

Guide d'assurance de la qualité

—

photogrammétrie et génération de MNT

Groupe de travail sur l'assurance de la qualité :
photogrammétrie et génération de MNT

Juillet 2000

Table des matières

1.	Introduction.....	4
1.1.	Objectif	4
1.2.	Structure	5
1.3.	Principes directeurs	5
1.4.	Rapport de l'adjudicataire	5
1.5.	Documentation	5
2.	Appel d'offres du projet	6
2.1.	Vérifications préliminaires	6
2.1.1.	Conflits d'objectifs	6
2.1.2.	Exigences d'ordre général	8
2.2.	Avant-projet / descriptif du projet	8
2.2.1.	Description de l'état existant	8
2.2.2.	Exigences posées au projet	8
2.2.3.	Descriptif des prestations (spécifications techniques pour l'appel d'offres)	9
2.3.	Remarques relatives à l'appel d'offres	9
3.	Signalisation et vol photogrammétrique.....	11
3.1.	Méthodes	11
3.2.	Points critiques	11
3.3.	Exigences	12
3.4.	Recommandations	17
3.5.	Méthodes et mesures de l'AQ	17
3.5.1.	Planification	17
3.5.2.	Vol photogrammétrique	18
3.5.3.	Détermination des points de calage	18
3.6.	Documentation	19
4.	Scannérisation	20
4.1.	Méthodes	20
4.2.	Points critiques	20
4.3.	Exigences	22
4.3.1.	Processus de scannérisation	22
4.3.2.	Remise des données	22
4.4.	Recommandations	23

4.5.	Méthodes et mesures de l'AQ	24
4.5.1.	Appel d'offres du projet / soumission	24
4.5.2.	Acceptation de scannérisations de test	24
4.6.	Documentation	24
5.	Aérotriangulation.....	25
5.1.	Méthodes	25
5.2.	Points critiques	26
5.3.	Exigences	27
5.4.	Recommandations	28
5.5.	Méthodes et mesures de l'AQ	28
5.6.	Documentation	29
6.	Génération de MNT	31
6.1.	Distinctions entre MN(A), MNT et MNS	31
6.2.	Méthodes	31
6.3.	Points critiques	34
6.4.	Exigences	35
6.5.	Méthodes et mesures de l'AQ	35
6.5.1.	Examen formel des données remises	36
6.5.2.	Tests de vraisemblance sur le modèle	37
6.5.3.	Examen de la précision et de la fiabilité	39
6.6.	Documentation	40
7.	Génération d'orthophotos	42
7.1.	Méthodes	42
7.2.	Points critiques	42
7.2.1.	Redressement différentiel	42
7.2.2.	Génération de mosaïques	44
7.3.	Exigences	45
7.4.	Recommandations	48
7.5.	Méthodes et mesures de l'AQ	48
7.5.1.	Examen formel	48
7.5.2.	Examen de la précision	49
7.6.	Documentation	49
8.	Restitutions.....	51
8.1.	Méthodes	51
8.2.	Points critiques	52
8.3.	Recommandations	53

Avant-propos

Les travaux visant à la rédaction de ce guide ont été initialement entrepris par le groupe de travail ad hoc mentionné ci-après, créé sous l'impulsion des professionnels concernés par la question. Dans le même temps, les demandes émanant de ses rangs ont poussé la Conférence des services cantonaux du cadastre (CSCC) à mettre en place un groupe de travail pour traiter sensiblement du même sujet. A la suite de cette décision, une réunion tenue avec la commission technique de la CSCC a permis de dégager une solution, consistant à donner un mandat officiel de la CSCC au groupe de travail préexistant pour l'étude de ce problème.

Membres du groupe de travail "Assurance de la qualité : photogrammétrie et génération de MNT" :

- Prof. Dr Stephan Nebiker, Ecole d'ingénieurs des cantons de Bâle (FHBB)
- Marc Amsler, Ecole d'ingénieurs des cantons de Bâle (FHBB) et terra Vermessungen (depuis janv. 2000)
- Hans Hägler, Service cantonal des mensurations et des améliorations foncières de Bâle-Campagne
- Christoph Käser & Stéphane Bovet (depuis le 1.7.99), Office fédéral de topographie
- Ueli Maag & Stéphane Bovet (jusqu'au 30.6.99), Service cantonal du cadastre de Berne

1. Introduction

1.1. Objectif

Le guide doit permettre aux mandants et aux adjudicataires de garantir la qualité aussi bien des techniques photogrammétriques mises en œuvre que des données et des produits qui en découlent. Il doit également permettre d'en déduire des exigences à satisfaire par des projets de tous types, ceux de la mensuration officielle en particulier. Dans ce dernier cadre, la saisie et la mise à jour des couches d'information de la couverture du sol, des objets divers et des éléments linéaires ainsi que de l'altimétrie semblent particulièrement concernées.

Le mandant a la possibilité :

- de formuler de manière adéquate l'objectif poursuivi par un projet
- de définir les produits avec la plus grande exactitude possible
- de spécifier clairement les exigences à respecter en matière de précision et de fiabilité
- de contrôler le respect de ces exigences

Le présent guide fournit aux adjudicataires :

- le document de base pour la description de la solution technique retenue et de la méthode envisagée, pour autant que le choix de celle-ci soit libre

- la possibilité d'élaborer une liste de vérification contenant les mesures d'assurance de la qualité les plus actuelles et de contrôler efficacement son propre travail

1.2. Structure

La structure du guide reflète la succession des étapes du processus photogrammétrique :

- appel d'offres du projet
- signalisation et vol photogrammétrique
- scannérisation
- aérotriangulation
- génération de MNT
- génération d'orthophotos
- restitutions

1.3. Principes directeurs

Libre choix des méthodes

Le choix des méthodes doit autant que possible être laissé à l'appréciation de l'adjudicataire, les restrictions devant se limiter à décrire les données et les produits concernés par le projet.

Contrôles effectués par l'adjudicataire

Les principes de gestion de la qualité imposent que l'accent soit clairement mis sur les contrôles effectués par les soins de l'adjudicataire ainsi que sur les preuves qu'il doit apporter du respect effectif de la précision et de la fiabilité requises. De son côté, le mandant doit exiger la livraison de documents appropriés, servant à établir le respect des critères de qualité, dès le stade de l'appel d'offres du projet.

1.4. Rapport de l'adjudicataire

Dans son rapport décrivant le déroulement des travaux, l'adjudicataire est tenu de définir en détail les méthodes choisies et de préciser l'instrumentation utilisée à cette fin. Il doit en outre y consigner toutes les décisions qu'il aura prises, les contrôles qu'il aura effectués en vue de garantir la qualité tout au long de la progression des travaux de même que les résultats finaux. Il doit enfin mentionner tout écart par rapport au descriptif présenté et approuvé des travaux.

La rédaction du rapport de l'adjudicataire, à concevoir de manière modulaire, doit s'effectuer au fil de l'avancement des travaux, de façon que les parties concernées puissent être jointes à des dossiers d'approbation ou à des vérifications intermédiaires.

1.5. Documentation

Dans les chapitres suivants, les documents à produire sont répertoriés sous la rubrique 'Documentation'.

2. Appel d'offres du projet

2.1. Vérifications préliminaires

2.1.1. Conflits d'objectifs

Aujourd'hui, les projets photogrammétriques poursuivent de plus en plus fréquemment des buts multiples. La mise à jour périodique des couches d'information de la couverture du sol, des objets divers et des éléments linéaires ainsi que de l'altimétrie en constitue la parfaite illustration, puisque des orthophotos numériques sont requises dans le même temps. Des conflits d'objectifs résultent toutefois de tels projets, mais un choix judicieux des paramètres suivants permet de les résoudre ou au moins de les minimiser :

- époque à laquelle le vol photogrammétrique doit s'effectuer
- choix de l'objectif, échelle des clichés
- recouvrement
- résolution de la scannérisation

Epoque à laquelle le vol photogrammétrique doit s'effectuer

Le conflit d'objectifs s'exprime ici de la manière suivante :

- Un survol effectué en dehors de la période de feuillaison garantit une bonne visibilité au sol dans les régions couvertes de forêts de feuillus, ce qui permet de restituer des informations telles que les chemins en sous-bois. Un survol effectué à cette époque comporte toutefois un risque de couverture neigeuse sur certaines parties des clichés, principalement en altitude ou dans le cas de chutes de neige tardives.
- Un survol durant la période de feuillaison est en revanche garant de 'belles' et vives couleurs et offre en outre la possibilité de déterminer plus facilement le type de la végétation.

Un survol au printemps ou en été est par conséquent indiqué dans le cas de projets pour lesquels la production d'orthophotos de qualité optimale sur le plan de la couleur est essentielle.

Dans certains cas, un survol simultané utilisant plusieurs capteurs permet d'atteindre différents buts en même temps, en réalisant par exemple des prises de vues en couleur pour les orthophotos et des prises de vues en infrarouge couleur pour l'étude de la végétation.

Choix de l'objectif, échelle des clichés

Le choix de l'objectif influence d'une part le déplacement radial d'ouvrages d'art sur les orthophotos et d'autre part la précision altimétrique atteignable dans la génération de MNT ou la stéréorestitution :

- L'utilisation d'une focale plus longue entraîne une réduction du déplacement radial sur l'orthophoto, raison pour laquelle l'utilisation d'objectifs normaux ou intermédiaires ($c_k = 210 - 300 \text{ mm}$) est avantageuse pour la génération d'orthophotos.
- L'utilisation d'objectifs à ouverture supérieure ou à distance focale plus courte (par exemple $c_k = 150 \text{ mm}$) permet d'augmenter la précision altimétrique atteignable. Cette amélioration se remarque essentiellement lors de la stéréorestitution interactive.

Dans le cas de projets pour lesquels les exigences en matière de précision altimétrique et de déplacements radiaux des objets sont élevées, un survol utilisant simultanément des chambres de focales différentes constitue une possibilité méritant d'être testée.

Zone/niveau de tolérance	Distance principale (c_K)	Echelle du cliché (m_B)
Zone urbanisée	300 mm	4000 – 6000
NT3, NT4	210 mm ou 300 mm	8000 – 12'000
NT4, NT5	Comprise entre 150 et 210 mm	20'000 – 30'000
Couche altimétrie (tous NT)	150 mm (– 300 mm)	

Tableau 1 : Distances focales d'objectifs et échelles de clichés usuelles pour des applications en mensuration officielle et à différents niveaux de tolérance

Recouvrement

La détermination du recouvrement latéral constitue généralement le point le plus délicat de la définition du recouvrement des clichés :

- Un recouvrement latéral traditionnel de 20-30% permet le survol économique d'une zone en minimisant le nombre des clichés. Un faible recouvrement latéral comporte toutefois des inconvénients, parmi lesquels :
 - un déplacement radial important pour la génération des orthophotos, perpendiculairement à la direction de vol
 - des écarts de luminosité potentiellement forts entre bandes de clichés voisines pouvant entraîner des difficultés lors du mosaïquage (ce problème est particulièrement aigu dans le cas de survols E-O, un survol N-S permettant de l'atténuer grandement) (cf. § 7 – Génération d'orthophotos)
 - un accroissement du nombre de zones non visibles (angles morts), particulièrement en région montagneuse
 - une forte dépendance de la précision et de la fiabilité altimétriques par rapport à la configuration des points de calage altimétriques dans des groupes de clichés ou la nécessité d'avoir une forte densité de points de calage altimétriques (dans le cas d'un vol effectué sans l'appui du GPS).
- Des recouvrements latéraux plus importants conduisent à une géométrie de bloc plus stable et par suite, à une précision et à une fiabilité altimétriques plus élevées, réduisant simultanément les déplacements radiaux et les angles morts. Un recouvrement latéral plus élevé signifie également un surcroît de travail au niveau du vol photogrammétrique (nombre de clichés, volume de données, coûts), le temps supplémentaire requis pouvant constituer un paramètre d'importance, en particulier pour les projets d'une certaine ampleur.

Résolution de la scannérisation

Il existe enfin un conflit d'objectif au niveau de la détermination de la résolution de la scannérisation. Par le passé, celle-ci était volontairement limitée en raison des volumes de données produits par l'opération. On admettait par conséquent des pertes au niveau du contenu de l'image résultante de même qu'une légère réduction de la précision de détermination des points. Même si les précisions atteignables n'augmentent pas de manière linéaire avec la résolution de scannérisation, il convient de se demander, compte tenu de la disponibilité de capacités de stockage toujours plus grandes, s'il ne serait pas opportun d'utiliser une résolution géométrique élevée pour la scannérisation dans le cas

de projets d'importance à long terme.

2.1.2. Exigences d'ordre général

Subdivision du projet

Si une exécution par étapes ou une subdivision en projets partiels doit être entreprise dans le cas de projets d'une certaine ampleur, il convient de veiller à une définition claire des responsabilités et des interfaces de même qu'à un déroulement fluide du projet.

Ainsi, il est par exemple judicieux de confier la responsabilité des prises de vues et du processus de scannérisation consécutif à un même adjudicataire, lequel est alors clairement responsable de la mise à disposition d'images numériques irréprochables. Cette mesure doit également garantir que la scannérisation s'effectue rapidement après le vol photogramétrique, avec des clichés totalement actuels.

Phases du projet et liens d'interdépendance

La plupart des étapes de travail du processus photogramétrique dépendent directement les unes des autres. Il convient par conséquent de garantir :

- que des vérifications intermédiaires sont entreprises
- que ces vérifications intermédiaires ou les acceptations de phases du projet interviennent rapidement et au terme des étapes concernées
- qu'aucune tâche n'est démarrée avant la vérification et la validation de l'étape précédente.

2.2. Avant-projet / descriptif du projet

Les éléments suivants comptent parmi les plus importants de l'avant-projet :

- la description de l'état existant
- la formulation des exigences auxquelles le projet est soumis, en particulier concernant la précision et la fiabilité
- la description des prestations (spécifications techniques pour l'appel d'offres), descriptif des produits compris
- une estimation sommaire des coûts et la définition des bases de règlement afférentes

2.2.1. Description de l'état existant

- Historique de la mensuration officielle et description de son état actuel, en particulier des données numériques existantes (par exemple leur qualité, actualité, intégralité, cohérence, format).
- Description d'autres conditions à respecter (exemple : points obligatoires pour l'exécution du travail, système et intensité de mise à jour, nécessité d'une coordination avec d'autres travaux, problèmes existants connus).

2.2.2. Exigences posées au projet

- Indication de prescriptions fédérales et cantonales en vigueur à respecter
- Catalogue des données de base du canton, formats de données, interfaces de données pour les différents produits photogramétriques

- Périmètre à traiter
- Directives d'ordre supérieur à respecter concernant les méthodes, le calendrier, les paramètres, etc.
- Exigences particulières (par exemple la nécessité d'une coordination avec d'autres travaux)

2.2.3. Descriptif des prestations (spécifications techniques pour l'appel d'offres)

Elles sont à répertorier dans l'ordre de leur intervention dans le processus photogramétrique. Le descriptif doit fournir une information suffisante à l'adjudicataire concernant les travaux à réaliser. Toutes les directives relatives au processus doivent être décrites avec clarté et ne laisser aucune question en suspens. Elles sont dérivées des phases du processus (cf. § 1.2). Les directives comprennent également les produits associés.

Le descriptif des prestations tient compte des aspects financiers et établit un lien si possible simple vers un formulaire d'offre. Une liste des éléments constitutifs du prix est à dresser dans le descriptif des prestations et leur nombre estimé est à indiquer.

Le descriptif des prestations se clôt par la définition des livraisons, incluant les formats de données exigés, les supports de données, etc.

2.3. Remarques relatives à l'appel d'offres

Les remarques suivantes concernant la procédure d'un appel d'offres et les exigences auxquelles il est soumis constituent des indications à caractère général. Elles sont à examiner en fonction de la législation s'appliquant au cas concerné (Confédération, canton, commune).

Outre les spécifications techniques, les informations suivantes font partie intégrante d'un appel d'offres :

- législation s'appliquant à l'appel d'offres
- nom et adresse du service adjudicateur
- désignation d'un centre de renseignement
- type de procédure prévue (ouverte, sélective, de gré à gré)
- objet et ampleur du mandat, variantes et travaux annexes
- délais d'exécution et de livraison
- langue dans laquelle s'effectue la procédure d'attribution
- exigences économiques, techniques, écologiques, garanties et informations financières requises (exemple : profil de l'entreprise, sous-traitants connus, références, solution technique, confirmation des délais)
- critères de qualification et autres critères
- autres éléments objectifs à prendre éventuellement en compte lors de l'attribution du marché
- déclaration de l'adjudicataire par laquelle il s'engage à remplir toutes ses obligations envers l'Etat, les organismes de sécurité sociale et son personnel
- lieu et date limite de dépôt des offres
- durée de validité de l'offre

- conditions de paiement
- dispositions contractuelles générales, le cas échéant

Une énumération détaillée de tous les documents transmis est à joindre aux documents de l'appel d'offres.

Un délai convenable est à accorder aux soumissionnaires pour formuler leur offre ; il est généralement de 4 à 5 semaines et court de la publication (ou communication directe) de l'appel d'offres au dépôt du dossier.

3. Signalisation et vol photogrammétrique

3.1. Méthodes

Planification

La planification de la signalisation et du vol photogrammétrique peut d'ordinaire s'effectuer suivant une procédure unique. Les points suivants requièrent toutefois des aménagements par rapport à la procédure standard :

- planification des points de calage : les exigences ne sont pas les mêmes suivant que le survol s'effectue avec ou sans l'assistance du GPS
- choix de la taille des signaux : les signaux sont de taille différente selon que l'aérotriangulation consécutive s'effectue avec un appareil de restitution analytique ou numérique

Réalisation

L'utilisation éventuelle du GPS pour la navigation du vol voire pour le positionnement précis du capteur (cf. également le chapitre consacré à l'aérotriangulation) influe directement sur l'exécution des survols photogrammétiques, par le biais des éléments suivants :

- vol photogrammétrique avec / sans navigation (D)GPS
- précision de la navigation : DGPS 1-5 m, GPS 50 (-100) m
- commande de l'avion par pilote automatique ou non

3.2. Points critiques

Les éléments suivants constituent des points critiques lors de la planification et de la réalisation d'un vol photogrammétrique :

Précision et fiabilité de la configuration des points de calage altimétriques

Dans le cas de vols photogrammétiques effectués sans l'assistance du GPS, l'expérience montre que la précision et la fiabilité atteintes dans la détermination des altitudes du bloc de clichés constituent des points critiques. C'est la raison pour laquelle une attention particulière doit être portée à la répartition et à la détermination des points de calage altimétriques.

Effet de filé

En photogrammétrie aérienne, les déplacements relatifs des chambres de prise de vues en mouvement par rapport aux objets stationnaires à saisir sont considérables. Ces déplacements relatifs causent un effet de filé sur le cliché dans la direction du vol, lequel est fonction de la vitesse de l'avion, du temps d'exposition et de l'échelle du cliché. La chambre photogrammétrique utilisée devrait par conséquent être équipée d'un dispositif de compensation du filé (FMC = forward motion compensation) dans le cas de vitesses de prises de vues élevées combinées à de grandes échelles de clichés.

Commande de l'exposition

La commande optimale de l'exposition constitue l'un des points les plus délicats et les plus

exigeants de la prise de vues, raison pour laquelle il s'agit d'une tâche réservée aux experts en la matière. Les deux possibilités suivantes sont envisageables :

- **Commande automatique de l'exposition** : elle ne pose généralement pas de problème lorsque la texture est relativement régulière sur l'ensemble du projet (prairie / forêt) et est par conséquent à privilégier dans un tel cas.
- **Commande manuelle de l'exposition ou conservation des valeurs d'exposition** : dans le cas de prises de vues comportant des surfaces en eaux assez étendues (en bordure de lac par exemple), la commande automatique de l'exposition peut conduire à des écarts radiométriques très prononcés entre clichés adjacents. Ces écarts exercent une influence négative sur les étapes ultérieures du traitement (par exemple la génération de MNT et d'orthophotos) pouvant aller, dans le pire des cas, jusqu'à rendre leur exécution impossible. Le problème de la commande de l'exposition se pose également dans des zones fortement urbanisées présentant d'importantes différences de luminosité entre des surfaces très réfléchissantes (telles que des toits) et d'autres parties de l'image, sombres et dans l'ombre. La commande manuelle de l'exposition ou la conservation de valeurs d'exposition prédéfinies est de ce fait à privilégier pour des projets présentant des caractéristiques de ce type.

Films

En règle générale, le choix du type de film le plus approprié pour un vol photogramétrique doit se fonder sur le savoir-faire acquis dans ce domaine par l'entreprise en charge du survol. Les critères de sélection comprennent :

- la stabilité dimensionnelle
- film couleur : la reproduction des couleurs (attention : des problèmes radiométriques sont possibles si des films de fabricants différents sont utilisés, particulièrement dans le cas de projets échelonnés dans le temps)
- l'utilisation de films noir et blanc pour les exigences géométriques les plus élevées
- les exigences à satisfaire par le développement (laboratoire spécialisé, durée, présence de salissures sur les négatifs originaux ou les diapositives, etc.)

3.3. Exigences

Les exigences à satisfaire par la planification du vol photogramétrique et de la signalisation résultent normalement des **exigences posées aux produits finaux** d'un projet de photogrammétrie, par exemple de la résolution géométrique des orthophotos ou de la précision des informations altimétriques à saisir (cf. également les remarques relatives aux conflits d'objectifs potentiels du § 2.1.1).

Les exigences formulées visent à atteindre :

- la géométrie de prise de vues souhaitée (objectif normal, grand-angle, etc.)
- la précision et la fiabilité requises
- la résolution géométrique souhaitée sur les images numérisées
- le contenu d'informations désiré sur les clichés (couleur, terrain, végétation, etc.)

De ces impératifs résultent :

- la date propice pour le vol photogramétrique
- la focale de l'objectif

- l'échelle des clichés
- la hauteur de vol et éventuellement le type de l'avion
- le recouvrement longitudinal et latéral
- la densité des points de calage
- le type de film

Certains de ces aspects vont à présent être traités un peu plus en détail :

Date propice pour le vol photogrammétrique

Parmi les aspects à prendre en compte dans la détermination du moment le plus opportun pour effectuer le vol photogrammétrique, on peut citer :

- la présence ou l'absence de végétation
- l'état de la végétation (en particulier dans le cas de prises de vues en infrarouge)
- la couverture neigeuse
- la longueur des ombres (heure du jour et saison)
- la visibilité à l'ombre
- les plages hyperlumineuses (cf. § 7.2.2)

Plan de vol

Le plan de vol doit intégrer les éléments suivants :

- le périmètre du projet
- l'échelle des clichés
- les lignes de vol numérotées avec l'inscription des hauteurs de vol
- la première et la dernière position de cliché pour chaque ligne de vol
- le recouvrement longitudinal (en %)
- la distance principale à utiliser
- le type de film à utiliser (NB, C, IR)

Densité et répartition des points de calage

La densité de points de calage requis et surtout la configuration des points de calage altimétriques sont très fortement dépendantes du recouvrement latéral (RLat) choisi ainsi que de l'utilisation ou non du GPS lors du vol. Aucune directive précise ne doit donc être imposée concernant le nombre de points de calage à signaler, pour ne pas entraver la liberté de choix au niveau de la méthode.

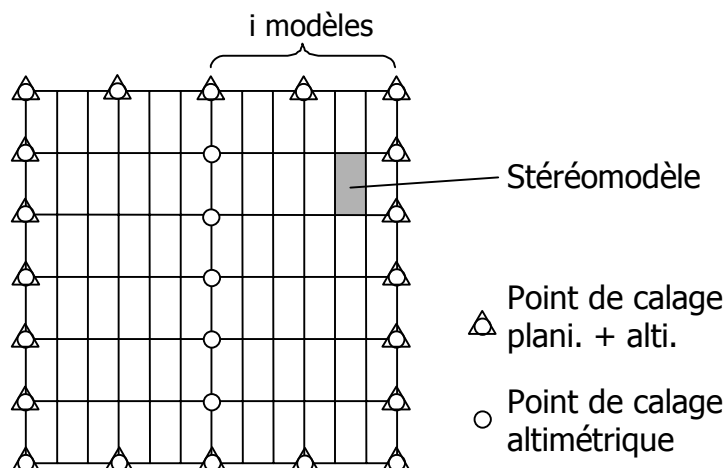


Figure 1 : Répartition des points de calage dans un bloc sans assistance du GPS avec un recouvrement latéral de 20%

Survol	Grandeurs des facteurs d'influence et exigences
RLat < 50 % / sans GPS	Dans le cas de survols avec des recouvrements latéraux de 20 à 30%, les points de calage altimétriques au sein du bloc devraient se présenter sous forme de traverses de points de calage, perpendiculaires à la direction de la bande (cf. Figure 1). La précision altimétrique résultante dans le bloc est alors principalement fonction de la distance i entre les traverses de points de calage altimétriques (i = nombre de stéréomodèles entre deux traverses). Les formules simplifiées suivantes permettent d'estimer l'ordre de grandeur moyen ($\sigma_{B,Z,Moyen}$) et maximal ($\sigma_{B,Z,Max}$) de l'erreur moyenne altimétrique à craindre dans un bloc (Kraus, tome 1). $\sigma_{B,Z,Moyen} = (0.34 + 0.22 \cdot i) \cdot \sigma_{M,Z}$ $\sigma_{B,Z,Max} = (0.27 + 0.31 \cdot i) \cdot \sigma_{M,Z}$ L'erreur moyenne altimétrique dans un modèle isolé ($\sigma_{M,Z}$) sert de base de calcul, les valeurs indicatives suivantes pouvant être utilisées : • photogrammétrie analytique : $\pm 0.03 \text{ ‰ } h_G$ • photogrammétrie numérique : $\pm 0.03 - 0.05 \text{ ‰ } h_G$ Exigences • La distance prévue entre traverses de points de calage altimétriques doit permettre de satisfaire les exigences en matière de précision altimétrique (par exemple pour la génération ultérieure de MNT). • Les points de calage altimétriques sont si possible à placer dans les zones de recouvrement entre bandes. • La configuration des points de calage doit également tenir compte d'aspects liés à la fiabilité (points de calage isolés

	inutilisables, invisibles ou faux). Des points de calage supplémentaires (double signalisation, par exemple) doivent donc être prévus à cet effet.
RLat > 50 % / sans GPS	Exigences Dans le cas d'un recouvrement latéral supérieur à 50%, l'exigence d'implantation de traverses de points de calage altimétriques avec des points de calage dans chaque zone de recouvrement de bandes se transforme en exigence d'implantation d'un quadrillage de points de calages altimétriques régulièrement répartis. Dans ce quadrillage, la distance entre points devrait être au plus de i modèles, par analogie aux calculs précédents.
Avec assistance du GPS	Exigences - Nombre de points de calage réduit, aucun point de calage altimétrique n'est théoriquement requis en milieu de bloc. - Toutefois, l'utilisation de plusieurs points de calage répartis sur l'ensemble du périmètre est vivement recommandée pour détecter voire éviter des erreurs systématiques dans les paramètres de transformation de coordonnées, dans les coordonnées des stations de référence GPS, etc. et pour permettre un contrôle indépendant des précisions atteintes.

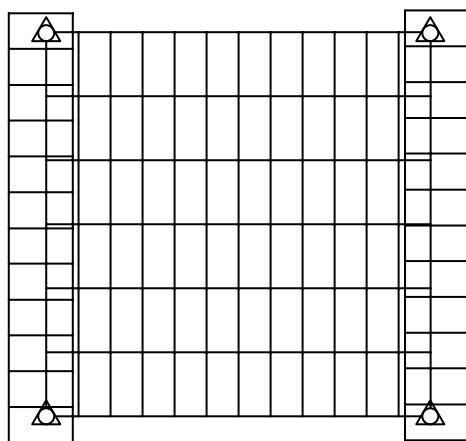


Figure 2 : Répartition des points de calage dans un bloc avec assistance du GPS et bandes latérales

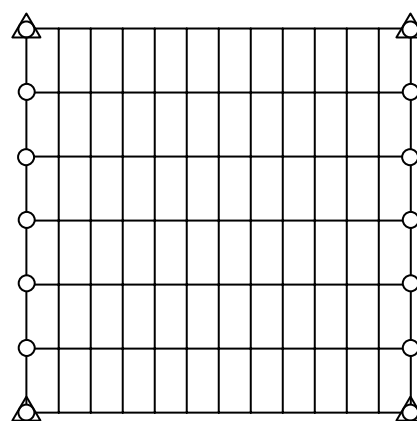


Figure 3 : Répartition des points de calage dans un bloc avec assistance du GPS sans bandes latérales

Groupes de points de calage

L'utilisation de groupes de points de calage altimétriques à la place de points de calage isolés permet d'augmenter le degré de fiabilité tout en ne requérant qu'un volume de travail supplémentaire relativement modeste. Les groupes de points de calage sont particulièrement indiqués lorsque des obstructions (trafic) ou des obstacles à la visibilité (bâtiments, végétation) sont à craindre.

Détermination des points de calage

Les aspects suivants devraient être pris en compte lors de la détermination des points de calage par des méthodes géodésiques :

- garantir la fiabilité par des dispositions adéquates (par exemple par une double détermination)
- garantir le meilleur rattachement possible à des réseaux de points fixes existants sur l'ensemble du périmètre du projet
- veiller à une documentation soignée d'éventuelles mesures de décalages, en particulier la détermination des cotes
- archiver les coordonnées des points de calage et les croquis de repèrment associés pour une réutilisation lors de survols ultérieurs.

Taille du signal

La taille du signal dépend de l'échelle des photos, du contraste et du type de restitution retenu pour les clichés (analogique ou numérique). Du fait de l'irradiation, les signaux artificiels sont représentés sur les clichés avec un diamètre supérieur à leur diamètre effectif (agrandis de 1,5 à 3 fois, suivant le contraste).

- photogrammétrie analogique (données analogiques)
 - pour la restitution analogique de clichés, la taille est d'environ 50 μ m pour les signaux sur la photo.
 - **règle empirique** : diamètre du signal d [cm] = $m_B / 300$ à 600 (le dénominateur est variable pour tenir compte de différences de contraste)
 - exemples :
 - vol photo. à petite échelle $m_B = 30'000 \Rightarrow d = 50 - 100$ cm
 - vol photo. à grande échelle $m_B = 4'000 \Rightarrow d = 7 - 13$ cm
- photogrammétrie numérique (données numériques)
 - la taille du signal est fonction de l'échelle du cliché et de la résolution de la scannérisation
 - **règle empirique** : diamètre d'environ 3 pixels
 - exemples :
 - $m_B = 7'000 \Rightarrow d = 25$ cm (environ)
 - $m_B = 10'000 \Rightarrow d = 50$ cm (environ)
 - $m_B = 30'000 \Rightarrow d = 100$ cm (environ)

Signalisation

Lors de la signalisation, il convient de veiller à un bon contraste entre le signal et l'arrière-plan. Ainsi, les surfaces bitumées décolorées par les intempéries peuvent au besoin être enduites d'une couche de fond noire.

Assistance du GPS

Il doit être tenu compte des aspects suivants pour les vols photogramétriques ayant recours au GPS :

- utiliser si possible deux stations de référence GPS (pour des raisons de sécurité en cas de panne sur l'une des stations)
- les stations GPS devraient se trouver dans le périmètre du projet dans le cas d'exigences de précision élevées ou de grandes échelles des clichés

- la station de référence doit être intégrée au réseau des points de calage (système de référence homogène) lors de la détermination des coordonnées
- un modèle de géoïde précis est à utiliser pour la restitution des altitudes à partir du positionnement GPS
- le décalage de la chambre de prise de vues est à documenter (GPS – centre de projection de la chambre)
- une restitution indépendante est éventuellement à effectuer avec une deuxième station de référence, une comparaison de coordonnées étant alors à réaliser.

3.4. Recommandations

Date du vol photogrammétrique

Pour des saisies initiales et la première exécution de mises à jour périodiques en mensuration officielle (restitution pour des MNT, restitution de limites naturelles de propriété), la période durant laquelle la végétation est absente ou celle précédant son apparition (bourgeonnement) devrait s'imposer. Des survols ultérieurs, essentiellement destinés à l'acquisition d'orthophotos de grande qualité au plan de la couleur, devraient être réalisés durant la période de feuillaison.

Exigences particulières

Des exigences particulières (par exemple un bon contraste dans les zones ombragées des clichés, une exposition manuelle, le survol de zones urbaines en présence de cirrus) sont à mentionner explicitement dans l'appel d'offres.

Archivage des images analogiques

Pour l'archivage des données analogiques, il convient de s'interroger sur l'opportunité de faire appel aux services de professionnels de l'archivage photographique. Les clichés ne devraient pas être stockés à long terme chez l'adjudicataire.

3.5. Méthodes et mesures de l'AQ

3.5.1. Planification

Il convient de vérifier au moins les points suivants avant l'exécution du vol photogrammétrique :

Planification de la signalisation

- Taille des signaux
- Matériel et couleurs de signalisation

Répartition des points de calage

- Documentation de la répartition prévue des points de calage
- Estimation a priori de la précision et de la fiabilité de la configuration prévue des points de calage
- Description des mesures visant à garantir la fiabilité

Plan de vol

- Respect des exigences relatives à la hauteur de vol, à l'échelle et aux recouvrements, ces dernières tout spécialement en terrain accidenté.

Les projets de documents de planification concernant la signalisation et le plan de vol sont à remettre au service du cadastre pour approbation.

3.5.2. Vol photogrammétrique**Support photographique et développement**

- Type de film utilisé (support, stabilité dimensionnelle)
- Développement des films (laboratoire, etc.)
- En cas d'exigences de qualité élevées : exposition éventuelle d'une échelle de couleurs ou d'une échelle de gris en début de film pour contrôler les valeurs de densité.

Procès-verbal d'étalonnage

- Datant d'au plus 5 ou 6 ans
- Fréquence éventuellement plus élevée dans le cas de projets dont les exigences de précision sont très importantes
- Dépend très fortement de la chambre utilisée

Rapport de vol

Vérifier si des événements particuliers se sont produits durant le vol (la présence de nuages par exemple ou encore des perturbations).

Configuration des points de calage

Contrôle de la répartition définitive des points de calage et explication d'écarts éventuels par rapport au plan initial. Analyse des nombres moyen et maximal de modèles ou de longueurs de base entre points de calage altimétriques ou entre traverses de points de calage altimétriques.

Synoptique des centres des clichés / index des photos aériennes

Respect du plan de vol : contrôles ponctuels des recouvrements latéraux et longitudinaux sur des couples de clichés

Réception des clichés

- Examen visuel qualitatif des clichés sur une table lumineuse avec agrandissement pour détecter par exemple la présence de rayures causées par des grains de poussière, etc.
- Appréciation de la qualité des clichés avec consultation éventuelle du mandant.

3.5.3. Détermination des points de calage**Contrôle du positionnement**

- Positionnement ou rattachement au réseau de points fixes de niveau supérieur

- Documentation des systèmes de coordonnées utilisés (WGS-84, MN95, MN03) et des transformations de coordonnées entreprises
- Documentation de la détermination des altitudes, en particulier dans le cas du recours au GPS (modèle de géoïde utilisé, transformations altimétriques)

Contrôle de la détermination des coordonnées

- Justification de la précision et de la fiabilité (en particulier pour des points nouveaux, transformations et résultats de celles-ci, précision de l'ajustage dans des réseaux géodésiques existants).

3.6. Documentation

Signalisation

Documentation de la signalisation effectuée :

- croquis de signalisation
- repérages
- cotes
- justification des écarts par rapport au plan de signalisation

Détermination des points de calage par des méthodes géodésiques

La documentation de la détermination des points de calage par des méthodes géodésiques doit au moins comprendre les points suivants :

- plan définitif des points de calage avec différenciation des points de calage altimétriques et des points de calage en planimétrie et en altimétrie
- calculs des points de calage, contrôles compris
- répertoire des points de calage récapitulant leurs coordonnées planimétriques, leurs attributs de qualité (précision, fiabilité), leurs types de codes, leurs provenances, les altitudes des points fixes, les hauteurs de signal et les cotes.

4. Scannérisation

La numérisation des données analogiques des clichés à l'aide d'un scanner est devenue une composante essentielle de presque tous les projets photogrammétriques. La scannérisation est un processus important car des pertes de qualité géométrique et radiométrique lors de cette phase ne peuvent plus être rattrapées ultérieurement ou alors de manière extrêmement limitée.

4.1. Méthodes

Les exigences élevées aux plans optique et mécanique à satisfaire par les restituteurs en photogrammétrie analogique sont désormais posées aux scanners en photogrammétrie numérique. Ainsi, la scannérisation des clichés photogrammétriques analogiques s'effectue principalement au moyen de scanners à plat des types suivants :

- scanners spéciaux pour la photogrammétrie : résolution géométrique très élevée, résolution radiométrique moyenne à élevée
- scanners pour la publication assistée par ordinateur (PAO) : résolution radiométrique très élevée, résolution géométrique réduite

Seuls des scanners étalonnés conçus pour la photogrammétrie devraient être utilisés pour les projets dont les exigences géométriques sont élevées (aérotriangulation, génération de MNT). Des scanners haut de gamme pour la PAO, étalonnés, peuvent également être envisagés dans le cas de projets aux exigences très élevées sur le plan radiométrique et réduites au niveau de la précision, à l'exemple de la production d'orthophotos de qualité radiométrique très élevée.

Les scanners pour la photogrammétrie sont par ailleurs scindés en deux groupes :

- les scanners pour bobine de film
- les scanners pour cliché isolé

Les scanners pour bobine de film présentent quelques avantages potentiels de nature aussi bien technique qu'économique, dans le cas surtout de projets de grande ampleur, pour autant que le logiciel de pilotage du processus soit en mesure de les exploiter.

4.2. Points critiques

Les éléments suivants comptent parmi les points critiques les plus connus de la scannérisation de clichés analogiques :

Poussière / rayure

Les dégradations et les altérations des supports photographiques analogiques causées par des poussières ou des rayures et pouvant intervenir **avant** ou **pendant** le processus de scannérisation en constituent l'un des risques principaux. Ces altérations étant souvent irréversibles, les mesures suivantes sont préconisées :

- la scannérisation doit, si possible, suivre immédiatement le développement des films
- la scannérisation doit s'effectuer avec le plus grand soin dans un environnement dépourvu de poussière

Orientation des clichés

Durant le processus de scannérisation, il convient de veiller à ce que tous les clichés

soient insérés dans le scanner avec une **orientation uniforme** (informations complémentaires toujours à gauche, par exemple, ou direction du vol resp. axe x du système des coordonnées-images toujours vers la droite).

L'orientation des clichés ne devrait en aucun cas se baser sur la direction des bandes dans le bloc, ce qui signifie que les opérateurs de la scannérisation ne devraient absolument pas avoir à se préoccuper de la direction de vol pour les différentes bandes du bloc.

Une orientation hétérogène des clichés est généralement difficile à détecter, les informations complémentaires étant fréquemment exclues de la scannérisation et certains appareils de prises de vues ne présentant par ailleurs pas de repères de fond de chambre numérotés.

Une orientation hétérogène des clichés entraîne les problèmes suivants :

- Lors de la reconstitution de l'orientation interne, il existe un risque d'**affectation erronée des repères de fond de chambre** et par suite, d'attribution inexacte des positions de repères de fond de chambre issues de son étalonnage. Ce risque est particulièrement important dans le cas d'une reconstitution automatique de l'orientation interne, mais il est également présent lorsque les repères de fond de chambre sont mesurés de manière interactive, la plupart des systèmes se rendant sur la position approchée (présumée correcte) du premier repère de fond de chambre ou la proposant. Une affectation incorrecte des repères de fond de chambre ne se manifeste bien souvent que par des résultats de transformation de qualité légèrement inférieure pour l'orientation interne (écarts résiduels plus importants, erreur moyenne de transformation légèrement plus élevée).

Si cette erreur peut normalement être détectée durant l'orientation des clichés, la deuxième conséquence se montre en revanche plus problématique :

- Les résultats de l'aérotriangulation, en particulier la détermination de '**paramètres supplémentaires**', sont significativement altérés par une orientation hétérogène des clichés lors de la scannérisation. Des paramètres supplémentaires sont entre autres intégrés pour **compenser des erreurs systématiques provenant du processus de** scannérisation. Cette compensation n'est toutefois possible que si les clichés ont uniformément été orientés lors de la scannérisation ou si un jeu de paramètres supplémentaires est déterminé pour chacune des différentes orientations. Cette dernière solution réduit le nombre de degrés de liberté du système et par suite la fiabilité des paramètres supplémentaires estimés.

Compression

Les données ne devraient pas être comprimées lors de la scannérisation et devraient être **archivées sous forme non comprimée**. Si une compression est envisagée pour les étapes suivantes du travail, elle ne devrait entraîner que des pertes minimales.

L'utilisation de la **compression JPEG** largement répandue a permis de montrer qu'aucune perte de qualité significative n'était à déplorer pour des taux de compression de l'ordre de 10 à 15 (*) dans le cas de données issues de clichés couleur et inférieurs à 5 dans le cas de données issues de clichés noir et blanc. L'utilisation de taux de compression plus élevés est vivement déconseillée !

(*) volumes de données comprimées = 1/10 à 1/15 du volume de données initial

Caractéristiques radiométriques

Les caractéristiques radiométriques de données scannées dépendent très fortement des caractéristiques correspondantes des clichés originaux. A cela s'ajoutent des exigences de nature en partie subjective, telle que la reproduction des couleurs. Il est par conséquent

impossible de résumer les exigences radiométriques en quelques mots.

Il est plus judicieux de définir des exigences spécifiques dans le cadre de l'appel d'offres et de vérifier leur respect après la scannérisation des premiers clichés. Ces exigences spécifiques peuvent par exemple être :

- un contraste élevé
- une bonne visibilité dans les zones situées à l'ombre
- la 'solidité' des couleurs
- l'absence de saturation des valeurs marginales (0 et 255, par exemple)

4.3. Exigences

4.3.1. Processus de scannérisation

Les points suivants sont à observer durant le processus de scannérisation :

- utilisation d'un scanner étalonné conçu pour la photogrammétrie (ou d'un scanner haut de gamme conçu pour la PAO, étalonné également, en cas d'exigences de qualité géométrique réduites)
- environnement de travail dépourvu de poussière au maximum
- exécution du travail avec le plus grand soin (la qualité des données analogiques ne doit pas être altérée par la scannérisation)
- orientation uniforme des clichés sur le scanner
- absence de compression des données durant le processus de scannérisation
- résolution de scannérisation si possible élevée, en cas d'utilisation ultérieure des données (cf. Recommandations)

4.3.2. Remise des données

Par le passé, les données scannées n'étaient souvent considérées que comme un produit intermédiaire généré durant le processus conduisant aux différents produits photogrammétriques finaux. Les données scannées représentent cependant une **précieuse copie numérique des données photographiques originales** et méritent de ce fait une attention particulière.

Dans le cas de projets d'une certaine ampleur et d'importance à long terme, la remise des données photographiques originales scannées au mandant devrait par conséquent devenir la règle. Que les données soient ou non remises au mandant, les aspects suivants sont à prendre en compte :

- formats des données
- supports des données et mécanismes de sauvegarde
- documentation exhaustive des données remises

Format des données

La diffusion toujours plus large de gros fichiers de données photographiques va avoir pour effet d'accroître les possibilités de codage efficace offertes par les différents progiciels existants. Dans le doute, seul le respect des règles suivantes permet un échange fiable de données photographiques entre systèmes différents :

- un format indépendant de tout système
- l'absence de compression des données
- l'absence de pyramide photographique
- l'absence de subdivision spatiale des clichés (donc l'absence de pavage)

Recommandation (photos couleur) : TIFF, RVB 24-bit, absence de compression, absence de pyramide photographique et de pavage

Supports de données et mécanismes de sauvegarde

Le mandant et le mandataire devraient convenir ensemble des supports appropriés retenus pour les données. Les supports AIT, DLT et éventuellement DDS/DAT semblent particulièrement indiqués en raison de leurs capacités de stockage.

La définition d'un format de sauvegarde (par exemple Windows NT Backup ou UNIX tar) doit garantir la possibilité d'un transfert entre environnements UNIX et Windows NT.

4.4. Recommandations

Date d'exécution de la scannérisation

L'intervalle de temps séparant la prise de vues de la scannérisation des clichés devrait être le plus court possible, afin de minimiser des problèmes tels que la poussière ou les rayures. Il est par conséquent recommandé de regrouper et d'adjuger le vol photogramétrique et la scannérisation des clichés dans le cadre de la même phase de projet.

Résolution de la scannérisation

Compte tenu des techniques de stockage actuellement disponibles, il convient de se demander si les données photographiques sont à scanner d'emblée avec une résolution géométrique élevée sinon maximale (généralement de l'ordre de 10 à 15 μm). Le contenu 'maximal' d'informations des clichés analogiques encore récents en serait de la sorte extrait. Une résolution réduite pourrait toujours être utilisée pour les traitements ultérieurs (tels que l'aérotriangulation ou la génération de MNT), au moyen d'un rééchantillonnage obtenu par voie de calcul.

Par conséquent, la scannérisation devrait en principe s'opérer avec une résolution élevée (10 – 15 μm) pour les projets relatifs à la mensuration officielle, à la saisie initiale et à la mise à jour périodique.

Étalonnage éventuel du scanner

Dans le cas de projets d'une certaine ampleur (plus de 100 à 200 clichés), un étalonnage séparé du scanner avant le début des travaux et immédiatement après leur terme serait envisageable sinon souhaitable. Les résultats de ces étalonnages devraient figurer dans le rapport technique.

Scanner à partir des bobines (dans le cas de projets de grande ampleur)

Comme déjà mentionné, la scannérisation à partir des bobines de films présente certains avantages potentiels dans le cas de projets d'une certaine ampleur. Si le logiciel de commande est parfaitement fiable, il s'agit en particulier d'un positionnement régulier du film et de la possibilité d'utiliser le contraste de manière optimale. Ils s'y ajoutent un risque plus réduit de présence de salissures, du fait de l'absence de manipulation

manuelle du film, de même qu'une charge électrostatique plus faible.

4.5. Méthodes et mesures de l'AQ

4.5.1. Appel d'offres du projet / soumission

Les indications suivantes devraient être demandées ou livrées dans le cadre de l'appel d'offres du projet et de la soumission :

Caractéristiques techniques du scanner mis en œuvre

Type de scanner avec ses caractéristiques techniques (résolution géométrique, précision géométrique, résolution radiométrique, domaine de densités)

Mesures prises au sein de la société pour l'assurance de la qualité de la scannérisation

Indications relatives à l'étalonnage du scanner, ordonnancement des travaux, etc.

Eventuels tests de scannérisations

Il serait envisageable, s'agissant de projets d'une certaine ampleur, d'exiger une scannérisation de test effectuée à partir de données photographiques (si possible) identiques. Ces scannérisations de test pourraient être examinées et comparées avant l'attribution du marché. Cette analyse pourrait porter sur des aspects tels que les artefacts, les 'raccords', des éléments CCD défectueux, la poussière, voire s'étendre à la précision géométrique ou aux caractéristiques radiométriques (domaines de niveaux de gris, contraste).

Remarque : la comparaison sérieuse de scannérisations de test de ce type requiert un volume de travail très important, la qualité d'une scannérisation de test isolé (qui plus est produit avec un soin tout particulier) ne permettant par ailleurs pas de tirer de conclusions probantes concernant la qualité des scannérisations effectivement réalisés en production.

4.5.2. Acceptation de scannérisations de test

Comme déjà mentionné, les exigences radiométriques à satisfaire par les clichés scannés comportent également une composante subjective. Il est par conséquent recommandé, dans le cas de projets d'une certaine ampleur, de scanner une sélection de clichés en utilisant différents paramètres et réglages pour le balayage et de les faire accepter par le mandant avant le début effectif des travaux de scannérisation.

La scannérisation des clichés restants ne devrait débuter qu'après l'acceptation des tests par le mandant.

4.6. Documentation

La livraison ou la définition du lieu de stockage des données numérisées devrait être réglée une fois le contrat exécuté. Les données numériques sont d'ordinaire à livrer au mandant. Les supports et les formats de données utilisés sont à définir dans cette optique.

5. Aérotriangulation

L'aérotriangulation, en tant que méthode d'orientation de groupes de clichés, constitue actuellement l'une des phases les plus exigeantes du déroulement d'un projet de photogrammétrie. La qualité géométrique des différents produits générés au final est très largement tributaire de la qualité de l'aérotriangulation.

5.1. Méthodes

La compensation par blocs par la méthode des faisceaux, une compensation globale par la méthode des moindres carrés, constitue actuellement la méthode standard de l'aérotriangulation. Les différences entre méthodes concernent les aspects suivants :

- les points de calage
- l'assistance du GPS
- la mesure de points de liaison
- des paramètres supplémentaires

Points de calage

Dans le cas de l'aérotriangulation classique, les points de calage signalisés de manière usuelle revêtent une très grande importance. Ainsi, leur répartition spatiale et leur densité déterminent très largement la précision et la fiabilité d'une aérotriangulation. En revanche, dans le cas d'une aérotriangulation utilisant le GPS, les points de calage servent essentiellement au positionnement ainsi qu'au contrôle du positionnement GPS. Les points de calage ne perdront pas totalement leur raison d'être et resteront un moyen de contrôle indépendant y compris dans le cas d'une détermination directe de l'orientation externe à l'aide du GPS/INS.

Assistance du GPS

Le système de positionnement à l'échelle du globe (Global Positioning System, GPS) est désormais utilisé de manière courante pour la navigation des vols photogrammétriques comme pour la détermination très précise de la position du capteur au moment de la prise de vues. La détermination de cette position au niveau centimétrique ou décimétrique peut s'effectuer en temps réel (Real-Time Kinematic, RTK) ou par une exploitation différée et différentielle des mesures de phases (mode de post-traitement, Post-Processing-Modus).

Dans l'optique de l'aérotriangulation, le positionnement GPS de haute précision présente les caractéristiques suivantes :

- un accroissement considérable de la précision et de la fiabilité des altitudes, surtout pour les grands groupes de clichés
- une réduction significative du nombre de points de calage requis et par suite, un volume de travail moindre pour leur signalisation et leur mesure
- une assistance / amélioration de l'aérotriangulation automatique et de la détermination automatique de points de liaison résultant des valeurs approchées de meilleure qualité disponibles pour les centres de projection

Mesure de points de liaison

La mesure de points de liaison s'effectue de plus en plus fréquemment de manière automatique en photogrammétrie numérique. La mesure automatique de points de liaison

est souvent assimilée à une **aérotriangulation automatique**. Les caractéristiques principales des aérotriangulations classique et automatique sont brièvement décrites ci-dessous :

- Mesure automatique (sur la base de la corrélation numérique) : obtention d'une précision élevée et surtout d'une fiabilité suffisante par le biais d'un grand nombre de mesures, d'une grande redondance ainsi que d'une recherche et d'une élimination automatiques d'erreurs, généralement sur la base d'estimateurs robustes. Les points de liaison déterminés automatiquement ne sont pas directement identifiables en tant que points sur les clichés et ne peuvent pas, d'ordinaire, être utilisés pour une (ré)orientation ou un contrôle de position interactif ultérieur.
- Mesure interactive : mesure du nombre minimal requis de points de liaison. La fiabilité est essentiellement garantie par des contrôles de l'opérateur. La combinaison d'une sélection de points interactive et d'une mesure automatique des points homologues est de plus en plus fréquente.

Paramètres supplémentaires

Les paramètres supplémentaires permettent la détermination et la compensation d'erreurs systématiques non prises en compte par le modèle standard. Grâce aux paramètres supplémentaires, il est par exemple possible de prendre en compte et de compenser des erreurs résiduelles dans les paramètres d'étalonnage de chambre, au niveau de déformations du film ou de la réfraction ou encore des erreurs systématiques intervenues lors de la scannérisation ou du positionnement GPS. Les paramètres supplémentaires conduisent à des résultats exempts de toute contradiction, donc plus précis, mais réduisent la redondance, donc la fiabilité de la solution obtenue. L'intégration de paramètres supplémentaires suppose de solides connaissances en photogrammétrie.

5.2. Points critiques

Précision et fiabilité des altitudes

La précision et la fiabilité des altitudes constituent surtout une question épineuse dans le cas de vols photogrammétriques effectués sans l'assistance du GPS. Il est fréquent que la densité et la répartition des points de calage altimétriques critiques à l'intérieur du bloc se fondent sur le cas théorique idéal, tel qu'il est par exemple décrit dans Kraus, tome 1. Mais il suffit alors que des points de calage deviennent inutilisables, par suite de destruction ou d'obstruction, pour que les exigences de précision et de fiabilité ne puissent plus être respectées.

Positionnement GPS

Les éléments suivants comptent parmi les points critiques en cas d'utilisation du GPS pour le positionnement du capteur :

- la détermination et la prise en compte correctes du décalage entre l'antenne GPS et le centre de projection
- l'introduction correcte des centres de projection comme observations : précisions, pondération
- dans le cas d'applications de très haute précision : garantir que les corrections horaires basées sur le GPS soient correctement modélisées à la station de référence et dans l'avion (absence de sauts périodiques dans l'échelle de temps)
- la synchronisation horaire des positions GPS et des instants de déclenchement

(l'erreur de synchronisation doit le cas échéant être estimé par des paramètres supplémentaires)

- le traitement adéquat du problème du référentiel (cf. ci-dessous)

Transformation de datum géodésique

Avec l'introduction du GPS pour la détermination des points de calage et surtout pour le positionnement du capteur, la transformation de datum (référentiel) géodésique est également devenue une question essentielle en photogrammétrie, voire une source potentielle de difficultés. Les points suivants sont particulièrement critiques :

- le positionnement / l'intégration des stations de référence GPS dans le système géodésique de référence local
- l'introduction et la prise en compte correcte du géoïde

Orientation uniforme des clichés lors de la scannérisation

Cf. § 4.2

Compatibilité des orientations externes

En règle générale, ce problème n'apparaît qu'au terme de l'aérotriangulation, lors de la prise en charge des données d'orientation et concerne les diversités dans les hiérarchies et les sens de rotation (horaire ou antihoraire) des axes de rotation et bien entendu l'utilisation d'unités différentes.

5.3. Exigences

Seules quelques exigences minimales sont répertoriées ici, afin de n'exercer aucune influence sur le choix de la méthode :

Précision et fiabilité

- La précision espérée en planimétrie et en altimétrie devrait être spécifiée sur la base des exigences à satisfaire par les produits
- La garantie de la fiabilité en planimétrie et en altimétrie, c.-à-d. la capacité de la configuration du réseau à permettre la détection de fautes, devrait être exigée.

Configuration des points de calage

- Concernant la précision : une densité suffisante de points de calage altimétriques ; dans le cas de recouvrements latéraux inférieurs à 50%, il convient notamment de veiller à ce que les points de calage altimétriques se trouvent, si possible, dans les zones de recouvrement de bandes.
- Fiabilité : double signalisation (mesure efficace contre la destruction, des obstacles à la visibilité, des obstructions durant le vol photogrammétrique constituées par des véhicules en stationnement, etc.)

Positionnement GPS

- Il est recommandé d'utiliser un minimum de deux stations de référence afin de disposer d'une marge de sécurité en cas de panne de l'une d'entre elles.
- L'une des deux stations au moins devrait se trouver dans le périmètre du projet ou à proximité de celui-ci. Une résolution plus robuste et plus précise des lignes de base est de la sorte possible.

- Les documents relatifs à l'intégration ou à la transformation des stations de référence dans le système de coordonnées locales sont à produire.

Points de liaison définis de manière interactive

- Lors d'une triangulation numérique effectuée sur des clichés destinés à une restitution ultérieure sur des systèmes analytiques, un nombre suffisant de points de liaison est à définir de façon interactive par cliché ou par modèle en plus des points de liaison déterminés automatiquement, afin de garantir qu'aucune difficulté ne survienne sur les systèmes analytiques (réorientation).

5.4. Recommandations

Signalisation de points de contrôle supplémentaires

La signalisation (et le cas échéant la détermination par des méthodes géodésiques) de points de contrôle supplémentaires par le mandant constitue une mesure d'AQ aussi efficace qu'économique. Toutefois, les points supplémentaires signalisés ne doivent, à dessein, pas faire partie du plan de signalisation de l'adjudicataire, afin de permettre un contrôle aussi indépendant que possible. Des coordonnées planimétriques approchées (ou précises) de ces points de même que les croquis de repérage des points de calage pour la détermination de coordonnées pourraient être remis à l'adjudicataire, comme faisant partie intégrante du mandat d'aérotriangulation. Les points de contrôle supplémentaires devraient être considérés comme des points nouveaux dans la compensation par la méthode des faisceaux.

Ces points pourraient même, en cas de besoin, servir de calage supplémentaire à l'aérotriangulation, sous réserve de l'approbation du mandant.

5.5. Méthodes et mesures de l'AQ

L'assurance de la qualité dans le domaine de l'aérotriangulation se fonde largement sur les documents transmis à ce sujet, raison pour laquelle les informations à fournir sont présentées de manière détaillée dans le paragraphe suivant.

Parmi les mesures d'AQ supplémentaires et largement indépendantes s'offrant le cas échéant à l'adjudicataire, on peut citer les suivantes :

Points de contrôle

La précision des points de calage doit être prouvée par l'adjudicataire au moyen d'une solution d'AT à contraintes minimales, dans laquelle les autres points de calage sont considérés comme des points de contrôle dont les résidus sont présentés (Attention : ces points de contrôle sont en corrélation avec les points de calage du fait de leur proximité. La preuve de la précision doit donc obligatoirement être apportée avec des points de contrôle supplémentaires ! En cas d'assistance du GPS, les points de contrôle sont à localiser en milieu voire en bordure de bloc.)

Génération de MNT

Des MNT générés automatiquement peuvent également servir à une vérification ultérieure efficace de la précision altimétrique. Cette possibilité ne devrait cependant être nécessaire qu'en cas de doute.

- Identification de zones de test disposant d'informations altimétriques existantes (aussi précises que possibles)

- Génération automatique d'un MNT pour les zones de test en utilisant les orientations externes de l'AT
- Analyse des écarts altimétriques

5.6. Documentation

Il est particulièrement important, pour la documentation de l'aérotriangulation, que les résultats ne soient pas seulement joints au rapport technique sous forme de listages. Les informations importantes sont au contraire à extraire de ces listages par l'adjudicataire, à rassembler de manière claire, à interpréter et à apprécier.

La documentation d'une aérotriangulation se compose au minimum :

- d'un récapitulatif ou de statistiques relatives au projet : nombre de clichés, nombre de points de calage (en planimétrie, en altimétrie, en planimétrie et en altimétrie, utilisés, non utilisés)
- d'un procès-verbal d'étalonnage de chambre
- de l'indication du logiciel mis en œuvre
- des listages de la compensation par blocs par la méthode des faisceaux

Mesure des points

- Nombre de points de liaison par cliché ou par modèle (minimal / moyen)
- Précision de la mesure des points

Résultats de la compensation par blocs par la méthode des faisceaux

- Erreur moyenne a priori
 - de l'unité de poids (σ_0) (*)
 - erreur moyenne de point de calage
- Erreur moyenne a posteriori
 - de l'unité de poids (σ_0)
 - erreur moyenne de point de calage
- Nombre de points de calage utilisés / non utilisés (avec justification)
- Redondance (nombre de degrés de liberté / surabondance)
- Récapitulation
 - nombre moyen de rayons par point
 - statistique de ce nombre (2 – max.)
- Résidus des points de calage
- Résidus des points de contrôle
- Résidus des points de calage non utilisés
- Inclure une sortie graphique des résultats de l'AT : position des points de calage, résidus, position et qualité des points de liaison (problème : rarement prévu pour l'heure par les logiciels d'AT du marché ; les sorties graphiques sont souvent

synonymes d'un déluge de papier !)

- Documentation et explication des problèmes rencontrés

(*) Sigma0 (ou σ_0) désigne l'erreur moyenne de l'unité de poids dans une compensation par blocs par la méthode des faisceaux, correspondant ainsi à l'erreur moyenne d'une observation de coordonnée-image (observation x' ou y'). Sigma0 est normalement indiquée en μm .

Aérotriangulation assistée par GPS

- Nombre et position des stations de référence utilisées
- Détermination de la position des stations de référence et intégration dans le système des points de calage
- Récepteurs GPS mis en œuvre
- Saisie des données (intervalles d'observation, géométrie des satellites durant le vol photogramétrique, événements particuliers)
- Logiciel d'exploitation et méthode de calcul utilisés
- Calculs de décalages (stations de référence et antenne GPS – chambre)
- Systèmes de coordonnées utilisés et transformation dans le système de coordonnées local
- Modèle de géoïde utilisé (éventuellement avec indications de précision)
- Contrôles : comparaison des solutions en cas d'utilisation de plusieurs stations de référence
- Observation des centres de projections :
 - erreur moyenne a priori (issue de l'exploitation GPS)
 - erreur moyenne a posteriori
 - résidus
- Appréciation des résultats

Paramètres supplémentaires

En cas d'intégration de paramètres supplémentaires à la compensation par blocs par la méthode des faisceaux, les informations suivantes sont à fournir :

- type et nombre des paramètres supplémentaires utilisés
- nombre de jeux de 'paramètres supplémentaires' utilisés
- appréciation des résultats obtenus

6. Génération de MNT

6.1. Distinctions entre MN(A), MNT et MNS

La description spatiale de la surface terrestre ainsi que de surfaces d'autres objets géométriques fait intervenir une série de modèles généralement désignés par leurs abréviations respectives. Les principaux modèles sont brièvement présentés ci-dessous :

MN(A) = Modèle numérique (altimétrique)	Modèle destiné à la représentation des altitudes (cotes z) de surfaces de toutes natures. Par conséquent, il peut tout aussi bien s'agir de la surface du terrain, de niveaux de nappes phréatiques ou de couches atmosphériques. (Abréviation angl., DEM = digital elevation model)
MNT = Modèle numérique de terrain	Les modèles numériques de terrain représentent la surface naturelle du terrain sans les ouvrages (bâtiments, ponts, etc.) ni la végétation qui la recouvrent. Outre les informations altimétriques, les modèles numériques de terrain comportent fréquemment des éléments de structure (tels que des lignes de rupture) permettant de modéliser le terrain au mieux. (Abréviation angl. DTM = digital terrain model) Indication : la couche des informations altimétriques de la MO93 constitue un MNT.
MNS = Modèle numérique de surface	Modèle d'une surface en 3D quelconque. Dans le contexte des données géoréférencées, on appelle modèles de surface des représentations de la surface visible (incluant les bâtiments, la végétation, etc.). (Abréviation angl. DSM = digital surface model)

6.2. Méthodes

Outre les méthodes de saisie photogrammétrique et la déduction de modèles de terrain à partir de cartes et de plans analogiques existants, de nouvelles méthodes telles que le balayage laser et le radar (radar à synthèse d'ouverture (RSO) interférométrique) apparaissent actuellement sur le marché. La génération de modèles numériques de terrain à l'aide de ces capteurs non photogrammétriques ne sera qu'effleurée ici. Cependant, la majeure partie des procédures d'AQ présentées ici est directement transposable à ces technologies.

Méthode de saisie	Points forts de la méthode	Points faibles de la méthode
Modélisation par des points isolés et des lignes du terrain (Mesures et modélisation interactives) Modèle raster automatiquement corrélé à partir de prises de vues photogrammétriques, modèle raster interpolé	Bonne modélisation du terrain avec un volume de données comparativement faible. Convient également à des zones bâties. Méthode de saisie efficace en terrain dégagé.	Travail de saisie important par des mesures photogrammétriques ou terrestres. Des détails topographiques du terrain peuvent être perdus, selon le pas du maillage retenu. Elle requiert un post-traitement pour les points sur la végétation et les constructions, en dépit du filtrage. La surface de la végétation est corrélée dans les zones boisées. Transition délicate entre le terrain découvert et la forêt. Gros volumes de données (suivant le pas du maillage retenu)
Courbes de niveau numérisées à partir de cartes et de plans existants	Coût peu élevé pour la saisie.	La qualité et l'actualité des informations altimétriques existantes sont reprises au mieux. Le maillage triangulaire atténue les ravins et les crêtes. Les zones de terrain planes peu structurées ont tendance à être mal modélisées.
Méthodes combinées	La combinaison de différentes méthodes de saisie constitue la norme actuellement et permet une modélisation du terrain fidèle à la situation existante.	Constitution hétérogène entraînant des caractéristiques différentes des modèles de terrain.
Modèle raster provenant d'un balayage laser	Modèle de surface de grande précision. Les signaux réfléchis permettent de déduire aussi bien la couverture du sol que le terrain naturel (sous-bois compris).	La faible portée du scanner et le désir de minimiser les zones d'ombre requièrent des vols à basse altitude et des bandes de balayage étroites. Exigences élevées posées au plan de vol, survol long donc

Méthode de saisie	Points forts de la méthode	Points faibles de la méthode
Modèle raster provenant de saisies radar (RSO interférométrique)	Fiabilité élevée (en raison de la densité élevée de points de mesure).	coûteux. Gros volumes de données (points de masse).
	Méthode de saisie efficace et peu coûteuse pour des modèles de surface de précision moyenne.	Les prises de vues obliques entraînent d'importantes zones d'ombre et requièrent des survols multiples, accroissant le volume de travail.
	Des longueurs d'onde différentes permettent la saisie d'informations relatives à la végétation et au terrain naturel.	Gros volumes de données (points de masse).

Précisions atteignables

Les précisions suivantes peuvent être estimées pour les différentes méthodes énumérées:

Photogrammétrie (restitution manuelle) :

Des précisions de l'ordre de 0.2 ‰ de la hauteur de vol au-dessus du sol sont atteignables.

Photogrammétrie (génération automatique) :

Des exploitations systématiques des résultats obtenus prouvent que la corrélation automatique permet à peu de choses près d'obtenir les mêmes précisions altimétriques que la restitution manuelle, c.-à-d. 0.2 à 0.3 ‰ de la hauteur de vol au-dessus du sol. Des surfaces dont la texture est mal reproduite (par exemples des ombres, des parties surexposées ou des cultures dépourvues de structures) ainsi que des versants très raides constituent des zones difficiles pour la corrélation. Des contrôles manuels sont à prévoir dans ces zones difficiles (les codes de qualité déterminés par voie statistique ne sont pas fiables et sont insuffisants pour justifier du niveau de qualité atteint).

Balayage laser :

Les précisions suivantes sont atteignables pour une largeur de bande de l'ordre de 250 mètres actuellement et un pas d'environ 1 mètre pour le quadrillage :

Modèle de terrain (MNT) en zone dégagée :	De ± 0.15 à 0.20 mètre
Modèle de terrain (MNT) en zone boisée :	Incertaine, fonction de la nature de la végétation
Modèle de surface (MNS) :	± 1.5 mètre, selon la nature de la surface

RSO interférométrique :

Les précisions suivantes sont actuellement envisageables avec un survol réitéré à quatre reprises et un pas d'environ 50 centimètres pour le quadrillage :

Modèle de terrain (MNT) en zone dégagée :	De ± 0.20 à 0.50 mètre
---	------------------------

La précision altimétrique se réduit en conséquence si le survol n'est répété que deux fois et non quatre. La proportion d'erreurs systématiques s'accroît par ailleurs considérablement du fait de la géométrie asymétrique des prises de vues.

6.3. Points critiques

Variété d'utilisation des données altimétriques

Les exigences à satisfaire par un modèle numérique de terrain, au-delà des simples exigences de précision et de fiabilité des données, peuvent être très diverses selon les utilisations prévues (exigences par exemple différentes pour des modèles de terrain, des modèles de surface, des MNT pour la génération de plans de courbes de niveau, des MNT pour la génération d'orthophotos, des MNT pour des projets d'ingénierie).

Portions de terrain dont la modélisation est exigeante

Les brusques variations de déclivité, les ruptures de pente marquées et les ouvrages d'art (constructions et talus le long de routes et de voies ferrées, murs de soutènement importants, ponts) comptent parmi les parties les plus difficiles à modéliser du terrain.

Bords du modèle

Les bordures du modèle de terrain comptent également parmi les points les plus critiques. C'est pourquoi il convient de prévoir une zone de recouvrement suffisante lors de la définition du périmètre.

Selon la méthode de saisie retenue, il existe par ailleurs un risque de discontinuité sur les bords des 'unités de saisie' ou des modèles partiels. En cas de saisie photogrammétrique, ces discontinuités se produisent principalement en bordure des différents stéréomodèles. En principe, seules les parties centrales des clichés, donc situées à l'intérieur du périmètre délimité par les points de calage ou d'orientation d'un modèle, devraient être utilisées pour la génération de MNT. La vérification des orientations externes est indispensable si des décalages altimétriques d'une certaine importance se font jour entre stéréomodèles voisins. Des discontinuités de moindre ampleur (dans les limites de la précision de mesure) occasionnant une gêne d'ordre essentiellement visuel sont à corriger par un traitement ultérieur du modèle de terrain.

Difficultés inhérentes au contrôle des modèles de terrain

De très grandes quantités de données présentant de très faibles redondances, lesquelles permettraient une justification directe des précisions et fiabilités atteintes, rendent les travaux de contrôle ardu.

La vérification d'échantillons sélectionnés de manière aléatoire peut se révéler judicieuse si le contrôle a pour objet d'apporter la preuve, par voie de calcul, de l'obtention effective des erreurs moyennes annoncées. Le fait que les erreurs survenant ne suivent pas une distribution normale contribue fréquemment à rendre plus difficile l'estimation complète de la précision.

En règle générale, la mesure ultérieure d'échantillons sélectionnés de manière aléatoire ne permet pas de répondre dans des conditions satisfaisantes (moyennant un volume de travail acceptable) à la question de savoir si le modèle de terrain saisi, y compris dans ses parties les plus délicates à modéliser, reproduit fidèlement la réalité du terrain. C'est pourquoi la vérification doit fréquemment se cantonner à la recherche de zones posant des problèmes et à des mesures complémentaires pour renforcer des points faibles. Mais

si le modèle de terrain n'est examiné de plus près qu'au niveau des zones difficiles, l'erreur altimétrique moyenne déduite des mesures complémentaires en sera défavorablement influencée. L'appréciation ne doit par conséquent se limiter qu'au contrôle du respect des tolérances.

En règle générale, les données altimétriques ne subissent d'utilisations ultérieures que sous une forme traitée (un maillage triangulaire par exemple). La mise en œuvre de logiciels différents et par suite d'algorithmes de calcul également différents peut par conséquent conduire à des divergences dans les résultats.

Orientation externe et positionnement des capteurs

Qu'il s'agisse de la photogrammétrie ou des nouvelles méthodes, RSO interférométrique ou balayage laser, la saisie des données s'effectue au sein même des capteurs mis en œuvre. La restitution implique donc de connaître la position occupée par le capteur dans l'espace au moment de la saisie. Actuellement, cette détermination s'effectue habituellement par GPS RTK à bord de l'avion. L'orientation dans l'espace fournie par des systèmes inertiels de très grande précision est par ailleurs requise pour le RSO interférométrique et le balayage laser.

Des incertitudes demeurent encore au niveau de l'étalonnage des capteurs pour le RSO interférométrique et le balayage laser.

6.4. Exigences

Les exigences posées à l'établissement de modèles de terrain sont fortement influencées par l'utilisation projetée des données. Les considérations suivantes sont à intégrer à la planification et conduisent au choix de la méthode ainsi qu'aux spécifications techniques :

- Quel est le type de modèle requis (modèle numérique de terrain, modèle numérique de surface, voire les deux) ?
- Les données altimétriques doivent-elles couvrir l'ensemble du territoire (exemple : surfaces boisées, angles morts, traitement de surfaces de bâtiments dans le MNT) ?
- Des exploitations ultérieures sont-elles prévues (par exemple des modèles urbains tridimensionnels ou un cadastre de zones inondables) ?
- Les données sont-elles requises pour la génération d'orthophotos ?
- La génération de plans de courbes de niveau est-elle prévue ?
- Quelles sont les exigences en matière de précision et de fiabilité des données ?
- Quelles sont les exigences concernant le degré de spécification (en harmonie avec les exigences relatives à la précision) ?
- La couverture surfacique est-elle à justifier et comment d'éventuelles lacunes sont-elles à traiter (par exemple par l'absence de mesure, en n'en signalant que la provenance; par complètement à l'aide de données altimétriques existantes) ?

6.5. Méthodes et mesures de l'AQ

Le contrôle de modèles numériques de terrain requiert de l'expérience et un niveau de connaissance élevé de la part du vérificateur de même que des fonctions étendues et un niveau de performance élevé de la part du processeur et du logiciel employés.

Les principes de gestion de la qualité imposent que l'accent soit clairement mis sur les contrôles effectués par les soins de l'adjudicataire ainsi que sur les preuves qu'il doit

apporter du respect effectif de la précision et de la fiabilité requises. L'autorité de surveillance doit, de son côté, exiger la livraison de documents appropriés, servant à établir le respect des critères de qualité, dès le stade de l'appel d'offres du projet.

Nous recommandons l'exécution des étapes de contrôle suivantes pour la vérification de modèles numériques de terrain, que la justification de la qualité obtenue soit à la charge de l'adjudicataire ou de l'autorité de surveillance :

1. Examen formel des données remises
2. Tests de vraisemblance
3. Examens de la précision et de la fiabilité

6.5.1. Examen formel des données remises

Contrôle d'intégralité

Le périmètre exigé est-il reproduit en totalité par le modèle, zone de recouvrement devant être définie au moment de l'appel d'offres comprise ?

Langage de description des données et formats de données

Des sous-programmes de contrôle permettent l'examen formel des données en ce qui concerne la syntaxe, les formats et la saisie de tous les attributs.

Tests de cohérence

Des lignes de rupture se recoupant elles-mêmes ou des cotes différentes possédant des coordonnées planimétriques identiques laissent présager la présence d'erreurs topologiques. Les recouvrements sont à détecter au moyen d'outils de SIG et à corriger le cas échéant.

Affectation correcte des attributs aux données

L'affectation des attributs aux données doit être vérifiée par échantillonnage, en ce qui concerne son contenu. La connaissance de la provenance et du mode d'obtention des données est d'importance dans l'optique de l'appréciation de la qualité de données altimétriques (par exemple restitution manuelle (lignes de rupture), corrélation automatique, saisie graphique de courbes de niveau sur un plan, données reprises d'un modèle de terrain existant).

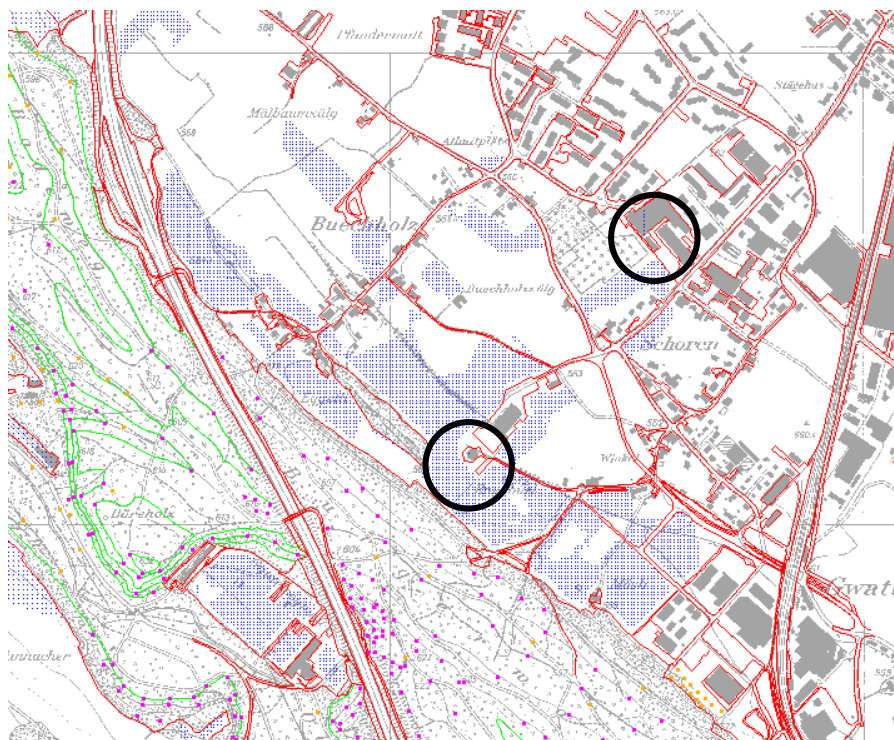


Figure 4 : Plan d'ensemble et éléments de la saisie des données. Les points critiques examinés sont signalés par des cercles foncés (cf. aussi figures suivantes).

6.5.2. Tests de vraisemblance sur le modèle

Modélisation du terrain

La description du terrain à l'aide de points isolés et de lignes caractéristiques requiert une grande expérience ainsi qu'une bonne dose de "doigté" ; il en va de même de l'appréciation de la qualité d'un modèle de terrain par le simple examen des éléments de mesure fournis. Cependant, certaines indications quant à d'éventuelles faiblesses dans la modélisation du terrain sont délivrées par la manière dont le modèle a été constitué (par exemple des lignes de rupture et de structure manquantes, la saisie de courbes de niveau sans lignes caractéristiques du terrain, des zones constructibles dépourvues de cotes altimétriques).

L'intégration d'une carte topographique ou de l'orthophoto en arrière-plan permet de faciliter l'appréciation des éléments saisis du modèle de terrain et de rendre cette opération plus efficace.

Calcul d'une image des courbes de niveau avec une équidistance réduite

La détermination d'une image de courbes de niveau plus denses permet de fournir des indications à l'observateur concernant des discontinuités et des artefacts (par exemple des cotes altimétriques en désaccord avec l'image des courbes ou des déclivités inexplicables de places ou de rues).



Figure 5 : Image de courbes de niveau avec une très faible équidistance

Estompage par éclairage oblique

Un estompage obtenu par l'éclairage oblique du modèle de terrain rend des discontinuités dans le modèle immédiatement visibles, particulièrement en terrain régulier de même qu'en cas de transitions insuffisamment soignées entre modèles partiels.

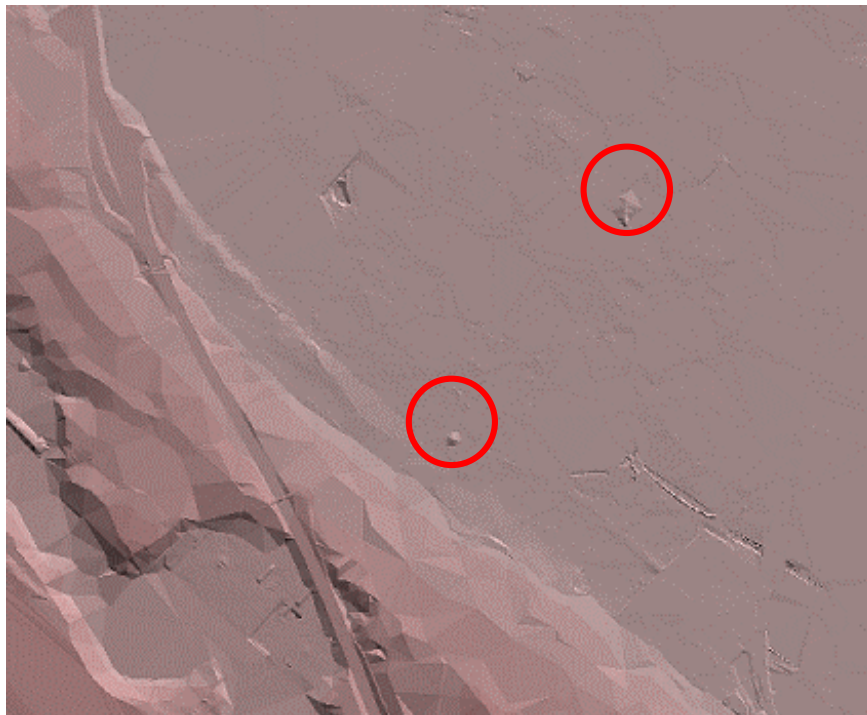


Figure 6 : Estompage par éclairage oblique

6.5.3. Examen de la précision et de la fiabilité

Détection de zones potentiellement critiques

Les considérations et les tests énumérés ci-dessous permettent de dégager des indications relatives aux zones potentiellement critiques dans lesquelles des mesures destinées au contrôle voire à l'amélioration de la modélisation du terrain s'imposent.

- Expérience du topographe

Les portions de terrain difficiles à saisir sont connues par expérience (par exemple de brusques variations de déclivité, des lignes de rupture marquées, des ouvrages d'art).

- Comparaison des données avec des informations altimétriques existantes :

⇒ Comparaison avec des modèles de terrain existants

Le calcul de surfaces d'écarts entre le modèle de terrain à contrôler et des modèles de terrain existants mais généralement moins précis permet de rechercher des zones dans lesquelles apparaissent de notables différences systématiques, un examen approfondi de ces zones étant ensuite éventuellement à entreprendre.

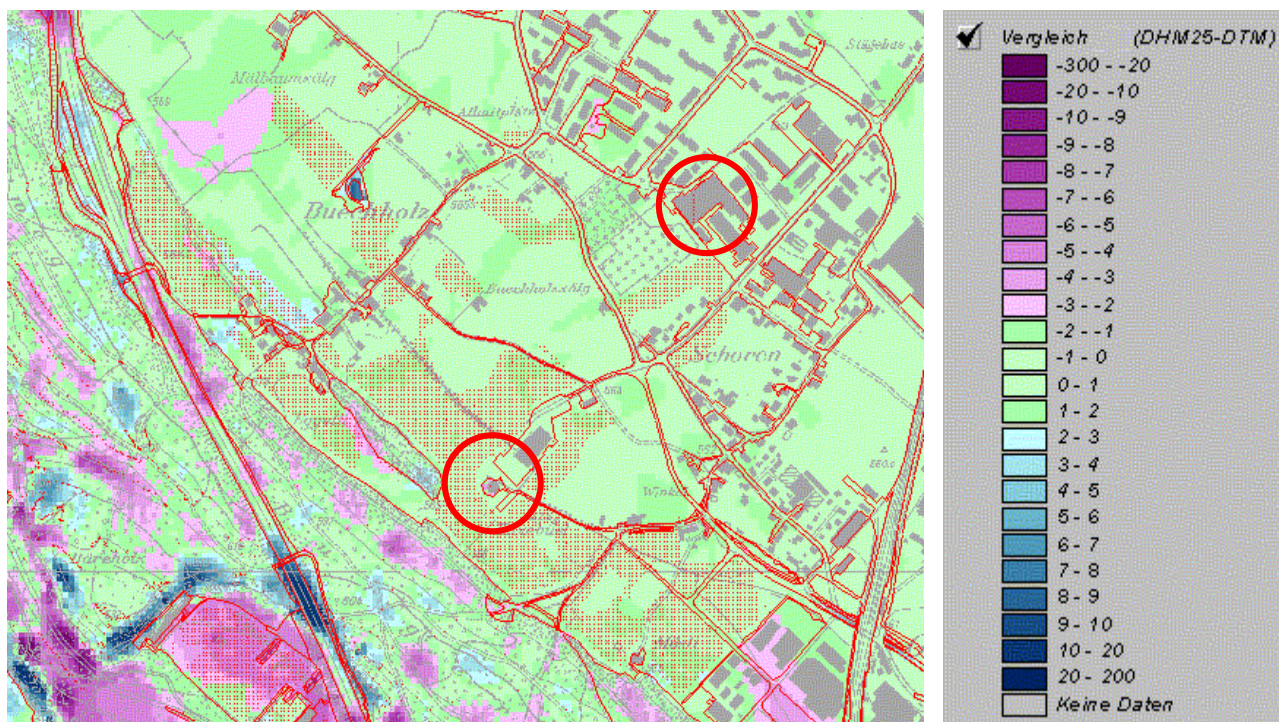


Figure 7 : Surfaces des écarts entre deux modèles de terrain (classes d'écarts en [m]).

⇒ Comparaison avec des informations altimétriques ponctuelles (par exemple des altitudes de points fixes)

Il est possible, pour des points altimétriques connus (par exemple des points fixes de la mensuration officielle ; incertitudes au niveau des cotes), d'interpoler les altitudes des points correspondants du modèle de terrain et de les comparer aux valeurs théoriques.

- Superposition des orthophotos avec des données vectorielles

La superposition des orthophotos éventuellement produites, calculées à partir du

modèle de terrain à contrôler, avec des données vectorielles existantes, provenant par exemple de la mensuration officielle, permet une recherche efficace des zones critiques.



Figure 8 : Superposition d'une orthophoto "imprécise" et de données vectorielles de la MO

Mesures de contrôle

Un dispositif de mesure aussi indépendant que possible (méthodes de mesure indépendantes, conditions géométriques de mesure et opérateurs différents) est à privilégier pour l'exécution des mesures de contrôle.

- Vérification de l'image de courbes de niveau interpolée sur un stéréorestituteur numérique ou un restituteur analytique avec injection d'image.
- Restitution photogrammétrique de contrôle
Restitutions parallèles (si possible) indépendantes sur des zones tests prédéfinies.
- Mesures terrestres de profils ou déterminations de points sur des surfaces (par exemple par RTK-GPS) et comparaison avec les valeurs interpolées provenant du modèle de terrain.

6.6. Documentation

Il est recommandé, dans le cadre de l'appel d'offres du projet, de demander les documents suivants, à l'aide desquels l'assurance de la qualité au sein de l'établissement de l'adjudicataire peut être établie :

- Rapport technique contenant les informations suivantes :
 - * Description des méthodes de saisie mises en œuvre et des bases utilisées à cet effet pour les données.
 - * Documentation du positionnement du capteur ou de la détermination de l'orientation externe, le cas échéant avec les calculs de décalage (dans le cas de projets de photogrammétrie, cette opération devrait être intégrée à l'aérotriangulation).
 - * Description du matériel et des logiciels utilisés, des mesures prises au sein de la société en vue de l'assurance de la qualité et des résultats des tests.
 - * Mesures de contrôle exécutées : points de calage, points de contrôle, utilisation de surfaces de test ou d'étalonnage.
 - * En cas de génération automatique : logiciel, pas du maillage, méthode de mise en correspondance (si elle est connue), paramétrage pour le type de terrain, filtrage, etc.

* Indication des paramètres de mise en correspondance

- Plan topographique du périmètre avec l'ensemble des données altimétriques saisies, distinguées par des couleurs différentes selon leur provenance / mode d'obtention (cf. Figure 4).
- Estompage avec un éclairage oblique (Top-View) ou plan des courbes de niveau avec une faible équidistance sur la totalité du périmètre du projet (cf. Figure 5 et Figure 6).
- Eventuellement plan du maillage triangulaire (cf. Figure 9)

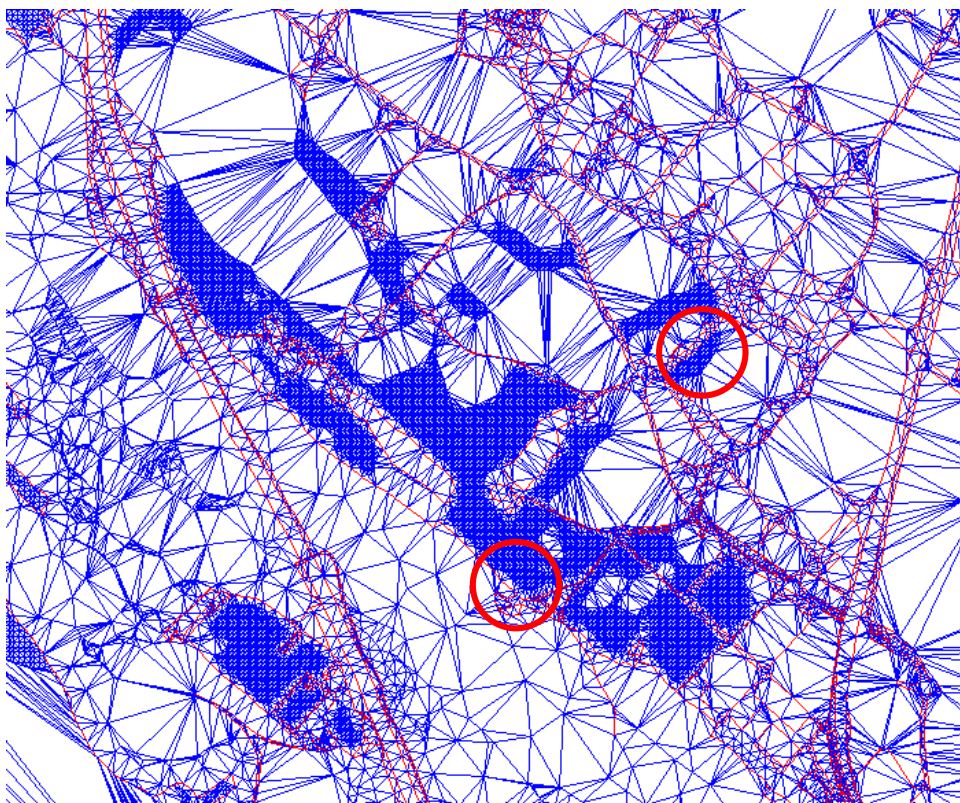


Figure 9 : Maillage triangulaire calculé

- Justification des différences altimétriques existant entre altitudes de points fixes ou de points de contrôle et altitudes du terrain interpolées sur le modèle (plan du périmètre en arrière-plan).
- Remise des données de mesures avec l'ensemble des attributs qui leur sont associés (en règle générale dans le format IMO/Interlis indépendant de tout système ou éventuellement en format DXF).
- Protocole des erreurs survenues lors de l'exportation des données et de leur contrôle dans le format IMO/Interlis.

7. Génération d'orthophotos

Les orthophotos sont pratiquement devenues une composante obligée de tout projet de photogrammétrie. Leur grande importance, leur large diffusion et leur utilisation parfois "irréfléchie" rendent indispensable la mise en place d'une assurance de la qualité soignée et rigoureuse dans ce domaine.

7.1. Méthodes

La génération d'orthophotos est scindée en deux étapes de travail qui sont :

- **le redressement différentiel** d'un cliché ou d'une image satellitaire d'orientation externe connue à l'aide d'un modèle numérique (de terrain ou de surface).
- **le mosaïquage**, c.-à-d. l'assemblage de plusieurs orthophotos pour constituer une orthophoto de plus grande taille ou une mosaïque d'orthophotos.

Aujourd'hui, la génération d'orthophotos constitue un processus pouvant être largement automatisé, requérant néanmoins une bonne connaissance des fondements théoriques qui le sous-tendent ainsi que du logiciel mis en œuvre à cet effet.

7.2. Points critiques

7.2.1. Redressement différentiel

La règle suivante prévaut : sur une orthophoto, seuls les objets fidèlement décrits par le modèle altimétrique seront correctement reproduits en planimétrie.

Par conséquent, le problème principal du redressement géométrique différentiel se situe au niveau :

- du phénomène du déplacement radial de l'image dans le cas de vues prises en perspective centrale, en particulier du déplacement planimétrique d'objets non contenus dans le modèle altimétrique (tels que les arêtes faîtières de toits ou les cimes des arbres)
- de la qualité du modèle de terrain ou de surface utilisé.

Déplacement de l'image

Le déplacement de l'image sur l'orthophoto est fonction :

- de la **distance principale** (c_k) – plus la focale est courte, plus les angles sont ouverts et les déplacements radiaux élevés
- de l'**extrait de cliché** utilisé ou de la distance maximale au point central du cliché (ρ') – plus l'extrait de cliché est étendu, plus le déplacement de l'image est élevé
- de l'**erreur altimétrique** ou de l'altitude d'un objet non modélisé (ΔZ)
- de la **déclivité locale du terrain** (α) (le déplacement est plus important lorsque le terrain est incliné à partir du point central de l'image : "l'eau s'écoule en direction du bord du cliché".)

En négligeant la déclivité locale du terrain, la formule approchée suivante peut être utilisée pour l'estimation des déplacements de l'image sur l'orthophoto (Δr) ou des déplacements correspondants des objets sur le terrain (ΔR) :

$$\Delta R = \frac{\Delta Z \cdot \rho'}{c_k} \quad (1)$$

$$\Delta r = \Delta R \cdot m_0 \quad (2)$$

Le tableau suivant présente le déplacement maximal des objets sur une orthophoto (format original du cliché : 23x23cm) en fonction de l'erreur altimétrique ΔZ pour un terrain plat :

Dist.	Recouvrement		Extrait de cliché utilisé					Déplacement-objet	
c_k [mm]	Long. [%]	Lat. [%]	Long. [%]	Lat. [%]	Long. [cm]	Lat. [cm]	ρ' max. [cm] (*)	ΔR f(ΔZ)	ΔR ($\Delta Z = 2m$)
150	60	20	40	80	9.2	18.4	10.3	0.68 * ΔZ	1.36 m
300	60	20	40	80	9.2	18.4	10.3	0.34 * ΔZ	0.68 m
150	70	40	30	60	6.9	13.8	7.7	0.51 * ΔZ	1.02 m
300	70	40	30	60	6.9	13.8	7.7	0.25 * ΔZ	0.50 m

Tableau 2 : Déplacements des objets sur des orthophotos en fonction de l'erreur altimétrique ΔZ .
(*) ρ' max. = Distance radiale maximale à partir du point principal de l'image

Qualité du modèle (de terrain ou de surface)

Du point de vue de la génération d'orthophotos, la qualité du modèle altimétrique est définie par les aspects suivants :

- la précision de la saisie des données du terrain
- la **qualité de la modélisation du terrain**, en particulier le rendu des zones les plus tourmentées du terrain au moyen de lignes de rupture et de points cotés
- éventuellement la **modélisation et la saisie** supplémentaires **d'ouvrages d'art** (tels que des ponts) conformément aux exigences spécifiées pour la production des orthophotos.

Les points suivants peuvent également se révéler potentiellement critiques :

Interpolation de MNT dans le cas du redressement différentiel

Afin d'optimiser le temps de calcul, une valeur altimétrique n'est généralement pas déterminée pour chaque pixel à calculer dans le cadre du redressement différentiel. Les altitudes de points dits "d'ancrage" sont en revanche déterminées à un intervalle donné. Les valeurs altimétriques des différents pixels sont ensuite interpolées entre ces points d'ancrage. La position et la densité de ces points d'ancrage exercent par conséquent une influence déterminante sur la précision géométrique des orthophotos. Dans le cas idéal, tous les points d'appui du MNT (nœuds du maillage triangulaire, points du quadrillage de MNT raster) sont utilisés en tant que points d'ancrage pour le redressement.

Orientations externes

La précision géométrique d'un cliché aérien redressé de manière différentielle dépend directement de la précision de ses orientations externes. Celles-ci sont tout particulièrement à contrôler en cas de reprise de données orientées provenant de

systèmes de tiers.

7.2.2. Génération de mosaïques

Raccords

Les raccords entre deux extraits de clichés voisins redressés devraient si possible être invisibles sur le produit final, c.-à-d. qu'ils ne devraient pas présenter de différences radiométriques ou d'erreurs géométriques significatives. Certains systèmes permettent un mosaïquage sous forme de carroyage avec des raccords standard rectilignes (cf. Figure 10). Un mosaïquage de ce type ne devrait être mis en œuvre que dans des zones non bâties et pour des exigences réduites. Cette méthode n'est pas admissible dans tous les autres cas.



Figure 10 : Mosaïquage avec placement automatique des raccords et déplacements géométriques importants dans les zones de raccord

Corrections radiométriques

La génération de mosaïques d'orthophotos optimales sur le plan radiométrique impose de compenser voire de corriger toute une série de phénomènes. Selon le système employé, ces compensations sont effectuées préalablement au mosaïquage ou durant ce processus et se traduisent par l'exécution d'opérations appropriées d'adaptation du contraste des clichés (Image Dodging Operations). Les corrections concernent les points suivants :

- **Réflexion en fonction de la direction** – La direction du rayonnement solaire fait que certaines parties des clichés aériens seront plus claires (photographiées "avec" le soleil) que d'autres (photographiées "contre" le soleil). Dans le cas de vols photogrammétriques effectués vers midi, il en résulte par exemple une baisse de luminosité du bord sud vers le bord nord. Ce gradient de valeurs de gris n'est pas perceptible au niveau d'une seule orthophoto, mais ces écarts de valeurs de gris peuvent en revanche occasionner de notables perturbations à plus grande échelle, au niveau d'une mosaïque. Une possibilité de réduction de cet effet consiste à sélectionner une **direction de vol orientée N-S** afin d'obtenir un recouvrement si possible important dans la direction du gradient de niveaux de gris (N-S) et de devoir ensuite utiliser des extraits de clichés de faible dimension.
- **Plage hyperlumineuse (Hot Spot)** – Une plage hyperlumineuse désigne une zone très localisée du cliché présentant une luminosité bien supérieure à celle de son environnement. En photogrammétrie aérienne, une plage hyperlumineuse perturbatrice peut être visible à l'endroit de la réflexion solaire directe, selon la nature

de la surface réfléchissante.

- **Perte de luminosité du centre du cliché vers ses bords** – Les objectifs photogrammétriques présentent une perte de luminosité du centre du cliché vers ses bords. Elle est particulièrement prononcée dans le cas d'objectifs grands-angles ou super grands-angles. Cette perte de luminosité est entre autres influencée par le phénomène dit de **vignettisation**, c.-à-d. le rétrécissement mécanique d'un rayon lumineux entrant de manière oblique dans un système optique.

La Figure 11 présente un exemple des problèmes radiométriques rencontrés (exemple tiré de la documentation Internet du logiciel OrthoVista™). La Figure 12 présente la mosaïque d'orthophotos corrigée.

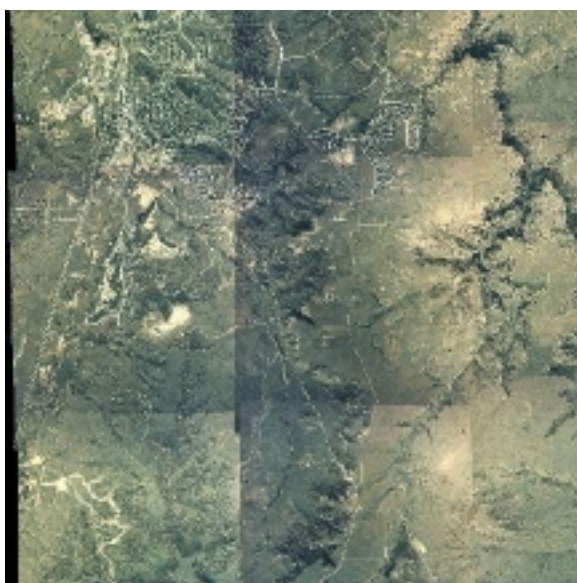


Figure 11 : Mosaïque d'orthophotos sans corrections radiométriques



Figure 12 : Mosaïque d'orthophotos avec corrections radiométriques

7.3. Exigences

Résolution géométrique d'orthophoto ⇔ Dimension minimale

La résolution géométrique de l'orthophoto ou la taille de pixel sur l'orthophoto devrait principalement dépendre de la dimension des objets à identifier. Une règle empirique veut que les objets dont la taille atteint au moins 2.5 (à 3) pixels sur l'orthophoto soient identifiables. Cela signifie, en d'autres termes, que la résolution géométrique d'une orthophoto devrait être inférieure à la moitié de la taille minimale des objets à saisir.

Exemple : Dimension minimale 20 cm $\Rightarrow$ résolution géométrique orthophoto ≤ 10 cm
($\approx$ exigence pour la résolution géométrique du cliché aérien scanné)

Par le passé, la résolution géométrique des orthophotos était souvent définie en fonction du volume de données résultant. Aujourd'hui, le critère de dimension minimale doit obligatoirement prévaloir.

Résolution géométrique d'orthophoto ⇔ Résolution de la scannérisation

La relation suivante peut servir de règle empirique pour la taille de pixel sur l'orthophoto ($P_{\text{Orthophoto}}$) en fonction de la résolution de la scannérisation ou de la taille de pixel du

cliché original scanné ($P_{\text{Cliché original}}$) :

$$P_{\text{Cliché original}} \leq P_{\text{Orthophoto}} < P_{\text{Cliché original}}^*2 \quad (\text{Rem.: tailles de pixels dans l'espace objet !})$$

Pour la génération d'orthophotos de qualité optimale, la taille de pixel sur l'orthophoto devrait être supérieure d'environ 20% à celle du cliché original scanné.

Exemple Taille de pixel sur le cliché original scanné = 20 cm (résolution de la scannérisation de 20 μm pour une échelle de cliché de 1 : 10'000) $\Rightarrow$ Taille de pixel sur l'orthophoto = 25 cm

Résolution géométrique de l'orthophoto $\Leftrightarrow$ Précision du MNT

Comme nous l'avons déjà indiqué au paragraphe 7.2.1, la précision géométrique d'une orthophoto dépend prioritairement de la précision du MNT utilisé. La formule (1) permet une estimation des erreurs géométriques causées sur une orthophoto par de telles erreurs altimétriques.

La règle empirique veut que la taille de pixel sur l'orthophoto ne soit pas inférieure à un sous-multiple de l'erreur planimétrique moyenne à craindre. Le risque d'une utilisation inappropriée des orthophotos est ainsi réduit (cf. également les recommandations formulées plus loin).

Précision géométrique des orthophotos

La précision géométrique d'orthophotos numériques comprend pour l'essentiel les composantes suivantes :

- Précision altimétrique du MNT : $m_H(\text{MNT})$
- Précision altimétrique des orientations externes ou de l'aérottriangulation : $m_H(\text{OE})$
- Précision planimétrique des orientations externes ou de l'aérottriangulation : $m_P(\text{OE})$
- Résolution géométrique (pas prise en compte plus avant dans ce cadre)

Les estimations suivantes constituent de bonnes approximations de la précision géométrique :

1. Détermination de l'erreur altimétrique moyenne totale m_H à partir de la précision altimétrique du MNT et de celle des OE : $m_H^2 = m_H^2(\text{MNT}) + m_H^2(\text{OE})$
2. Détermination d'une $m_P(\text{DO})$ moyenne ou d'un déplacement maximal d'objet causé par cette erreur altimétrique moyenne m_H (cf. Tableau 2).
3. Détermination de l'erreur planimétrique moyenne totale d'une orthophoto $m_P(\text{OP})$ à partir des composantes de déplacement d'objet $m_P(\text{DO})$ et d'erreur planimétrique des orientations externes $m_P(\text{OE})$: $m_P^2(\text{OP}) = m_P^2(\text{DO}) + m_P^2(\text{OE})$

Exemple : Si l'erreur planimétrique moyenne $m_P^2(\text{OP})$ sur l'ensemble de l'orthophoto ne doit pas dépasser la valeur de 1 m, alors l'erreur planimétrique moyenne de l'aérottriangulation et le déplacement d'objet moyen provoqué par les erreurs altimétriques ne doivent ni l'un ni l'autre excéder 0.7 m. Dans le cas d'un survol à 70/40% avec un objectif de 15cm, cela signifie que l'erreur altimétrique moyenne totale m_H (OE et MNT) ne devrait pas dépasser 1.4 m (cf. Tableau 2 -> $\Delta Z = 0.7\text{m} / 0.51$). En sens inverse, cette condition serait remplie dans le cas d'une erreur altimétrique moyenne de 1m pour le MNT comme pour l'aérottriangulation.

Paramètres de planification résultants

En raison des considérations précédentes et des valeurs limites pour la résolution géométrique de la scannérisation, un choix judicieux des paramètres suivants devrait être

opéré par le mandant ou par l'adjudicataire :

- Echelle pour les orthophotos imprimées
- Focale de l'objectif
- Echelle des clichés
- Recouvrement longitudinal et latéral
- Résolution géométrique des clichés originaux (résolution de la scannérisation)

Traitement des ouvrages d'art

Si des ouvrages d'art (d'importance) tels que des ponts, des passages supérieurs ou des murs de soutènement sont à représenter sur l'orthophoto aussi fidèlement que possible et de manière planimétriquement exacte, les exigences à satisfaire par le modèle numérique de terrain et les orthophotos doivent en faire expressément mention. Rappelons toutefois que l'intégration d'ouvrages d'art dans le MNT signifie un surcroît de travail considérable.

Déplacements d'images / Sélection des portions de clichés

Seules les portions centrales des clichés (à proximité du point principal) devraient si possible être utilisées, afin de minimiser le déplacement radial d'objets par rapport à leur base sur les orthophotos. Tous les clichés aériens saisis devraient par conséquent être intégrés dans la phase de production des orthophotos. Des solutions ne préconisant que la scannérisation ou l'utilisation d'un cliché sur deux sont par exemple inappropriées en zone bâtie.

Mosaïquage

- Les raccords entre clichés aériens voisins ne devraient pas se situer au niveau de bâtiments ou d'autres objets non contenus par le modèle de terrain.
- Une adaptation radiométrique devrait être entreprise aux raccords, en vue de garantir une transition continue des niveaux de gris.
- En cas d'écarts radiométriques conséquents entre groupes de clichés différents (survol par exemple de bandes voisines à des heures différentes de la journée), une adaptation radiométrique ou une 'normalisation' des photos devrait être entreprise avant le mosaïquage.
- Le mosaïquage devrait s'effectuer par projet, indépendamment de la répartition définitive des feuilles souhaitée. Le mosaïquage ou la disposition des raccords ne doit en aucun cas suivre la répartition des feuilles souhaitée.

Répartition des clichés / Répartition des plans

Le volume des données reste un critère d'importance parmi les considérations conduisant à déterminer la répartition des orthophotos.

- En cas d'utilisation d'une répartition standard des feuilles (par exemple 50cm x 50cm – répartitions héritées des projets d'orthophotos analogiques), il existe un risque réel que de nombreux utilisateurs potentiels des orthophotos numériques ne puissent pas manipuler les volumes de données produites du fait de limitations de leurs systèmes. Cette remarque vaut particulièrement pour le cas où le travail doit concerner la zone d'interface de plusieurs orthophotos.
- Si l'utilisation des orthophotos numériques par des tiers à l'aide de moyens informatiques standard est envisagée, le volume de données non compressé d'une orthophoto ne devrait pas excéder 25 à 50% de l'espace mémoire principal

normalement disponible, pour permettre l'assemblage de plusieurs orthophotos le cas échéant (Etat en 2000 : environ 50 Mo par orthophoto).

- Ces considérations perdront de leur actualité en cas de constitution future de banques de données d'orthophotos indépendantes du découpage en feuilles permettant une grande flexibilité dans la diffusion des données.

7.4. Recommandations

But de l'utilisation des orthophotos

L'éventail des utilisations possibles des orthophotos, compte tenu de leur précision, devrait être fixé dès la planification du projet. Dans le cas des orthophotos comme dans celui des autres types de données, il existe toujours un risque qu'elles soient utilisées au-delà des limites du domaine prévu, à bon voire à mauvais escient.

Lors de la détermination de la résolution géométrique, il faut :

- choisir la taille de pixel dans l'ordre de grandeur de l'erreur planimétrique à craindre
- ou, dans le cas d'une taille de pixel significativement plus faible (par exemple 10 cm pour une erreur planimétrique moyenne à craindre de 50 cm), indiquer de manière explicite la précision de l'orthophoto.

Orthophotos d'essai, sous forme numérique et imprimée

Le traitement radiométrique des orthophotos définitives recèle toujours une composante **subjective**. C'est la raison pour laquelle il est vivement recommandé à l'adjudicataire de transmettre des orthophotos de zones représentatives du projet, sous forme numérique et imprimée (!), au mandant pour obtenir son approbation avant de se lancer dans la phase de production.

Des copies papier des clichés aériens originaux peuvent par exemple servir de référence ou de point de repère pour cette acceptation, ces photos ayant déjà été utilisées dans le cadre de l'approbation des clichés analogiques.

7.5. Méthodes et mesures de l'AQ

7.5.1. Examen formel

- Intégralité (dans le cas par exemple de recouvrements insuffisants ou en zone montagneuse)
- Couverture intégrale du périmètre de l'orthophoto par un MNT (précis)
- Zones floues (causées par exemple par un filtrage trop important au niveau des raccords)
- (In)visibilité des raccords
- Ecart radiométriques systématiques entre orthophotos
- Contrôle de perturbations systématiques des images (consécutives par exemple à une trop forte compression des données durant le processus de production)
- Compatibilité des informations de géoréférencement fournies avec les clichés et de l'environnement SIG du mandant (à vérifier suffisamment tôt au moyen d'un jeu de données de test)

7.5.2. Examen de la précision

La qualité géométrique d'orthophotos peut être vérifiée visuellement ou par voie de calcul, par l'utilisation de points de contrôle ou par la superposition de données de SIG. En règle générale, ce contrôle peut être effectué par le mandant à l'aide de ses propres outils de SIG et constitue ce faisant une mesure d'AQ aussi simple qu'efficace.

Points de contrôle

- photogrammétriques : détermination stéréoscopique
- GPS, tachéométrie : problème de l'identification des points sur l'OP

Il doit être tenu compte des points suivants en cas d'analyse de la précision à l'aide de points de contrôle :

- répartition des points de contrôle sur la totalité de l'image
- points de contrôle répartis sur tous les types de terrain présents
- l'inspection numérique et visuelle (!) des résidus peut révéler la présence d'erreurs systématiques

Superposition de données de SIG

- superposition de données vectorielles (en particulier le réseau routier !)
- superposition de plans existants (scannés, géoréférencés et géocodés)

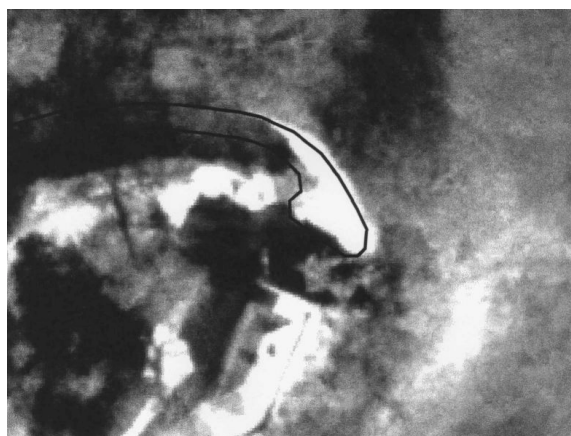


Figure 13 : Orthophoto basée sur un MNT sans lignes de rupture – superposition de données vectorielles (bord de chemin)

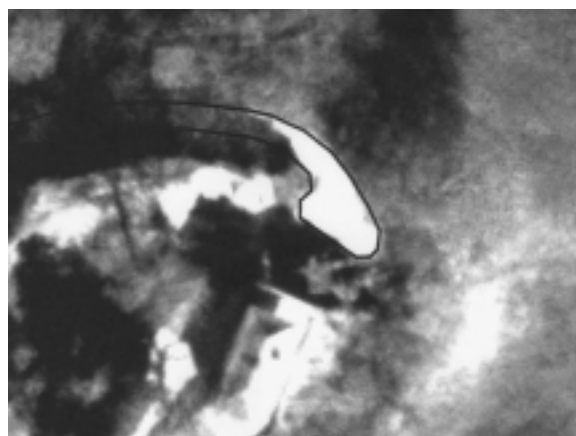


Figure 14 : Orthophoto basée sur un MNT avec lignes de rupture – superposition de données vectorielles (bord de chemin)

7.6. Documentation

Le rapport de l'adjudicataire doit au moins comprendre les aspects suivants de la génération d'orthophotos :

- clichés, orientations externes utilisées
- résolution géométrique
- méthode de rééchantillonnage employée (interpolation des pixels)
- méthode et paramétrage de l'interpolation des altitudes (transformation altimétrique pixel par pixel ou méthode des points d'ancrage, position et densité de ces points)
- modèle altimétrique : modèle de terrain ou modèle de surface, périmètre, précision,

utilisation de lignes de rupture, modélisation d'ouvrages d'art

- adaptations d'images éventuellement réalisées (Image Dodging)
- mode de détermination des raccords (automatique, manuel)
- méthode et paramétrage du traitement des raccords
- synoptique 'répartition des orthophotos' (mosaïque définitive des orthophotos)
- géoréférencement (par exemple fichiers GeoTIFF et / ou TIFF World), formats de données, compression des données

8. Restitutions

La saisie ou la mise à jour de données géoréférencées 2D ou 3D à partir de clichés métriques est d'ordinaire très économique en plus d'être d'actualité (au travers par exemple de la mise à jour de la couche de la couverture du sol de la MO, de la mise à jour des surfaces agricoles utiles ou de la saisie des formes des toitures pour des modèles urbains en 3D). Dans ce domaine, la restitution photogramétrique est en concurrence avec l'exploitation d'orthophotos dans un environnement SIG. Ce chapitre a pour objet de récapituler et de comparer entre elles les principales caractéristiques ainsi que les points forts et les points faibles des différentes possibilités de restitution. Une sélection d'aspects qualitatifs spécifiques sera présentée en guise de conclusion.

8.1. Méthodes

Les méthodes de restitution peuvent être distinguées en fonction des critères suivants :

- stéréoscopiques ⇔ monoscopiques
- numériques ⇔ analogiques

stéréoscopiques ⇔ monoscopiques

La subdivision en stéréorestitution et monorestitution reflète également la distinction entre restitutions photogramétriques et non photogramétriques.

	Stéréorestitution	Monorestitution
Caractéristiques	• Restitution 3D à partir de couples de clichés stéréoscopiques sur un restituteur photogramétrique	• Restitution à partir d'orthophotos numériques sur une station de travail de SIG
Avantages	• Tous les objets sont représentés à leur position planimétrique exacte et peuvent être restitués de manière géométriquement correcte • Meilleure visibilité / possibilité d'identification d'objets, en particulier dans des zones couvertes de végétation (lisières de forêts, chemins en sous-bois) • Possibilité de restitution d'un objet à partir de différents stéréomodèles • Précision et fiabilité plus élevées	• Systèmes de restitution bon marché (matériel et logiciels) • Vision stéréoscopique non requise
Inconvénients	• Poste de travail stéréoscopique requis	• Les objets ne figurant pas ou de manière incorrecte dans le MNT ne sont pas reproduits à

		leur position planimétrique exacte (par exemple des bâtiments, des murs de soutènement ou des ouvrages d'art de manière générale) • Certaines informations peuvent être inaccessibles ou masquées pour l'observateur selon la position de prise de vue (par exemple les lisières de forêt)
--	--	--

numériques ⇔ analogiques

La suite ne se préoccupe que de la restitution photogramétrique. A cet effet, le type de restituteur ou de support d'information utilisé constitue une distinction d'importance :

	Restitution numérique	Restitution analogique
Caractéristiques	• Restitution sur une station de travail de photogrammétrie numérique	• Restitution sur un restituteur photogramétrique analytique
Avantages	• Changement de modèle très rapide • Injection standard de données de SIG existantes • Potentiel de liaison ou d'intégration directe dans des SIG simplifiant voire supprimant tout transfert de données et traitement ultérieur coûteux en temps • Potentiel d'automatisation des restitutions	• Ergonomie bonne sinon très bonne • Infrastructure existante et opérateurs expérimentés
Inconvénients	• Contenu dépendant de la résolution de la scannérisation • Ergonomie perfectible • Investissement nécessaire (des systèmes à des prix de plus en plus abordables sont à présent disponibles sur le marché)	• Injection de données de SIG nécessitant un volume de travail important

8.2. Points critiques

Précision planimétrique dans le cas de restitutions à partir d'orthophotos

La distinction au niveau de la qualité est surtout sensible entre la stéréorestitution photogramétrique et la restitution à partir d'orthophotos.

Dans le cas d'une restitution à partir d'orthophotos, les objets absents du MNT présentent

une erreur planimétrique correspondant aux valeurs récapitulées sur le Tableau 2 (chapitre sur les orthophotos). Selon la focale de l'objectif et les recouvrements des clichés, l'erreur planimétrique sur l'orthophoto peut atteindre 25% à 70% de l'erreur altimétrique dans des cas défavorables. Un mur de soutènement d'une hauteur de 4 mètres absent du MNT peut de ce fait présenter une erreur planimétrique pouvant aller jusqu'à 3 mètres sur l'orthophoto. Cette situation peut également s'appliquer aux lisières de forêt, en particulier pour des zones fortement boisées. En cas de restitution sur l'orthophoto, il faut alors compter avec une erreur planimétrique systématique pouvant atteindre 70% de la hauteur des arbres.

Reprise d'orientations externes connues

La précision des restitutions photogrammétriques dépend directement des orientations externes, ce qui peut entraîner des difficultés dans le cas de la mise en œuvre de systèmes différents (définition des axes de rotation, unités, etc.). (cf. aussi chapitres relatifs aux MNT et aux orthophotos). Un contrôle de la position planimétrique des points de calage et éventuellement des points de liaison, au moyen des listes de coordonnées et des croquis de repèrement afférents, devrait toujours être entrepris.

Couverture complète du périmètre et levé des lacunes

L'intégralité et la cohérence des informations à saisir ainsi que le traitement des lacunes, c.-à-d. d'objets ou de zones ne pouvant pas être restitués par voie photogrammétrique ou uniquement en partie, sont à définir au moment de l'attribution du mandat. A cette occasion, il convient également de déterminer si les lacunes sont à lever et, dans l'affirmative, de préciser celui qui, du mandant ou de l'adjudicataire, devra assumer la responsabilité du levé des lacunes.

8.3. Recommandations

Utilisation d'orthophotos

Les restitutions à partir d'orthophotos devraient être limitées au terrain dégagé et à des applications nécessitant une précision de l'ordre de grandeur de celle du MNT. Des restitutions visant l'exactitude planimétrique pour des objets absents du MNT concerné (tels que des ouvrages d'art) sont à éviter.

GT AQ photogrammétrie & génération de MNT

Muttenz, juillet 2000