

Les missions photogrammétriques réalisées par drone au centimètre sans points de calage au sol

■ Olivier DEGUELDRE

Avant toute mission photogrammétrique aérienne, il est indispensable de déterminer précisément la position de points de calage au sol. Ces derniers sont généralement mesurés lors de levés topographiques et servent à la mise à échelle et au recalage du modèle numérique dans le référentiel cartographique souhaité. Lors de ce travail de fin d'études, nous avons étudié la possibilité de nous passer de ces points de calage via l'utilisation d'un récepteur GNSS embarqué sur drone. L'atteinte de cet objectif apporterait un gain non négligeable en termes de rapidité et de rentabilité dans les missions photogrammétriques actuelles.

NDLR : cet article a été soumis dans le cadre du prix de l'AFT2018.

Introduction

La photogrammétrie permet la modélisation tridimensionnelle de notre environnement sur la base du traitement d'images 2D illustrant les perspectives de cet environnement. À l'heure actuelle, afin d'obtenir des précisions centimétriques dans la restitution, il est indispensable d'utiliser des points de calage au sol, aussi appelés GCP's ("Ground Control Points" en anglais). Ces points, matérialisés par des cibles visibles sur les images, permettent la mise à l'échelle des modèles photogrammétriques générés, ainsi que leur orientation absolue dans le référentiel cartographique souhaité. Il est donc indispensable que les positions de ces points soient connues avec une très grande précision, afin d'éviter que les erreurs ne se répercutent dans les résultats de la restitution photogrammétrique. C'est pourquoi le géoréférencement des GCP's fait généralement l'objet d'une mission topographique préalable au vol photogrammétrique. Les points de calage sont alors mesurés au moyen de récepteurs GNSS topographiques ou de stations totales de précision. Ce travail de fin d'études a eu pour objectif de valider l'hypothèse que l'on pourrait

se passer de ces points de calage au sol via l'utilisation d'un récepteur GNSS de haute précision, embarqué sur un drone lors du vol. Les mesures enregistrées par le récepteur permettraient alors de géoréférencer les images prises lors du vol et l'on pourrait se servir de leurs positions, afin de recalculer les modèles photogrammétriques générés

Choix du récepteur GNSS

Le récepteur GNSS que nous souhaitons utiliser devait tout d'abord être léger, afin de minimiser l'impact sur l'autonomie des batteries du drone. De plus, il devait présenter des dimensions réduites, afin de lui garantir une intégrabilité optimale. Enfin, le prix était également un critère primordial. La solution choisie devait être économique, afin qu'elle puisse d'une part s'intégrer au budget envisageable pour cette étude, et d'autre part amplifier l'attrait que pourraient avoir des professionnels à l'égard de cette technologie.

Selon ces critères, le récepteur choisi fut le REACH de chez Emlid :

- multiconstellations : GPS, GLONASS, Beidou / Compass, Galileo,
- monofréquence L1,
- dimensions : 47 x 25 x 9,2 mm,

MOTS-CLÉS

Photogrammétrie, GNSS drone, GCP, Time Marks, offset géométrique, offset temporel, post-traitement.

- poids : 14 g,
- prix : 235 \$.

L'antenne GNSS choisie était une Tallysman TW4721 :

- multiconstellations : GPS, GLONASS, Beidou/Compass, Galileo,
- monofréquence L1,
- dimensions : 38 x 38 x 14,3 mm,
- poids : 50 g,
- prix : 60 \$.

Qualification du récepteur GNSS

■ Qualité de réception

La qualité de réception du récepteur REACH a été étudiée sur la base d'un mesurage statique d'une durée de 24 h. Les fichiers bruts d'observation GNSS ont ensuite été analysés au moyen du logiciel TEQ QC développé par l'UNAVCO. Ce logiciel permet de générer des rapports de qualité reprenant un ensemble d'informations statistiques établies sur base des observations récoltées par le récepteur GNSS en cours de mesurage. Au sein de ce rapport de qualité, trois données principales ont pu être mises en évidence :

- aucune coupure de réception des signaux satellitaires n'était à déplorer durant le mesurage ;
- l'ensemble des constellations théoriquement visibles ont été observées par notre récepteur ;
- le récepteur a pu exploiter des signaux de bonne qualité, présentant un bruit de signal limité.

Pour ce dernier point, il est important de préciser que le bruit de signal est quantifié par ce que l'on appelle le SNR ("Signal to Noise Ratio" en anglais) qui est le rapport entre la puissance du signal reçu et la puissance du bruit observé. De bonnes valeurs de SNR sont généralement comprises entre



40 et 50 dB. Lors de la session de 24 h, la valeur moyenne obtenue s'élevait à 42 dB. Le récepteur REACH a donc fait preuve d'une bonne qualité de réception, sans toutefois être excellente.

■ Précision de mesurage

La précision de mesurage permet de quantifier les erreurs de mesure pouvant impacter le recalage des modèles photogrammétriques. Pour ce faire, une comparaison a été réalisée entre les positions mesurées par le récepteur REACH et celles obtenues par un récepteur topographique, en l'occurrence le R6 de chez Trimble.

En premier lieu, la comparaison a été établie sur la base de résultats de mesures réalisées en PPS (*"Post Processing Static"*). Les deux récepteurs ont été montés sur un même trépied et sur une même embase, cette dernière ayant été disposée à l'aplomb d'un point IGN. Concernant la durée d'observation, celle-ci s'élevait à 1 h pour le récepteur REACH contre 8 minutes pour le récepteur Trimble R6. Les écarts obtenus sur les mesures sont les suivants :

Tableau 1

Deltas (Reach - R6)		
Δ Est [m]	Δ Nord [m]	Δ h [m]
-0.001	0.003	0.019

Les mesures en RTK des deux récepteurs ont également été comparées sur un échantillon de points fixes, matérialisés par des clous topographiques. Les écarts entre les positions obtenues sont repris dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2

Deltas (R6 - REACH)		
Δ Est [m]	Δ Nord [m]	Δ h [m]
-0.015	0.012	-0.024
0.005	0.011	-0.038
0.005	0.019	-0.015
0.011	0.000	-0.024
-0.009	-0.007	-0.035
-0.010	0.023	-0.031
0.022	0.024	-0.032

Au vu des similitudes observées entre les résultats, la qualité de mesure de notre récepteur GNSS *low-cost* a pu être validée.

Résolution des offsets

■ Offset temporel

L'offset temporel représente l'erreur de synchronisation entre la mesure GNSS et l'instant de la capture d'image par la caméra. Si l'on prend pour exemple le cas d'un drone se déplaçant à 2 m/s et dont l'erreur entre les mesures GNSS et la capture d'image est de 0,1 seconde, chaque position mesurée associée aux prises de vues aura un décalage de près de 20 cm avec la position réelle des images. Il est donc indispensable que la synchronisation entre les mesures GNSS et la capture d'image soit parfaite. Dans ce sens, la solution adoptée résidait dans l'une des caractéristiques principales de la carte REACH : la génération de *"Time Marks"*. Les *"Time Marks"* sont des empreintes horodatées générées directement dans le fichier brut d'observations GNSS. Leur inscription est déclenchée par l'action d'impulsions électriques transmises directement à l'un des *pins* (borne) du port DF13 de la carte REACH. Les impulsions exploitées furent celles générées par le *flash* de la caméra. Ainsi, à chaque prise de vue, la caméra générerait une impulsion qui était directement redirigée vers la carte REACH, permettant alors la génération instantanée de *"Time Marks"* dans le fichier brut d'observations GNSS. Par la suite, un logiciel spécialisé de post-traitement allait permettre d'extraire uniquement les coordonnées associées aux *"Time Marks"* et donc, à la position des images prises lors du vol photogrammétrique.

■ Offset géométrique

L'offset géométrique est le décalage spatial entre la position du centre de phase de l'antenne GNSS (là où sont mesurées les positions GNSS) et le centre optique de la caméra. Pour permettre la géolocalisation des images prises lors du vol, il est indispensable que les mesures GNSS correspondent aux positions du centre optique. Or, ce dernier n'est jamais confondu avec l'emplacement du centre de phase de l'antenne GNSS. Il faut donc déterminer soigneusement les décalages existant afin de pouvoir les corriger. Cependant, ces décalages

ne sont pas constants au sein du référentiel dans lequel ils sont déterminés étant donné que les mesurages sont réalisés en cinématique. De ce fait, les inclinaisons prises par le drone lors du vol, ainsi que l'évolution de son orientation entraînent des variations dans les décalages déterminés au sein du référentiel. Pour des raisons de simplicité et de gain de temps, il a été choisi de réaliser l'approximation consistant à négliger l'inclinaison du drone lors du vol. Ce choix a entraîné inévitablement des erreurs dans les positions mesurées des images. Cependant, ces erreurs ont été minimisées notamment par le choix de trajectoires de vol rectilignes, parcourues à vitesses réduites et constantes. Compte tenu de cette approximation, l'antenne GNSS a uniquement été alignée d'un point de vue planimétrique avec le centre optique de la caméra, et le décalage vertical subsistant a été soustrait aux résultats des mesures GNSS. Cet alignement a été effectué au moyen d'une opération associant la photogrammétrie à des mesurages de haute précision réalisés à la station totale. Après traitement des données, l'implantation de l'antenne a également été effectuée au moyen d'une station totale.

Méthode de mesurage

Pour atteindre des précisions de mesure dites centimétriques, la méthode employée fut celle du positionnement différentiel. Celle-ci nécessite les observations de deux récepteurs GNSS distincts, réceptionnant simultanément les observations satellitaires des mêmes satellites. L'un de ces deux récepteurs est appelé *"récepteur de base"* et doit être situé sur un point connu en coordonnées. Grâce à cela, il devient alors possible de calculer le vecteur séparant l'antenne de base de l'antenne mobile. Via le calcul de ce vecteur, on peut d'une part s'affranchir d'une série d'erreurs que sont notamment les erreurs ionosphériques, troposphériques, les décalages d'horloges... mais également déterminer la valeur des ambiguïtés entières. Le positionnement différentiel est égale-



ment appelé "positionnement relatif", car l'ensemble des positions calculées du récepteur mobile sont déterminées à partir de la position connue du récepteur de base. Le positionnement différentiel peut être réalisé de deux manières :

- en temps réel (RTK – *Real Time Kinematic*) ;
- en temps différé (PPK – *Post Processing Kinematic*).

La méthode retenue pour ce travail de fin d'études fut le mesurage en temps différé. Ce choix a été motivé par plusieurs critères.

Tout d'abord, la raison principale est que contrairement au RTK, le PPK ne nécessite pas de couverture réseau durant le mesurage. Il s'agit ici d'un point primordial, car lors de vols photogrammétriques, il est difficile de s'assurer de l'obtention d'une bonne connexion réseau sur l'ensemble du site et durant toute la durée du vol.

Secondement, la méthode PPK impose le téléchargement des données des deux récepteurs GNSS. Cependant, ce téléchargement peut être effectué simultanément à l'enregistrement des images capturées lors du vol.

Ensuite, grâce au téléchargement des observations GNSS, il devient possible de réaliser un contrôle de qualité sur ces observations préalablement au calcul des positions.

Par ailleurs, le PPK nécessite l'utilisation de logiciels de post-traitement. Il est vrai que ces logiciels sont généralement onéreux. Toutefois, il existe également des solutions libres telles que la librairie RTKlib. C'est cette solution qui a été retenue pour la réalisation de l'ensemble des opérations de post-traitement entreprises dans ce travail de fin d'études.

Enfin, pour éviter l'achat d'un second récepteur, il est également possible, en Belgique, d'obtenir gratuitement les données d'observation des antennes des réseaux permanents que sont Walcors en Wallonie, Flepos en Flandre et GPSBru à Bruxelles. Lors de ce travail de fin d'études, l'ensemble des vols et mesurages ont été réalisés sur le territoire de la Wallonie. Nous avons donc utilisé exclusivement les données du réseau permanent Walcors.

Génération d'une VRS

L'utilisation du réseau Walcors fait entrer en jeu un nouveau facteur d'imprécision : la longueur de la "ligne de base". La ligne de base est la distance séparant le récepteur mobile du récepteur de base. De manière conventionnelle pour les récepteurs mono-fréquence, on estime que cette distance ne doit pas dépasser une dizaine de kilomètres, afin d'éviter d'accroître sensiblement les imprécisions de mesure. Or, le réseau Walcors est configuré avec des entre-distances entre stations de 25 à 35 km ! La solution choisie à ce problème fut le recours à une station de base virtuelle Rinex (VRS – *Virtual Reference Station*). Il s'agit d'une antenne non physique pouvant être générée n'importe où sur le territoire du réseau Walcors, et donc également à proximité du lieu de mesurage. Les données de la VRS sont calculées sur base de l'ensemble des observations des antennes du réseau permanent. De ce fait, les données obtenues sont bien adaptées et individualisées à la zone de mesurage en question. Nous obtenons ainsi des lignes de base de seulement quelques mètres sans avoir recours à un second récepteur sur site. Il s'agit de la méthode "standard" utilisée en GNSS RTK.

Cependant, en RTK, les données de la station de référence virtuelle sont transmises via une couverture réseau. En PPK, ces données doivent être téléchargées séparément et simultanément à la période de mesurage. Cette opération a pu être réalisée grâce au logiciel RTKnavi. Sur base d'une adresse IP et d'un identifiant réseau, RTKnavi a permis une connexion avec le service VRS du réseau permanent Walcors. Ce dernier a alors généré des données d'observation pour une antenne VRS située à un emplacement préalablement indiqué. Ces données ont été sauvegardées en temps réel au format RTCM3 et ont ensuite été converties au format RINEX via le logiciel RTKconv de la librairie RTKlib. Le format Rinex est un format directement exploitable pour le post-traitement.

■ Post-traitement

Pour le post-traitement GNSS, le logiciel choisi fut RTKpost de la librairie

RTKlib. Trois fichiers furent nécessaires :

- le fichier d'observations GNSS du récepteur mobile ;
- le fichier d'observations GNSS de l'antenne de base VRS ;
- les messages de navigation.

Les messages de navigation sont également enregistrés par le récepteur mobile et par l'antenne VRS. Ils sont donc téléchargeables et directement exploitables après mesurage. Concernant les paramètres du post-traitement, ceux-ci ont été choisis pour un traitement cinématique avec des angles d'élévation satellitaire compris entre 10 et 20°. Il s'agit ici d'angles au-dessus de l'horizon en dessous desquels nous ne souhaitons pas conserver les observations satellitaires, ces dernières ayant une trop forte probabilité d'avoir été dégradées par d'éventuels obstacles tels que la végétation, des bâtiments... mais également par une traversée trop rasante des différentes couches de l'atmosphère. Par ailleurs, seuls les constellations GPS et GLONASS ont été prises en compte. Ceci est une restriction du réseau Walcors qui n'enregistre que les observations de ces deux constellations.

Enfin, le logiciel RTKpost utilisé était une version remasterisée par la compagnie Emlid. Cette version avait la particularité de permettre la création de deux types de fichiers : l'un reprenant l'ensemble des mesures GNSS prises lors du vol, soit 5 mesures par seconde, et l'autre reprenant uniquement les positions calculées associées aux "Time Marks". Ce dernier fichier a bien entendu été utilisé afin d'associer les coordonnées aux images et géoréférencer les modèles photogrammétriques générés.

Vols photogrammétriques

■ Zone urbanisée

Le premier vol a été réalisé au-dessus d'une zone urbanisée. Cette dernière présente des reliefs marqués et des textures diverses facilitant le traitement photogrammétrique. De plus, un milieu urbain possède un grand nombre de surfaces propres et lisses telles que des trottoirs ou des voiries, qui rendent plus aisée la détermination de points de contrôles au moyen de peinture. Cependant, le relief important que





Figure 1. Plan de la zone urbanisée

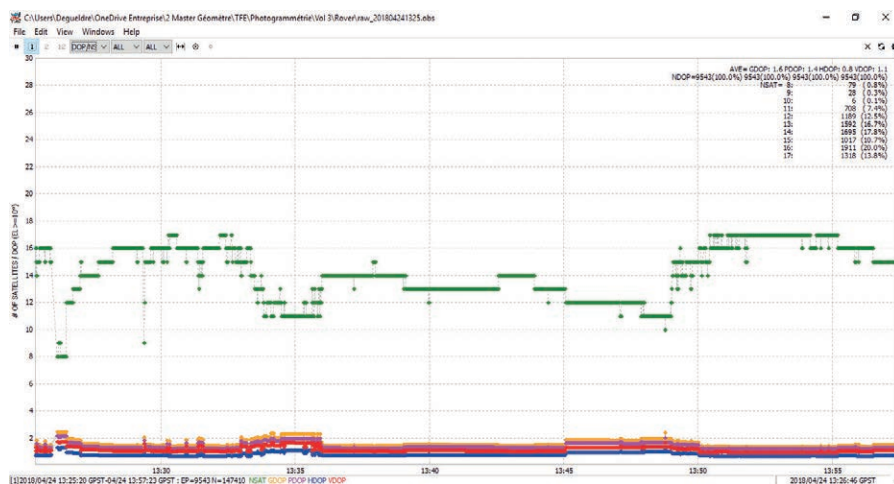


Figure 2. Vol photogrammétrique en zone urbanisée - Évolution du nombre de satellites observés lors du vol photogrammétrique

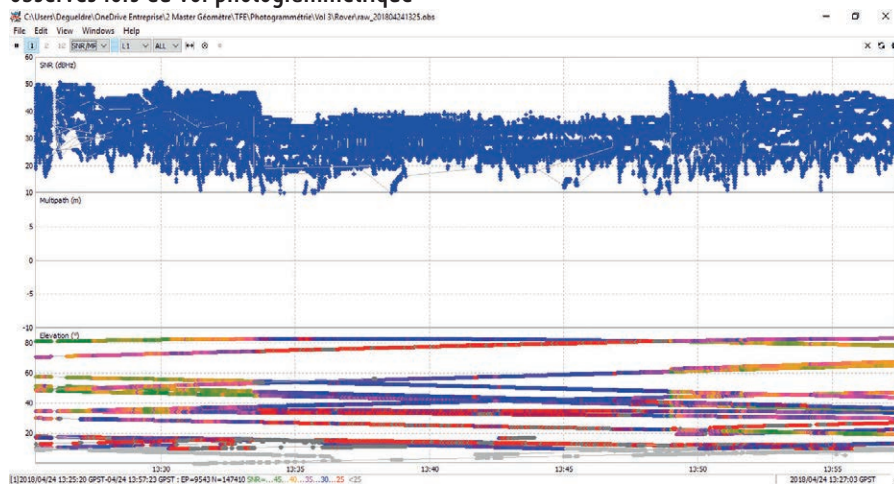


Figure 3. Vol photogrammétrique en zone urbanisée - Évolution des valeurs de SNR observées lors du vol photogrammétrique

constituent les bâtiments avoisinants peut être un obstacle à la réception satellitaire. D'autre part, une zone urbanisée représente un lieu sensible en termes de voisinage. Le survol d'habitations engendre inévitablement des nuisances qu'il est bon de limiter au maximum, afin de s'assurer du bon déroulement des missions photogrammétriques.

Après ce premier vol, le modèle photogrammétrique obtenu a été mis à l'échelle et recalé uniquement sur la base des coordonnées images enregistrées. 8 points de contrôle ont été utilisés, afin de vérifier la qualité de la restitution. Cette vérification a été opérée par comparaison entre les positions connues de ces points et leurs positions calculées par le logiciel photogrammétrique. Ils n'ont servi en aucun cas à la mise à l'échelle ou au recalage des modèles numériques générés. Les résultats de cette vérification sont exposés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3

Label	Deltas		
	Δ Est [m]	Δ Nord [m]	Δ h [m]
9002	0.403	0.781	-0.234
9003	0.414	0.799	-0.214
9004	0.438	0.775	-0.166
9005	0.473	0.781	-0.155
9006	0.495	0.775	-0.167
9007	0.536	0.791	-0.146
9008	0.536	0.769	-0.166
9009	0.504	0.724	-0.158

Ces écarts sont très importants. Toutefois, on peut remarquer que les valeurs varient de manière faible autour de constantes propres à chaque axe du référentiel. Cette constatation laisse à penser que l'erreur pourrait provenir de la fixation d'une solution erronée au départ du mesurage. Afin de valider cette hypothèse, il a été nécessaire d'analyser les fichiers bruts d'observations GNSS.

Cette analyse a été réalisée au moyen du logiciel RTKplot de la librairie RTKlib.

La première donnée examinée fut le nombre de satellites observés lors de la mission photogrammétrique. Cette donnée est représentée par la courbe verte de la Figure 2. Sur ce graphique, on peut remarquer de fortes variations du nombre de satellites observés en début et en fin de mesurage. Il est

important de préciser que le vol photogrammétrique a été encadré par deux périodes d'initialisation des solutions au sol et en position fixe. C'est au cours de ces deux périodes que l'on observe les variations les plus importantes. Cela est dû à l'environnement dans lequel a été placé le drone avant décollage et après atterrissage. En effet, le décollage et l'atterrissage ont été réalisés sur un même emplacement. Cependant, celui-ci était situé à proximité d'un arbre de grande hauteur. De ce fait, les ondes électromagnétiques en provenance des satellites ont traversé la végétation (diffraction). Cette variation a eu pour conséquence de compliquer fortement la fixation des solutions par le récepteur GNSS.

La seconde donnée analysée a été l'évolution des valeurs du rapport signal-bruit lors du vol (SNR – *Signal to Noise Ratio*). Le SNR est représenté en bleu sur la *Figure 3*. Plus la colorisation bleutée est haute dans le graphique, moins il y a de bruit et meilleure est la qualité du signal. Or sur cette image, on peut observer une détérioration soudaine des valeurs de SNR au centre du graphique. Cette détérioration intervient lors de la mise sous tension du drone. On peut donc affirmer que le drone et ses moteurs produisent des interférences électromagnétiques affectant directement la qualité des signaux exploités par le récepteur GNSS.

Afin de remédier à ces problèmes, différentes solutions ont été appliquées :

1. rehaussement de l'antenne : éloignement de l'antenne par rapport aux sources de perturbations électromagnétiques ;
2. cadre de rehausse en aluminium : l'aluminium joue le rôle de plan de masse, isolant l'antenne contre les signaux de défaut en provenance du bas de l'antenne ;
3. emballage de la carte GNSS dans du papier aluminium : isolation de la carte contre les perturbations électromagnétiques induites par le drone ;
4. zone de décollage et d'atterrissage dégagée : optimisation de la visibilité satellitaire.

Sur base de ce dernier critère, il a été

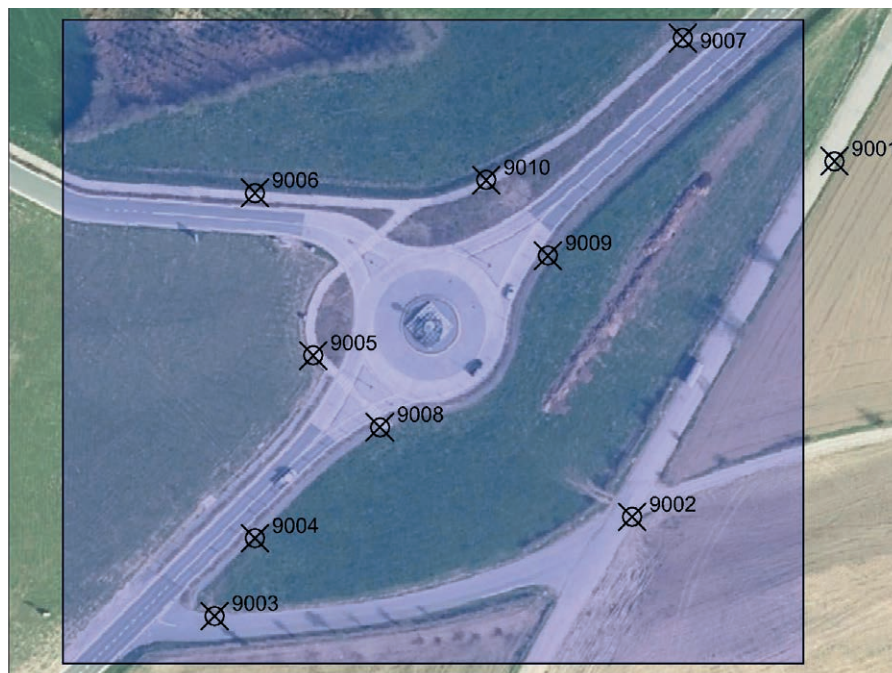


Figure 4. Vol photogrammétrique en zone agricole - plan du site

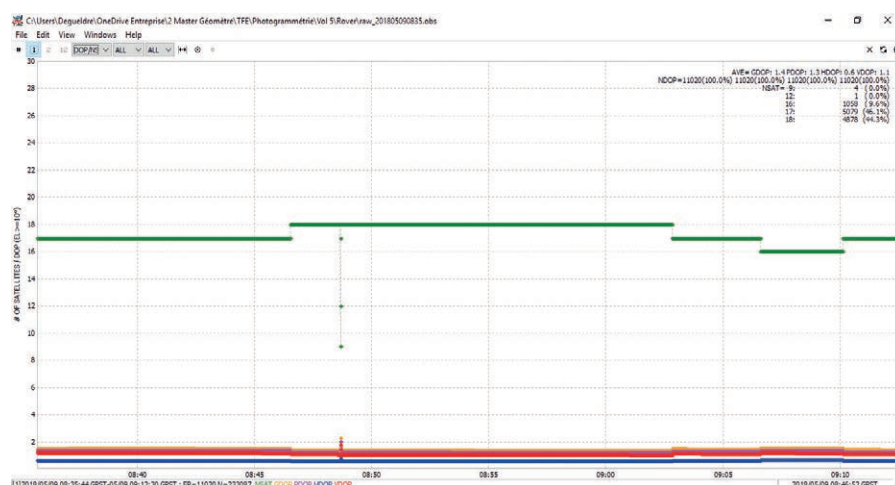


Figure 5. Vol photogrammétrique en zone agricole - Variation du nombre de satellites observés lors du vol photogrammétrique

choisi de réaliser le second vol dans une zone agricole.

■ Zone agricole

La zone agricole présente pour avantages d'offrir un espace complètement dégagé, dépourvu d'obstacles à la réception satellitaire. De plus, il s'agit d'une zone peu sensible en termes de voisinage. Enfin, la zone choisie possédait de nombreuses voiries favorisant la matérialisation de points de contrôle. Cependant, les inconvénients principaux de ce genre d'environnement sont la présence de textures beaucoup plus neutres, un relief moindre et une présence importante de végétation

rendant plus complexes les traitements photogrammétriques.

Après le vol photogrammétrique, les données GNSS ont été analysées, afin de valider l'intérêt des solutions précédemment établies. D'une part, on peut constater une variation bien moindre du nombre de satellites observés, leur nombre étant maintenu entre 16 et 18 durant l'ensemble du mesurage (voir *Figure 5*).

D'autre part, le graphique du rapport signal sur bruit représenté à la *figure 6* ne fait plus état d'une détérioration soudaine des valeurs de SNR lors de la mise sous tension du drone. Les



perturbations électromagnétiques en provenance du drone n'ont donc plus eu d'impact marqué sur la qualité des données récoltées.

Par ailleurs, l'analyse ci-dessus porte uniquement sur les données GNSS. Afin de vérifier la qualité du modèle photogrammétrique généré, une

comparaison a été réalisée entre 3 logiciels distincts :

1. Photoscan Professional de chez Agisoft ;
2. Pix4D ;
3. Context Capture de chez Bentley.

Les objectifs principaux de cette analyse étaient de comparer les résultats obtenus avec chacun des logiciels, d'identifier d'éventuelles causes d'er-

reurs dans la restitution et pouvoir valider la qualité des mesures GNSS.

Le tableau de la *Figure 7* présente les écarts observés entre les coordonnées connues des points de contrôle 9002 à 9010 avec les coordonnées de ces mêmes points calculées par les logiciels photogrammétriques Context Capture, Agisoft Photoscan et Pix4D.

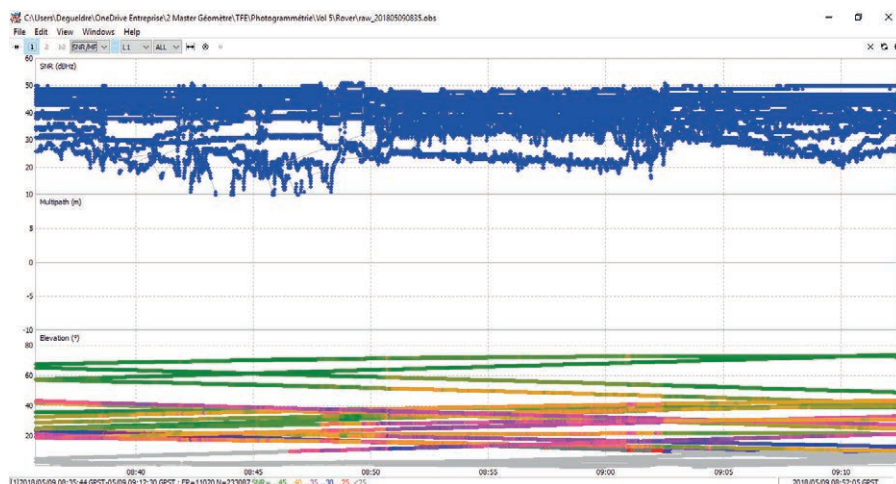


Figure 6. Vol photogrammétrique en zone agricole - Variation des valeurs de SNR durant le vol photogrammétrique

Label	Context Capture			Agisoft Photoscan			Pix4D		
	Δ Est [m]	Δ Nord [m]	Δ h [m]	Δ Est [m]	Δ Nord [m]	Δ h [m]	Δ Est [m]	Δ Nord [m]	Δ h [m]
9001	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9002	0.027	-0.110	0.723	0.091	-0.014	0.502	0.041	0.007	0.614
9003	0.007	-0.035	0.852	0.045	0.027	0.500	0.002	-0.006	0.625
9004	0.000	-0.039	0.839	0.023	0.053	0.504	-0.008	0.028	0.641
9005	0.010	-0.057	0.763	0.031	0.062	0.489	0.023	0.048	0.602
9006	-0.013	-0.077	0.733	0.000	0.034	0.519	0.016	0.031	0.608
9007	0.010	-0.006	0.750	0.032	0.001	0.517	0.029	0.048	0.625
9008	0.006	-0.069	0.778	0.037	0.035	0.512	0.018	0.030	0.640
9009	0.031	-0.022	0.706	0.040	0.038	0.502	0.031	0.054	0.616
9010	0.003	-0.025	0.710	0.016	0.025	0.482	0.023	0.032	0.629

Figure 7. Vol photogrammétrique en zone agricole - Comparaison des résultats obtenus avec les logiciels photogrammétriques Photoscan Professional, Pix4D et Context Capture.

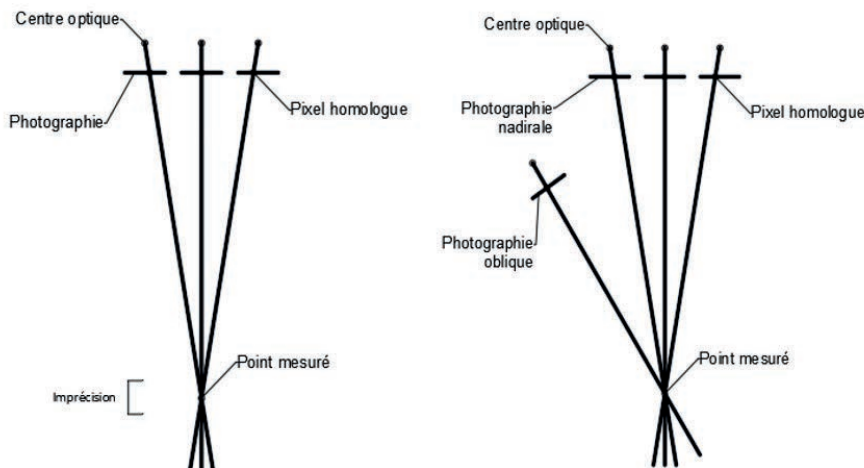


Figure 8. Influence des images obliques sur l'angle d'intersection des faisceaux photogrammétriques

Comme on peut le constater, les résultats planimétriques sont relativement bons pour les trois logiciels. Cependant, les écarts en élévation sont importants avec des valeurs maximales d'environ 85 cm pour Context Capture, 52 cm pour Agisoft Photoscan et 64 cm pour Pix4D. Toutefois, il est important de noter que ces résultats font état d'erreurs systématiques variant de manière très faible autour d'une constante propre à chaque logiciel. Les données GNSS fournies aux logiciels ayant été les mêmes, on peut affirmer que les mesures GNSS sont hors de cause. Le traitement photogrammétrique induit donc des erreurs. Afin de les rectifier, il a été choisi de repenser la configuration des prises de vues ainsi que de modifier quelque peu le mode opératoire choisi pour les vols photogrammétriques.

La première solution apportée fut l'utilisation d'images obliques. En effet, lorsque les logiciels photogrammétriques tentent de déterminer la position d'un pixel dans l'espace, ils projettent des faisceaux partant du centre optique de chaque prise de vue et passant par les pixels homologues aux images. Par la suite, les logiciels recalent les images les unes par rapport aux autres en faisant concourir les différents faisceaux. L'intersection des faisceaux donne alors la position du pixel dans l'espace. Toutefois, pour des images prises à 60 m d'altitude avec des entre-distances de l'ordre de 10 à 15 mètres, les intersections des faisceaux deviennent extrêmement rasantes, ce qui engendre des imprécisions importantes dans la direction de ces faisceaux. Ceci s'apparente à la théorie du relèvement topographique ou encore du GDOP en GNSS. Comme représenté à la *Figure 8* ci-dessus, en associant aux images nadirales des images obliques, on obtient des intersections plus franches qui auront pour



Figure 9. Vol en zone agricole - Drone avec récepteur GNSS embarqué

effet de réduire fortement les incertitudes sur la position des pixels.

La seconde démarche d'amélioration fut l'utilisation d'un point "parking". Il s'agit d'un point connu en coordonnées au-dessus duquel est positionné le drone avant décollage et après atterrissage. Grâce à cela, il a été possible de vérifier la qualité des solutions fixées par le récepteur GNSS avant et après le vol, mais également d'analyser l'évolution des altitudes et de corriger les éventuels décalages observés entre les données GNSS et les résultats photogrammétriques.

Enfin, le troisième point fut l'utilisation d'une antenne GNSS présentant de meilleures performances. Cette nouvelle antenne a permis de réduire le bruit sur les observations, ce qui a eu pour conséquences d'accélérer la fixation des solutions et d'augmenter leur fiabilité. En tenant compte de toutes ces améliorations, un dernier vol a été réalisé au-dessus de la zone agricole.

Tableau 4

Label	Deltas		
	Δ Est	Δ Nord	Δ h
9001	-	-	-
9002	0.017	-0.055	0.002
9003	-0.019	-0.041	0.025
9004	-0.019	-0.020	0.001
9005	0.017	-0.004	0.013
9006	0.016	-0.020	0.028
9007	-	-	-
9008	-0.006	-0.032	0.028
9009	0.030	-0.019	0.005
9010	0.028	-0.023	0.012

L'ensemble du modèle photogrammétrique a été généré avec le logiciel Pix4D et a été recalé uniquement au moyen des positions images. La qualité des résultats a ensuite été vérifiée au moyen de 8 points de contrôles au sol. Les écarts obtenus entre les positions théoriques de ces points de contrôle et leurs positions calculées par le logiciel photogrammétrique sont présentés dans le Tableau 4.

Au vu de ces résultats, on peut affirmer qu'il est effectivement possible de réaliser des missions photogrammétriques par drone au centimètre sans points de calage au sol.

Conclusion

Le recalage des modèles photogrammétriques par géoréférencement des images fournit divers bénéfices.

Tout d'abord, cette technologie dispense l'utilisateur de l'opération de détermination de GCP's et de ce fait, de la mission topographique préalable qu'elle nécessite généralement. Ceci implique d'une part une plus grande rapidité d'exécution, mais également un gain financier non négligeable.

Ensuite, cette solution fournit à l'opérateur un plus grand nombre de points de contrôle de qualité que sont l'ensemble des coordonnées images récoltées durant le vol.

Enfin, il devient désormais possible de réaliser des missions photogrammétriques dans des zones dangereuses ou difficiles d'accès telles que des décharges, des zones forestières ou encore des carrières.

Il reste toutefois des développements futurs envisageables.

Tout d'abord, il serait intéressant d'utiliser un capteur d'attitude permettant d'enregistrer les angles d'inclinaison du drone durant le vol et de corriger simultanément les mesures fournies par le récepteur GNSS.

On pourrait également utiliser la carte GNSS pour permettre un guidage RTK du drone, lui offrant de la sorte une plus grande précision de déplacement et une meilleure stabilité.

Enfin, on pourrait utiliser une carte GNSS multifréquences afin d'améliorer la précision et la fiabilité des mesures.

Pour terminer, les applications envisageables actuellement pour le récepteur Reach sont les levés terrestres, ainsi que le monitoring d'ouvrages d'arts tels que les ponts ou les barrages. En effet, le récepteur Reach a fourni de très bons résultats en mesurage RTK ainsi qu'en PPS. D'autre part, il représente également un outil pédagogique exceptionnel, jouissant d'un prix d'achat hors concurrence et offrant d'innombrables possibilités d'apprentissage dans les différents domaines du GNSS de précision. ●

Contact

Olivier DEGUELDRE
olivier.degueldre@hotmail.com

ABSTRACT

Before each aerial photogrammetric mission, it is necessary to determine the precise position of ground control points (GCP). These points are generally measured during topographic survey and are used for scaling, orienting and referencing the generated digital models. During this study, we envisaged the possibility to dispense with ground control points by using a GNSS high precision grade receiver onboard an UAV. Such technology would bring a considerable gain in terms of speed of execution and profitability for the current photogrammetric missions.