

Développement d'une procédure d'amélioration du calcul de trajectographie d'un système de cartographie dynamique

■ Katia MIRANDE

L'entreprise GEOFIT dispose d'une chaîne de traitement efficace pour traiter les données issues de levés effectués grâce à un système de cartographie dynamique. Néanmoins, les trajectoires calculées à partir des informations fournies par la centrale inertielle et le système GNSS embarqués sont parfois inexactes et entraînent un décalage entre le nuage de points généré et la réalité. Afin de mener à bien les expérimentations ayant pour objectif de trouver des éléments d'amélioration du calcul de trajectoire, une procédure de tests a été mise en place. Une méthode de création de trajectoires de références a été définie, cette dernière permet de générer une trajectoire à partir des points de contrôles disponibles sur les sessions de mesures d'intérêt. Des trajectoires ont ensuite été générées et comparées à cette trajectoire de référence. Des paramètres de calculs permettant d'améliorer les trajectoires ont été découverts. De plus, un programme sous Matlab a été créé pour permettre d'optimiser certaines étapes du traitement. La chaîne de traitement a donc été améliorée en termes de vitesse et de résultats.

■ **MOTS-CLÉS**
cartographie dynamique, trajectoire, ambiguïté de phase, navigation

de points obtenu présente des décalages par rapport à la réalité ou ne soit pas cohérent entre plusieurs passages. Ces dossiers nécessitent alors plus de temps humain et de temps sur le terrain (acquisition de données complémentaires) pour l'obtention de données satisfaisantes.

Le bon déroulement d'une mission de cartographie dynamique dépend d'un nombre important d'étapes présentées en figure 1. L'acquisition et le traitement des données sont entièrement réalisés par GEOFIT.

Ce projet se focalise uniquement sur les éléments permettant d'améliorer le calcul de la trajectoire du système d'acquisition lors d'une mission. En effet, le géoréférencement du nuage de points obtenu lors de l'acquisition dépend du bon calcul de la trajectoire adoptée pendant la mission. Il serait

Contexte et objectifs de l'étude

L'entreprise GEOFIT, anciennement FIT ESIC, propose, depuis maintenant plus de 5 ans, la réalisation de relevés à haut rendement par cartographie dynamique. Cette technologie présente la possibilité d'acquérir une quantité très importante de données et constitue donc un réel atout lorsqu'il s'agit de répondre aux besoins des clients.

Néanmoins, le traitement d'une telle quantité de données n'est pas aisé car il peut devenir particulièrement chronophage. Il est donc nécessaire de disposer d'une chaîne de traitements qui soit optimale en matière de temps passé et menant à des données exploitables, c'est-à-dire un nuage de points géoréférencé le plus précisément possible. La chaîne de traitement mise en place chez GEOFIT permet d'ores et déjà d'obtenir un résultat

répondant aux demandes des clients. Malheureusement, il peut arriver que certains dossiers présentent des difficultés supplémentaires et que le nuage

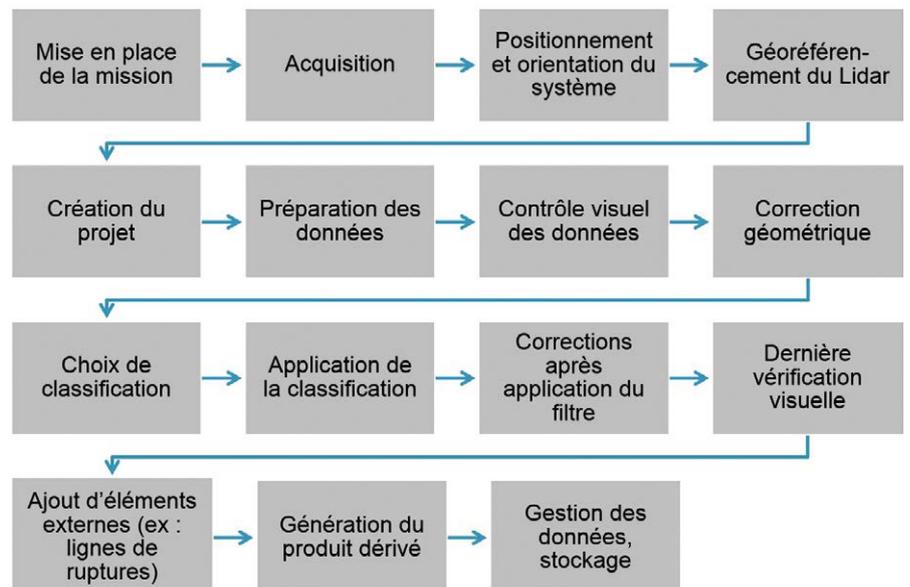


Figure 1. Étapes classiques d'une mission de cartographie dynamique (traduit de Graham (2010)).

ainsi possible de diminuer le traitement effectué à même le nuage de points dans la suite.

Positionnement et orientation du système

Le système de positionnement

Nous nous sommes intéressés ici aux systèmes d'acquisition mobile embarqués sur véhicules. Un système d'acquisition mobile est constitué de deux grands ensembles d'éléments :

- Un système de positionnement ou POS (*Position and Orientation System*) : ce système est composé d'un récepteur GNSS, d'une centrale inertielle ou IMU (*Inertial Measurement Unit*) et d'un système de mesure de distance.
- Un ou plusieurs systèmes d'acquisition de données : il peut s'agir d'un LiDAR et d'une caméra par exemple.

L'emplacement relatif des différents composants d'un système mobile doit être connu de façon précise pour que le géoréférencement des données acquises soit possible. Ces distances entre les différents éléments sont désignées comme étant des bras de levier. La *figure 2* présente les bras de levier présents dans un système d'acquisition mobile embarqué sur un véhicule terrestre. Le vecteur position que l'on souhaite déterminer est le vecteur \mathbf{r}_P^m . Il s'agit du vecteur de coordonnées de P dans le système de coordonnées de la commande (exprimable en mètres). Un certain nombre de vecteurs sont déterminés par la calibration du système. L'ensemble du système est positionné dans un repère défini par la centrale inertielle. L'ensemble des informations nécessaires est ramené dans un référentiel absolu par le biais du récepteur GNSS.

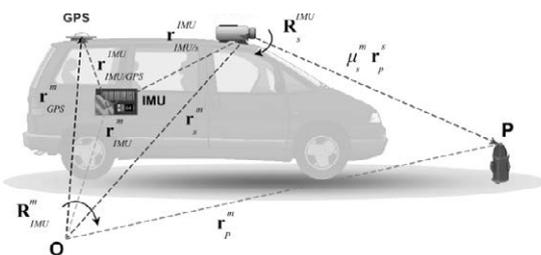


Figure 2. Les différents bras de levier présents dans un système d'acquisition mobile (Graham, (2010)).

Le couplage des données

On a pu noter que le système de positionnement était constitué d'un récepteur GNSS et d'une centrale inertielle. Les données issues de ces deux systèmes sont couplées. Ce couplage de la centrale inertielle avec le GNSS permet de combiner les avantages des deux systèmes. D'une part, on obtient une position absolue, de précision indépendante du temps par le système GNSS. D'autre part, on obtient une acquisition à haute fréquence, autonome et indépendante, grâce à la centrale inertielle. Le couplage permet d'obtenir une trajectoire disposant de points à la même fréquence que la centrale inertielle, sans le défaut de dérive en précision dans le temps de celle-ci. Plusieurs stratégies de couplage entre les deux systèmes de positionnement existent. On en distingue deux principales :

- Le couplage lâche (*figure 3*) : le système GNSS calcule à partir de ses propres données (pseudo-distances et mesures de vitesse Doppler) et fournit une position et une vitesse. Parallèlement, les données de la centrale inertielle sont calculées (accélérations et attitude) et nous donnent une position et une vitesse. Les deux solutions de positionnement sont donc calculées séparément puis comparées. La solution issue des mesures de la centrale inertielle est alors corrigée grâce à la solution GNSS. Cette solution de couplage présente l'intérêt de rester relativement simple. Dans ce couplage, la solution GNSS a été calculée, par conséquent, les erreurs de mesures accidentelles ont pu être filtrées en partie.
- Le couplage serré : le couplage est appliqué directement aux mesures

brutes et non pas aux solutions issues des deux systèmes de calcul respectifs. On considère les pseudo-distances et les pseudo-vitesses extraites en amont par le récepteur GNSS. Les mesures de la centrale inertielle sont utilisées pour estimer les mesures brutes acquises par GNSS. Les mesures GNSS ainsi que les mesures de la centrale inertielle sont corrigées lors de ce couplage.

Le couplage serré est considéré comme meilleur dans des environnements urbains puisqu'il ne nécessite la présence que de 4 satellites pour corriger les mesures de la centrale inertielle quand le couplage lâche en demande au minimum 7. Néanmoins, les mesures inertielles seront corrigées grâce aux mesures GNSS. Le couplage serré pose donc problème lorsque des erreurs grossières sont présentes dans ces mesures GNSS. Le couplage lâche présente l'avantage de considérer la solution GNSS déjà calculée et donc exemptée d'erreurs grossières. C'est ce couplage qui est utilisé dans la chaîne de traitement étudiée.

La création d'une référence

Avant d'effectuer tout test ou toute tentative d'amélioration du calcul de trajectoire, la question de l'évaluation de cette dernière se pose.

En effet, les décalages ou erreurs dus à la trajectoire sont très simplement visibles dans le nuage de points généré. Malheureusement, la génération du nuage de points est une étape chronophage et limiterait le nombre de tests possibles. De plus, la détection des erreurs dans le nuage de points doit

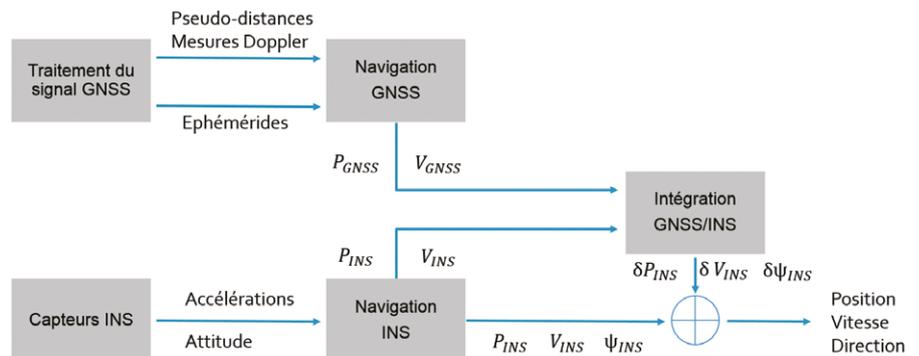


Figure 3. L'intégration des données de la centrale inertielle et des données GNSS, lâche. (traduit et réalisé à partir de Spangenberg (2009)).

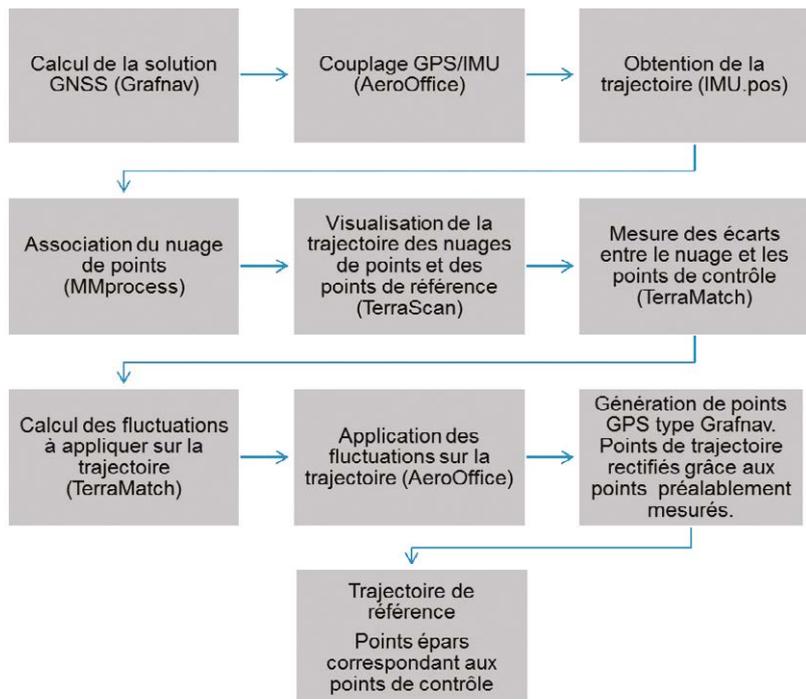


Figure 4. Étapes nécessaires à la réalisation d'une trajectoire de référence constituée de positions éparses.

par la suite se faire de façon manuelle, en mesurant les écarts constatés entre plusieurs passages du système d'acquisition dans la même rue ou zone. Il est donc nécessaire de pouvoir évaluer une trajectoire sans générer le nuage de points LiDAR associé.

Certes, il est possible de juger d'une trajectoire de façon relative par rapport à plusieurs passages du système d'acquisition sur la même zone. Néanmoins, une évaluation par rapport à une référence extérieure est préférable et ne serait pas corrélée, or certains projets de cartographie dynamique se trouvent complétés des acquisitions par méthode traditionnelle (tachéomètre...). Ces points servent alors de points de contrôles ou de compléments. Dans le cadre de ce projet, ces points vont être exploités pour permettre l'obtention de points de référence. Cependant, une question se pose : comment exploiter ces points directement après la génération de la trajectoire ?

■ Méthode

Un procédé, illustré en *figure 4*, a été développé pour permettre d'utiliser ces points de contrôle directement après le couplage de la solution GNSS avec la centrale inertielle. Ce procédé démarre par l'utilisation des mêmes étapes que la chaîne de traitement et

utilise les logiciels présents dans la chaîne de traitement. Dans un premier temps, il s'agit de calculer la trajectoire d'une session de mesure et de géoréférencer le nuage de points associé. On visualise ensuite la trajectoire avec le nuage de points. Il est alors possible de mesurer des écarts entre le nuage et les points de contrôle. Ces écarts vont être convertis en "fluctuations". On obtient la rectification à appliquer à la trajectoire à un instant précis pour que celle-ci génère un nuage de points cohérent avec l'emplacement du point de contrôle mesuré. Ces fluctuations sont appliquées à la trajectoire et permettent l'obtention de points épars correspondant à une trajectoire de référence en adéquation avec les points de contrôle.

■ Résultat

La *figure 5* permet de visualiser des points de référence créés à partir d'un point de contrôle. Le point de contrôle est représenté en bleu clair. Il peut être considéré comme un contrôle vertical car la chaussée ne présente pas d'irrégularités à cet emplacement. Mais il peut également être un contrôle horizontal puisqu'il est associé au coin d'une bande du passage clouté. La trajectoire adoptée par le véhicule est représentée en vert. Deux points sont

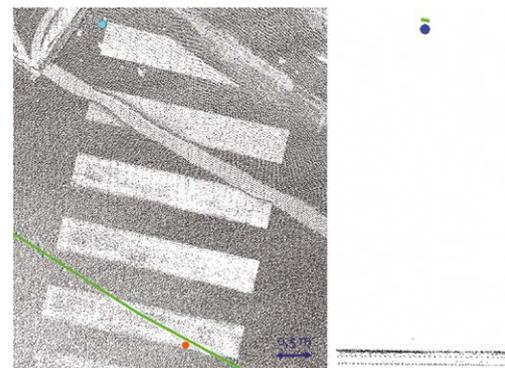


Figure 5. Vue de dessus et en coupe d'un nuage de points, de la trajectoire et des références.

générés grâce au processus décrit précédemment. Le point de couleur orange est le point de référence en planimétrie généré. Il s'agit de l'emplacement que devrait emprunter la trajectoire pour que le nuage de points soit géoréférencé de façon à ce que le point de contrôle (bleu) se trouve parfaitement à l'angle de la bande blanche. De la même façon, on obtient une référence verticale représentée par le point de couleur bleue sur la vue en coupe.

■ Exploitation

Un script Matlab permet, par la suite, d'exploiter cette trajectoire. La trajectoire créée est une suite de positions dont la fréquence dépend entièrement de la quantité de points GNSS disponibles pour la session de mesure associée. Cette trajectoire de référence doit être comparée à la trajectoire obtenue après couplage avec la centrale inertielle. Dans le cas présent, la trajectoire est donnée avec une fréquence très élevée. L'acquisition GNSS est effectuée avec une fréquence de 2 Hz mais est couplée avec la centrale inertielle qui effectue son acquisition à une fréquence de 500 Hz, soit 0.002 seconde entre deux positions adoptées lors de l'acquisition. Une interpolation a donc été effectuée mais cette dernière n'impacte pas les résultats puisqu'elle est minimale. Cette interpolation étant systématiquement effectuée sur un intervalle de temps inférieur à 0.002 seconde (temps entre deux mesures de la centrale inertielle), l'erreur due à cette interpolation ne peut excéder, à 100 km/h, 5 centimètres. De plus, nous sommes plus souvent amenés à travailler sur des missions en milieu urbain (plus susceptibles de contenir



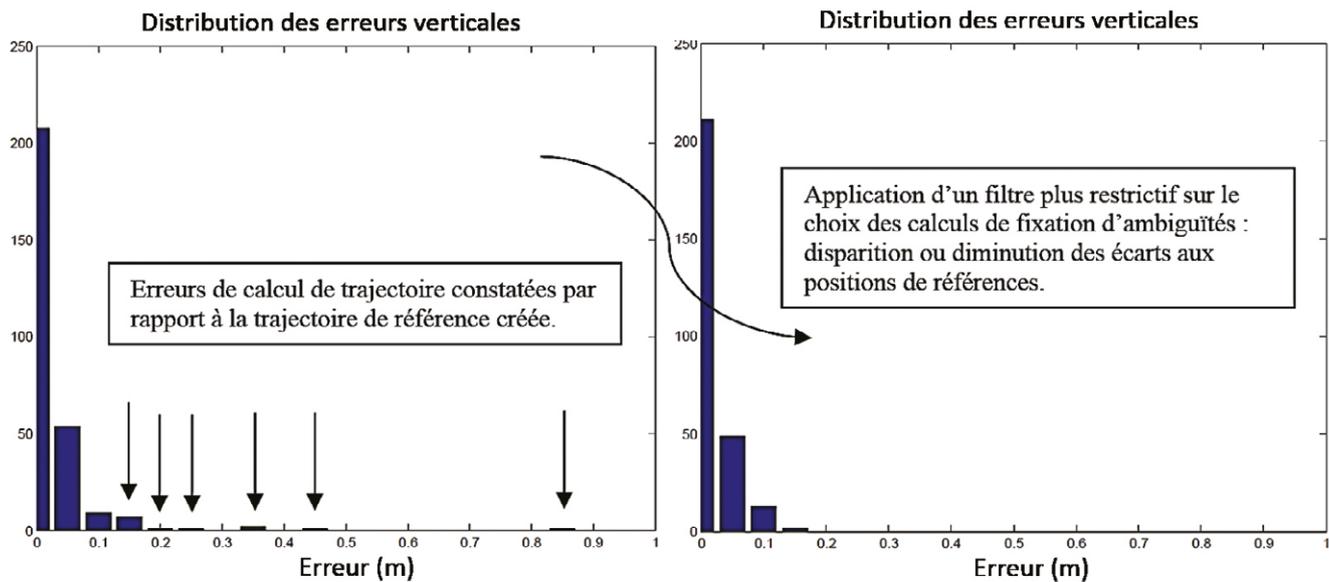


Figure 6. Histogrammes représentant les écarts aux positions de référence par rapport aux trajectoires testées. À gauche, la trajectoire est calculée selon la méthode originelle de traitement. À droite, la trajectoire a été calculée en filtrant un certain nombre de fixations d'ambiguïtés erronées.



des erreurs), entre 30 et 50 km/h de vitesse de déplacement du système d'acquisition.

Une chaîne de tests a donc été mise en place de façon à pouvoir évaluer une trajectoire par rapport à une référence indépendante. Néanmoins, il est impossible avec cette méthode d'évaluer la solution GNSS avant couplage par rapport à la trajectoire de référence. En effet, l'interpolation devrait alors être effectuée sur une période de temps trop importante, l'erreur due à celle-ci serait bien trop conséquente.

Amélioration de la solution GNSS

■ Ajout d'une étape

Le logiciel de traitement GNSS (GraphNav) de la chaîne de traitement propose un nombre important de graphiques permettant d'analyser les calculs et les données à disposition. Parmi tous les graphiques qui n'étaient pas utilisés dans la chaîne de traitement initiale, nous sommes parvenus à prouver l'intérêt de certains. Nous avons exploité un graphique présentant les différences de position planimétriques et de hauteur entre deux solutions GNSS produites. Il s'agit par défaut d'une différence entre un calcul aller et un calcul retour. Ce graphique permet notamment d'évaluer la qualité des fixations d'ambiguïtés sur les deux

solutions GNSS (aller et retour) calculées. Or, les parties de ce graphique qui présentent de fortes différences sur un temps important, constituant visuellement ce que l'on peut appeler un "plateau", engendrent généralement des erreurs dans le nuage de points généré. Ce graphique permettant de repérer les fixations d'ambiguïté provoquant ces fortes différences, la suite du projet s'est donc focalisée sur la recherche d'options afin de supprimer ces mauvaises fixations d'ambiguïtés.

■ Filtre et résultats

Les tests se sont portés sur les paramètres de calcul de fixation de phase, plus particulièrement sur les conditions de conservation de ces solutions. Les options manipulées lors de cette étape doivent rester compréhensibles et les seuils doivent pouvoir être simplement déterminés grâce au graphique précédent. Afin de représenter l'évolution des écarts de la trajectoire calculée à la trajectoire de référence à l'échelle de toute une session de mesure, ces décalages sont présentés sous forme d'histogrammes.

La figure 6 présente la diminution des écarts de plus de 10 centimètres grâce à l'application d'un filtre plus restrictif. Les histogrammes sont similaires. Cela n'est pas étonnant, la chaîne de traitement a déjà fait ses preuves. Néanmoins, il est bon de rappeler que la trajectoire évaluée est comparée à une

trajectoire de référence plus éparse. Par conséquent, un seul écart sur cet histogramme peut représenter des écarts sur plusieurs mètres d'acquisition. Le bénéfice obtenu n'est pas négligeable. Néanmoins, on note que l'utilisation d'un filtre trop restrictif détériore les résultats dans le cas où le signal GNSS n'est pas de bonne qualité et donc, lorsque la quantité de calculs de fixation d'ambiguïté est limitée. Le filtre appliqué et sa valeur restent donc entièrement dépendants de la session de mesure traitée.

Amélioration du couplage

■ Etude du calcul

L'opération du couplage des données GNSS et de la centrale inertielle est une opération sur laquelle l'utilisateur a un nombre de possibilités d'intervention réduites dans cette chaîne de traitement. C'est pourquoi un certain nombre de tests ont été réalisés dans le but de mieux comprendre cette étape de l'obtention d'une trajectoire mais également de l'optimiser au mieux.

■ Absence de données GNSS

La solution GNSS fournit une position toutes les 0.5 secondes, mais nous avons étudié le cas où la solution GNSS serait absente sur une durée plus importante pour observer les écarts induits par la centrale inertielle. Les tests ont été réalisés dans un cas idéal, celui d'un levé linéaire d'autoroute. Ce cas



Figure 7. Écart en planimétrie constatés entre la trajectoire initialement calculée et la trajectoire disposant d'importantes zones sans données GNSS.

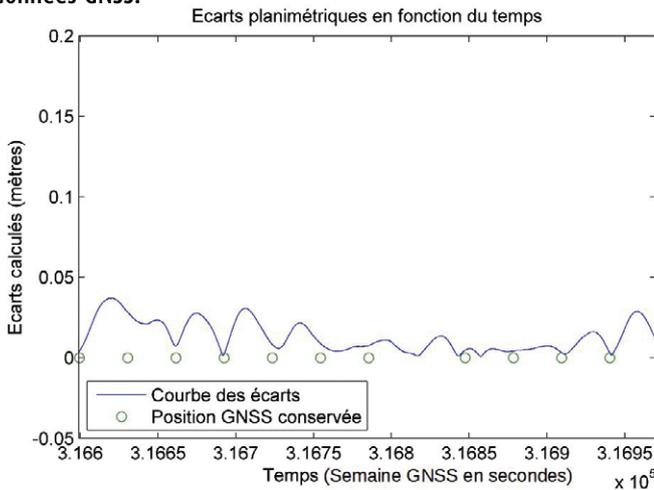


Figure 7.1. Absence de points GNSS d'une durée de 30 secondes.

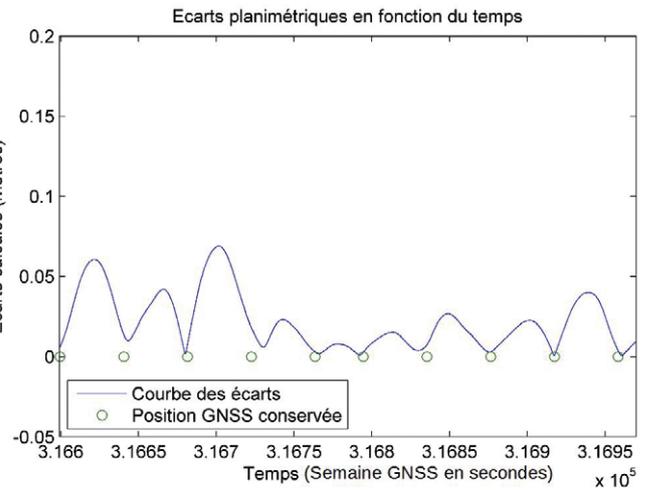


Figure 7.2. Absence de points GNSS d'une durée de 40 secondes.

présente l'avantage de fournir le plus souvent une excellente solution GNSS et une dérive de la centrale inertielle moindre puisque le système n'effectue aucun virage pouvant altérer les mesures. Grâce à ce choix de données, la trajectoire de référence est donc la trajectoire calculée à l'origine puisque cette dernière fournit déjà des résultats exploitables et en adéquation avec les points de contrôle. Les graphiques de la *figure 7* présentent donc la comparaison de la trajectoire de référence avec la trajectoire dont on a supprimé des parties de solution GNSS. Ces graphiques permettent de bien observer l'initialisation de la centrale inertielle sur les points GNSS. En effet, les écarts tendent vers 0 aux temps auxquels les positions GNSS sont renseignées. Les écarts augmentent, comme prévu, avec la durée d'absence de points GNSS. Néanmoins, il n'est pas possible d'observer un systématisme dans les biais observés et induits par la centrale inertielle. On constate donc que dans des conditions idéales (excellent GNSS et trajet linéaire), il faudra une absence de plus de 40 secondes pour que l'erreur sur la trajectoire dépasse 5 centimètres.

■ Seuil de cohérence

Lors du couplage, il est possible de définir un seuil pour lequel les positions de la solution GNSS ne seront pas prises en compte. Ce seuil est défini à partir d'un graphique fourni par le logiciel de couplage, présentant la différence entre la prédiction de la position obtenue

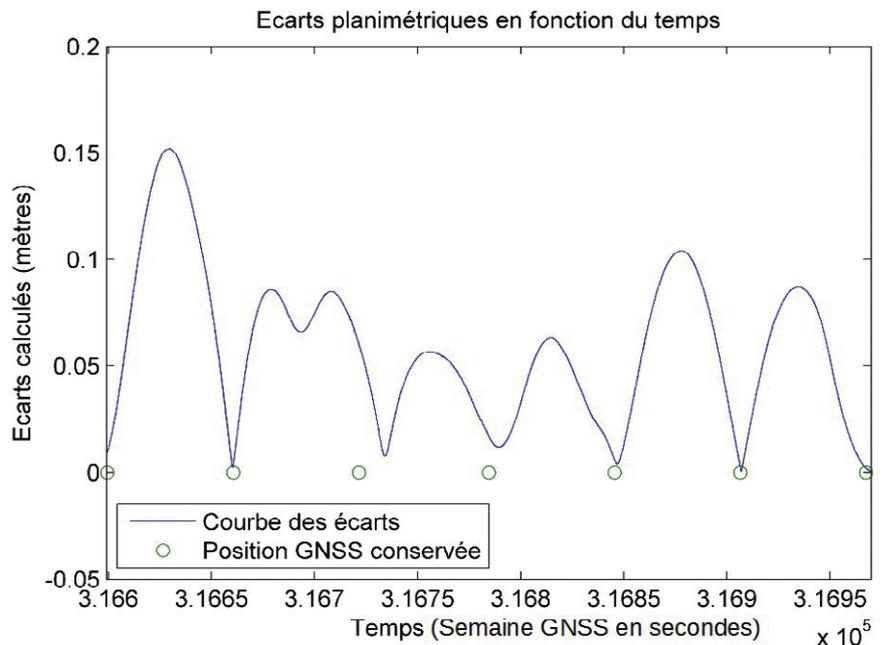


Figure 7.3. Absence de points GNSS d'une durée de 60 secondes.

nue avec la centrale inertielle et la position GNSS donnée pour chaque mesure GNSS. Ce graphique est généré uniquement à partir d'un calcul "aller". Il ne reflète en aucun cas les corrections qui seront appliquées lors du couplage. Des tests ont été réalisés pour constater l'amélioration ou la détérioration de la trajectoire selon la sévérité du seuil. Finalement, le seuil jusqu'à maintenant utilisé a été conservé. L'utilisation d'un seuil plus sévère demanderait une analyse plus fine du graphique précédent pour limiter des absences de solution GNSS trop importantes dans le calcul.

Automatisation d'une partie du traitement

Lors du couplage de la solution GNSS avec la centrale inertielle sous le logiciel AeroOffice, l'utilisateur est amené à préciser certains éléments. L'utilisateur précise notamment quelles sont les zones de non-déplacement du système d'acquisition, les "ZUPT" (*Zero Velocity Updates*) et également les zones disposant d'un signal GNSS qu'il vaut mieux ne pas prendre en compte dans le couplage, les zones "No GNSS". Dans ce cas, seules les informations de position fournies par la centrale inertielle





Figure 8. Interface graphique du programme réalisé sous Matlab.



sont utilisées pour déterminer la trajectoire. Les "ZUPT" sont déterminées à partir d'un graphique donnant la vitesse en fonction du temps d'acquisition. Ce graphique est obtenu à partir de la solution GNSS précédemment calculée. Les zones "No GNSS" sont déterminées grâce à un graphique représentant les écarts entre une estimation de la solution proposée par la centrale inertielle et la solution proposée grâce aux observations GNSS en fonction du temps. Si ces écarts dépassent un certain seuil, la solution GNSS n'est pas prise en compte. La détermination de ces zones est particulièrement chronophage. En effet, il est nécessaire de faire défiler en longueur chacun des deux graphiques de contrôle et d'ajuster sa fenêtre de vue à la zone que l'on veut signaler. Cela demande d'agrandir et de diminuer sans cesse les échelles du graphique.

Après avoir découvert qu'il était possible d'exporter ces graphiques d'analyse sous la forme d'un fichier texte, il a été possible de créer un script Matlab permettant la détermination de ces zones et de les réimporter directement dans le logiciel en modifiant directement le fichier de travail d'AeroOffice qui est un fichier texte. Une interface graphique, présentée en *figure 8*, a été réalisée pour plus de confort pour l'utilisateur. Les paramètres de sélection des zones peuvent être modifiés. Des sécurités ont été mises en place. L'utilisateur est obligé de déterminer les zones dans le bon ordre de traitement (sinon les boutons restent grisés). Si le fichier de travail AeroOffice contient déjà des zones, l'utilisateur ne peut pas poursuivre et reçoit un message l'invitant à les supprimer ou à les conserver. Le programme s'inscrit dans la même

logique de traitement que la chaîne de traitement initiale. C'est l'analyse des graphiques qui est ici automatisée.

Le gain de temps est important puisque la détermination de ces zones, dans le cas où elles ne demandent pas d'analyse particulière, varie selon les sessions de mesures de 20 à 40 minutes, voire même une heure pour des sessions très longues. Ce programme permet de limiter l'opération à 5 minutes. Il est ensuite possible de se consacrer à l'analyse et à l'amélioration des zones sans GNSS qui demandent un traitement plus approfondi.

Conclusion

Ce projet a permis l'amélioration de la solution GNSS obtenue par l'ajout d'un traitement et de l'étude d'un graphique supplémentaire. Les erreurs dues à une mauvaise fixation d'ambiguïté sont à présent prises en compte dans cette chaîne de traitement et autant que possible, éliminées. Lors du couplage avec les données de la centrale inertielle, l'utilisateur dispose d'une meilleure compréhension du processus grâce aux travaux préliminaires, mais également de plus de temps d'analyse. En effet, une partie de ce traitement ayant été automatisé, du temps est libéré pour effectuer des analyses plus fines. On élimine également les erreurs dues à l'opérateur lors de ce traitement.

Enfin, on notera que l'ensemble des traitements effectués sont appliqués de façon globale à l'ensemble d'une session de mesure. Or, lors d'une même session de mesure, l'environnement peut être très différent et donc les données du système d'acquisition vont être de qualité variable. On peut, par exemple, effectuer une partie de la session dans une zone très dégagée et linéaire puis la poursuivre dans une ville dense en effectuant de nombreux virages. Il pourrait donc être intéressant de segmenter la session de mesure afin d'appliquer des paramètres de calcul différents selon la nature de ces zones. ●

NDLR : Le PFE chez GEOFIT étant confidentiel, certains détails ne sont pas cités dans l'article.

Contacts

Katia MIRANDE
katia.mirande@laposte.net
Directeur de PFE : Valentin Poitevin
Correcteur : Pierre Grussenmeyer

Bibliographie

- Alshawa, M. (2010). *Contribution à la cartographie mobile : développement et caractérisation d'un système basé sur un scanner laser terrestre*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Strasbourg.
- Ellum, C. et El-Sheimy, N. (2002). *Land-based mobile mapping systems*. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 68(1):13-17.
- Graham, L. (2010). *Mobile mappingsystemsoverview*. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 76(3):222-228.
- King, A. (1998). *Inertial navigation-forty years of evolution*. *GEC review*, 13(3):140-149.
- Lahaye, R. et Ladet, S. (2014). *Les principes du positionnement par satellite : Gnss*. Le Cahier des Techniques de l'INRA, pages 9-18.
- Rizos, C. (1997). *Principles and practice of GPS surveying*. University of New South Wales.
- Spangenberg, M. (2009). *Safe navigation for vehicles*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.

ABSTRACT

Keywords: mobile mapping, trajectory, phase ambiguity, navigation

The GEOFIT firm has an effective processing chain to process data resulting from mobile mapping surveys. However, the trajectories calculated with the information provided by the inertial measurement unit and the GNSS system are sometimes inaccurate and involve a shift between the generated point cloud and reality. A method of creation of reference trajectories was defined. This method allows to generate a trajectory from the available control points in the measuring run used. Then, trajectories were generated and compared with this reference trajectory. Parameters of calculations improving trajectories were discovered. Besides, a Matlab program was developed to optimize some stages in the process. The processing chain was therefore improved in terms of speed and results.