

Repérage d'un système d'inspection dans un tunnel-canal

■ Antoine GUITTET

Cette étude a été réalisée au sein du Laboratoire régional des ponts et chaussées (LRPC) de Strasbourg, faisant partie du Centre d'études techniques de l'équipement (CETE) de l'Est. Les services de Voies Navigables de France (VNF) ont exprimé le besoin de disposer d'un outil à grand rendement afin de diagnostiquer, par l'image, l'état de la maçonnerie des tunnels fluviaux. Afin de répondre aux besoins des services de VNF, le groupe ouvrages d'art et l'équipe de recherche associée (ERA) du CETE de l'Est ont proposé (convention du 7 octobre 2009) d'adapter et de développer, dans une démarche innovante, un outil d'inspection basé sur les connaissances et techniques du système d'imagerie routière développé au sein de ces équipes. La faisabilité d'un tel système pour les canaux est étudiée. Cette phase fait suite à une série d'essais préalables menés conjointement par le LRPC de Strasbourg et le groupe PAGE de l'INSA de Strasbourg dans un tunnel-canal de 475 m situé à Niderviller en Moselle. Dans un premier temps, il s'agit de mettre en place un système d'acquisition automatique permettant de constituer une cartographie détaillée et géoréférencée de l'ouvrage. Ensuite, un système de traitement semi-automatique des images destiné à repérer et localiser les défauts dans le tunnel sera développé.

Les tunnels navigables sont des ouvrages peu structurés, d'une longueur variable (47 à 5 681 m), où la trajectoire d'une plate-forme mobile est difficilement planifiable. De plus, la plate-forme reposant sur l'eau, ses mouvements sont très instables. Les contraintes telles que la longueur, l'obscurité et l'impossibilité d'utiliser le GPS sont également à prendre en considération. Le système d'inspection, embarqué sur un véhicule, doit pouvoir être repéré dans le tunnel : la connaissance des positions longitudinale et transversale est nécessaire.

L'objectif du projet est de définir une méthode de repérage de la barge et plus précisément des centres de perspective des caméras (trajectographie). Lors des deux expérimentations menées en mai et décembre 2011, plusieurs méthodes ont été testées : suivi tachéométrique, photogrammétrie, GPS/centrale inertielle (CI). Les trajectoires obtenues par les différentes méthodes lors de ces

essais sont comparées, et les erreurs (notamment la dérive de la centrale inertielle) estimées. Il est donc nécessaire

MOTS-CLÉS

photogrammétrie, tachéométrie, centrale inertielle, GPS, cartographie mobile, tunnel

d'étudier la faisabilité des différents systèmes selon plusieurs critères : précision, facilité de mise en œuvre, rapidité, efficacité et automatisation du traitement de données.

Données utilisées

Les données utilisées proviennent de différents instruments :

- Images acquises depuis le système mis en place par le LRPC de Strasbourg. Le système d'acquisition embarqué sur la barge est composé de deux caméras Marlin (prises de vues latérales), de deux caméras Pike (prises de vues de la voûte), d'un dispositif d'éclairage et d'un ordinateur gérant le déclenchement et l'enregistrement des prises de vues (figures 1 et 2). La disposition des caméras Pike est modulable afin de disposer d'images de l'ensemble de la voûte.
- Résultats de levés topométriques et lasergrammétriques réalisés par le

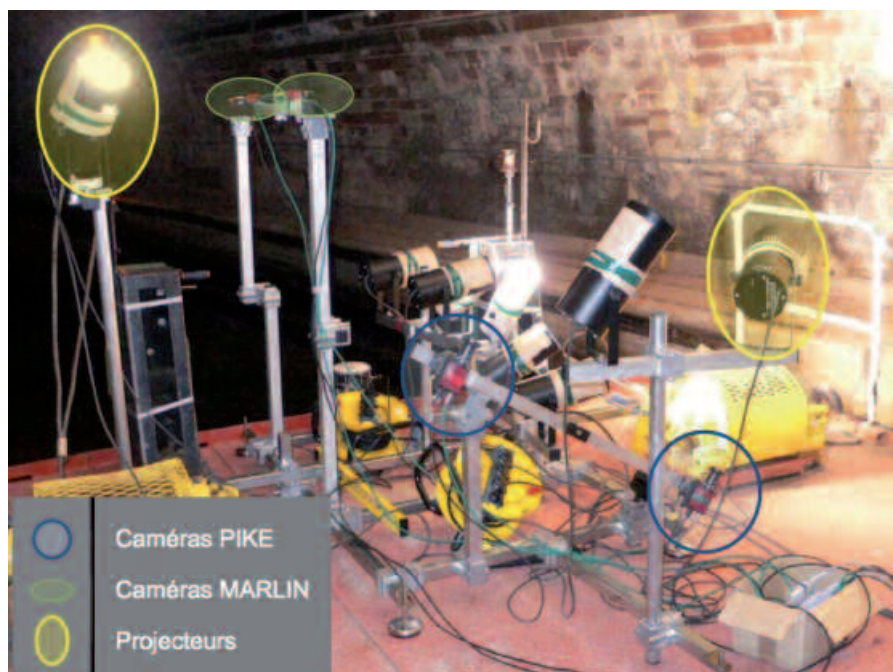


Figure 1. Système d'inspection

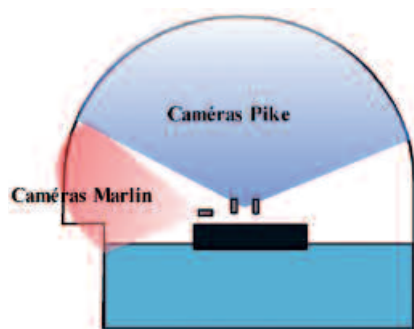


Figure 2. Disposition des caméras



groupe PAGE, ayant permis de positionner de manière précise un certain nombre de cibles de référence tout au long du tunnel par tachéométrie, d'effectuer un suivi tachéométrique de la barge et d'établir un modèle 3D de référence de l'ouvrage par lasergrammétrie. Ce travail a été effectué grâce à la présence d'une banquette dans le tunnel qui a permis de réaliser un cheminement polygonal.

- Données de positionnement issues d'un système de géoréférencement direct utilisant une centrale inertielle associée à un GPS et un capteur DVL (*Doppler Velocity Log*) mesurant le déplacement du bateau par rapport au fond de l'eau. La mise en place de ce système a été effectuée par la société Cadden.

Traitements réalisés

■ Optimisation de la synchronisation des différents capteurs

Dans le cadre d'un système de cartographie mobile, la synchronisation des différents capteurs est primordiale. Les différents traitements et tests réalisés ont permis d'identifier et de corriger les décalages d'horloge qui peuvent entraîner des erreurs systématiques de positionnement de la barge. Dans le cadre de ce projet, une synchronisation parfaite est nécessaire notamment entre les caméras de chaque couple stéréoscopique (Marlin et Pike) pour un traitement par stéréovision. En effet, au moment de l'acquisition d'images, la position et l'orientation de deux caméras homologues l'une par rapport à l'autre doit être celle définie lors du calibrage. Les différents tests effectués

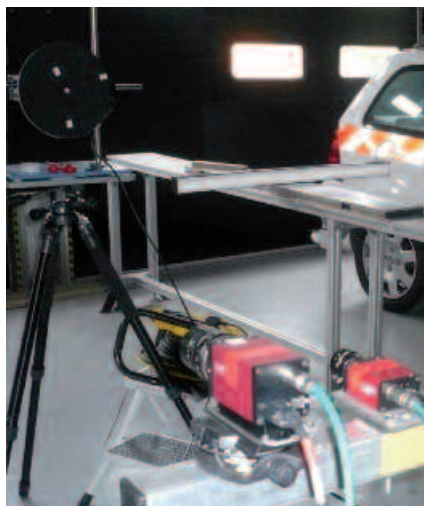


Figure 3. Test de synchronisation des caméras par l'observation d'un disque mis en rotation

confirment que les quatre caméras prennent les photos simultanément. Ces tests reposaient sur l'étude des signaux d'impulsion envoyés aux caméras et de déclenchement de prise de vue et sur l'étude de la position des repères d'un disque mis en rotation. Concernant la synchronisation entre les caméras, le système GPS/CI/DVL et les tachéomètres, celle-ci a été corrigée après traitement des données et évaluation des systématismes de positionnement. Les corrections temporelles ont été déterminées en associant les décalages spatiaux et les vitesses du bateau à des instants précis.

■ Positionnement par suivi tachéométrique

La détermination des positions des centres de perspective des caméras

nécessite plusieurs étapes de traitement. Des tachéomètres placés à l'entrée et à la sortie du tunnel suivent les prismes sur la barge, aboutissant par la suite aux positions du prisme associées aux temps de mesure (figure 4).

Une interpolation permet de rattacher ces positions sur le temps d'acquisition des images. En y associant les décalages spatiaux entre les prismes et les caméras sur la barge, les paramètres de transformation sont calculés et appliqués afin d'obtenir les positions des centres de perspective (figure 5). Deux méthodes ont été utilisées pour déterminer ces décalages : un levé tachéométrique de la barge en position quasi-statique et l'orientation d'images du système d'inspection (photogrammétrie).

Ces relevés sont très importants car une imprécision de positionnement des différents capteurs sur la barge entraîne une erreur systématique dans le géoréférencement des caméras dans le tunnel. Le type de transformation planimétrique est différent pour les deux expérimentations menées car un ou deux prismes ont été utilisés. Dans les deux cas, l'altitude est déterminée séparément de la planimétrie car le nombre de prismes est insuffisant pour appliquer une transformation 3D. Le décalage altimétrique calculé suit donc un axe vertical. L'inconvénient de cette méthode est que les mouvements de roulis et de tangage du bateau ne sont pas pris en compte dans les transformations.



Figure 4. Suivi tachéométrique

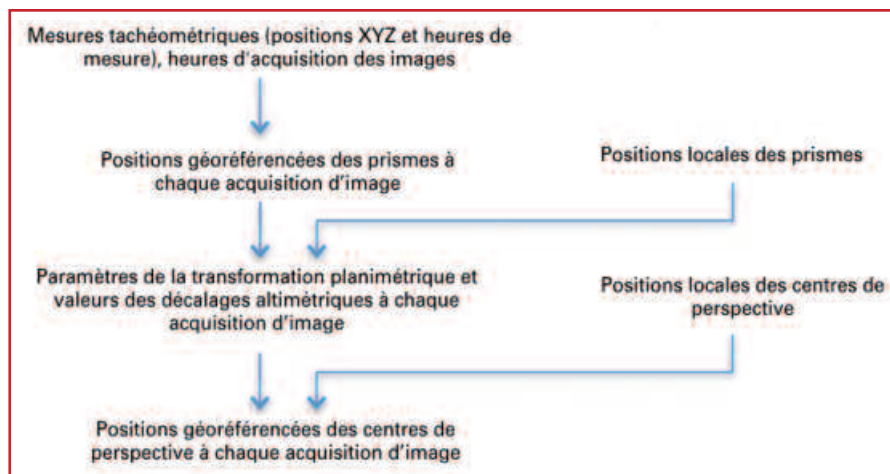


Figure 5. Calcul des positions des caméras par suivi tachéométrique

■ Positionnement par photogrammétrie

L'objectif est de déterminer la position et l'orientation des centres de perspective des caméras à l'aide du logiciel PhotoModeler Scanner (PMS). Le géoréférencement a tout d'abord été effectué en s'appuyant sur des photos prises à des instants différents depuis une caméra latérale en raison de la présence de points d'appui sur les piédroits. Un recouvrement de 75 % a été choisi afin de diminuer le nombre de photos tout en conservant une précision suffisante. Sous PMS, le module "SmartMatch" permet une orientation relative automatique des photos. Néanmoins, ces premiers essais de géoréférencement ont montré une déformation du modèle, malgré un plus fort résidu de 2,1 pixels (environ 6 mm) (figure 6). Ce problème est récurrent concernant les ouvrages linéaires où la fin du modèle est déviée par rapport au début. Ces petites erreurs sur quelques photos deviennent importantes sur l'ensemble du modèle en raison d'un recouvrement qui s'applique d'une photo à l'autre. En raison d'une distance trop faible entre la caméra et le piédroit, aucune photo avec un recouvrement global permettant de rectifier

le modèle ne peut être prise. Afin de quantifier cette courbure, une zone de 100 m a été orientée. Les écarts sur les points d'appui ont révélé que la planimétrie est davantage affectée (écart maximal de 30 cm) que l'altimétrie (écart maximal de 2 cm).

Afin de corriger cette courbure, il est donc nécessaire d'insérer des points d'appui et surtout de les fixer en utilisant le mode "Imported Object". Néanmoins, les valeurs de tolérance sur ces points doivent rester adaptées afin de limiter les contraintes géométriques sur le modèle qui provoquent une instabilité de l'altitude des caméras. Les nombreux tests réalisés sur la bande de photos latérales ont permis de définir une méthode d'orientation et de géoréférencement des centres de perspective des caméras. Dès le départ, le modèle a été défini dans le système de coordonnées Lambert I ou Lambert 93. Il s'est ensuite construit progressivement par l'orientation relative de nouvelles photos et géoréférencé grâce à la présence de points d'appui. L'intégration de photos de la voûte a permis de compléter le modèle et de géoréférencer les caméras Pike.

Un traitement stéréoscopique a également été effectué en utilisant le logiciel

développé en interne. Il s'appuie sur deux images prises au même instant par deux caméras homologues d'un même couple stéréoscopique. Le calibrage de chaque couple stéréoscopique (Marlin et Pike) a permis de déterminer les paramètres d'orientation des deux caméras l'une par rapport à l'autre. A partir de points d'appui visibles sur un couple d'images, les positions des centres de perspective ont été déterminées.

■ Positionnement avec le système GPS/Centrale inertielle/DVL

Lors de l'expérimentation menée le 1^{er} décembre 2011, le dispositif sur le bateau comprenait le système de prises de vues, un récepteur GNSS relié à une base au sol, une centrale inertielle et un capteur DVL. Les décalages spatiaux entre les différents éléments ont été déterminés par levé quasi statique. Le but de cette expérimentation est d'évaluer la précision de positionnement que l'on peut atteindre avec un tel système.

Le GPS ne fonctionnant qu'à l'entrée et à la sortie de tunnel, il s'agit notamment d'estimer la dérive de la centrale inertielle. C'est pourquoi le suivi tachéométrique d'un prisme placé sur la barge a été réalisé. Dans un premier temps, la trajectoire de la CI a été calculée à partir des positions du prisme au cours du trajet. Elle peut ensuite être comparée à celle calculée par la société Cadden, obtenue à partir des mesures de la CI. Dans un second temps, en fusionnant toutes ces données, une méthode de calcul des positions des centres de perspective est étudiée.

Résultats atteints

■ Photogrammétrie

La capacité mémoire de PMS étant limitée, la décomposition en de nombreux sous-modèles a dû être effectuée. Par exemple, le tunnel a été décomposé en 9 modèles associant une caméra Marlin à une caméra Pike. Cela pose donc problème pour la continuité du modèle global. Les points homologues sont détectés automatiquement par le descripteur SIFT

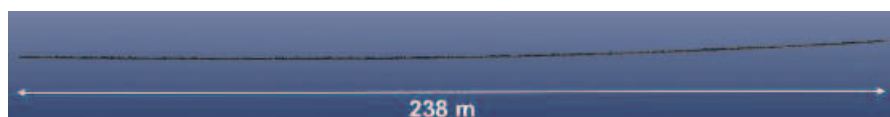


Figure 6. Problème de déformation du modèle : vue de dessus d'une partie du tunnel après l'orientation relative et la mise à l'échelle

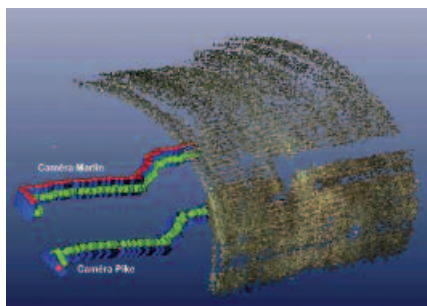


Figure 7. Extrait du modèle photogrammétrique



(figure 7) mais cette détection n'est pas toujours facile. On remarque notamment des zones sans point homologue entre les deux bandes, s'expliquant par un faible recouvrement inter-bandes (25 %). Une saisie manuelle de points est nécessaire afin d'éviter que la bande Pike diverge par rapport à la bande Marlin géoréférencée : on peut donc qualifier cette méthode de semi-automatique. Cette intervention manuelle est beaucoup moins fréquente lorsque l'on traite uniquement les images latérales.

La détermination des centres de perspective à partir des couples stéréoscopiques a été rendue plus difficile. Un décalage d'environ 4 pixels entre la ligne épipolaire et la position du point sur l'image a été constaté. Une modification des paramètres des caméras entre le calibrage et l'expérimentation dans le tunnel est à l'origine de ce problème. Cela concernait plus particulièrement les positions et orientations des deux caméras l'une par rapport à l'autre, modifiées probablement lors du transport sur le lieu de l'expérimentation. Un des inconvénients de cette technique réside donc dans la difficulté de réaliser un calibrage et d'éviter les mouvements de caméra lors du transport de celle-ci. Une des pistes d'amélioration envisagée est d'effectuer un

calibrage *in situ*. La mise en place d'un tel dispositif peut cependant s'avérer complexe.

■ Comparaison tachéométrie/ PhotoModeler Scanner

Les premiers résultats sur les positions des caméras Marlin ont montré que les écarts planimétriques étaient assez importants. Ces écarts (maximum de 52 cm), de même direction que l'avancement du bateau et variant en fonction de la vitesse du bateau, peuvent donc être traduits en erreur temporelle systématique, représentant le décalage d'horloge entre l'ordinateur gérant les caméras et les tachéomètres.

La correction de ce décalage nous permet d'obtenir des écarts plus faibles (entre 0 et 5 cm), dont les valeurs et les directions sont variables. En altimétrie, on constate une grande instabilité de la méthode sous PMS par rapport à la tachéométrie (figure 8). En effet, en photogrammétrie, la présence de points d'appui entraîne des contraintes géométriques importantes sur le modèle qui provoquent une imprécision altimétrique (variations d'environ 15 cm sur l'ensemble de la traversée du tunnel). Ces points sont néanmoins nécessaires afin de limiter la courbure du modèle en planimétrie.

■ Système GNSS/Centrale inertielle/DVL

Les résultats ont permis d'évaluer la dérive de la centrale inertielle. En raison de l'impossibilité d'utiliser le GPS, cette dérive est inévitable. Elle est moins forte en planimétrie (environ 1 m entre l'entrée et la sortie du tunnel) qu'en altimétrie (environ 2 m). L'utilisation du capteur DVL, mesurant la vitesse du bateau par rapport au fond de l'eau, explique probablement ces meilleurs

résultats en planimétrie. Néanmoins, en cas de dérive constante, il est possible de recalibrer la trajectoire de la caméra obtenue à partir de mesures inertielles grâce à l'intervention d'autres techniques comme la photogrammétrie ou la tachéométrie. Pour ce recalage, nous sommes cependant en présence de deux inconnues : la dérive de la centrale inertielle et le décalage d'horloge du système GNSS/CI/DVL avec les autres appareils.

Afin de contourner ce problème, le recalage de la trajectoire s'est basé sur une zone d'arrêt du bateau et plus particulièrement sur la position imd.560 de la caméra obtenue par PhotoModeler Scanner (figure 9). Une translation de la trajectoire a tout d'abord été effectuée sur ce point. Ensuite, l'utilisation des autres points de recalage a permis de faire tendre la dérive en X et Y vers 0, grâce à une rotation et une mise à l'échelle de la trajectoire de la caméra.

Les zones à dérive constante sont intéressantes car elles ne nécessitent pas d'aide extérieure. Par exemple, sur une zone de 470 mètres, le système CI/DVL aurait pu fonctionner de manière autonome, avec simplement un recalage aux extrémités de la zone. Sur environ 500 m, cinq points de recalage auront été nécessaires en planimétrie et trois points en altimétrie.

Après le recalage, la précision de positionnement sur les caméras est comparable aux autres techniques (écarts d'environ 8 cm en planimétrie et 8 cm en altimétrie). De plus, à l'approche du tunnel, le GPS en mode RTK, permettant une précision de positionnement centimétrique, était rarement disponible en raison de l'encaissement de la zone. Le GPS en mode naturel était alors employé, expliquant ainsi les

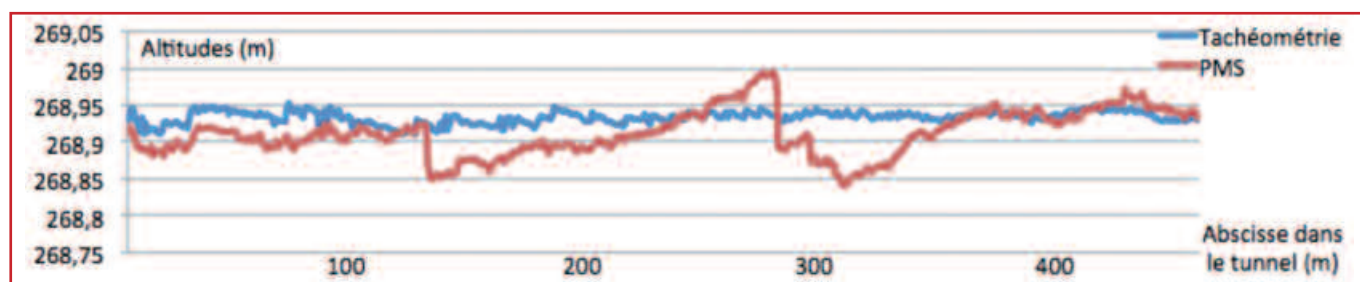


Figure 8. Altitudes par méthodes photogrammétrique (PMS) et tachéométrique

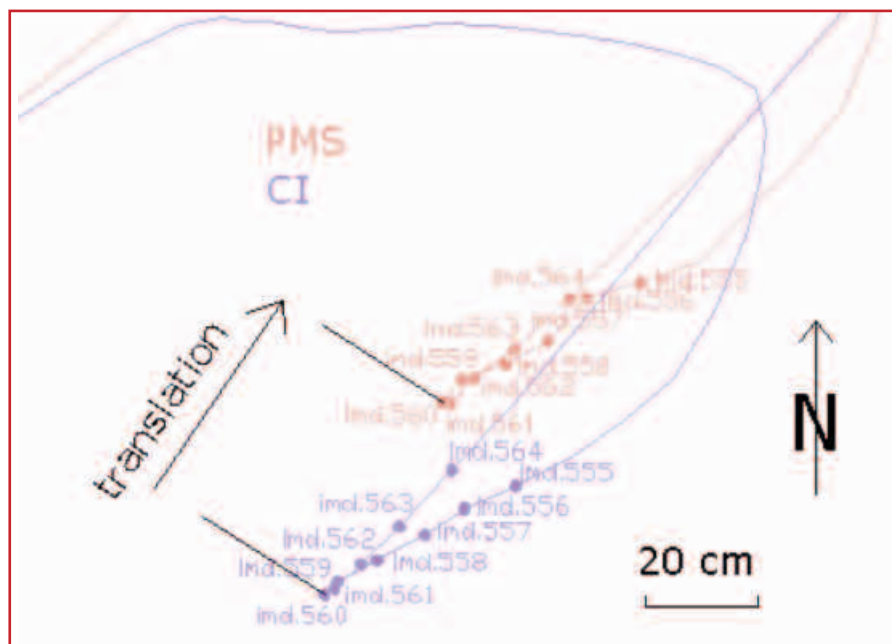


Figure 9. Recalage de la trajectoire de la caméra (obtenue par mesures inertielles) sur le point imd.560 de la trajectoire obtenue par PhotoModeler Scanner

écarts importants avec les autres méthodes à l'approche du tunnel.

Conclusion et perspectives

Ce projet a permis d'évaluer la précision que l'on peut atteindre pour le repérage d'un système d'inspection dans un tunnel-canal. Les différents traitements effectués et résultats obtenus nous montrent que la synchronisation temporelle entre les différents instruments doit être optimale dans le cadre d'un système de cartographie mobile. Les erreurs de positionnement sont principalement dues à ces décalages d'horloge. Sachant que le bateau avance à 1 m/s, un décalage d'une milliseconde entraîne une erreur de positionnement d'un millimètre. Il sera donc intéressant à l'avenir de synchroniser tous les instruments sur une base de temps commune, sachant qu'il est difficile d'obtenir un décalage d'horloge inférieur à 0,5 s pour des appareils se basant chacun sur leur propre horloge.

La constitution du modèle photogramétrique est une méthode qui permet de s'affranchir de ces décalages. Néanmoins, elle demande beaucoup de temps dans le levé des points d'appui ainsi que dans le traitement et l'orientation des photos, même si la détection automatique de points homo-

logues facilite cette tâche. Les points d'appui doivent être en nombre suffisant (tous les 10 m environ) afin d'éviter une dérive du modèle. La tachéométrie est une méthode sûre mais pénalisée par les décalages d'horloge que les appareils peuvent avoir avec le système de prises de vues et par une portée limitée qui rend son application difficile pour les tunnels longs, courbés et sans banquette (la mise en place de consoles dans le tunnel peut être une solution).

Le système CI/GNSS/DVL a donc été testé. Cette expérimentation nous montre la nécessité d'associer ce système aux autres méthodes. Un recalage de la trajectoire a en effet permis d'obtenir une bonne précision de positionnement.

A l'issue de cette étude, nous pouvons en conclure qu'aucune méthode en fonctionnement autonome ne permettra d'obtenir le repérage du système d'inspection de manière précise et efficace. La fusion de ces méthodes s'impose alors en exploitant les avantages de chacune.

A ce stade du projet, les méthodes ont été comparées les unes aux autres. Chaque méthode générant des erreurs, la précision du positionnement de la caméra n'a été déterminée qu'en valeur relative. Afin d'évaluer cette précision

en valeur absolue, un contrôle devra s'effectuer à partir de références indépendantes telles que les points de référence situés sur le piédroit. Cela nécessite donc de connaître les six éléments d'orientation externe de la caméra, afin qu'un point situé sur au moins deux photos puisse être connu en XYZ dans le système de coordonnées terrain. A l'avenir, il sera donc nécessaire de compléter les positions XYZ obtenues lors de cette étude par les trois angles d'orientation ω , φ et κ (seul PMS a permis cette détermination). ●

Contact

Antoine GUITTET
guittet@atgt.fr

ABSTRACT

Key words: photogrammetry, tacheometry, INS, GPS, mobile mapping, tunnel

French Waterways Services expressed the need for a high-performance tool to analyse by the picture, the state of the masonry of the canal-tunnels. The Civil engineering works Group and the Associate Research Team of the Eastern Centre of Technical Studies on Equipment have therefore proposed to adapt their knowledge for road imaging to canal-tunnel. The study is in the phase of implementation of an automatic acquisition system in order to provide a detailed and georeferenced mapping of the tunnel. The experimental tunnel, 475 m long, is located between Niderviller and Arzviller in France (57). The project objective is to develop a method for positioning the barge in the tunnel and more precisely the cameras centers (trajectography). For this project, several methods are tested: tacheometry, photogrammetry, GPS / inertial unit. Trajectories obtained by the different methods in these tests are compared, and the errors (including the inertial drift) are estimated. It is therefore necessary to study the feasibility of the different systems according to several criteria: accuracy, ease and speed of implementation, efficiency and automation of data processing.