

Les drones au service de l'enseignement

BERTRAND CANNELLE¹

Résumé : Pendant de nombreuses années, l'apprentissage de la photogrammétrie s'est fait grâce à des images argentiques, des stéréoscopes et des restituteurs. La prise de vue aérienne ainsi que les calculs de plan de vols ne se faisaient qu'à l'aide de manuels et d'illustrations. Le processus photogrammétrique complet, de l'acquisition à la production, d'une carte était difficilement réalisable : il était coûteux et prenait également beaucoup de temps (acquisition des images, développement des clichés, mise en place des couples...).

Aujourd'hui, le plan de vol, calculé en classe, est réalisé quelques instants plus tard par un drone. Les données sont directement exploitables dès la plateforme posée : contrôle du recouvrement effectif, contrôle qualité des images et aérotriangulation. Là aussi, le travail a considérablement changé : fini les six points manuels de von Gruber par couple et vive les points SIFT par milliers ! La production de modèle de terrain, limitée à des courbes de niveaux, est réalisable aujourd'hui en quelques minutes. La production d'ortho-photos est également réalisée en quelques instants en utilisant le modèle numérique issu de la corrélation.

Ces nouvelles techniques n'ont pas que des avantages : l'explication des algorithmes (SIFT, aérotriangulation, modèles numériques) n'est pas toujours aisée et il n'y a plus d'explications réalistes possibles : les restituteurs ont été remplacés par des fichiers contenant les rapports des calculs beaucoup moins intuitifs.

Cet article présente les évolutions de l'enseignement à la fois d'un point de vue pratique mais également d'un point de vue théorique. Il met également l'accent sur les aspects historiques qui sont encore visibles aujourd'hui à travers les logiciels.

1 Introduction

La photogrammétrie a été, pendant des dizaines d'années, une discipline confidentielle réservée aux instituts géographiques nationaux parce que les matériels utilisés étaient extrêmement coûteux : caméras argentiques calibrées précisément, mesure de points sur le terrain afin de caler les images dans un référentiel connu et restitutions sur des appareils dotés de qualités optiques et mécaniques extrêmement efficaces.

Depuis quelques années, l'arrivée du numérique mais surtout des drones ont permis de démocratiser cette discipline (KASSER & EGELS 2001). Par contre, cela a entraîné quelques bouleversements sur l'ensemble de la chaîne de production et également dans l'enseignement.

Dans cet article, nous allons présenter comment le drone a révolutionné l'apprentissage de la photogrammétrie, puis nous expliciterons l'intérêt de celui-ci à chaque étape du processus : préparation, acquisition, traitement des données et production.

¹ HEIG-VD, route de Cheseaux 1, CP 521, CH-1401 Yverdon-les-Bains,
E-Mail bertrand.cannelle@heig-vd.ch

2 L'initiation à la photogrammétrie

La plupart des personnes ayant fait de la photogrammétrie se souviennent de leur premiers cours : démonstration des équations de la parallaxe, passage sur un restituteur pas toujours adapté à la vision de la personne (d'où un léger mal de tête...), apprentissage du vocabulaire : convergence, site, déversement... (ALBERTZ & KREILING 1980). En général, il a marqué les esprits mais, malheureusement, pas forcément de façon positive. Certains ont même découvert tardivement que les mesures se faisaient sur des clichés et que les formules permettant les mesures tridimensionnelles n'étaient en fait que des vis de réglages des instruments.

Aujourd'hui, la première prise de contact est beaucoup plus facile : il suffit de présenter le drone (figure 1), la camera qu'il emporte et le tour est joué. Il est possible en une demi-journée de réaliser toutes les étapes :

- Acquisition d'images par drones
- Visualisation des données
- Réalisation d'une aérotriangulation
- Production d'un modèle numérique de surface ainsi qu'une orthophoto.
- Restitution d'objets ou de bâtiments en utilisant la saisie multi-images.

Après ce premier contact, il est beaucoup plus facile de parler de points de liaison ou d'appui, de position et d'orientation d'images dans l'espace...

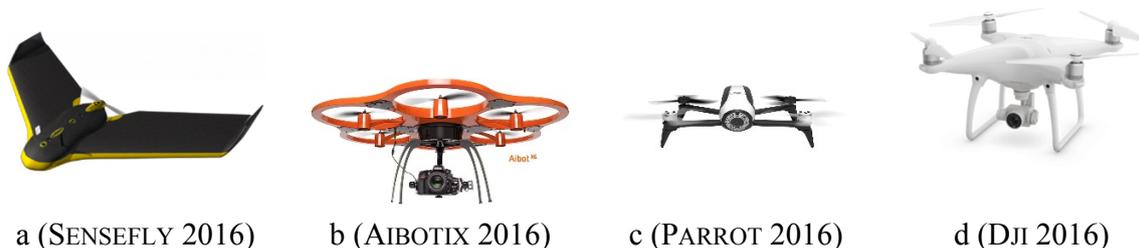


Fig. 1: Exemple de drones pouvant être utilisés. (a) et (b) drones professionnels, (c) et (d) drones amateurs

3 Préparation de chantiers, plan de vol et acquisition

La préparation de chantiers photogrammétriques était réservée aux sociétés de prises de vues. Ce point n'était pas forcément utile dans une formation traditionnelle et n'était pas toujours abordé. Aujourd'hui le vol est souvent réalisé par la personne qui souhaite exploiter le chantier. Elle doit donc être sensibilisée aux problématiques de l'acquisition : autonomie de la plateforme, choix de la résolution, contraintes météorologiques, adaptation au terrain.

Sur la figure 2, on peut voir un exemple de plan de vol complexe. En 2.a, l'altitude de vol a dû être adapté afin d'assurer une résolution adaptée sur toute la zone. En 2.b, on se rend compte des difficultés liées à l'acquisition avec un drone. La zone en bleue indique une reprise de bande : la surface étant importante, le vol a été découpé en deux zones et, afin d'éviter les problèmes de recouvrement, une bande commune entre les deux vols a été réalisés. Par contre, un des problèmes qui arrive de temps en temps et l'absence d'une ou plusieurs photos (en rouge sur la figure 2.b).

En effet, sur les drones amateurs, il n'y a aucun acquittement lorsqu'une photo est prise. Il faut donc adapter les paramètres de recouvrement afin de pallier ce problème, par exemple en indiquant un recouvrement de 60% par 60%.

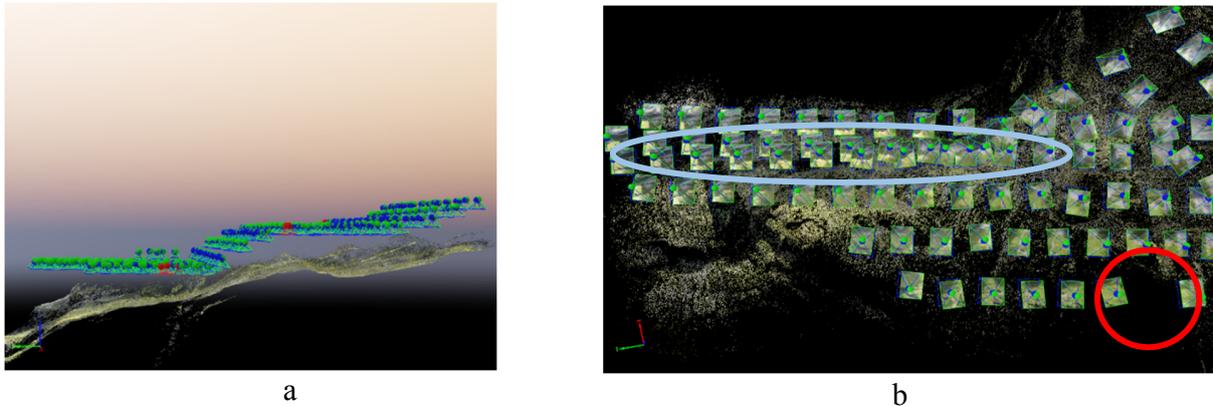


Fig. 2: Plan de vol complexe. (a) gestion des altitudes pour adapter la résolution. (b) bleu : reprise de bande rouge : absence de données.

4 Dépouillement des données

Après l'acquisition des données, il faut passer au post-traitement, étape qui permet d'associer les méta-données de vol aux images afin que chacune ait une position et une orientation. Ces métadonnées associées aux images se trouvent dans les tags exifs, informations visibles par l'explorateur windows (voir figure 3) ou grâce à certains logiciels spécifiques (exiv2 (EXIV2, 2016)).

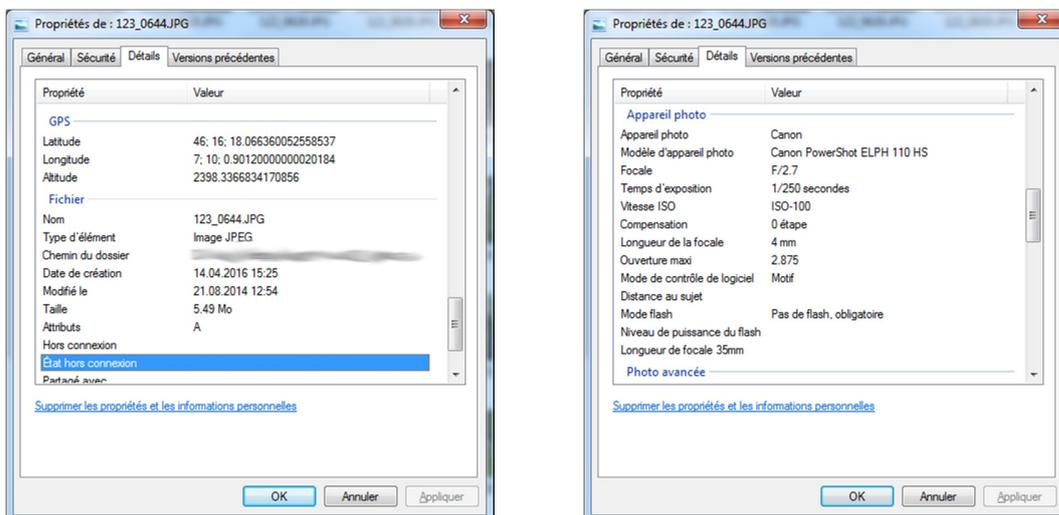


Fig. 3: Exemple d'informations de positionnement d'une image.

5 Aérotriangulation

Tous les drones ne possèdent pas de système de positionnement, ou il n'est pas assez précis. C'est pourquoi il est toujours nécessaire d'effectuer l'aérotriangulation, étape qui permet de retrouver de manière précise, la position et l'orientation des images au moment de la prise de vue. Nous allons détailler les étapes importantes qui sont arrivées depuis le numérique.

5.1 Points de liaison

Les points de liaison en photogrammétrie sont un élément essentiel pour assembler les images les unes par rapport aux autres. La première chose enseignée était les 6 points de von Gruber (figure 4) qui consiste à déterminer 6 points homologues par couple (5 étant le minimum + 1 en contrôle), répartis de façon uniforme dans la zone de recouvrement. Le numéro et l'emplacement des points sont indiqués sur la figure 4.

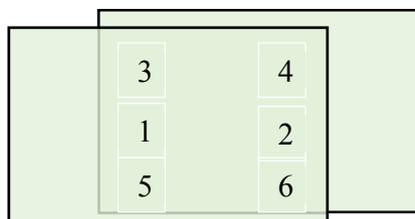


Fig. 4: Points de von Gruber

Avec les drones, nous n'avons pas (ou difficilement) de bandes rectilignes avec des recouvrements rectangulaires (voir partie 4) et le travail ne se fait plus manuellement. Tous les logiciels actuels utilisent des algorithmes (par exemple, SIFT (LOWE 2004) ou encore FAST (ROSTEN & DRUMMOND 2006)) qui détectent et appariant les points automatiquement. Le principal avantage est le nombre de points extraits, pouvant aller jusqu'à plusieurs milliers par couple, mais malheureusement comportant un nombre de fautes non négligeable. Il a donc fallu mettre en place des stratégies (comme RANSAC (FISCHLER & BOLLES 1981), qui consiste à tester plusieurs sous ensemble de données pour calculer l'orientation relative des images et de conserver la meilleure) basées sur les statistiques, ou encore sur la position approchée des images afin de ne garder que les bonnes mesures. Un deuxième inconvénient est la répartition non homogène dans la zone de recouvrement ce qui peut entraîner des mises en places erronées. La figure 5 présente les points homologues extraite (5.b) à partir d'une image (5.a). Certaines zones sont plus propices à la détection de points (changement de contraste, de couleurs, détails dans l'image : pierre...) et d'autres moins (zones uniformes, neige...)



Fig. 5: Exemples de points homologues automatiques. (a) Image initiale et (b) points de liaison extraits

Le numérique a permis d'effectuer un grand nombre de mesures dans un temps relativement court mais dont la qualité dépend : du contenu de l'image et des algorithmes de détection de fautes qui peuvent être perfectibles : c'est aujourd'hui un problème récurrent lorsque les chantiers ne fonctionnent pas et dont il faut essayer de prendre en compte lors de l'acquisition, notamment en augmentant le recouvrement dans les zones complexes ou en réalisant des bandes à différentes altitudes afin d'augmenter les zones propices à la détection.

5.2 Compensation

La compensation a elle aussi évoluée, notamment à cause des nombres de mesures par couple (cf partie précédente) mais elle a aussi dû s'adapter. Le but de la compensation est de déterminer précisément la position et l'orientation des images lors de la prise de vue. Malheureusement, les drones ne peuvent pas garantir les acquisitions identiques aux plans de vols initiaux. Il a donc fallu mettre en place des stratégies afin de pallier cette difficulté mettre l'accent dans la formation sur les étapes automatiques actuelles et leurs limitations.

5.2.1 Avec solution initiale

La solution initiale provient généralement d'un GNSS qui sert également au pilotage du drone. Dans la majorité des cas la précision de position est métrique. Concernant l'orientation, elle est soit déduite de la trajectoire du drone, soit issue de capteur d'orientation dont la précision est de quelques degrés. Ces informations servent, dans un premier temps, de prédicteurs pour l'appariement d'images : inutile d'appareiller une image en début de bande avec une image située à la fin. Ensuite, cette solution initiale peut servir à la détection de faute sur les mesures homologues elles-mêmes en se basant sur des considérations géométriques (résidus images...) afin d'aider les algorithmes de détection de fautes. Malheureusement, dans certains cas, lorsque la précision est trop dégradée (mauvaise réception GNSS à cause de masques ou de multi trajets par exemple), on peut être contraint de supprimer ces informations. En effet, des informations erronées ne permettent plus de détecter les mesures vraies ou fausses et entraînent une divergence du calcul. Le processus devient donc identique à celui expliqué juste après.

5.2.2 Sans solution initiale

Tous les drones ne possèdent pas de système de positionnement. Des stratégies ont donc été mises en place pour déterminer une solution initiale avant d'effectuer la compensation mais avec certaines limites.

Tout d'abord, la détection des points homologues (voir partie 5.1) a lieu entre tous les couples d'images possibles dans la mesure où le logiciel ne sait pas quelles images sont proches les unes des autres. Il y a, pour N images, $N \times (N-1)$ couples à calculer, ce qui peut être très long... Ensuite, le programme choisi une image, généralement l'image qui a le plus points homologues, comme référence, puis calcule les poses relatives des images voisines par rapport à cette image et ainsi de suite.

Malheureusement, ces hypothèses ne se basent que sur des statistiques et peuvent parfois arriver à des mises en place erronées : deux images sont mises en place avec uniquement des points de liaisons faux, mais qui n'ont pas été détectés comme tels. C'est le cas notamment en photogrammétrie de façade ou les fenêtres se ressemblent entre les étages. On peut donc arriver à un géoréférencement totalement aberrant mais avec des indicateurs relativement bons

Il faut donc que l'opérateur ait un regard critique afin de trouver l'erreur et de remédier au problème. En pratique, il faut invalider toutes les images mal géoréférencées, puis les réactiver les unes après les autres en fonction de leurs emplacements par rapport au bloc déjà mis en place.

5.3 Validation et export des résultats

Les données d'aérotriangulation ne sont pas très intéressantes en soit. Ce sont les produits qui en découlent qui le sont (voir partie suivante). Par contre, il est nécessaire que les résultats soient valides afin d'avoir des produits de qualité. Il faut donc connaître les outils permettant de savoir si un calcul est cohérent ou non et si toutes les données sont exploitables. Nous présenterons également les difficultés des formats d'exports, qui doivent permettre de passer d'un logiciel à l'autre mais qui ne sont pas toujours simples.

5.3.1 Validation des résultats

Nous allons présenter et détailler différents indicateurs qui sont généralement fournis par les logiciels et qui permettent de savoir si un calcul est bon ou non.

5.3.1.1 Indicateurs statistiques

Après une compensation, il y a différentes grandeurs qui sont calculées et qui doivent faire l'objet d'une analyse :

- Résidus moyens / erreur moyenne / erreur de reprojection : correspond à l'écart entre la mesure faite dans l'image (points de liaison) et la reprojection du point 3D correspondant (mesure en orange et reprojection en vert figure 6.a). Elle est normalement exprimée en pixel (car on travaille avec des images numériques) mais peut encore être exprimée en millimètre. Normalement cette valeur doit être inférieure à 1 pixel.
- Taux de recouvrement (figure 6.b) : cette valeur permet de savoir si une zone a été acquise par 1, 2, 3 images ou plus. En photogrammétrie, il faut qu'une zone soit photographiée par au moins 2 images pour être mesurable par stéréoscopie. Cette carte ne prend pas forcément en compte les zones de masques provoquées par les bâtiments notamment en milieu urbain, ni les masques dûs au relief accidenté. Il faut donc analyser cette carte avec soin.
- Nombre de points de liaison entre les images (figure 6.c) : dans la mesure où les points de liaison sont calculés de manière automatique, nous ne maîtrisons ni le nombre (ou uniquement le nombre maximum) ni la répartition. Il faut donc être vigilant sur ce type de graphique afin d'éviter les zones avec peu de points de liaison : zone où le bloc est moins bon géométriquement et là où il peut y avoir des anomalies géométriques comme par exemple sur la zone en rouge de la figure 6.c. En fonction des logiciels, on peut : relancer les calculs en augmentant le nombre de points de liaison, ajouter des points de liaisons manuels ou encore refaire un vol si nécessaire.

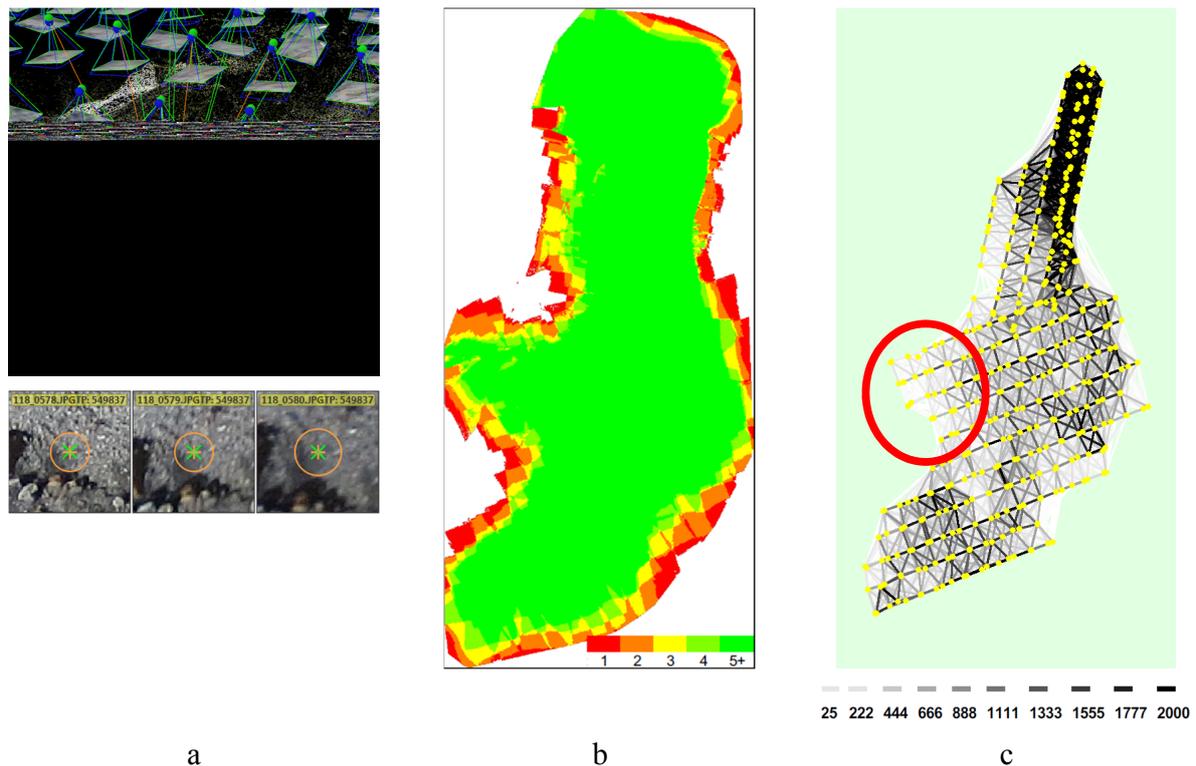


Fig. 6: Indicateurs après compensation

- Résidu sur les points d'appui (GCP : Ground Control Point) : deux grandeurs sont généralement fournies :
 - Erreur sur les coordonnées 3D : grandeur exprimée dans l'unité du système terrain (m ou cm). L'erreur doit être en adéquation avec la précision des coordonnées 3D mais également avec la précision de pointé de l'objet dans l'image (précision de l'opérateur ou de l'algorithme d'extraction).
 - Résidu image / erreur de reprojection : correspond à l'écart entre la mesure faite dans l'image et la reprojection du point 3D correspondant. Là encore, l'erreur doit être en adéquation avec la précision de pointé de l'objet dans l'image (précision de l'opérateur ou de l'algorithme d'extraction). Pour un opérateur humain, elle est de l'ordre du pixel. Pour un algorithme, elle peut être de 0.1 pixel voire mieux.

Une erreur sur les résidus images est souvent révélateur d'une erreur de pointé : l'opérateur s'est trompé de cible, de détail... entre les différentes images. De forts résidus sur les points terrains peuvent venir soit : d'une erreur de coordonnées/de nom ou d'une mauvaise aérotriangulation.

Il faut également prendre garde que l'erreur ne vienne pas forcément du point ayant les plus forts résidus parce que le processus de compensation consiste à répartir les écarts entre toutes les mesures sur les points de liaison et d'appui.

Une fois tous ces critères validés, si l'opérateur souhaite changer de logiciel, exporter les données.

5.3.2 Exports des résultats

L'export de résultats devrait être une étape relativement simple et triviale, mais en pratique ne l'est pas forcément. Voici les principales sources de problèmes lors de la conversion :

- L'unité des mesures images : aujourd'hui nous travaillons avec des images numériques et la plupart des logiciels travaille avec comme unité le pixel. Seulement, certains logiciels historiques travaillent encore en millimètre. Il faut donc convertir les données en connaissant la taille d'un pixel (souvent quelques microns...). Attention, la focale sur les appareils photos compacts utilisés peut être de quelques millimètres alors que les caméras aériennes étaient plutôt de l'ordre d'une centaine de millimètres.
- Le repère image : les images numériques ont traditionnellement un repère comme sur la figure 7.a : origine en haut à gauche, axe des x correspondant aux colonnes dans l'image et axe des y vers le bas correspondant aux lignes. Le repère présenté sur la figure 7.b correspond au repère image historique : origine au centre de l'image et axe des x horizontal et axe des y vertical. Le repère présenté en 7.c a déjà été rencontré : l'origine est située en bas à gauche et axe des x horizontal et axe des y vertical. Malheureusement, chaque logiciel utilise ses propres conventions qui sont plus ou moins bien décrites. Lors de l'export des mesures images, il faudra donc faire attention et au repère et à l'unité...

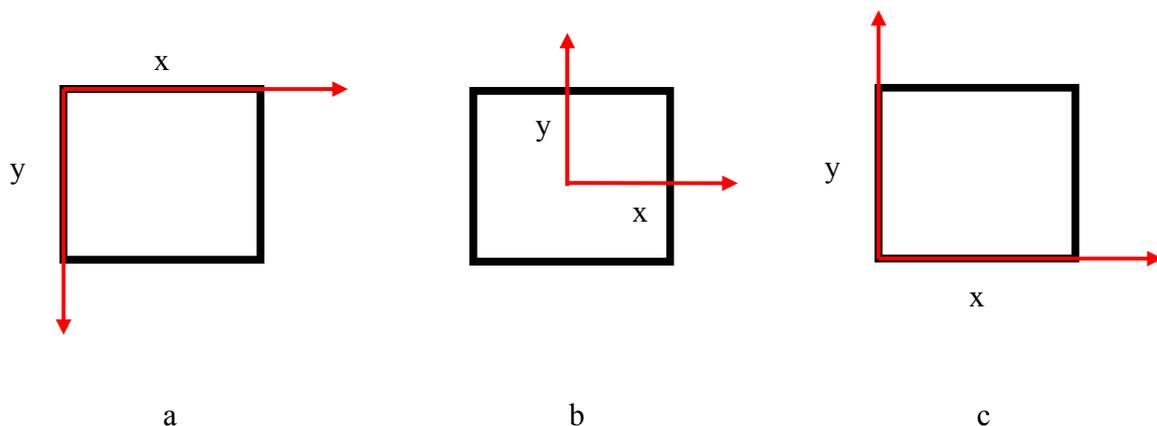


Fig. 7: Exemples de conventions de repères images existants à l'heure actuelle

- Géoréférencement d'images :
 - Orientation du cliché : positionner un objet dans l'espace n'est pas très compliqué, il suffit de connaître l'unité du repère et de donner les trois coordonnées X, Y et Z.
 - Orientation du cliché : historiquement les orientations étaient calculées à partir de 3 angles (convergence, site, déversement (ALBERTZ & KREILING 1980) ou encore oméga, phi et kappa). Pour obtenir la rotation globale, il suffit de faire le produit des 3 rotations. Malheureusement, le produit matriciel étant non commutatif, il convient de savoir dans quel sens les multiplier, sens qui est rarement communiqué par les logiciels... Ensuite, en fonction du repère image choisi (cf point précédent), la rotation ne sera pas exprimée de la même manière (et donc les angles non plus).

Il convient ensuite d'être au clair sur l'unité angulaire choisie : degré, radian, grade... là encore la documentation n'est pas toujours adaptée. Enfin il faut ensuite savoir si la rotation transmise permet de passer du repère terrain au repère image ou l'inverse. Il ne s'agit que de la transposée au sens mathématique mais rajoute une combinaison supplémentaire à toutes les options énumérées précédemment. Il faut généralement passer beaucoup de temps pour échanger des données d'un logiciel l'autre si l'export n'est pas prévu.

6 Produits de la photogrammétrie

Après avoir acquis puis géoréférencé précisément les images, nous allons maintenant détailler les différents produits réalisables : tout d'abord la restitution, les modèles numériques et enfin l'orthophoto.

6.1 Restitution

L'une des difficultés de l'acquisition par drone est qu'elle est peu propice à une restitution stéréoscopique traditionnelle. En effet, les images ne sont toujours parallèles et il peut y avoir des changements d'altitude qui provoquent un inconfort lors de la saisie. Par contre, il existe une autre solution : la saisie multi-images. Cela consiste à saisir l'objet pas uniquement dans 2 images mais dans beaucoup plus (figure 8). La saisie est faite dans chacune des images séparément : cela permet d'augmenter la précision de saisie dans la mesure où l'opérateur réalise la saisie dans des images prises avec de fortes différences de points de vue. Sur la figure 8.a, on peut voir les différents faisceaux (en orange) qui servent à la mesure du point et ceux qui pourraient être mesurés (en vert). Il faut veiller à ce que les faisceaux servant à la mesure soient réparties afin d'avoir une intersection franche qui permet une bonne détermination du point 3D.

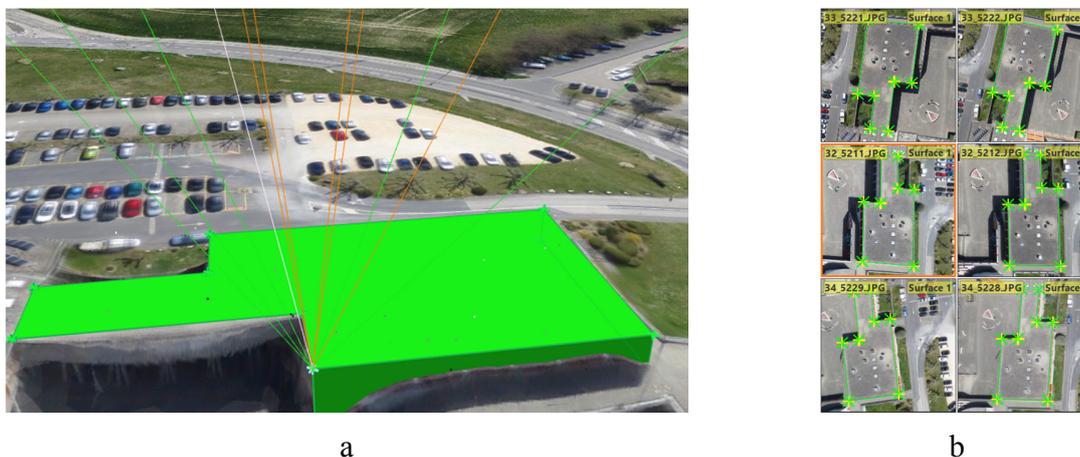


Fig. 8: Principe de restitution multi-images. (a) Faisceaux servant à la reconstruction, (b) Saisie de la surface dans 6 images

6.2 Modèle Numérique de Surface

Un des produits de la photogrammétrie par drone est le modèle numérique. Il s'agit d'un modèle numérique de surface car il décrit le terrain et les objets qui se trouvent dessus. La génération se

fait automatiquement grâce à des algorithmes de reconstruction comme par exemple (ROY & COX 1998).

Il existe plusieurs stratégies de génération mais le principe de base est de tester, pour une position planimétrique (X,Y) plusieurs valeurs d'altitude Z et de ne conserver que la valeur de Z pour laquelle la reprojection dans chacune des images est identique. Il peut donc y avoir des difficultés lorsque les zones sont homogènes, des motifs répétitifs ou encore lorsque les points de vues entre les images sont trop différents.

On peut, en général, définir le type de modèle numérique que l'on cherche à reconstruire : surface lisse (figure 9.b), surface normale (figure 9.c) ou surface accidentée (figure 9.d). Il faudra adapter le paramètre en fonction du résultat souhaité : calcul de volumétrie, calcul hydraulique, orthophoto... Un modèle « lisse » aura tendance à éliminer les petits reliefs (figure 9.b) alors qu'un modèle accidenté présentera des artefacts liés aux calculs et non pas à la géométrie du terrain (figure 9.d).

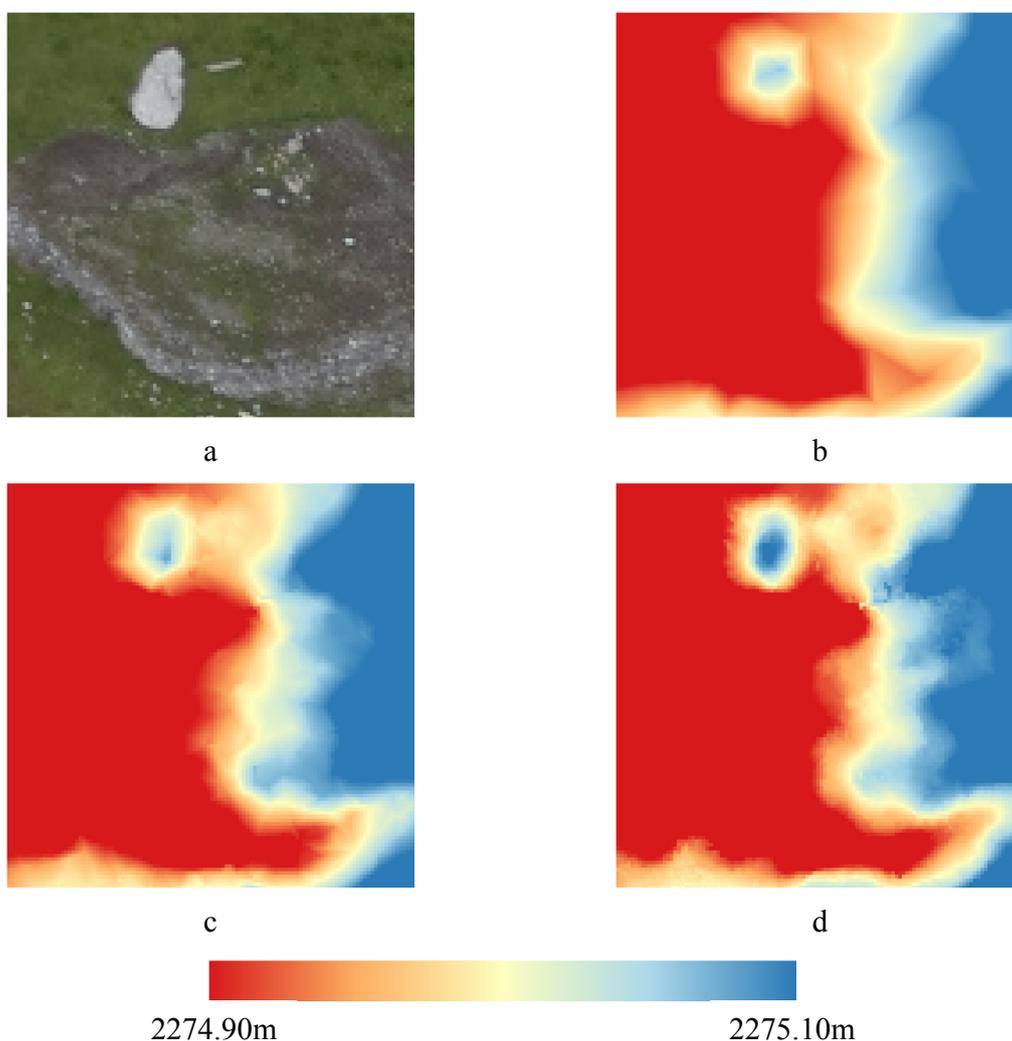


Fig. 9: Influence des paramètres sur le modèle numérique de surface. (a) orthophoto, (b) modèle lisse, (c) modèle moyen, (d) modèle accidenté

6.3 Orthophoto

Le dernier produit photogrammétrique est l'orthophoto. Pour la produire, il faut des images géoréférencées et un modèle numérique de surface. Avant, le modèle numérique était issu soit des bases de données, soit de missions précédentes. Il pouvait y avoir des différences entre le contenu des images et le modèle : bâtiments construits ou détruits par exemple. L'avantage des chaînes actuelles est que le modèle numérique est cohérent avec les images car il est produit à partir de celles-ci. Par contre, en fonction des réglages choisis pour la production du modèle numérique (voir paragraphe précédent), on aura des orthophotos de qualités différentes. Ensuite, les images de drones ne sont pas toujours d'excellente qualité : il peut y avoir du flou de bougé lié aux conditions de vols, temps de pose pas optimale.... ce qui se verra directement dans le produit.

La figure 10 présente deux orthophotos générées avec les mêmes images. La figure 10.a a été générée avec un bon modèle numérique de surface : arrêtes de bâtiments bien définies... tandis que la figure 10.b a été générée avec un modèle numérique imparfait : les bords de bâtiments ne sont pas corrects.



Fig. 10: Exemple d'orthophotos.(a) avec un modèle numérique cohérent. (b) avec un modèle numérique incohérent

7 Conclusion et Perspectives

Dans cet article, nous avons présenté la chaîne photogrammétrique enseignée grâce au drone. La plus grande avancée est le fait de pouvoir étudier et mettre en pratique la chaîne complète de l'acquisition à la production. Cela implique également de maîtriser chacune des étapes ou, tout du moins, les comprendre et connaître les impacts sur la suite des processus. Même si l'usage des drones se démocratise, l'utilisation des données nécessite et nécessitera toujours des compétences dans le domaine de la géomatique : de la géodésie pour les systèmes de coordonnées, le GNSS ou de la photogrammétrie pour tous les produits réalisables. Il nous faut juste nous adapter à ces nouvelles plateformes avec leurs avantages (coûts, facilités d'utilisation) et leurs inconvénients (sensibilité au vent, qualité d'image pas toujours optimale) afin d'en tirer le meilleur !

8 References

- AIBOTIX, 2016: <https://www.aibotix.com/de/aibot-x6.html>, accédé le 28/04/2016.
- ALBERTZ, J. & KREILING, W., 1980: Photogrammetrisches Taschenbuch. Photogrammetric Guide. Guide Photogrammetrique. Manual Fotogrametrico de Bolsillo. Wichmann, Karlsruhe.
- DJI, 2016: <http://www.dji.com/fr>, accédé le 28/04/2016.
- EXIV2, 2016: <http://www.exiv2.org/getting-started.html>, accédé le 28/04/2016.
- FISCHLER, M.A. & BOLLES, R.C., 1981: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *ACM* **24**, (6), 381-395.
- KASSER, M. & EGELS, Y., 2001: Photogrammétrie numérique. Paris, Hermès sciences publications, 2001, 379 p.
- LOWE, D.G., 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision* **60** (2), 91-110.
- PARROT, 2016: <https://store.parrot.com/fr/drones/515-bebop-2.html#/couleur-white>, accédé le 28/04/2016.
- ROSTEN, E. & DRUMMOND, T., 2006: Machine learning for high-speed corner detection. *European Conference on Computer Vision*, 430-443.
- ROY, S. & COX, I., 1998: A Maximum-Flow Formulation of the N-camera Stereo Correspondence Problem, dans : *International Conference on Computer Vision*, Bombai 1998, 142.
- SENSEFLY, 2016: <https://www.sensefly.com/home.html>, accédé le 28/04/2016.