

Apport de nouvelles technologies dans l'acquisition des données topographiques

les caméras numériques de l'IGN

Jean-Philippe SOUCHON – Christian THOM (IGN/LOEMI)



RÉSUMÉ

Le projet caméra numérique, qui a débuté en 1991 à l'Institut Géographique National illustre l'apport de nouvelles technologies à l'acquisition des données topographiques. À cette époque, l'inadéquation des caméras numériques disponibles sur le marché à des applications photogrammétriques a amené le LOEMI, en 1995, à développer ses propres prototypes. Leurs caractéristiques ont été optimisées en vue d'une utilisation dans des chaînes de restitution photogrammétrique numérique. Ces prototypes qui n'ont depuis lors cessé d'évoluer, arrivent aujourd'hui à la stabilité et la qualité requise pour un passage en production. On assistera alors à un déplacement des coûts de production, la prise de vue plus chère étant compensée par l'absence de développement photographique et de numérisation. Les images acquises par ces caméras, qu'elles soient panchromatiques ou couleur, ont suscité un important intérêt chez de nombreux utilisateurs de produits cartographiques. Leur grande qualité, radiométrique et géométrique, améliore considérablement leur lisibilité, leur exploitation photogrammétrique, mais permet aussi de lever le véritable frein à l'automatisation des chaînes de restitution que constituait la numérisation des clichés argentiques.

INTRODUCTION

Du secteur médical à l'imprimerie, nombre de professions ont vu leur mode de travail profondément modifié par l'introduction de l'informatique et de l'électronique dans leurs outils de production. Les métiers de l'IGN n'ont pas échappé à cette règle avec le développement des appareils de restitution numériques et de l'orthophotographie numérique. Alors que l'on parle d'appareils de restitution numériques bon marché basés sur un simple PC [EGELS 98] et de l'intégration d'algorithmes de restitution automatique ou semi-automatique dans des chaînes de production tout numérique, une seule étape analogique va bientôt subsister : la prise de vue aérienne. À l'heure actuelle, on continue d'utiliser des clichés argentiques que l'on numérise après développement du film. Le film photographique ne permet pas d'obtenir des données de qualité radiométrique suffisante pour certaines applications et les phases de développement et de numérisation ne font qu'amplifier le problème. L'idée d'embarquer un capteur directement numérique à bord des avions de l'IGN s'est vite révélée intéressante et indispensable à une chaîne numérique de production de données topographiques de qualité.

LE CONTEXTE DU PROJET

L'état de l'art au début du projet

Le projet caméra numérique démarre en 1991, époque à laquelle différentes sources d'images numériques existent déjà. Trois grandes classes se dégagent alors :

• La numérisation de clichés argentiques :

Elle permet en outre de continuer à utiliser les chambres de prise de vue dont est déjà doté l'IGN et d'obtenir des images numériques de fauchée importante. Néanmoins, cette méthode présente des inconvénients : des délais d'obtention importants, l'introduction de coûts supplémentaires, les traitements chimiques et la numérisation qui détériorent une qualité radiométrique déjà faible et enfin l'instabilité géométrique du support.

• L'imagerie spatiale :

Sa relative simplicité opérationnelle liée au fait que de nombreux développements et recherches ont déjà été réalisés dans ce secteur et la grande fauchée des images ne peuvent compenser deux carences : l'absence de très haute résolution (de l'ordre décimétrique) et la traversée de l'épaisseur totale de l'atmosphère à l'origine de la dégradation du contenu des images qui ne peuvent satisfaire les attentes des photogramètres. Les délais d'obtention demeurent importants et les coûts réels sont difficiles à évaluer.

• L'imagerie aérienne :

Deux types de procédés sont alors à étudier suivant que l'on choisit de développer des caméras autour de capteurs linéaires (barrettes CCD) ou des capteurs matriciels. Ces deux procédés présentent l'avantage de fournir une imagerie de grande qualité radiométrique. Les principaux inconvénients des caméras linéaires résident, d'une part dans la complexité de récupération de la géométrie des images nécessitant l'utilisation d'une plateforme stabilisée et la mesure précise de l'attitude du cap-

teur durant l'acquisition, et d'autre part dans le couplage temps d'exposition/taille de pixel sol. Ces caméras utilisent beaucoup la technologie spatiale et donc des développements déjà réalisés. La couleur est plus facile à obtenir avec ces caméras (trois barrettes munies de filtres colorés) qu'avec une caméra matricielle et la fauchée est plus grande (environ 15 000 contre 4 000 pixels). Par contre les caméras matricielles offrent une bonne qualité géométrique, une possibilité de contrôle de la qualité des images en temps réel et une géométrie de prise de vue traditionnelle en photogrammétrie : projection conique (cylindrique pour les barrettes).

Les spécifications attendues pour une caméra numérique dédiée à la prise de vue aérienne

Disposant de toutes ces solutions techniques et désirant obtenir la plus grande qualité radiométrique mais également géométrique possible, il a été décidé d'opter pour une caméra à capteur CCD matriciel. Afin de limiter au maximum les coûts de vol donc le nombre d'axes de prise de vue à réaliser, le format du capteur devait être le plus grand possible.

Il est bien entendu indispensable de concilier un recouvrement stéréoscopique d'au moins 60 % et une taille de pixel sol la plus petite possible ce qui n'est autorisé que par une vitesse de lecture élevée, un fort débit de données sur disque et une compensation de filé électronique la plus précise possible. Il a enfin été décidé de

réaliser une interface pour l'envoi de tops GPS afin de positionner les sommets de prise de vue.

La première caméra numérique

En 1993, le LOEMI se dote d'une caméra construite par Photometrics (USA) munie d'un capteur 4Kx4K de Loral Fairchild Imaging. L'adaptation de cette caméra pour l'embarquement à bord d'un avion s'est faite à l'IGN. Les caractéristiques de cette caméra figurent dans la première colonne du tableau *figure 1a*. La cadence de prise de vue s'est révélée insuffisante et la qualité des images acquises trop mauvaise pour prétendre rivaliser avec les clichés numérisés. L'idée d'utiliser une caméra du commerce a donc été abandonnée. À la même époque, une enquête au niveau européen sur l'utilisation de caméras numériques en photogrammétrie était réalisée pour l'OEEPE, les résultats dépouillés et exploités lors d'un atelier de travail. La décision fut alors prise de mettre au point à l'IGN un prototype de caméra mieux adapté aux applications aéroportées.

LES CARACTÉRISTIQUES DES CAMÉRAS NUMÉRIQUES DE L'IGN

Description générale [THOM, SOUCHON 98]

Les caractéristiques essentielles des caméras figurent dans le tableau *figure 1a*.

En 1995, pour réaliser un prototype de caméra numérique matricielle à l'IGN, on a choisi un capteur Kodak qui

Figure 1a – Caractéristiques des caméras numériques IGN

CARACTÉRISTIQUE	CAMÉRA 1993	CAMÉRA 1996	CAMÉRA1 1997	CAMÉRA2 1997
Taille du DTC	4096 x 4096	3072 x 2048	3072 x 2048	4096 x 4096
Couleur	non	possible	possible	non
Numérisation	1 Mhz, 12 bits	5 Mhz, 12 bits	8 Mhz, 12 bits	8 Mhz, 12 bits
Rapport Signal/Bruit	90	300	300 P/200 C	300
Dynamique	< 500	3000	2000 P/1000 C	2000
Période minimum entre deux clichés	20 s	4 s (12 bits), 2 s (8 bits)	2 s (12 et 8 bits)	4 s (12 bits), 3 s (8 bits)
Pixel sol min, en stéréo avec Vavion = 100 m/s	1 m	50 cm (12 bits) 25 cm (8 bits)	18 cm	20 cm (12 bits) 12 cm (8 bits)
Moyen de stockage et capacité	1 disque dur fixe de 1 Goctets	2 disques durs, 3 Mo/s, 8 Go extensibles (disques amovibles à chaud)	2 disques durs, 10 Mo/s, 20 Go extensibles (disques amovibles à chaud)	2 disques durs, 10 Mo/s, 20 Go extensibles (disques amovibles à chaud)
Compensation de filé	non	électronique, jusqu'à 22 mm/s, précision : 1/2 pixel	électronique, jusqu'à 22 mm/s, précision : 1/2 pixel	électronique, jusqu'à 22 mm/s, précision : 1/2 pixel
Interface GPS pour date et position des sommets de prise de vue	oui	oui	oui	oui
Objectifs	24 mm, 1/150 s min. (Optique Thévon)	24 mm, 1/150 s min. (Optique Thévon)	24 mm, 1/150 s min. (Optique Thévon) 50 mm, 1/1000 s min. (Schneider Super-Angulon PQS)	24 mm, 1/150 s min. (Optique Thévon) 50 mm, 1/1000 s min. (Schneider Super-Angulon PQS)

proposait une matrice panchro de 2048 lignes par 3072 colonnes. L'électronique a été développée autour de ce CCD dans le souci d'obtenir une dynamique et un rapport Signal/Bruit (S/B) les plus grands possibles. La dynamique est égale au rapport :

$$\frac{\text{signal détectable le plus grand}}{\text{signal détectable le plus petit}} =$$

$$\frac{\text{niveau de saturation} = 86\,000\,e^-}{\text{bruit de lecture} = 29\,e^-} \cong 3000$$

On voit l'importance d'un faible bruit qui dans nos caméras panchro conduit à une dynamique de 3000 niveaux de gris. La conversion du signal analogique (vidéo) en signal numérique se fait donc sur 12 bits et le stockage des données sur 2 octets par pixel. On peut noter que les vitesses et les capacités de stockage ont connu de 1996 à 1997 une évolution qui a permis de réduire de moitié la période minimum entre deux clichés et donc la taille de pixel sol pour une vitesse d'avion donnée. De même, Kodak a proposé depuis un capteur plus grand (4Kx4K) dont nous nous sommes équipés.



Figure 1b – Système d'acquisition et caméra1 1997

Nous verrons par la suite l'importance de la dynamique et du rapport S/B qui a déjà fait l'objet d'une étude dans [THOM, JURVILLIER 97].

La couleur [SOUCHON98]

La caméra1 1997 permet d'intégrer un capteur couleur de mêmes dimensions que le capteur noir et blanc. Ce capteur a la particularité d'être doté d'un dispositif anti-éblouissement (drain anti-blooming). La technique employée pour installer un tel dispositif limite malheureusement la capacité en électrons des pixels et par conséquent la valeur de la dynamique. C'est pourquoi la distinction est faite entre panchro (P) et couleur (C) dans la colonne caméra1 1997 de la figure 1a pour ce qui est des caractéristiques radiométriques.

Il est important de décrire brièvement la structure du capteur couleur installé dans la caméra (figure 2). Ce capteur est en fait constitué d'une mosaïque de petits filtres colorés et les images brutes subissent un traitement mis au point au laboratoire afin de retrouver leur pleine résolution.

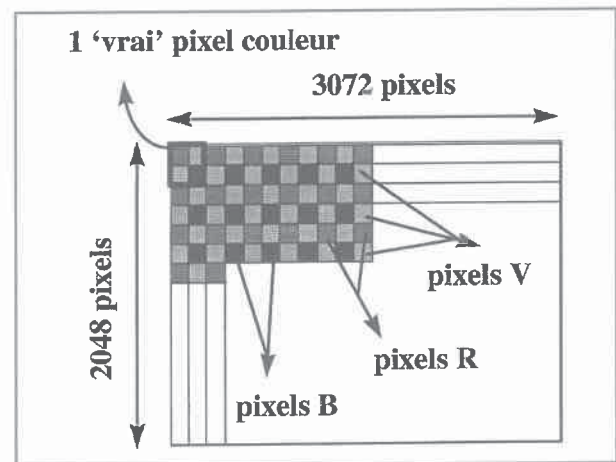


Figure 2 – Structure du capteur couleur

La compensation de filé électronique

La compensation de filé est une caractéristique essentielle pour une caméra destinée à la prise de vue aérienne. Nous avons opté pour une compensation électronique du filé : durant le temps d'exposition, on décale les charges autant que nécessaire de ligne en ligne afin de suivre le déplacement des objets au sol et d'obtenir une précision au demi-pixel près. Voici une illustration de l'importance de la compensation de filé :



Figure 3a – Extrait avec compensation de filé



Figure 3b – Extrait sans compensation de filé

Vu la structure du capteur, on procède par paires de lignes pour la compensation de filé dans les images couleur.

LES APPORTS DE L'ACQUISITION DIRECTEMENT NUMÉRIQUE

La pénétration des ombres et des zones peu contrastées

Comme nous l'avons déjà mentionné, la dynamique de la caméra permet de séparer sans difficulté 2000 à 3000 niveaux de gris, alors qu'un film traditionnel, même très bien traité, ne permet guère d'en séparer plus de 50 [KASSER 97].

Ceci autorise l'identification de très nombreux détails dans les zones très claires et dans les zones à l'ombre où l'on peut encore compter sur 200 niveaux de gris, contre 1 ou 2 sur des films normaux. Ce phénomène observé dans les zones d'ombres des images panchro en 1996 est encore plus net dans les images couleur (voir figure 5b). En effet, l'information présente dans les ombres est bleutée car éclairée par le ciel bleu. Or la réponse spectrale des capteurs noir et blanc est partiellement coupée dans les longueurs d'ondes correspondant au bleu tandis que l'ensemble (pixel + filtre bleu) du capteur couleur est parfaitement sensible dans cette gamme de longueurs d'ondes.

Suivant le même principe, une grande dynamique permet de faire apparaître de l'information dans des zones peu contrastées. Dans l'illustration de la figure 4, on voit qu'un corrélateur pourrait détecter plusieurs points significatifs sur le toit de la gare de Perrache de Lyon dans l'image numérique, tandis qu'il ne pourrait corrélérer que les quatre coins du toit dans le cliché numérisé (le bruit ne se corrélant pas).

La correction du voile atmosphérique, la sensibilité à la météo

À partir des histogrammes calculés dans chaque canal R, V, B de l'image en tenant compte de l'épaisseur variable d'atmosphère traversée suivant qu'un pixel se situe au centre ou à la périphérie d'une image, on mesure la valeur du voile à retrancher. La qualité radiométrique des images permet de réaliser une correction efficace bien que fondée sur un modèle très simpliste (figure 5). Ceci laisse entrevoir la possibilité de voler par un temps légèrement brumeux qui ne permettrait pas de réaliser des photographies couleur de qualité.

Une mission aérienne de la caméra numérique couleur réalisée sur la ville de Rennes en août 1998 nous révèle également qu'il est envisageable d'acquérir par temps nuageux des images destinées à être restituées. En effet, au cours de cette mission, le ciel s'est couvert jusqu'à un taux de 5/8e d'alto-cumulus, et on se rend

compte à l'aide de la figure 6, que les images auraient été restituables.

On peut noter que les ombres sont beaucoup moins contrastées et par conséquent plus facilement pénétrables sous couvert nuageux en raison de l'éclairement diffus.

Les raccords radiométriques entre images

Pour conclure au sujet de tous les apports d'une bonne radiométrie, nous allons maintenant aborder le problème des raccords entre les différents clichés d'une mission. Le numérique offre la possibilité de calibrer le capteur et d'effectuer de manière automatique des traitements [THOM, SOUCHON 97] donnant des images radiométriquement homogènes contrairement aux clichés argentiques (vignettage, défaut de calibration du scanner, etc.) [JAUBERTIE 98]. Lorsque la météo n'a pas changé au cours d'une mission, on traite toutes les images d'une mission avec les mêmes valeurs de voile atmosphérique à corriger. Au laboratoire MATIS de l'IGN, un développement réalisé par Frank FUCHS et Franck JUNG, permet de réaliser de manière automatique et sans l'aide des données GPS un tableau d'assemblage des images acquises au cours d'un chantier caméra numérique. La figure 7 qui illustre cette partie est tirée de résultats de leurs travaux sur le chantier de Rennes.

Nos images ne permettent tout de même pas d'éviter les coefficients de réflectance bidirectionnelle que présentent des surfaces homogènes comme les terrains de sport (figure 7b) ou des surfaces texturées comme les cimetières (figure 7c). On notera la continuité radiométrique du cours d'eau figure 7b.

Les autres apports

La qualité de la géométrie du capteur est un point essentiel qui doit être mentionné. Par opposition au film déformable, le capteur est rigide et la calibration géométrique de l'ensemble formé par le capteur et l'optique permet de corriger précisément la distorsion dans les images et de connaître la position pixellaire du point principal. Ces données sont importantes pour des applications photogrammétriques.

L'exploitation photogrammétrique est également améliorée en terme de résolution spatiale. En effet, à échantillonnage équivalent, on a un gain de résolution avec les images numériques : c'est l'apport de la résolution radiométrique. On pense ainsi que des images numériques acquises au pixel sol de 70 cm remplaceront des clichés numérisés à 40 cm de pixel sol pour la restitution de la BDTopo. À tout cela s'ajoute le contrôle temps réel à bord de l'avion qui permet de savoir sur site si certains axes doivent être revolés et si la mission est acceptée.

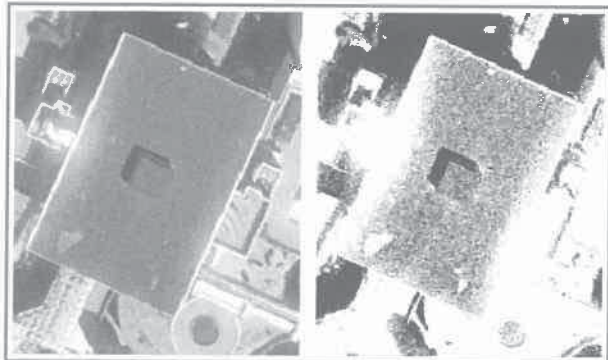


Figure 4a – Extrait de cliché numérisé (pixel sol = 40 cm)

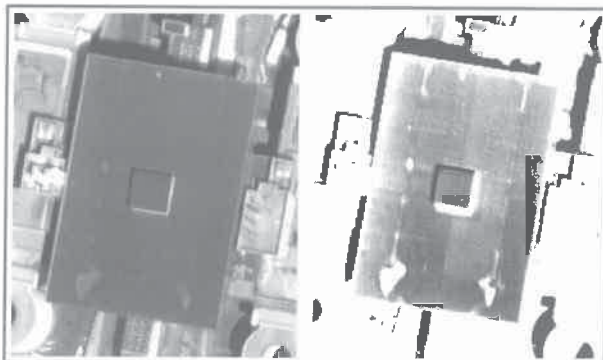


Figure 4b – Extrait d'image numérique (pixel sol = 40 cm)



Figure 5a – Extrait d'une image du Mans sans correction du voile atmosphérique (40 cm)



Figure 5b – Le même extrait après correction de ce voile



Figure 6 – Ci-contre image sous-échantillonnée acquise sur Rennes le 06/08/98 : on voit la zone à l'ombre d'un nuage à gauche du cliché.

Ci-dessous, à gauche, redistribution des niveaux de gris de l'extrait dont l'emprise figure en jaune. À droite, la même zone acquise par temps clair le 21/09/98.





Figure 7a – Extrait du tableau d'assemblage couleur réalisé au MATIS.
Plus de 15 images sous-échantillonnées contribuent à cet extrait,
les segments de droites représentent la largeur et passent par le centre des images.



Figures 7b et 7c – Exemples de surfaces à coefficient de réflectance bidirectionnelle.

CONCLUSION

L'exploitation photogrammétrique des données numériques est donc améliorée par rapport à celle des clichés argentiques numérisés : une amélioration de la radiométrie due à la réponse linéaire du capteur à la lumière, une amélioration également de l'archivage, des coûts hors prise de vue, des délais et un gain de résolution spatiale. Au sujet de la résolution spatiale, une étude devrait être menée dans les mois à venir pour établir la

relation entre taille de pixel sol en numérique et échelle de prise de vue en argentique suivant les applications visées. Mais la qualité des images est également un facteur essentiel de l'automatisation des chaînes de restitution ; elle augmente en effet la robustesse et la précision des algorithmes utilisés [DISSARD, BAILLARD 98]. On ne peut par conséquent envisager aujourd'hui une chaîne de restitution numérique de grande qualité et automatisée sans que son premier maillon, l'acquisition des données, ne soit lui-même directement numérique.

Bibliographie

- [DISSARD, BAILLARD 98], "Analyse automatique d'images aériennes stéréoscopiques pour la restitution 3D des milieux urbains", O. Dissard, C. Baillard, Bulletin n° 149 de la SFPT, pp. 28-41.
- [EGELS 98], "La photogrammétrie numérique : vers une banalisation du métier de photogrammètre ?", Y. Egels, Bulletin n° 149 de la SFPT, pp. 8-11.
- [JAUBERTIE 98], "Étude et réalisation d'une mosaïque de photos aériennes numériques", P. Jaubertie, Rapport de DESS Télédétection, Méthodes, Applications et environnement.
- [KASSER 97], "Le "tout numérique" sur les chemins d'une vulgarisation", M. Kasser, Revue GÉOMÈTRE novembre 1997, pp. 30-33.
- [SOUCHON 98], "Les images numériques maintenant en couleur", J.-Ph. Souchon, Bulletin d'Information, la recherche à l'IGN 97, pp. 17-24.
- [THOM, JURVILLIER 97], "An aerial digital frame camera for photogrammetry : radiometric comparison with scanned imagery", Ch. Thom, I. Jurvillier, Geomatica, Vol 51, N° 2 (1997), pp. 133-141.
- [THOM, SOUCHON 97], "Chaîne de traitement des images numériques couleur", J.-Ph. Souchon, Ch. Thom, octobre 1997.
- [THOM, SOUCHON 98], "Le point sur les caméras numériques de l'IGN", Ch. Thom, J.-Ph. Souchon, Bulletin n° 149 de la SFPT, pp. 12-20.

AFT ADHEREZ

L'Association Française de Topographie est le lieu géométrique où se rencontrent les grandes écoles de la nation et de la topographie, les organismes de la profession, et surtout ceux qui ont à connaître de la topographie, opérateurs et utilisateurs.

Vous y partagerez l'expérience et le savoir avec vos collègues de tous les secteurs, vous y trouverez un lieu d'échange et une connection avec vos besoins professionnels, vous y rencontrerez la solidarité du métier.