



RECHERCHES TRANSPORT

BULLETIN D'INFORMATION SCIENTIFIQUE

Volume thématique no 15 : mars 1994

MODÉLISATION DE TERRAIN PAR PROCÉDÉ PHOTOGRAMMÉTRIQUE POUR LA CONCEPTION DE PROJETS ROUTIERS

Sylvie Laroche, Mario Perron
Service de l'arpentage et de la géomatique
Ministère des Transports

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
CENTRE DE DOCUMENTATION
700, BOUL. RENÉ-LEVESQUE EST,
21^e ÉTAGE
QUÉBEC (QUÉBEC) - CANADA
G1R 5H1

CONTEXTE DE LA RECHERCHE

L'utilisation des modèles numériques de terrain pour la conception de projets routiers est peu répandue à ce jour au Ministère, mais il est reconnu qu'un tel produit offre une grande souplesse quant au choix optimal d'une nouvelle géométrie de la route tout en limitant les interventions sur le terrain. Un modèle numérique de terrain (MNT) est un modèle tridimensionnel représentant, sous forme numérique, le relief d'une portion du territoire. Le modèle peut être utilisé sous sa forme numérique pour calculer des pentes, sections et profils, etc. ou, encore, pour générer des courbes de niveau et afficher des images perspectives ou isométriques.

Traditionnellement, dans la majorité des organisations, les MNT ont été réalisés par levés d'arpentage (station totale, niveau). Au Ministère, l'utilisation du procédé photogrammétrique pour générer les MNT est récente. Cette nouvelle façon de procéder a été mise au point par le Service de l'arpentage et de la géomatique, qui s'est inspiré de la méthode utilisée par le Department of Transportation du Texas. C'est ainsi que les techniques photogrammétriques, autrefois utilisées au Ministère pour la production de cartes topographiques nécessaires à la réalisation des avant-projets, sont dorénavant utilisées à la phase de conception pour modéliser le terrain naturel avec une précision adéquate.

CANQ
TR
248
V.15

Québec 

PROCÉDÉ PHOTOGRAMMÉTRIQUE UTILISÉ POUR LA MODÉLISATION DU TERRITOIRE

Les différentes étapes nécessaires à la réalisation d'un modèle numérique par procédé photogrammétrique sont décrites ci-après.

Photographies à basse altitude

Dans le cas de photographies à basse altitude, le territoire à modéliser fait généralement l'objet d'une couverture photographique à l'échelle 1 : 2 000, ce qui signifie une altitude de vol de 305 mètres (1 000 pieds) par rapport à l'élévation moyenne du territoire visé. Cette échelle photographique permet de réaliser un produit photogrammétrique tridimensionnel de grande précision. Pour atteindre le niveau de précision requis aux fins de conception de projets routiers, la couverture photographique doit être réalisée dans des conditions particulières, à savoir :

- absence de neige;
- absence de feuilles aux arbres, si le territoire à couvrir est en partie boisé;
- conditions météorologiques idéales (soleil ou couverture nuageuse à haute altitude, vents allant de faibles à légers);
- minimum d'ombrage, soit entre 10 h et 14 h environ, lorsque l'angle solaire est supérieur à 30°.

La photographie peut être prise en couleurs, ce qui facilite l'interprétation des détails visibles. Par contre, la photographie noir et blanc est généralement préférée, car elle permet d'optimiser le pointé stéréoscopique pour chaque détail à capter et, par conséquent, augmente la précision du produit final. Une mission photographique réalisée en présence d'une couverture nuageuse à haute altitude est souhaitable, car les ombrages sont ainsi éliminés.

Le succès de toute mission photographique dépend de l'équipement utilisé : le film et la chambre de prise de vues aériennes sont choisis en fonction de l'échelle des photographies requise, de la hauteur de vol et de la vitesse d'obturation. C'est ainsi que, pour des photographies à basse altitude, il est nécessaire d'utiliser une chambre de prise de vues aériennes possédant un système de compensation du filé de l'image, c'est-à-dire dont le film lui-même se déplace au moment de la prise de vue dans la direction opposée au déplacement de l'avion. Ce système permet d'éliminer la «traînée» sur les photographies et la déformation des détails; les photographies aériennes qui en résultent sont de très grande qualité.

Contrôle photogrammétrique

L'établissement du contrôle photogrammétrique est l'opération qui assure le lien physique et mathématique entre la photographie et le terrain photographié.

Cette opération consiste à identifier des points visibles au sol et sur la photographie. Le choix de ces points se fait en repérant une tige de fer (ou autre) plantée dans le sol, en utilisant des marques de peinture ou des bandes de tissu placées en forme de «Y» de part et d'autre de chaque point. Les détails physiques tels que des coins de toiture, des trottoirs, des intersections de rues ou des couvercles de regards peuvent aussi être utilisés. Une fois choisis, ces points sont mesurés par rapport au système de coordonnées géodésiques par méthode conventionnelle, c'est-à-dire à l'aide d'une station totale et d'un niveau, ou par méthode satellitaire GPS (*Global Positioning System*).

Le but de cette étape consiste à obtenir des coordonnées rectangulaires (X, Y, Z) de chaque point de contrôle en rapport avec le système de coordonnées planes du Québec (SCOPQ), et à les repérer sur les photographies aériennes. Ces points sont placés à des endroits stratégiques, assurant ainsi une précision adéquate à l'issue du processus d'aérotriangulation.

La disposition des points au sol dépend de la configuration de la zone à modéliser, du plan de vol et de la précision recherchée. Afin d'atteindre les objectifs, environ un point de contrôle vertical à tous les modèles et un point de contrôle horizontal à tous les trois modèles sont établis sur le terrain.

Aérotriangulation

L'aérotriangulation est le processus par lequel le contrôle photogrammétrique est densifié pour répondre aux besoins d'orientation de chaque modèle à placer sur les stéréorestituteurs analytiques de premier ordre. La densification du contrôle photogrammétrique est réalisée par le marquage mécanique des diapositives aux endroits stratégiques, et par le calcul mathématique des coordonnées géodésiques de ces nouveaux points. Dix points sont requis pour l'ajustement de chaque modèle; ils sont distribués de la façon suivante : deux à chaque coin du modèle et deux autres au centre, de chaque côté du modèle (voir figure 1).

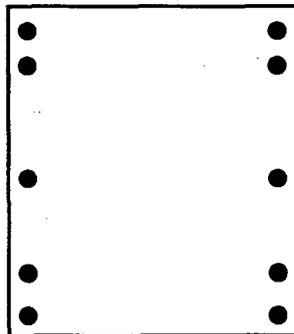


Figure 1

DISTRIBUTION DES POINTS PHOTOGRAMMÉTRIQUES

DOR-CEN-MON

CANQ
TR
248
V. 15

L'ajustement d'aérotriangulation est l'opération mathématique qui détermine les coordonnées des points photogrammétriques. Elle est réalisée à l'aide du logiciel Space-M en respectant fidèlement un niveau élevé de précision. En effet, à l'occasion de cette opération, l'erreur moyenne quadratique (EMQ) maximale à respecter ainsi que l'écart maximum permis sur chaque coordonnée (X, Y, Z) à une échelle des photographies de 1 : 2 000 sont montrés au tableau 1.

TABLEAU 1 : PRÉCISIONS À RESPECTER POUR L'AJUSTEMENT						
ÉCHELLE 1 : 2 000	EMQ (X)	EMQ (Y)	EMQ (Z)	Xmax	Ymax	Zmax
Points de liaison	0,02 m	0,02 m	0,02 m	0,04 m	0,04 m	0,04 m
Points de contrôle	0,03 m	0,03 m	0,03 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m
Points de lac			0,04 m			

Le but de l'étape d'aérotriangulation consiste à procurer des modèles stréréoscopiques comprenant l'information mathématique qui permettra d'effectuer les orientations nécessaires à la mise en place de ces modèles sur les stéréorestituteurs analytiques de façon à permettre le captage de données numériques de grande précision.

Captage

Le captage des données à partir des photographies aériennes est fait à l'aide d'un stéréorestituteur analytique de grande précision, en suivant les procédures établies pour un levé terrain conventionnel en ce qui concerne le type de données à capter et leur codification. Ainsi, l'opérateur capte les coordonnées des points de détails (X, Y, Z) de la même façon que le ferait un opérateur de station totale lorsqu'il fait le levé sur le terrain.

Cette étape de captage des données est réalisée par l'entreprise privée. Une assistance spéciale doit être offerte aux entreprises afin de s'assurer qu'elles répondent exactement aux besoins spécifiques relatifs aux travaux d'ingénierie, qui sont fort différents des normes généralement utilisées pour la production d'une carte topographique traditionnelle.

Afin de livrer un produit des plus fidèles, il est souvent nécessaire de compléter l'étape de captage par un levé sur le terrain, que ce soit pour relever des détails nécessaires non-visibles sur les photographies à cause d'ombrage, de végétation ou d'une superposition de détails comme des viaducs et des ponceaux, pour compléter le drainage à l'extérieur des limites du MNT, ou pour assurer une précision maximale à l'occasion de la jonction d'un projet avec des infrastructures existantes.

Traitement des données

Les données captées à l'aide de stéréorestituteurs sont ensuite validées, puis utilisées pour générer le modèle numérique de terrain. Finalement, à l'étape du contrôle de la qualité du produit à diffuser, il est nécessaire de s'assurer de l'exactitude du modèle en termes de détails physiques et de la surface à représenter, à l'aide d'un logiciel spécialisé en représentation tridimensionnelle du territoire.

Diffusion des données

Divers produits peuvent être remis à l'équipe chargée de la conception d'un projet en fonction de ses besoins :

- les fichiers numériques des points captés (coordonnées, chaînes);
- les fichiers numériques du modèle tridimensionnel selon différents formats (CEAL, PANTERRA ET GÉOMAX);
- les fichiers numériques de sections transversales ou profils longitudinaux selon différents formats (CEAL, Ø71, GDA-INTERROUTE via Ø71);
- des plans topographiques sur divers supports, avec ou sans courbes de niveau, et les fichiers numériques;
- les photographies aériennes.

PRÉCISION DU MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN

La précision du modèle numérique de terrain est fonction de la méthode utilisée pour le captage de l'information, à savoir les levés d'arpentage ou le procédé photogrammétrique.

Précision théorique

La modélisation de terrain par captage photogrammétrique est réalisée en utilisant le réseau géodésique provincial à titre de système de référence planimétrique et altimétrique. Les points de contrôle photogrammétrique requis sont établis par relevé polaire et nivellement géométrique à partir des repères permanents déjà existants ou implantés spécialement pour le projet à réaliser. Dans certains cas, les repères permanents sont eux-mêmes balisés et sont utilisés comme points de contrôle.

Les coordonnées connues (X, Y, Z) des repères permanents utilisés pour le relevé polaire comportent une certaine imprécision qui peut varier de quelques centimètres à plus de deux décimètres dans certains cas. L'ellipse d'erreur que représente la variation potentielle en position (X, Y) et en élévation (Z) d'un point mesuré par rapport à sa position absolue sur la terre, est reconnue comme étant en moyenne égale à ± 20 mm pour une densité de points de 4^e ordre⁽¹⁾, ce qui correspond aux types de points généralement utilisés pour ces projets.

Afin de connaître la précision d'une mesure photogrammétrique d'un point de détail, il faut combiner l'imprécision des points de contrôle photogrammétrique établis par station totale et l'imprécision du processus photogrammétrique, c'est-à-dire la combinaison des erreurs dues à la photographie, au repérage des points photogrammétriques, au stéréorestituteur et à l'opérateur.

La précision d'un point de détail relevé par station totale peut être quantifiée par la combinaison des erreurs relatives aux repères permanents, à l'instrumentation, au pointé de l'opérateur et à la position de la cible choisie par le chaîneur.

Précision d'un point de détail relevé par station totale

La précision planimétrique d'un point de détail relevé par station totale s'exprime comme suit :

$$\text{où :} \quad \sigma_{XY\text{-terrain}} = (\sigma_{\text{pt-XY}}^2 + \sigma_{\text{inst.-XY}}^2 + \sigma_{\text{pointé}}^2 + \sigma_{\text{cible}}^2)^{1/2}$$

$\sigma_{XY\text{-terrain}}$ = précision planimétrique d'un point de détail relevé par station totale

$\sigma_{\text{pt-XY}}$ = imprécision planimétrique des repères permanents, évaluée à $\pm 20,0$ mm⁽²⁾

$\sigma_{\text{inst.-XY}}$ = imprécision due à l'instrument pour une observation planimétrique, évaluée à $\pm 27,3$ mm⁽³⁾

$\sigma_{\text{pointé}}$ = précision du pointé de l'opérateur, évaluée à 1" d'arc pour une distance de 500 mètres, soit $\pm 2,4$ mm⁽⁴⁾

σ_{cible} = précision du positionnement de la cible découlant du centrage et de sa verticalité, évaluée à $\pm 1,5$ mm⁽⁵⁾.

(1) Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources. Service de la géodésie. *Guide d'utilisation du réseau géodésique en milieu urbain*. Sainte-Foy, février 1989, annexe 4.

(2) *Op. cit.*, note 1.

(3) Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources. Service de la géodésie. *Instructions pour l'établissement des réseaux géodésiques de base*. Sainte-Foy, janvier 1989, p. 50-51.

(4) BLACHUT, J.J., A. CHRZANOWSKI et J.H. SRASTOMOINEN. *Urban Surveying and Mapping*. New York, Springer-Verlag New York Inc., 1979, 372 p.

(5) *Op. cit.*, note 1.

On aura donc :

$$\hat{\sigma}_{XY\text{-terrain}} = \pm 34 \text{ mm} \quad (i)$$

De même, la précision altimétrique d'un point de détail relevé par station totale s'exprime comme suit :

$$\hat{\sigma}_{Z\text{-terrain}} = (\hat{\sigma}_{pt-Z}^2 + \hat{\sigma}_{inst-Z}^2 + \hat{\sigma}_{pointé}^2 + \hat{\sigma}_{cible}^2)^{1/2}$$

où :

$\hat{\sigma}_{Z\text{-terrain}}$ = précision altimétrique d'un point de détail relevé par station totale

$\hat{\sigma}_{pt-Z}$ = imprécision altimétrique des repères permanents, évaluée à $\pm 20,0 \text{ mm}^{(6)}$

$\hat{\sigma}_{inst-Z}$ = imprécision due à l'instrument pour une observation altimétrique, évaluée à $\pm 14,8 \text{ mm}^{(7)}$

$\hat{\sigma}_{pointé}$ = précision du pointé de l'opérateur, évaluée à $1''$ d'arc pour une distance de 500 mètres, soit $\pm 2,4 \text{ mm}^{(8)}$

$\hat{\sigma}_{cible}$ = précision du positionnement de la cible découlant du centrage et de sa verticalité, évaluée à $\pm 1,5 \text{ mm}^{(9)}$.

On aura donc :

$$\hat{\sigma}_{Z\text{-terrain}} = \pm 25 \text{ mm} \quad (ii)$$

Précision d'une mesure photogrammétrique d'un point de détail

Dans le cas extrême où le contrôle photogrammétrique est constitué seulement de points établis par relevé polaire à partir des repères permanents du réseau géodésique provincial, l'ellipse d'erreur relative de ces points affecte nécessairement la précision finale d'une mesure photogrammétrique qui est tributaire de la qualité du contrôle photogrammétrique.

Ainsi donc, la précision planimétrique d'une mesure photogrammétrique d'un point de détail s'exprime comme suit :

$$\hat{\sigma}_{XY\text{-photog.}} = (\hat{\sigma}_{XY\text{-terrain}}^2 + \hat{\sigma}_{photo.}^2 + \hat{\sigma}_{diapos.}^2 + \hat{\sigma}_{pug}^2 + \hat{\sigma}_{inst./pointé}^2)^{1/2}$$

⁽⁶⁾ *Op. cit.*, note 1.

⁽⁷⁾ *Op. cit.*, note 3.

⁽⁸⁾ *Op. cit.*, note 4.

⁽⁹⁾ *Op. cit.*, note 1.

où :

$\sigma_{XY\text{-photog.}}$ = précision planimétrique d'une mesure photogrammétrique d'un point de détail

$\sigma_{XY\text{-terrain}}$ = précision planimétrique d'un point de détail relevé par station totale, évaluée à $\pm 34,0$ mm⁽¹⁰⁾

$\sigma_{\text{photo.}}$ = imprécision de la photographie aérienne (lentille de la chambre de prise de vues aériennes, émulsion, ...)⁽¹¹⁾, évaluée à ± 5 μm à l'échelle de la photographie pour une chambre de prise de vues aériennes Wild RC-20, soit $\pm 12,0$ mm pour une photographie à l'échelle de 1 : 2 400

$\sigma_{\text{diapos.}}$ = imprécision due à la déformation de l'image positive par rapport à l'original négatif, évaluée à ± 7 μm à l'échelle de la photographie⁽¹¹⁾, soit $\pm 16,8$ mm pour une photographie à l'échelle de 1 : 2 400

σ_{pug} = imprécision découlant du transfert des points photogrammétriques (pug), évaluée à ± 10 μm à l'échelle de la photographie⁽¹¹⁾, soit $\pm 24,0$ mm pour une photographie à l'échelle de 1 : 2 400

$\sigma_{\text{inst./pointé}}$ = imprécision due à l'instrument et au pointé de l'opérateur à l'occasion d'une mesure, évaluée à ± 3 μm à l'échelle de la photographie⁽¹¹⁾, soit $\pm 7,2$ mm pour une photographie à l'échelle de 1 : 2 400.

On aura donc :

$$\sigma_{XY\text{photog.}} = \pm 47 \text{ mm} \quad (iii)$$

De même, la précision altimétrique d'une mesure photogrammétrique d'un point de détail s'exprime comme suit :

$$\sigma_{Z\text{photog.}} = \left(\sigma_{Z\text{-terrain}}^2 + \sigma_{\text{photo.}}^2 + \sigma_{\text{diapos.}}^2 + \sigma_{\text{pug}}^2 + \sigma_{\text{inst./pointé}}^2 \right)^{1/2}$$

⁽¹⁰⁾ Voir (j), p. 10.

⁽¹¹⁾ Québec. Bureau de la cartographie et des arpentages. *Normes générales pour les produits géodésiques*. Québec, 1984, 53 p.

où :

$\sigma_{XY\text{-photog.}}$ = précision altimétrique d'une mesure photogrammétrique d'un point de détail

$\sigma_{Z\text{-terrain}}$ = précision altimétrique d'un point de détail relevé par station totale, évaluée à $\pm 25,0$ mm⁽¹²⁾

$\sigma_{\text{photo.}}$ = imprécision de la photographie aérienne (lentille de la chambre de prise de vues aériennes, émulsion, ...)⁽¹³⁾, évaluée à ± 5 μm à l'échelle de la photographie pour une chambre de prises de vues aériennes Wild RC-20, soit $\pm 12,0$ mm pour une photographie à l'échelle de 1 : 2 400

$\sigma_{\text{diapos.}}$ = imprécision due à la déformation de l'image positive par rapport à l'original négatif, évaluée à ± 7 μm à l'échelle de la photographie⁽¹³⁾, soit $\pm 16,8$ mm pour une photographie à l'échelle de 1 : 2 400

σ_{pug} = imprécision découlant du transfert des points photogrammétriques (pug), évaluée à ± 10 μm à l'échelle de la photographie⁽¹³⁾, soit $\pm 24,0$ mm pour une photographie à l'échelle de 1 : 2 400

$\sigma_{\text{inst./pointé}}$ = imprécision due à l'instrument et au pointé de l'opérateur à l'occasion d'une mesure, évaluée à ± 3 μm à l'échelle de la photographie⁽¹³⁾, soit $\pm 7,2$ mm pour une photographie à l'échelle de 1 : 2 400.

On aura donc :

$$\sigma_{XY\text{photog.}} = \pm 41 \text{ mm} \quad (iv)$$

Ainsi la précision d'une mesure photogrammétrique d'un point de détail est évaluée à ± 47 mm en planimétrie et à ± 41 mm en altimétrie.

Les précisions théoriques pour la mesure d'un point de détail sont résumées au tableau 2.

⁽¹²⁾ Voir (iii), p. 12.

⁽¹³⁾ Op. cit., note 11.

TABLEAU 2 : PRÉCISION THÉORIQUE D'UN POINT DE DÉTAIL		
Méthode	Précision en planimétrie	Précision en altimétrie
Levé conventionnel	± 34 mm	± 25 mm
Procédé photogrammétrique	± 47 mm	± 41 mm

La précision d'une mesure par procédé photogrammétrique étant tributaire de la précision du levé conventionnel utilisé pour l'établissement des points de contrôle photogrammétrique, ces résultats démontrent que, dans les cas extrêmes, l'écart théorique entre les deux méthodes sera d'environ 15 mm.

Dans les cas où les points géodésiques sont eux-mêmes balisés pour servir directement de contrôle photogrammétrique, la partie de l'imprécision liée à la mesure «terrain» d'un point de détail est éliminée, ce qui augmente de façon significative la qualité du travail final. Par expérience, nous pouvons affirmer que l'utilisation directe de ces points géodésiques représente en moyenne 30 % de l'ensemble du contrôle photogrammétrique d'un projet.

Cas pratique

À la suite de la livraison des deux premiers projets de modélisation par photogrammétrie, une étude portant sur la comparaison de coordonnées obtenues à partir de photographies aériennes, d'une part, et de levés conventionnels d'arpentage, d'autre part, a été réalisée. Cette étude avait pour but de confirmer l'intérêt de la méthode utilisée et de déterminer les améliorations à apporter au processus de production.

Afin de pouvoir juger de la précision d'une méthode par rapport à l'autre, 32 points planimétriques (X, Y) et 104 points altimétriques (Z) ont fait l'objet d'un levé conventionnel basé sur le réseau géodésique québécois : relevé polaire par stations totales et nivellement géométrique. Par la suite, ces mêmes points ont été captés à l'aide d'un stéréorestituteur d'ordre 1,5 à partir de photographies en couleurs à l'échelle 1 : 2 400. Les points planimétriques et les points altimétriques étaient tirés de deux projets et correspondaient à six couples de photographies. Les mesures ont été prises dans des conditions normales de production.

Les tableaux 3 et 4 présentent les écarts entre les mesures planimétriques et altimétriques d'un point de détail prises sur le terrain et par photogrammétrie.

**TABLEAU 3 : ÉCART ENTRE LES MESURES PLANIMÉTRIQUES D'UN POINT DE DÉTAIL PAR
LEVÉ SUR LE TERRAIN ET PAR PHOTOGRAMMÉTRIE**

NUMÉRO DU MODÈLE	N° DU POINT	ÉCART	
		ΔX ($X_t - X_{ph}$) (mètre)	ΔY ($Y_t - T_{ph}$) (mètre)
0108	1	0,020	0,000
0108	2	-0,010	-0,002
0108	3	-0,022	0,040
0208	1	0,010	-0,003
0208	2	-0,020	0,038
0208	3	-0,024	0,009
0208	4	0,011	0,039
0208	5	-0,001	-0,006
0208	6	0,000	-0,109
0208	7	0,016	-0,027
0208	8	-0,029	0,008
0208	9	0,013	-0,020
0208	10	0,015	-0,034
0208	11	0,032	-0,023
0208	12	-0,012	-0,044
0208	13	0,008	-0,052
0215	1	0,000	-0,014
0215	2	-0,004	-0,061
0215	3	-0,033	-0,078
0215	4	-0,009	-0,051
0215	5	-0,010	-0,052
0215	6	-0,018	-0,049
0215	7	-0,047	-0,067
0215	8	0,010	-0,054
0215	9	-0,014	-0,059
0215	10	-0,021	-0,027
0215	11	-0,089	-0,016
0215	12	-0,005	-0,042
0215	13	0,054	0,046
0215	14	-0,007	-0,040
0215	15	0,004	-0,007
0215	16	-0,028	-0,003
Moyenne des écarts (ΔX , ΔY)		$\pm 0,026$	$\pm 0,043$

TABLEAU 4 : ÉCART ENTRE LES MESURES ALTIMÉTRIQUES D'UN POINT DE DÉTAIL PAR LEVÉ SUR LE TERRAIN ET PAR PHOTOGRAMMÉTRIE

NUMÉRO DU MODÈLE	N° DU POINT	ΔZ ($Z_t - Z_{ph}$) (mètre)	NUMÉRO DU MODÈLE	N° DU POINT	ΔZ ($Z_t - Z_{ph}$) (mètre)	NUMÉRO DU MODÈLE	N° DU POINT	ΔZ ($Z_t - Z_{ph}$) (mètre)
0210	127	0,030	0207	86	0,060	0409	50	0,040
	128	0,014		87	0,056		51	0,034
	129	0,012		88	0,048		52	0,014
	130	0,003		89	0,048		53	0,011
	131	0,012		90	0,035		54	0,008
	132	-0,044		91	-0,025		55	0,021
	133	-0,044		92	-0,015		56	-0,001
	134	-0,016		93	-0,009		57	0,031
	135	0,010		94	-0,010		58	0,049
	136	0,016		95	-0,005		59	0,049
	137	0,029		96	0,013		60	0,043
	138	0,065		97	0,021		61	-0,002
	139	0,046		98	-0,013		62	-0,006
	140	0,063		99	0,001		63	-0,067
	141	0,077		100	0,004		64	-0,070
	142	0,032		101	0,018		65	-0,081
	143	0,023		102	0,024		66	-0,045
	144	0,048		103	0,053		67	-0,065
	145	0,039		104	0,033		78	-0,053
	146	0,047		105	0,026		79	-0,093
	147	0,047		106	0,060		80	-0,065
	148	0,068		107	0,034		81	-0,028
	149	0,062		108	0,048		162	-0,070
	150	0,068		109	0,055			
	152	0,034		111	0,043			
	153	-0,009		112	0,044			
	154	-0,018		113	0,040			
	155	0,028		114	0,028			
	156	0,005		115	0,051			
	157	0,001		116	0,018			
158	-0,007	117	0,017					
159	0,055	118	-0,005					
160	-0,064	119	-0,014					
161	-0,024	120	0,002					
162	-0,030	121	0,045					
163	-0,068	122	0,032					
164	0,028	123	0,032					
165	-0,054	124	0,021					
166	0,016	125	0,031					
167	-0,001	126	0,047					
168	0,003							

Moyenne des écarts (ΔZ) : $\pm 0,040$ mètre

La moyenne des écarts pour l'ensemble des observations est de $\pm 0,026$ m en X et $\pm 0,043$ m en Y, c'est-à-dire $\pm 0,050$ m en position, et $\pm 0,040$ m en Z. Bien que la position absolue des points de détail mesurés soit inconnue, la similitude de ces résultats pratiques avec les précisions théoriques (tableau 2) permet de confirmer la validité de la méthode photogrammétrique. À la suite de cette étude, des modifications ont été apportées au processus de production photogrammétrique en termes d'échelle et d'émulsion photographiques, d'équipements utilisés et des précisions exigées dans le processus d'aérotriangulation, ce qui améliore sans aucun doute la précision du produit final qui est maintenant réalisé.

D'un point de vue pratique, l'écart observé entre les deux méthodes est tout à fait négligeable dans le cas d'un projet de construction d'un nouvel axe routier étant donné qu'un plus grand nombre de points est capté à l'occasion de l'utilisation du procédé photogrammétrique. Ce phénomène entraîne une représentation tridimensionnelle du terrain plus fidèle que celle produite par levé conventionnel, puisque le modèle de surface est créé par rapport à un plus grand nombre de contraintes mieux réparties sur le territoire à modéliser. Toutefois, pour des travaux de réfection d'infrastructures où une partie de la chaussée existante peut être conservée, une attention particulière sera portée à l'étape de la planification du complément terrain de façon à livrer un produit final des plus adéquats.

APPORTS DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE DANS LA CONCEPTION D'UN PROJET ROUTIER

L'utilisation des MNT pour la conception d'un projet routier a démontré sans contredit qu'une telle méthode est beaucoup plus rentable, car elle évite les retours répétés sur le terrain pour la prise de mesures à l'occasion de modifications du tracé projeté et donne à l'ingénieur-concepteur plus de possibilités lors de la création des plans d'aménagement et de construction. Le procédé photogrammétrique mis au point au Service de l'arpentage et de la géomatique pour la réalisation des MNT permet des économies de l'ordre de 50 % par rapport aux coûts d'un levé conventionnel tout en assurant un produit de grande qualité. Cette méthode présente sans contredit de nombreux avantages :

- la saisie des données par procédé photogrammétrique s'effectue dans des conditions plus favorables que celles prévalant à l'occasion d'un relevé terrain conventionnel (sécurité des travailleurs, conditions atmosphériques, température, calibration et stabilité des instruments);
- le procédé photogrammétrique permet à l'opérateur qui doit saisir les données d'avoir une meilleure vue d'ensemble du territoire à modéliser qu'à l'occasion d'un relevé terrain, ce qui entraîne une interprétation plus facile et plus exacte des détails visibles et des sinuosités de la surface;
- la modélisation du terrain naturel à l'aide de ce procédé est plus fidèle puisque le nombre de points

saisis est supérieur d'environ 30 % par rapport au nombre de points saisis à l'occasion d'un relevé conventionnel sur le terrain;

- le principe mathématique d'aérotriangulation permet une plus grande homogénéité quant à la qualité des coordonnées prélevées par rapport à la méthode conventionnelle qui nécessite de multiples cheminements polygonaux;
- la photographie aérienne pouvant montrer les marques d'occupation des divers propriétaires fonciers, l'intervention sur le terrain de l'arpenteur-géomètre pour ses besoins d'analyse foncière peut être réduite considérablement en procédant au captage de ces éléments à l'étape de la réalisation du modèle numérique.

Bien que l'utilisation de la photogrammétrie se révèle rentable et efficace pour la plupart des projets de conception, il pourrait arriver qu'en fonction des caractères spécifiques de certains projets tels que la quantité de détails requis et la densité de la végétation ou du boisé, il s'avère plus judicieux d'effectuer un levé sur le terrain pour recueillir l'information. Une analyse de rentabilité effectuée à partir des coûts de production réels des deux méthodes a démontré que pour un projet standard, le procédé photogrammétrique est plus rentable dès que ce projet a une longueur supérieure à 600 mètres.

Toutefois, l'utilisation du procédé photogrammétrique est sujette à une contrainte majeure, à savoir la planification des travaux, car la prise de photographies aériennes doit être faite à une période spécifique de l'année qui est déterminée en fonction des caractéristiques de chaque projet.

En conclusion, la modélisation de terrain effectuée à partir de photographies prises à basse altitude permet de fournir un produit numérique de précision adéquate à l'ingénieur-concepteur. En effet, l'étude métrique qui a été réalisée a démontré que, dans un cas extrême, l'écart de précision entre les mesures photogrammétriques et les mesures conventionnelles par stations totales pour un point de détail est d'environ 15 mm, tant en planimétrie qu'en altimétrie. Compte tenu des améliorations techniques qui ont été apportées depuis le test pratique, des avantages découlant du procédé photogrammétrique en termes de densité des points captés ainsi que des conditions opératoires idéales au moment des prises de mesures, le produit final est de qualité équivalente ou supérieure au produit réalisé par méthode conventionnelle.

MINISTÈRE DES TRANSPORTS



QTR A 056 803