

## 3DCity

# Cartographie spatiale et outils holographiques pour l'acquisition des données 3D et visualisation des réseaux enterrés

■ Vedran VLAJKI - Mathieu TAPPOLET - Youri ROBERT - Rodolphe FAHRNI - Dimitri KONSTANTAS

*Le projet 3DCity, mené par l'Université de Genève en partenariat avec le CERN et les Services industriels de Genève, vise à fournir des solutions innovantes basées sur les technologies de numérisation 3D et de réalité augmentée pour i) les opérations de relevé des réseaux souterrains et ii) la visualisation des réseaux souterrains avant les travaux d'excavation.*

### MOTS-CLÉS

Réseaux souterrains, numérisation 3D, réalité augmentée, relevés, HoloLens

2018, puis soigneusement testé en laboratoire pour les mesures de précision. Depuis lors, nous avons mené de multiples essais sur des chantiers de construction, en collaboration avec nos partenaires industriels CERN et SIG (Services Industriels de Genève).

## Introduction

Les opérations de relevé des réseaux en fouille ouverte revêtent une importance particulière et sont très consommatrices en ressources. Elles nécessitent un personnel qualifié capable d'utiliser correctement des outils complexes tels que le récepteur GNSS centimétrique, le théodolite, etc. Par ailleurs, l'intervalle de temps disponible pour le relevé des réseaux avant que la fouille ne soit refermée est très court et doit être minimisé. Ces multiples exigences entraînent des coûts élevés, ainsi que des données inexactes ou incomplètes. Il est également très courant que des éléments tels que des câbles, des tuyaux ou autres conduites soient endommagés lors des travaux d'excavation.

Dès lors, apparaît la nécessité de développer de nouvelles méthodes simples, rapides et de haute précision i) pour le relevé des réseaux en fouille ouverte et ii) pour visualiser l'emplacement des réseaux enterrés avant les travaux d'excavation.

3DCity est un projet de recherche et développement mené par l'Université de Genève et financé par Innosuisse. Démarré en mai 2017, ses objectifs principaux sont de :

- permettre aux équipes présentes sur site de générer des modèles 3D des réseaux en fouille ouverte,

- permettre au personnel formé de bureau d'extraire des données SIG à partir des modèles 3D réceptionnés, conformément aux normes en vigueur,
- permettre au personnel formé de bureau de convertir les données SIG contenues dans les bases de données cadastrales en modèles 3D géolocalisés,
- permettre aux équipes présentes sur site de visualiser les modèles 3D des réseaux enterrés à leur emplacement précis dans l'environnement.

Un prototype fonctionnel des solutions a été complété avec succès en février

## Solution de relevé

La première partie du processus de relevé consiste à utiliser une caméra 3D pour recueillir des mesures géométriques des surfaces du réseau de conduites. Comme le marché de la vision par ordinateur devrait continuer de croître à un rythme soutenu, diverses entreprises technologiques investissent massivement dans la recherche et le développement de nouvelles caméras 3D portables, toujours plus performantes et moins coûteuses. Pour notre projet de recherche, nous avons sélectionné la caméra stéréoscopique

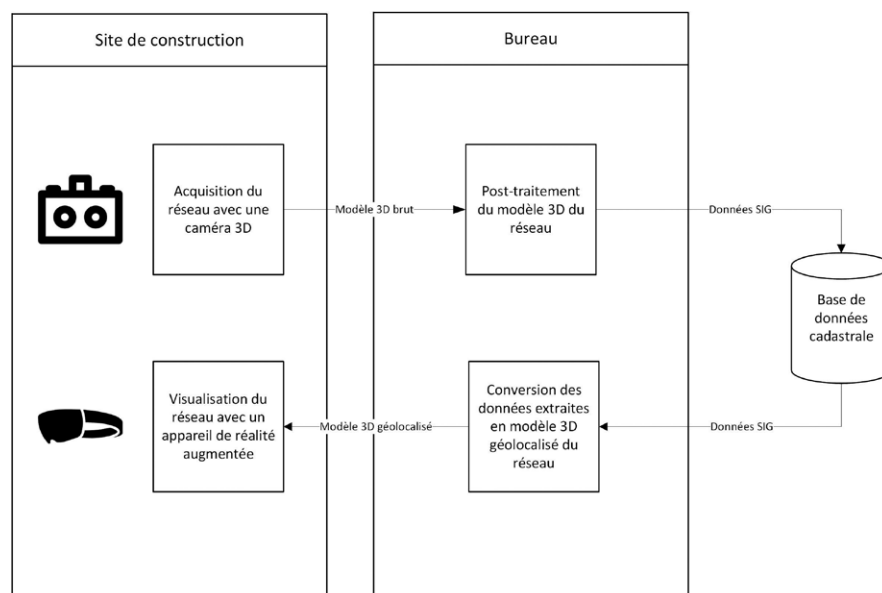
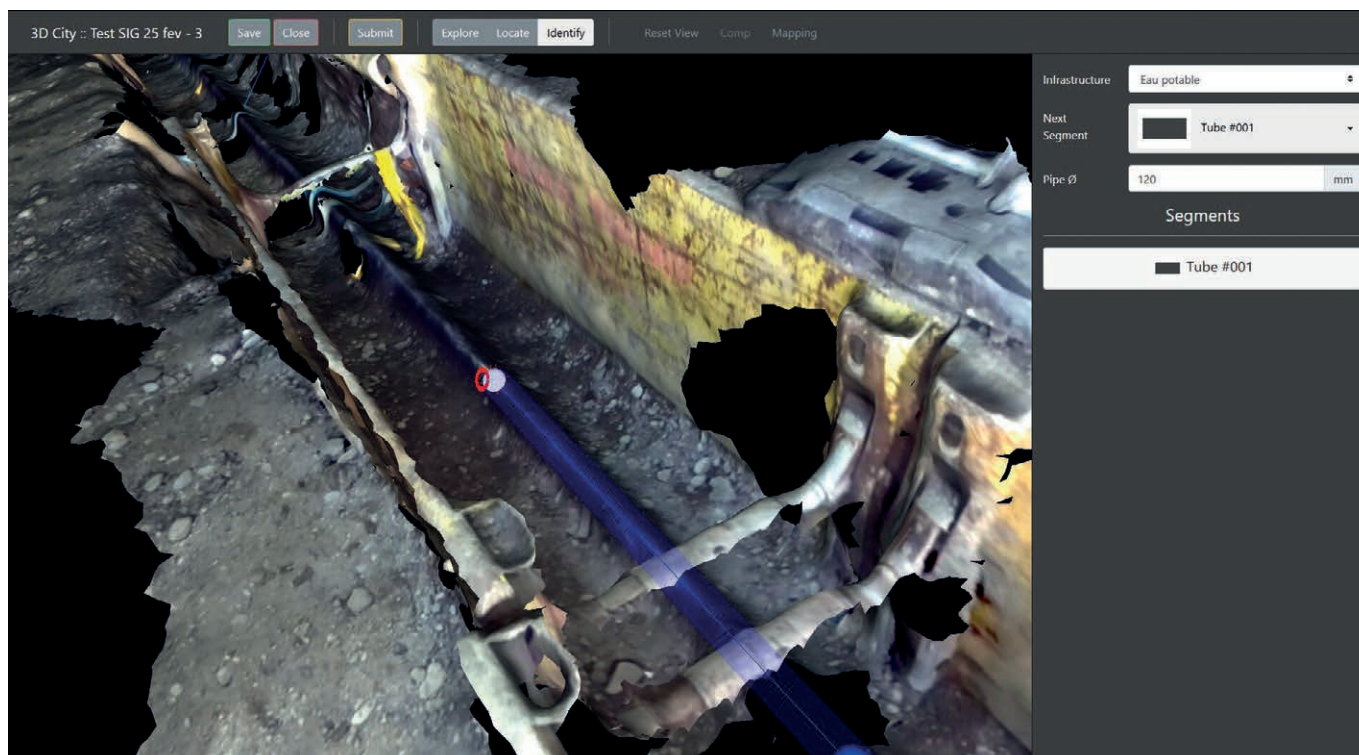


Schéma du cycle des données : de l'acquisition à la visualisation



Tracé des conduites par-dessus la scène brute dans l'application CAO



ZED produite par la société américaine StereoLabs. Elle s'inscrit dans notre objectif de fournir une solution simple (aucune expérience requise), rapide et de haute précision pour les opérations de relevé. Il suffit en effet de connecter la caméra à un ordinateur portable équipé d'un port USB3, puis de lancer l'enregistrement depuis l'application de numérisation. La longue portée de la caméra (jusqu'à 20 m), et la fonctionnalité intégrée de mappage de texture qui facilite le travail ultérieur avec le modèle 3D dans une application CAO, comptent parmi ses avantages significatifs. Une fois l'enregistrement terminé, le modèle 3D est généré et les textures projetées. Ce traitement lourd en calculs peut être exécuté directement sur site en temps réel (sur des ordinateurs portables équipés d'un GPU haut de gamme) ou par la suite sur un ordinateur de bureau.

La scène brute ainsi obtenue est composée d'une seule surface dont le point d'origine est arbitraire. En tant que telle, elle n'offre aucune utilité immédiate en termes de données SIG, même si elle peut être considérée comme précieuse en soi (visualisation, calcul des volumes, etc.). Heureusement, la plus grande partie de la géométrie des réseaux enterrés admet des représentations paramétriques explicites basées

sur des formes simples comme des cylindres ou des parallélépipèdes généraux. Le faible nombre de paramètres permet à un opérateur humain d'utiliser un logiciel de modélisation pour "nettoyer" assez rapidement la scène brute, en remplaçant des ensembles non organisés de polygones acquis par numérisation par des formes géométriques paramétriques, qui peuvent être associées à des métadonnées (par exemple matériaux utilisés, diamètres, numéros des pièces). Pour obtenir des données SIG, nous devons donc i) géolocaliser la scène, ii) recréer le tracé du réseau de conduites, et iii) exporter les données significatives dans le format requis. Ces tâches peuvent être exécutées avec l'application CAO spécialisée que nous avons développée pour le projet.

• Pour géolocaliser la scène à l'aide de notre application, nous devons identifier manuellement au moins trois points de référence ayant des coordonnées connues, tels que des marqueurs géodésiques ou des extrémités de conduites déjà existantes (et visibles). Le site de construction ne présentera parfois pas de points facilement exploitables. Dans ce cas, l'idée est de se rabattre sur des points de référence "artificiels" – par exemple

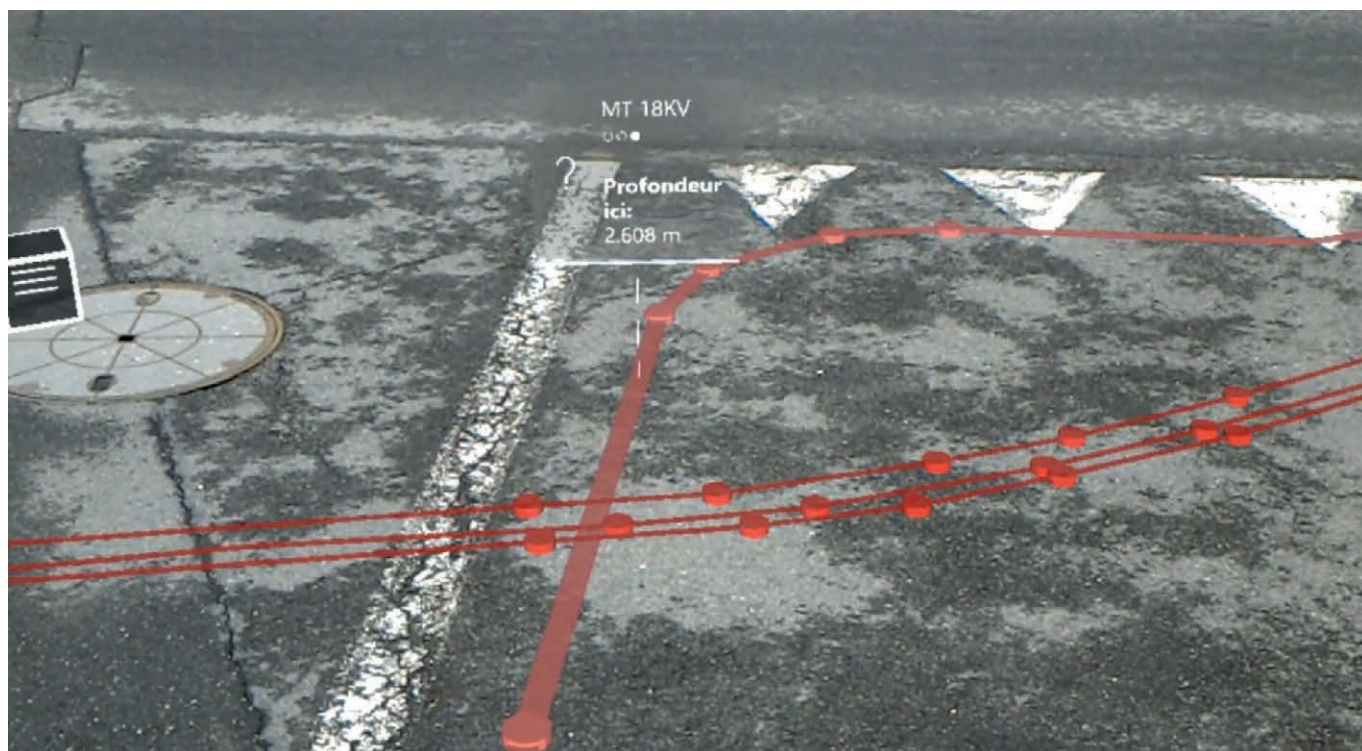
une marque pulvérisée sur le sol dont les coordonnées seront fournies par un appareil GNSS centimétrique.

- La phase suivante consiste à dessiner le plus précisément possible le tracé des conduites par-dessus la scène brute. De nombreux algorithmes d'assistance prenant en compte divers paramètres (comme le diamètre des conduites) ont été implémentés pour aider l'utilisateur et optimiser le travail. Il est possible de travailler simultanément sur plusieurs types de réseaux, de changer le type de segment (par ex. coude au lieu de droit), de fendre des conduites, etc.
- Enfin, les données significatives (coordonnées des nœuds, formes, métadonnées) contenues dans la scène peuvent être extraites, transformées dans le format exploitable par le SIG visé, puis soumises pour examen ou traitement ultérieur.

## Solution de visualisation

Une localisation approximative des réseaux enterrés par les équipes de construction, basée sur des plans parfois inexacts, peut avoir de graves conséquences lors de l'excavation : blessures importantes, voire même décès, réparations à entreprendre, retards de construction. Afin de permettre une





### Affichage des réseaux enterrés et aides visuelles sous forme d'hologrammes

visualisation utile et géolocalisée des réseaux enterrés existants (ou futurs) dans le cadre du chantier, nous avons développé une solution fonctionnant sur un dispositif d'augmentation holographique, à savoir HoloLens. Annoncé au 21 janvier 2015 comme une innovation scientifique majeure, HoloLens de Microsoft fonctionne sous Windows 10, et est décrit comme l'ordinateur holographique le plus avancé au monde. Il permet à l'utilisateur de visualiser et d'interagir avec le contenu holographique incrusté dans l'environnement. De plus, HoloLens génère et maintient en temps réel un modèle 3D de son environnement immédiat (cartographie spatiale).

Lorsqu'un appareil HoloLens est mis sous tension, sa position spatiale initiale définit l'origine (0, 0, 0) du système de coordonnées. Tous les hologrammes sont affichés par rapport à ce point d'origine. Cependant, pour géolocaliser notre scène et visualiser les réseaux de conduites à leur position spatiale exacte, nous devons utiliser le système de coordonnées du monde réel. Sur HoloLens, nous pouvons afficher un curseur spatial qui indique où le regard de l'utilisateur se pose dans l'environnement. Son principe de fonctionnement peut être comparé à un rayon laser

partant d'entre les yeux de l'utilisateur, et représenté mathématiquement par un vecteur. Lorsque l'utilisateur déplace son regard, le rayon est intersecté avec la surface la plus proche de l'environnement cartographié en temps réel par l'appareil, afin de déterminer les composantes et la longueur du vecteur. Nous pouvons dès lors cibler des points sur les surfaces environnantes avec le curseur, puis les mettre en relation avec une liste de points de référence connus dont les coordonnées ont été stockées dans l'application. Dès que deux points ont ainsi été identifiées (ancres spatiales), nous pouvons calculer avec précision la position et l'orientation de l'appareil, et par conséquent utiliser cette information pour transformer toutes les coordonnées relatives en coordonnées géolocalisées du monde réel.

Une fois la position de l'appareil connue, l'application peut afficher les réseaux (ou fourreaux) sous forme d'hologrammes géolocalisés. En fonction de leur visibilité, les éléments des réseaux sont représentés par leurs lignes de contour (cachés sous le sol) ou par des volumes pleins (fouille ouverte). Pour visualiser le site de manière à aider l'utilisateur à mieux percevoir la position des hologrammes "flottant" dans l'espace, les lignes de projection et les distances

entre chaque nœud et la surface du sol la plus proche sont calculées et diffusées en temps réel. L'utilisateur peut également creuser un « trou virtuel » en ciblant deux points au sol. Une représentation en coupe verticale 2D du trou incluant des informations contextuelles supplémentaires, telles que les distances entre les conduites s'y trouvant, est alors calculée en temps réel et affichée dans une fenêtre flottante.

### Essais de précision en laboratoire

#### ■ Environnement

Les essais ont été réalisés dans un espace intérieur de taille moyenne, avec une bonne luminosité et sans lumière artificielle. Plusieurs points de référence ont été placés à travers la pièce et leurs coordonnées ont été mesurées aussi précisément que possible à partir d'un point arbitraire d'origine. La caméra ZED que nous utilisons pour la numérisation 3D est basée sur une vision stéréoscopique RVB passive, ce qui signifie que la qualité du résultat est corrélée au nombre d'apparitions non ambiguës des points de l'image. Elle est donc mieux adaptée aux espaces extérieurs richement texturés, tels que les sites de construction.



### ■ *Tracé de conduites*

Nous avons assemblé un petit tracé de conduites en PVC brun brillant, positionné verticalement sur le sol en appui sur les extrémités de deux segments droits, et composé comme suit :

- 3 segments droits, d'un diamètre de 60 mm et d'une longueur de 1000 mm,
- 2 segments coudés à 87°, d'un diamètre de 60 mm.

Huit nœuds utiles pour les mesures ont été définis. Chaque segment a un nœud à ses extrémités. De plus, les segments coudés ont un troisième nœud équidistant des deux autres. Dans une représentation 3D, les nœuds sont au centre du plan de coupe des segments. Afin de permettre une identification répétable et précise de l'emplacement des nœuds lors de l'étape de traitement avec l'application CAO, nous avons collé des marqueurs colorés sur la surface extérieure des segments. La distance entre les nœuds correspond à la distance entre les marqueurs, et a été mesurée manuellement le plus précisément possible. Il est à noter que le réseau n'est pas parfaitement symétrique, en raison de l'angle du coude et des distorsions créées par l'orientation et le verrouillage imparfait des segments.

### ■ *Résultats : précision des relevés*

La scène a été numérisée avec la caméra 3D, puis traitée avec l'application CAO que nous avons développée. Les coordonnées spatiales des nœuds ainsi obtenues ont ensuite été comparées aux mesures effectuées manuellement. L'imprécision mesurée dans les conditions de laboratoire (environnement contrôlé, essais répétés et travaux effectués par les ingénieurs en charge du projet) était d'environ 2 cm en moyenne.

Min Erreur	0.2 cm
Max Erreur	4.7 cm
Moyenne	1.9 cm
SD1 68 %	1.2 cm
SD2 95 %	2.4 cm

### ■ *Résultats : précision de positionnement lors de la visualisation*

En considérant que toutes les coordonnées spatiales du tracé sont

parfaitement exactes, on peut postuler que la totalité de l'imprécision de positionnement des hologrammes lors de la visualisation est due i) à la distorsion des distances par l'appareil, et ii) à la géolocalisation initiale de l'appareil par le positionnement manuel des ancrs spatiales.

#### • *Imprécision due à la distorsion des distances par l'appareil.*

Il est facile de vérifier si l'appareil respecte la distance entre deux points représentés sous forme d'hologrammes dont les coordonnées sont connues. Pour ce faire, il suffit de marquer avec un stylo leur emplacement lorsque intersectés avec un espace plat, puis d'en mesurer la distance et vérifier si celle-ci correspond aux données. Après avoir effectué de nombreuses mesures, nous avons déterminé que l'inexactitude due à l'appareil est non significative, largement inférieure à 1 cm. Sachant cela, nous pouvons conclure que l'imprécision du placement des hologrammes est presque entièrement due à l'imprécision créée lors du placement manuel des ancrs.

#### • *Imprécision due à la géolocalisation de l'appareil.*

Le dispositif est géolocalisé en positionnant au moins deux ancrs spatiales sur des points de référence dont les coordonnées sont connues. Pendant les tests, chaque ancre a été positionnée grossièrement à l'aide du curseur spatial de l'appareil, puis ajustée avec les outils de translation et de rotation jusqu'à ce qu'elle semble parfaitement en place. Afin de mesurer l'imprécision, une "cible" de 1 cm a été imprimée, puis centrée sur l'emplacement théorique parfait de l'axe du tracé en intersection avec le sol. En remplaçant l'hologramme du segment par une ligne axiale centrale, nous avons pu déterminer l'imprécision équivalente à la distance entre le point d'intersection de la ligne avec la cible et le point central de la cible. Selon l'angle de vue, l'imprécision était en moyenne d'environ 2 cm.

### Évaluation sur site des cas d'utilisation

Les solutions développées au cours du projet ont été évaluées sur plusieurs

chantiers de construction, en collaboration avec M. Youri Robert, responsable topographie et SIG au CERN, et M. Jean-Rodolphe Fahrni, responsable des projets géomatiques aux Services Industriels de Genève. Au-delà des deux cas d'utilisation que nous avons identifiés, testés et présentés ci-dessous, d'autres possibilités peuvent bien entendu être envisagées.

### ■ *Relevé sur site et extraction des données SIG à l'aide de la caméra 3D*

Le relevé traditionnel nécessite du personnel qualifié sur le site et du matériel coûteux. En raison des nombreux sites à couvrir pendant la journée, la disponibilité du géomètre est souvent limitée. Son absence peut retarder l'avancement des travaux, car la fouille ne peut être refermée avant que les mesures ne soient terminées. De plus, et sur la base d'informations obtenues lors des entretiens, les mesures par GNSS ne peuvent être effectuées dans environ trente pour cent des cas (notamment en ville) parce que le signal réceptionné est trop faible. Par conséquent, les travailleurs doivent descendre dans la fouille pour prendre les mesures à la main, ce qui est lent, dangereux et sujet à l'erreur.

La solution basée sur la caméra stéréoscopique résout les problèmes susmentionnés. En effet, la numérisation 3D peut être effectuée par les équipes déjà présentes sur le site, au moment le plus opportun, sans compétences particulières ou équipement sophistiqué – soit avec une simple application d'enregistrement vidéo nécessitant un ordinateur portable et une caméra 3D peu coûteuse. Sur la base du modèle 3D généré, le géomètre peut ensuite dessiner les tracés tout en restant à son bureau, ce qui élimine les nombreux déplacements quotidiens et réduit considérablement les coûts. Enfin, si les conditions météorologiques et l'éclairage sont acceptables, la numérisation 3D fonctionne dans les cas où le signal GNSS n'est pas disponible ou insuffisant.

Les résultats des essais de performance et de précision sont basés sur 15 opérations de relevé que nous avons



réalisées sur les chantiers des Services Industriels de Genève, dont 58 vidéos 3D et 42 tuyaux. En moyenne, nous avons constaté une différence d'environ 7 cm par rapport aux mesures traditionnelles effectuées avec un récepteur GNSS centimétrique. Le temps consacré au relevé sur place a été réduit de 60 %, et le temps de post-traitement passé au bureau de 25 %.

### ■ Assistance holographique pour le marquage au sol du tracé de réseaux

Les réseaux enterrés sont souvent identifiés par des lignes colorées marquées au sol avant les travaux d'excavation. C'est une tâche fastidieuse, lors de laquelle le responsable doit mesurer et déterminer avec exactitude l'emplacement des lignes point par point avant le marquage. Les techniques holographiques permettent non seulement de gagner beaucoup de temps, mais aussi de réduire les erreurs humaines pouvant avoir de graves conséquences. Suite à la géolocalisation de l'appareil, notre application se base sur son analyse de l'environnement en temps réel, afin de calculer et projeter le tracé des réseaux au niveau du sol. L'utilisateur peut dès lors simplement suivre l'affichage pour effectuer le marquage. Sur la base de plusieurs tests effectués sur les chantiers des Services Industriels de Genève, nous avons constaté que le travail était réalisé environ quatre fois plus rapidement avec le support holographique par rapport à la méthode traditionnelle.

## Conclusions et perspectives

Nous avons examiné les méthodes et avantages de l'utilisation des technologies de numérisation 3D, de réalité augmentée, et des logiciels spécialisés, pour faciliter les travaux de relevé et de maintenance des réseaux enterrés. Bien que nous reconnaissons que nos solutions ne peuvent être appliquées à toutes les tâches et situations, nous sommes très encouragés par les résultats obtenus. Ceux-ci démontrent de nombreux avantages concrets, réalisés dans le cadre de l'environnement complexe de chantier. Les processus et les logiciels que nous avons développés

pour atteindre nos objectifs sont résumés ci-dessous.

En ce qui concerne l'acquisition et la transformation des données, nous avons pu utiliser une caméra stéréoscopique pour générer un modèle 3D de tracés complexes et diversifiées de conduites en fouille ouverte. Ces données brutes composées de surfaces spatiales ont ensuite été traitées dans notre application CAO, où l'utilisateur peut géolocaliser le modèle à l'aide de points de référence identifiés dont les coordonnées sont connues, recréer une représentation paramétrique du réseau avec des outils assistés, ajouter diverses métadonnées, et enfin extraire les données SIG dans le format requis. Pour nous assurer de la précision obtenue, nous avons effectué des essais de laboratoire détaillés et conclu que la différence par rapport aux mesures manuelles était en moyenne d'environ 2 cm.

En ce qui concerne la visualisation holographique des réseaux enterrés, nous avons développé une application permettant d'afficher de manière géolocalisée des tracés complexes à partir des données SIG extraites des bases de données cadastrales. De multiples aides visuelles et fonctionnalités – lignes de projection, calcul de distances, excavations virtuelles – ont été mises en œuvre de manière à fournir une solution vraiment utile pour les utilisateurs. Nous avons effectué des essais en laboratoire pour déterminer la précision du placement des hologrammes dans l'environnement, et conclu que l'imprécision était presque entièrement due à l'erreur humaine lors de la géolocalisation de l'appareil, qui est d'environ 2 cm en moyenne.

Afin de comparer notre solution aux méthodes conventionnelles, tous les processus et outils logiciels développés au cours du projet ont été testés et validés sur plusieurs chantiers, tant par les développeurs que par des professionnels du domaine. Le temps nécessaire pour effectuer les relevés a été réduit de 60 % dans certains cas, tout en maintenant une précision suffisante par rapport à un relevé classique. La visualisation holographique des lignes de projection au sol des réseaux

de conduites avant excavation a permis de tracer les marquages environ quatre fois plus rapidement que la méthode plan/kutch, tout en étant plus fiable en raison de l'absence de possibles erreurs humaines de mesure.

Parmi les difficultés à surmonter, on peut noter l'absence de points de référence connus et facilement identifiables sur certains chantiers. La solution consiste à créer des points artificiels à l'aide d'un récepteur GNSS centimétrique. Aussi, la qualité du modèle 3D réalisé avec la caméra stéréoscopique doit être validée avant la fermeture de la fouille. Cela ne peut actuellement se faire que sur un ordinateur équipé d'un GPU haut de gamme – pas forcément disponible sur le site – impliquant donc d'éventuels transferts de fichiers de données volumineux par un réseau mobile 4G. Enfin, les changements organisationnels nécessaires à l'adoption de ces nouvelles approches ne sont pas négligeables. D'autres études et essais seront certainement nécessaires pour fournir des preuves supplémentaires de fiabilité et de précision des solutions développées. ●

## Contacts

Vedran VLAJKI – Université de Genève  
Vedran.Vlajki@unige.ch

Mathieu TAPPOLET – Université de Genève  
Youri ROBERT – CERN

Rodolphe FAHRNI – Services Industriels de Genève

Dimitri KONSTANTAS – Université de Genève

## ABSTRACT

**Key words:** Underground networks, 3D scanning, surveying, augmented reality, HoloLens

*The 3DCity project, led by the University of Geneva in partnership with CERN and Services Industriels de Genève, aims to provide innovative solutions based on 3D scanning and augmented reality technologies for i) underground networks surveying operations, and ii) visualization of hidden infrastructure elements prior to excavation.*