qu'il a été facile de les modéliser à l'identique par des carrés de 50 centimètres de côté. Sur le terrain nous avons initialisé les différents systèmes à proximité de la première grille dans le cas du positionnement absolu et en utilisant les coins de la grille et un clou placé à une dizaine de mètres de celle-ci dans le cadre du positionnement relatif. Ensuite nous nous sommes déplacés vers la deuxième grille à 15 mètres de la première et effectués 3 captures d'écran de l'interface selon 3 orientations différentes, puis avons fait de même en direction de la 3^{ème} grille (Figure 14).

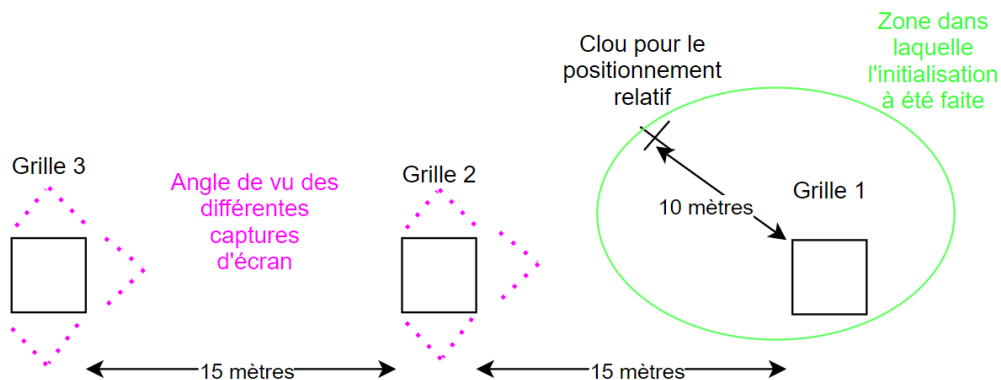


Figure 14: Schéma de la méthodologie utilisée sur le terrain (production personnelle).

Ainsi nous avons pu mesurer l'erreur de positionnement en mesurant visuellement la distance entre le modèle de la grille et la grille elle-même. L'erreur de mesure est estimée à plus ou moins un demi-centimètre, elle provient de l'erreur de mesure en pixel par rapport à la taille d'un pixel sur le sol (Figure 15).

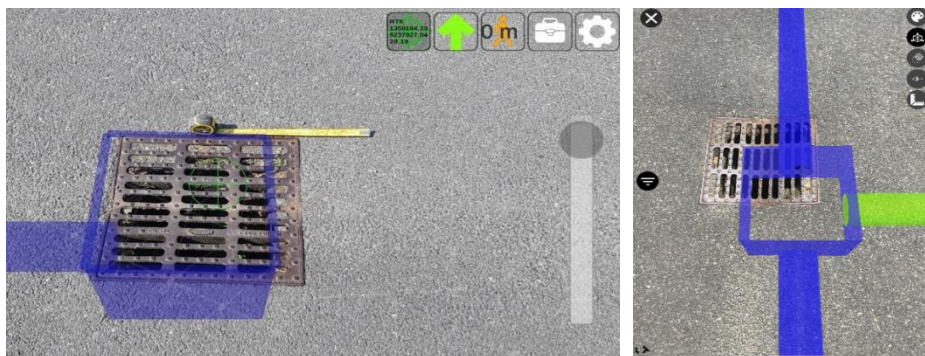


Figure 15: Capture d'écran de l'interface à partir de laquelle l'erreur de position est mesurée (capture d'écran de l'application Syslor à gauche et Bloc in Bloc à droite).

III.2.2.2 Résultats pour le positionnement absolu

	SiteVision	Syslor
Moyenne (cm)	3,5	12,0
Ecart-type (cm)	1,4	6,6
Ecart max. (cm)	5,7	23,3

Tableau 4: Résultats des écarts du positionnement absolu (production personnelle).

La moyenne est le quotient de la somme de plusieurs valeurs par leur nombre. L'écart-type est la moyenne quadratique des écarts à la moyenne. Enfin, l'écart maximum est l'écart le plus grand : pour la classe A, aucune valeur ne doit dépasser 40 centimètres.

Dans l'exercice du positionnement absolu, le système SiteVision de Trimble est dans la tolérance de précision de la stratégie NRTK. La solution de visualisation de Syslor est moins performante mais elle permet néanmoins de visualiser les réseaux en respectant la classe de précision A.

III.2.2.3 Résultats pour le positionnement relatif

	SiteVision	Syslor	Bloc in Bloc
Moyenne (cm)	4,2	10,2	7,0
Ecart-type (cm)	1,7	3,5	6,2
Ecart max. (cm)	6,6	14,5	14,2

Tableau 5: Résultats des écarts du positionnement relatif (production personnelle).

Dans le cas du positionnement relatif on constate des écarts plus importants sur la solution de SiteVision ce qui n'est pas étonnant : la sélection visuelle des deux points de référence est moins précise, l'application ne permet pas de sélectionner automatiquement un angle de la grille ou un point sur la modélisation contrairement à Syslor. On obtient étonnamment de meilleurs résultats qu'en positionnement absolu pour Syslor.

Bloc in Bloc utilisant une méthode de positionnement différente avec un point et angle, l'erreur d'orientation faite sur le clou à 10 mètres est multipliée par 3 lorsque l'on se déplace jusqu'à la 3^{ème} grille. Néanmoins le système de recalage était performant lorsqu'on se déplaçait autour de la première grille ayant servi pour l'initialisation.

Les trois solutions permettent de visualiser les réseaux en classe A.

III.2.2.4 Mesure de la profondeur

Etant donné qu'il est difficile de se rendre compte de la profondeur des réseaux sur la visualisation en deux dimensions, SiteVision et Bloc in Bloc proposent des outils de

mesure intégrés à la visualisation. Pour obtenir leur précision, nous avons comparé la profondeur calculée par le système à celle modélisée.

	Mode fosse	Mesure de ligne	Bloc in Bloc
Moyenne (cm)	3,0	6,0	16,0
Ecart-type (cm)	1,0	7,6	8,2
Ecart max. (cm)	4,0	26,0	23,0

Tableau 6: Résultats des écarts de la mesure de profondeur (production personnelle).

On constate que la lecture visuelle fournie par le mode fosse de SiteVision est relativement efficace, les graduations étant tous les 10 centimètres une estimation à 2.5 centimètres est tout à fait correcte. La mesure de ligne entre le modèle et un point sur le sol grâce au distancemètre intégré à la solution donne des résultats très dispersés : il est à la fois difficile de viser correctement la génératrice supérieure du réseau et de mesurer un point sur le sol qui soit correctement à l'aplomb.

Les résultats donnés par Bloc in Bloc, bien que dans la tolérance de la classe A, sont beaucoup moins précis, le système utilisant l'estimation du plan du sol mais le mode de mesure perpendiculaire au sol limitant le nombre de points d'intérêt, cela dégrade à la fois le recalage mais aussi cette estimation.

III.2.3 Marquage- traçage d'un réseau

III.2.3.1 Méthode de mesure

Toujours en respectant les préconisations des constructeurs pour mettre en place le modèle en absolu et en relatif au niveau de la grille 1, nous avons effectué une simulation de marquage de réseau au niveau de la grille 2. Les implantations de point ont été réalisées en utilisant le mode dédié de chaque appareil si disponible, sinon à partir de la visualisation en 3D et en projetant manuellement l'axe du réseau sur le sol. Dans le cas où le réseau ou sa projection apparaît avec une épaisseur importante, ils ont été marqués de part et d'autre afin de pouvoir reconstituer l'axe. Ensuite les marquages ont été relevés au TPS1203+ et comparés aux données théoriques.

III.2.3.2 Résultats du marquage en positionnement absolu...

III.2.3.2.1 ...directement à partir de la visualisation en 3D

	SiteVision	Syslor
Moyenne (cm)	4,1	39,1
Ecart-type (cm)	0,6	11,0
Ecart max. (cm)	4,8	51,7

Tableau 7: Résultats des écarts d'implantation positionnement absolu et visualisation 3D (production personnelle).

On constate que la solution SiteVision fournit une précision acceptable au vu de l'utilisation de la stratégie NRTK. En revanche la position indiquée par Syslor est au-delà de la précision requise pour la classe A sur ce test. Après compte rendu auprès des équipes de Syslor, il s'avère que le modèle s'est recalé juste avant l'implantation mais pas correctement. Mais les voyants de l'application étant au vert, sans élément connu pour vérifier le recalage du modèle il est impossible de se rendre compte de cette erreur.

III.2.3.2.2... à partir de la projection manuelle ou automatique

La projection du réseau sur le sol n'apporte pas une précision supplémentaire pour SiteVision par rapport à l'implantation à partir de la modélisation, cela provient du fait qu'en se tenant à l'aplomb du réseau et dans son axe l'erreur de parallaxe décrite en Figure 9 est corrigée. L'écart-type a augmenté ce qui traduit tout de même une précision au-delà de celle permise par la stratégie NRTK.

	SiteVision	Syslor
Moyenne (cm)	5,4	8,2
Ecart-type (cm)	4,0	3,3
Ecart max. (cm)	10,0	12,3

Tableau 8: Résultats des écarts d'implantation positionnement absolu et projection du réseau automatique (Syslor) ou manuelle (SiteVision) (production personnelle).

La projection automatique fournie par le système de Syslor semble apporter de meilleurs résultats, légèrement au-delà de la précision NRTK. La nette amélioration par rapport au Tableau 7 provient du fait que le modèle est resté correctement positionné pendant l'implantation.

III.2.3.2.3...en utilisant classiquement le récepteur GNSS

	Syslor
Moyenne (cm)	1,8
Ecart-type (cm)	1,8
Ecart max. (cm)	3,8

Tableau 9: Résultat des écarts d'implantation en positionnement absolu en utilisant le récepteur GNSS en mode topographie (production personnelle).

Dans le cas d'une implantation classique, c'est-à-dire en utilisant le récepteur sur une canne et en se servant du téléphone comme d'un contrôleur, le système Syslor obtient des résultats très convaincants comme l'a montré Quentin SEMLER³¹ dans son résumé de projet de fin d'étude. Cette solution est intéressante mais étant donné qu'elle nécessite un abonnement spécial cela fait double emploi par rapport aux solutions GNSS déjà possédées par l'entreprise.

III.2.3.3 Résultats du marquage en positionnement relatif...

III.2.3.3.1...directement à partir de la visualisation en 3D

	SiteVision	Syslor	Bloc in Bloc
Moyenne (cm)	5,2	6,2	11,5
Ecart-type (cm)	1,1	1,8	6,8
Ecart max. (cm)	7,8	8,3	22,2

Tableau 10: Résultats des écarts d'implantation positionnement relatif et visualisation 3D (production personnelle).

Les écarts pour les solutions SiteVision et Syslor se trouvent légèrement au-delà de la précision du NRTK, liés à l'erreur visuelle de positionnement. La solution Bloc in Bloc se basant uniquement sur un recalage visuel, le fait de s'approcher du sol pour faire la marque réduit le champ de vision de la caméra et de LiDAR et donc dégrade le recalage. Les précisions restent cependant dans la tolérance de 40 centimètres requise par l'arrêté du 15 février 2012.

³¹ SEMLER Quentin, Développement d'une solution de positionnement centimétrique par GNSS low-cost pour une application Android, Science de l'ingénieur, Strasbourg, 2019, résumé de 6 pages.

III.2.3.3.2... à partir de la projection manuelle ou automatique

	SiteVision	Syslor	Bloc in Bloc
Moyenne (cm)	4,7	4,0	10,8
Ecart-type (cm)	1,3	1,5	5,8
Ecart max. (cm)	6,5	5,7	17,2

Tableau 11: Ecarts d'implantation positionnement relatif et projection automatique (Syslor) ou manuelle (SiteVision, Bloc in Bloc) (production personnelle).

On retrouve des écarts similaires à ceux obtenus précédemment. Les résultats de Syslor sont légèrement meilleurs et rentrent dans la précision attendue du NRTK (rappel : le positionnement est manuel mais le système utilise toujours le récepteur GNSS pour se positionner). La solution de Bloc in Bloc est toujours moins précise, l'utilisation du GNSS dans le système semble donc préférable pour avoir la meilleure position possible même si les 3 solutions respectent la classe A de précision.

III.2.4 Levé de points

En suivant la même méthodologie, nous avons testé les solutions dans le cas où un levé complémentaire. Nous avons effectué ce test à la fois sur le parking pour comparer les données au plan fait avec la station totale et nous avons aussi fait un levé en tranchée ouverte pour utiliser la solution vidéogrammétrique de Syslor. Malheureusement pour ce dernier test, le plan de référence a été réalisé par un levé GNSS en NRTK donc la précision des écarts calculés est entachée d'une erreur de 2 à 5 centimètres. Nous ne prendrons pas en compte ces dernières valeurs pour estimer la classe de précision liée à l'arrêté du 16 septembre 2003. Pour appliquer cet arrêté en tenant compte du système légal français, il a été nécessaire de dissocier les erreurs planimétriques des erreurs altimétriques.

III.2.4.1 Résultat et classe de précision

Ecarts en cm	Planimétrie				Altimétrie			
	Moyenne	6.1	Ecart-type	4.1	Moyenne	4.8	Ecart-type	1.2
SiteVision: GNSS sur canne	Moyenne	6.8	Ecart-type	4.4	Moyenne	1.6	Ecart-type	2.1
SiteVision: mesure EDM	Moyenne	1.5	Ecart-type	0.9	Moyenne	3.1	Ecart-type	2.4
Syslor: GNSS sur canne								

Tableau 12: Ecarts sur les points levés (production personnelle).

Les deux méthodes de levé de points de SiteVision ont une précision moins bonne que celle de la stratégie NRTK en planimétrie mais il est intéressant de noter que les mesures effectuées grâce au distancemètre intégré fournissent des écarts semblables à l'utilisation du récepteur sur canne. On peut en déduire que l'erreur d'orientation est moins importante que

celle du positionnement. En ce qui concerne l'altimétrie, l'utilisation du distancemètre donne de meilleurs résultats que la mesure sur canne même si la dispersion est plus importante.

Les résultats de Syslor sur Canne sont conformes à ce qu'a montré Quentin SEMLER dans son mémoire de fin d'études même si les mesures altimétriques sont de moins bonne

		SiteVision sur canne	SiteVision EDM	Syslor sur canne
Planimétrie (cm)	[xx]=	4.5	5.7	1.9
	T0=	5.1	6.4	2.1
	T1=	12.3	15.5	5.2
	T2=	18.4	23.3	7.8
Altimétrie (cm)	[xx]=	3.5	1.8	2.1
	T0=	3.9	2.0	2.4
	T1=	12.7	6.5	7.6
	T2=	19.1	9.8	11.4

Tableau 13: Classes de précisions et valeurs associées pour chaque système selon l'arrêté du 16 septembre 2003 (production personnelle).

qualité. Les deux systèmes permettent d'atteindre la classe de précision A mais afin de mieux les caractériser, nous avons cherché la classe de précision la plus précise de telle manière à ce que les écarts relevés remplissent toutes les conditions. Ces conditions sont rappelées au paragraphe I.1.2.

On constate ainsi que l'utilisation du récepteur Syslor sur canne est environ deux fois plus précise sur le récepteur de SiteVision. En ce qui concerne l'altimétrie, la solution de mesure par distancemètre de SiteVision est la plus précise.

III.2.4.2 Levé de réseau en tranchée ouverte

Ecart en cm	Planimétrie				Altimétrie			
	Moyenne	4.1	Ecart-type	0.9	Moyenne	2.9	Ecart-type	3.6
SiteVision: GNSS sur canne	Moyenne	5.6	Ecart-type	4.7	Moyenne	3.0	Ecart-type	1.7
SiteVision: mesure EDM	Moyenne	3.0	Ecart-type	1.3	Moyenne	1.4	Ecart-type	1.3
Syslor: Plan obtenu après vidéogrammétrie	Moyenne	3.0	Ecart-type	1.3	Moyenne	1.4	Ecart-type	1.3

Tableau 14: Ecart de position entre les réseaux levés selon les différentes méthodes (production personnelle).

Ce tableau montre les écarts obtenus sur un levé de réseau en tranchée ouverte avec les solutions se positionnant en utilisant un GNSS en stratégie NRTK comparativement à la méthode de levé utilisée chez Kadran, c'est-à-dire par GNSS sur canne en NRTK. Les écarts ne sont pas représentatifs car inférieurs à 5 centimètres, soit la précision du GNSS dans ce mode d'utilisation.

On constate que l'ensemble des applications fournies par les solutions testées permettent d'obtenir une précision de classe A. Dans l'exercice du positionnement du modèle, c'est la solution de Trimble qui donne les meilleurs résultats avec un écart-type de moins de 2 centimètres quelle que soit la méthode. En ce qui concerne le marque-piquetage de réseaux, la solution de Trimble est là aussi plus fiable mais Syslor propose un mode d'implantation « classique » qui donne d'excellents résultats compte tenu du mode de positionnement employé. Pour les deux applications précédemment citées, Bloc in Bloc donne de moins bons résultats, liés à sa méthode de positionnement relatif avec une orientation qui dégrade la qualité dès qu'on s'éloigne du point d'appui. Enfin pour le levé de points, Syslor est la solution la plus fiable par rapport aux deux méthodes innovantes proposées par SiteVision. D'un point de vue uniquement mathématique, la meilleure solution pour visualiser les réseaux enterrés est SiteVision. Pour les implantés ou les levés c'est Syslor qui donnera les résultats les plus fiables.

Conclusion

Le métier de géomètre a constamment évolué depuis ses début en utilisant à chaque fois les dernières technologies disponibles dans le but d'améliorer la qualité des mesures, de réduire le temps passé à les effectuer et de faciliter le processus de traitement, de dessin.

C'est dans cette optique que s'inscrit ce travail de fin d'études : tester si les dernières innovations en matière de réalité augmentée sont viables pour un bureau de géomètre et plus précisément pour les chantiers liés aux réseaux enterrés. Il a d'abord été nécessaire d'identifier les besoins actuels de l'entreprise en matière de réseau et d'analyser les méthodologies utilisées pour y répondre. La contrainte principale, liée à la législation, étant d'avoir une précision inférieure à 40 centimètres en planimétrie pour le positionnement. Nous avons ensuite fait l'inventaire des solutions distribuées sur le marché afin de les comparer aux solutions internes et entre elles, pour voir si elles permettent d'apporter une réelle plus-value aux prestations fournies.

Cette comparaison passe tout d'abord par une analyse du mode de fonctionnement des différentes solutions afin d'avoir une première idée de la précision à laquelle s'attendre. Des tests ont ensuite été effectués en suivant les préconisations des constructeurs et sur des chantiers similaires à ceux sur lesquels l'entreprise intervient, pour vérifier les données théoriques. Deux systèmes sur les trois pris en main utilisent un récepteur GNSS fonctionnant en stratégie NRTK; il était évident qu'ils se géo-positionneraient mieux que celui simplement équipé d'une puce fonctionnant avec la stratégie A-GPS. De même, ce dernier système, équipé d'un LiDAR censé augmenter la précision de recalage, donne de moins bons résultats en relatif du fait de sa méthode d'initialisation.

Les solutions ont aussi été comparées au niveau des coûts d'utilisation et de leur compatibilité avec les logiciels utilisés dans l'entreprise ou la facilité à importer et exporter les données. Sur ces points, aucun logiciel ne nous a pleinement convaincu; soit l'import était facile mais l'export nécessitait un traitement long et fastidieux des données, soit la transformation du fichier source n'était pas automatique et bien moins rapide car traitée manuellement par l'entreprise fournissant la solution.

Au final, bien que les solutions testées soient intéressantes par certains aspects, il faudrait combiner les avantages des trois : la facilité d'import et les outils de visualisation

de SiteVision, la précision de l'implantation et du levé de points ainsi que l'export de Syslor et enfin l'interface intuitive de Bloc in Bloc. C'est dans ce but qu'il a été décidé de développer une solution interne à Kadran comme l'ont déjà fait certains autres cabinets de géomètres. Cela permettra d'avoir une meilleure intégration du système sans faire double emploi avec les méthodologies déjà présentes.

Ce sujet sur lequel j'ai eu l'occasion de travailler durant ces quatre mois et demi m'a donné un regard critique sur les technologies innovantes qui peuvent être intégrées au panel du géomètre. Il est important de rester toujours informé et attentif aux nouvelles et incessantes évolutions technologiques afin de faire évoluer les méthodes de travail, en restant conscient de leurs limites possibles qui ne sont pas toujours perçues dans les présentations marketing.

Bibliographie

Chapitre dans un ouvrage imprimé

SIMONETTO Elisabeth, 2016. Photogrammétrie. Support de cours IG3, ESGT. 152p

Travaux universitaires

CHANIER François. Localisation et cartographie simultanées de l'environnement à bord de véhicules autonomes : analyse de solutions fondées sur le filtrage de Kalman. Automatique / Robotique. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2010. 225p. [en ligne]. Disponible sur : tel.archives-ouvertes.fr/tel-00719341/document. (consulté le 30/06/2021).

DEMEULE Vincent. Estimation des déplacements des piétons à partir des mesures inertielles et GPS d'un smartphone. Sciences de l'ingénieur [physics]. Le Mans. ESGT. 2012. 49p. [en ligne]. Disponible sur : dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00920114 . (consulté le 22/06/2021).

LAVOIE Philippe. Système de navigation hybride GPS/INS à faible coût pour la navigation robuste en environnement urbain. Sciences de l'ingénieur [physics]. Le Mans. ESGT. 2012. 314p. [en ligne]. Disponible sur : researchgate.net/publication/236658166_Systeme_de_Navigation_Hybride_GPSINS__Faible_Cot_Pour_la_Navigation_Robuste_en_Environnement_Urbain . (consulté le 22/06/2021).

LOUVET Sélim. Mise en place d'un dispositif de repérage de réseaux enterrés fondé sur la technologie RFID. Sciences de l'ingénieur [physics]. Le Mans. ESGT. 2018. 60p. [en ligne] Disponible sur : dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02093178. (consulté le 02/06/2021).

PERRET Cyril. Mise en place d'une méthode de positionnement dynamique des réseaux, accessible via smartphone, répondant aux normes de la DT-Dict. Sciences de l'ingénieur [physics]. Le Mans. ESGT. 2016. 53p. [en ligne]. Disponible sur : dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01339013/document . (consulté le 22/06/2021).

SEMLER Quentin, Développement d'une solution de positionnement centimétrique par GNSS low-cost pour une application Android, Science de l'ingénieur, Strasbourg, 2019, résumé de 6 pages.

Sites web

CNET France. In : L'équipe du CENT France. iPhone 12 : tout savoir sur le Lidar, une technologie prometteuse. [en ligne]. Disponible sur : cnetfrance.fr/produits/iphone-12-tout-savoir-sur-le-lidar-une-technologie-prometteuse-39911969.htm. (consulté le 02/06/2021).

GEOSERVICE : RGE Alti. [en ligne]. Disponible sur : <https://geoservices.ign.fr/rgealti> (consulté le 27/08/2021).

Liste des figures

Figure 1: Extrait d'un ancien plan de récolement à l'échelle 1/200 dans le système planimétrique Lambert II et le système altimétrique IGN69. On retrouve en fond de plan une carte aérienne mais la taille pixel sol étant de 20 centimètres, il est impossible de prendre des mesures à partir de celui-ci (source : plan Kadran).....	14
Figure 2: Représentation des points d'intérêt sur un sol relativement lisse, on s'aperçoit que si l'on ne filme par les bâtiments aux alentours, leur nombre diminue drastiquement et la qualité du suivi de mouvement sera dégradée. (source : illustration provenant du forum dsp.stackexchange.com consulté le 02/06/2021).....	20
Figure 3: Détection du plan sol représenté par le quadrillage qui permet de poser des objets virtuels dessus. Un ombrage permet un rendu plus réaliste. (source : wiktitude.com consulté le 02/06/2021).....	20
Figure 4: Illustration de la zone de points prise par le capteur LiDAR de l'iPhone 12 Pro. (source: vidéo de démonstration produite par Alan S et disponible en ligne sur youtube.com/watch?v=9DQkGg49x08&ab_channel=AlanS consulté le 02/06/2021).....	21
Figure 5: Mode de positionnement à partir de deux points : on sélectionne le point sur le modèle puis on le vise au travers de la caméra (source : brochure Syslor).....	29
Figure 6: Positionnement manuel avec un point et orientation (source : capture d'écran de l'application Bloc in Bloc).....	30
Figure 7: Mesure de la profondeur à la verticale du modèle. Une bulle permet de contrôler la verticalité (source: capture d'écran de l'application Bloc in Bloc).	31
Figure 8: Fosse virtuelle dont la profondeur est graduée tous les 10 centimètres (source: capture d'écran de l'application SiteVision).	31
Figure 9: Schéma représentant le phénomène de parallaxe (production personnelle).	32
Figure 10: Projection manuelle du réseau (source : capture d'écran de l'application Site Vision)..	33
Figure 11: Projection automatique du réseau (source : capture d'écran de l'application Syslor).	33
Figure 12: Modélisation fictive d'un réseau à partir des données du levé topographique (production personnelle)	35
Figure 13: Aperçu de la tranchée ouverte d'une longueur d'environ 5 mètres pour 1,5 de profondeur (photo personnelle).....	36
Figure 14: Schéma de la méthodologie utilisée sur le terrain (production personnelle).	37
Figure 15: Capture d'écran de l'interface à partir de laquelle l'erreur de position est mesurée (capture d'écran de l'application Syslor à gauche et Bloc in Bloc à droite).....	37

Liste des tableaux

Tableau 1: Valeur de N' en fonction du nombre de mesures de contrôle.....	12
Tableau 2: Récapitulatif des technologies embarquées dans les systèmes testés (production personnelle).	23
Tableau 3: Récapitulatif des fonctionnalités incluses dans les différents logiciels (production personnelle).	34
Tableau 4: Résultats des écarts du positionnement absolu (production personnelle).	38
Tableau 5: Résultats des écarts du positionnement relatif (production personnelle).	38
Tableau 6: Résultats des écarts de la mesure de profondeur (production personnelle).....	39
Tableau 7: Résultats des écarts d'implantation positionnement absolu et visualisation 3D (production personnelle).....	40
Tableau 8: Résultats des écarts d'implantation positionnement absolu et projection du réseau automatique (Syslor) ou manuelle (SiteVision) (production personnelle).	40
Tableau 9: Résultat des écarts d'implantation en positionnement absolu en utilisant le récepteur GNSS en mode topographie (production personnelle).....	41
Tableau 10: Résultats des écarts d'implantation positionnement relatif et visualisation 3D (production personnelle).....	41
Tableau 11: Ecart d'implantation positionnement relatif et projection automatique (Syslor) ou manuelle (SiteVision, Bloc in Bloc) (production personnelle).	42
Tableau 12: Ecart sur les points levés (production personnelle).	42
Tableau 13: Classes de précisions et valeurs associées pour chaque système selon l'arrêté du 16 septembre 2003 (production personnelle).	43
Tableau 14: Ecart de position entre les réseaux levés selon les différentes méthodes (production personnelle).	43

Etude et analyses comparatives des solutions existantes sur les outils de réalité virtuelle et de réalité augmentée pour des applications de positionnement de réseaux enterrés.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2021

RESUME

Les réseaux enterrés représentaient environ 2,7 millions de kilomètres en 2012 en France. La réforme anti-endommagement des réseaux de 2012 fixe un calendrier aux gestionnaires de réseaux pour qu'ils géoréférencent l'intégralité de leurs réseaux d'ici 2032. L'entreprise Kadran cherche à proposer à ses clients habituels ses services pour intervenir dans le cadre des réseaux en utilisant une solution innovante afin de les visualiser.

C'est pour cela que nous avons recherché des solutions de réalité virtuelle ou augmentée pour « voir à travers le sol » avec suffisamment de précision, la nature des réseaux et leur position. Nous avons d'abord étudié les technologies qui font que ses outils fonctionnent, pour vérifier si la classe A de précision pourrait être atteinte.

Nous avons ensuite comparé plusieurs systèmes aux méthodes actuellement employées en prenant en compte la facilité d'utilisation, l'adaptabilité aux logiciels déjà acquis ainsi que leur modèle économique et enfin leur précision et fiabilité. Le but étant de conseiller l'entreprise sur l'intérêt d'un investissement ou non dans une de ces solutions.

Mots clés : réseaux enterrés, réalité augmentée, smartphone, classe A, géoréférencer.

SUMMARY

Buried underground utilities represented approximately 2.7 million kilometres in 2012 in France. The 2012 reform against damage to networks sets a timetable for network managers to georeference all their networks by 2032. Kadran is looking to offer its regular customers its services to work in the networks using an innovative solution to visualise them.

Therefore, we looked for virtual or augmented reality solutions to “see through the ground” with sufficient accuracy, the nature of the networks and their position. We first studied the technologies that make these tools work to see if class A accuracy could be secured.

We then compared several systems to the methods currently in use. Taking into account their ease of use, adaptability to existing software and their economic model and finally their accuracy and reliability. The aim was to advise the company on whether or not to invest in one of these solutions.

Key words : underground utilities, augmented reality, smartphone, class A, to georeferenced.