

La photo aérienne de l'IGN, depuis l'avion jusqu'à la *BD Ortho*

La photographie aérienne représente encore aujourd'hui la brique de base sur laquelle s'élaborent la plupart des autres produits finaux : cartes papiers, modèles numériques de terrain, suivi des évolutions urbaines, rectification des parcelles cadastrales, etc. Visite dans les locaux IGN de Creil, où sont réalisées toutes les étapes du traitement des photographies aériennes, depuis la planification des missions jusqu'à la duplication des clichés pour les clients finaux.

Situé en périphérie de Creil, au voisinage de la base aérienne militaire avec laquelle il partage l'utilisation de la piste aérienne, le service des opérations aériennes de l'IGN abrite toutes les ressources nécessaires à la réalisation des campagnes de prises de vue aéroportées, depuis la planification amont jusqu'à l'archivage sur bande numérique des photographies, en passant par le développement, la numérisation, ou bien encore le traitement des toutes nouvelles images issues de la caméra numérique développée en interne.

Première étape : le plan de vol

Lorsqu'une commande arrive au service, qu'il s'agisse d'une commande interne à l'IGN, par exemple dans le cadre du renouvellement quinquennal du fonds photographique départemental, ou bien une commande isolée d'un organisme tiers (par exemple l'ONF, voire la DGI dans le cadre de missions de contrôle des déclara-

tions foncières), la première tâche qui échoit aux équipes de l'IGN est de constituer le plan de vol adéquat. Pour cela, plusieurs données sont nécessaires : la zone à couvrir, bien sûr, mais également l'échelle finale du cliché, laquelle donnera la superficie couverte par une photographie élémentaire, ainsi que l'altitude de vol : « Sur terrain plat, explique Michel Gabrielli, chef du service planification, le calcul est facile, sachant que, par exemple, une échelle au 1 : 25 000 correspond à une altitude de 4000 mètres au-dessus du niveau du sol. En revanche, au-dessus des reliefs accidentés, comme dans les Alpes ou dans les Pyrénées, il faut systématiquement ajuster l'altitude de l'avion en fonction de celle du sol, ce qui nécessite plusieurs passages successifs pour la même bande. Heureusement, nous avons certaines tolérances qui nous permettent de ne pas avoir à effectuer ces manœuvres délicates pour chaque cliché ! » En outre, chacune de ces photographies recouvre partiellement la précédente, de façon à pouvoir obtenir une paire stéréoscopique. Le pourcentage souhaité de

recouvrement (typiquement de l'ordre de 60 à 80 %) est également un paramètre essentiel, qui détermine la fréquence de la prise de vue lors du vol. Le recouvrement latéral (perpendiculaire à la trajectoire de l'avion), non essentiel à la vision en relief, est fixé à 20 % environ.

Sur le fond de plan au 1 : 100000, chaque rectangle élémentaire dessine le périmètre d'un cliché, avec son numéro d'ordre (ici il s'agit de clichés de la caméra numérique).

Dernière mesure préparatoire : obtenir les autorisations de survol nécessaires. Ces dernières sont obligatoires dans le cas de survol de périmètres surveillés ou interdits, comme la ville de Paris ou certaines zones militaires. « Quoique nous possédions une autorisation permanente pour le survol des zones P et R, il nous faut néanmoins prévenir les autorités militaires. En ce qui concerne Paris, les autorisations, accordées par la Préfecture de Police, prennent environ un mois à un mois et demi. Elles ne durent que quelques jours, il faut donc espérer que les conditions météorologiques soient favorables, car l'IGN, en raison de sa

charte qualité, ne prend jamais de clichés si le moindre nuage masque une partie du sol », continue Michel Gabrielli.

Deuxième étape : le vol

Lorsque la fenêtre calendaire arrive, l'équipe se prépare pour la mission. L'équipage, qui opère à bord d'avions commerciaux transformés (de type Beechcraft, réputés pour leur stabilité), se compose d'un pilote (responsable du suivi du plan de vol et du maintien de l'altitude de l'appareil) et d'un photographe navigant, qui s'occupe pour sa part de l'équipement électronique, notamment des ordinateurs embarqués, et change les rouleaux de film au fur et à mesure des prises. Naguère encore, le photographe navigant n'était aidé que d'un chronomètre, et prenait un cliché à chaque intervalle de temps précalculé : naturellement, l'incertitude et les fluctuations de la vitesse de l'avion entraînaient beaucoup d'imprécision. De nos jours, l'ordinateur embarqué reçoit le plan de vol et les coordonnées du centre de chaque photo. Un équipement GPS commande alors automatiquement le déclenchement lorsque l'avion passe à la verticale du centre de chaque cliché.

L'intérieur d'un Beechcraft. Au premier plan, en bleu, on distingue les appareils de prise de vue. En second plan, à gauche, le panneau boisé cache l'armoire où prend place l'ordinateur de commande des chambres. En arrière plan, le cockpit.

En outre, le mouvement de l'avion durant le temps de pose exigeait auparavant que ce dernier ne dépassât pas un maximum (de l'ordre du 1/1000ème de seconde), faute de quoi le cliché devenait flou (phénomène de filé). Les fabricants, pour remédier à ce problème, ont équipé leurs chambres récentes d'un dispositif de compensation, qui fait glisser le film pendant l'ouverture du rideau, à une vitesse calculée en fonction de la donnée des capteurs tachymétriques. L'avantage de ce dispositif réside essentiellement dans la possibilité d'utiliser des films à faible sensi-

bilité (donc à durée d'exposition longue), lesquels présentent un grain réduit, et permettent donc des agrandissements plus importants que les films rapides (image « piquée »).

La base de Creil est équipée d'un système de réception satellite *Météosat* qui permet de vérifier heure par heure la nébulosité sur le continent et le proche Atlantique, ainsi que de différents programmes d'interprétation des informations météorologiques (*Attis*) en provenance des aéroports. Les pilotes sont ainsi à même de décider le matin même s'il est raisonnable de décoller ou non. Restent des incertitudes : « *particulièrement en ce qui concerne les phénomènes convectifs et l'apparition de rues de cumulus, par exemple, un phénomène que nous sommes presque incapables de prédire* », admet Alain Reynes, chef du département des opérations aéronautiques.

L'autonomie des avions (équipés de réservoirs supplémentaires en bout d'ailes, elle peut atteindre 7 à 8 heures), et leur vitesse (environ 400 km/h sol), est suffisante pour atteindre n'importe quel point du territoire métropolitain en un temps raisonnable. Pour les missions plus éloignées, Corse ou DOM, l'avion effectue le trajet en plusieurs escales. Par exemple, en vue de la prochaine mission en Guadeloupe/Martinique, l'un des *Beechcrafts* suivra plus ou moins les anciens itinéraires de l'aéro-postale, avec une étape en Espagne, au Cap Vert, au Brésil, en Guyane avant d'atteindre les Antilles. Mais il n'est pas rare non plus que les pilotes se posent sur des aéroports locaux plutôt que de remonter à Creil, lors de missions étendues durant plusieurs journées.

La base détient une flotte de quatre avions, un cinquième d'un type différent étant réservé quant à lui à des études atmosphériques à haute altitude (en partenariat avec le Cnes et le CNRS, entre autres). Chaque appareil est équipé de deux caméras autonomes, l'arrière de l'habitacle étant aménagé en chambre noire pour

pouvoir extraire et remplacer les rouleaux de films dans la caméra. Cette dernière de marque Zeiss TOP 15, reçoit un objectif de focale 153 mm, ce qui correspond, compte-tenu des dimensions de la surface sensible, à un cliché final légèrement grand angle.

Le hangar de la base de l'IGN abrite les quatre Beechcrafts qui servent aux missions aérienne, ici en pleine révision hivernale.

Les missions de vol, effectuées de préférence en été pour des questions de durée de jour et de déclinaison solaire (pour que les clichés soient validés, l'IGN exige que la hauteur du Soleil dépasse 30°) s'effectuent sur un rythme volontariste. Selon les statistiques, au nord de la Loire, le nombre de jours où le ciel reste parfaitement bleu n'excède pas trente, il faut donc profiter au maximum de chaque belle journée. Les 6 à 7 heures de vol sont intégralement exploitées, l'avion bénéficiant d'une prise en charge par un contrôleur aérien particulier, ce qui lui donne priorité sur les vols commerciaux. Au total, l'Institut produit tous les ans de l'ordre de 80000 nouveaux clichés qui, une fois développés (voir l'encadré à propos des caractéristiques et du traitement du film), rejoignent les 4 millions de prises de vue déjà archivées au sous-sol de la photothèque de Saint-Mandé.

En dehors de cette période estivale, il arrive aux avions de décoller pour des missions spéciales, par exemple lors d'inondations exceptionnelles (comme celles du Gard ou de la Somme), ou bien pour photographier des objets inobservables en été (cabanes forestières ou sentiers) en raison du couvert végétal.

Troisième étape : développement et archivage

Une fois la mission terminée, les films sont rapportés à la base de Creil où ils sont développés dans une machine laboratoire (voir l'encadré). À la sortie de celle-ci,

la bobine part au service de la planification des vols, où sa qualité visuelle est contrôlée, ainsi que le taux de recouvrement effectif, grâce à une machine spéciale conçue par un atelier mécanique interne. « *Les films ratés sont exceptionnels, mais cela peut arriver de temps à autre, notamment à l'occasion de changement ou de réglages de machines. Le dernier incident en date était dû à un mauvais fonctionnement du séchoir, qui a malheureusement rendu un film incomplètement sec, lequel a collé sur son support et s'est déchiré* », explique Michel Gabrielli.

Cet appareil de contrôle conçu par un atelier mécanique de l'IGN permet à un opérateur de contrôler le taux de recouvrement entre deux photos consécutives du même rouleau.

Lorsque les photos ont été validées, le rouleau retourne au service photographique, qui en assure la numérisation. Comme il s'agit d'un travail important (500 clichés par rouleau, généralement numérisés à 1000 ppp), la plupart des travaux s'effectuent de nuit, sous le contrôle d'un serveur PC. Les images numériques produites sont d'un poids extrêmement important (environ 220 Mo chaque), et sont conservées sur des supports magnétiques de type bande d'une capacité unitaire de 100 Go, le format TIFF utilisé n'étant pas compressé. Cette image sert de base à la fameuse *BD-Ortho*.

Le numériseur de haute qualité employé pour numériser les clichés argentiques atteint une définition de 1000 ppp, soit à peine moins de la moitié de la granularité de l'émulsion.

Le film fini ensuite découpé en photographies élémentaires, qui sont envoyées à la phototèque de Saint-Mandé pour archivage, le reste des opérations prenant pour base exclusive le fichier numérisé. Seuls des négatifs pris avant l'an 2000 restent entreposés sur place. Leur duplication, lorsqu'elle est demandée, se fait d'une manière classique, grâce à une machine à planches contact et une tireuse de papier photographique.

[Image : tiragecontact.png ; Légende : Certaines planches sont

encore tirées grâce à une machine classique à planche contact.]

Quatrième étape : la duplication

En dehors de ces vieux films, les productions papier sont désormais réalisées à l'aide d'un agrandisseur numérique. Préalablement à toute copie, les fichiers numériques sont chargés sur un PC à écran calibré, puis la partie désirée est retraitée sous Photoshop afin d'en améliorer la restitution (augmentation des contrastes, élimination de l'effet de brume, amélioration de la saturation des couleurs, etc.). Une fois l'image visuellement satisfaisante (contrôle à l'histogramme), elle est envoyée à l'agrandisseur numérique.

Ce dernier n'est pas une imprimante au sens classique. Il s'agit d'un dispositif à trois lasers colorés (rouge, vert, bleu), lesquels viennent impressionner un papier photographique argentique traditionnel. Le système opère donc par balayage, mais il n'y a pas de dépôt d'encre : au contraire, une fois impressionné, le papier suit un traitement traditionnel de développement, ce qui permet au final d'obtenir une qualité identique aux tirages argentiques traditionnels, sans avoir à affronter les réglages complexes de l'agrandisseur optique. « *Avantage supplémentaire, indique Jean-Hubert Dutrieux, l'un des opérateurs, le coût du papier photographique est très inférieur à celui du papier imprimante, d'un rapport un à dix. Le coût initial de l'agrandisseur est donc rapidement amorti.* »

En raison de la densité de numérisation (1000 ppp), elle-même fonction de la taille du grain argentique, les agrandissements de clichés sont généralement limités à un maximum de 20. Il est évidemment possible d'obtenir des clichés plus précis en diminuant au départ l'altitude du vol (mais cela augmente l'effet de filé). Au total, la meilleure résolution d'un cliché aérien produit à l'IGN atteint le 2 : 1000, soit 1 mm pellicule pour 2 mètres sol.

[Image : agrandisseurargentique.png ; Légende : l'ancien agrandisseur argentique horizontal n'est plus guère utilisé depuis la mise en service de son équivalent numérique, mais demeure fonctionnel en cas de besoin.]

Alternativement, le service duplication peut également fournir un CD-Rom contenant le fichier image, mais ce format d'archivage ne permet de stocker que trois photos par disque. Il convient cependant bien pour les demandes de communes ou de particuliers.

Vers le tout numérique

L'ère de l'argentique tire cependant à sa fin : toutes les étapes du développement, de l'agrandissement puis du tirage sont menacées de disparition par l'utilisation de la caméra numérique, dispositif de prises de vue multispectral à capteur CCD. Celle qu'utilise l'IGN a été développée en interne par le laboratoire Cogit. Il s'agit d'un dispositif à quatre capteurs d'une taille de 4000x4000 (16 millions) pixels, chaque cellule CCD élémentaire mesurant 7 µm. La caméra opère simultanément dans chacune des trois couleurs visibles plus un canal de proche infrarouge. La surface couverte par une image, en revanche, est inférieure à celle du cliché argentique correspondant, il convient donc de réaliser plus de clichés numériques pour couvrir la même superficie.

Cependant que cette année seulement 3 départements ont fait l'objet d'une campagne aérienne numérique, ce chiffre devrait passer à 12 l'année prochaine, ce qui représente la moitié du programme annuel prévu. Une proportion qui ne cessera d'augmenter : « *Il y a de fortes chances que, d'ici à trois ans, lorsque nous aurons reçu les quatre caméras, nous ne fassions plus que des images numériques, à l'exception de besoins ponctuels pour de petits cabinets de géomètres experts. La photographie numérique présente beaucoup d'avantages : elle se traite plus vite, nécessite moins de corrections, donne une*

précision équivalente et fournit une meilleure qualité d'image grâce à la dynamique importante des capteurs CCD ! », affirme Alain Reynes.

[Réserver de la place (1/4 page) pour une mosaïque en composantes]

L'avion équipé d'une caméra numérique embarque un PC de contrôle relié à des baies de stockage (les alternateurs sont changés pour supporter le surcroît de consommation électrique). Ces baies fonctionnent avec des disques durs escamotables de 120 ou 180 Go à l'heure actuelle, capacité qui évolue au rythme du progrès technologique. Chaque cliché correspondant à une bande spectrale pèse 33 Mo, donc une image totale représente environ 130 Mo. Il est donc possible de mettre un peu plus de mille photographies sur un seul disque, au rythme d'un cliché entier toutes les trois secondes environ.

Une fois l'avion de retour à la base, les disques sont déchargés, puis transférés au service de traitement informatique. Là, un premier programme propriétaire assemble chaque image composante pour en tirer un fichier image TIFF multi-spectral (ou fausses couleurs). Il faut ensuite procéder, tout comme en argentique, à l'élimination du voile et de la brume pour chaque image (les conditions de nébulosité pouvant varier suivant le lieu et l'heure de la prise de vue). Pour cela les opérateurs (ils sont deux) calculent (manuellement !) un seuil à l'aide de la fonction d'histogramme de Photoshop, puis effectuent la correction nécessaire. « Comme nous ne sommes ni utilisateurs finaux, ni ne savons quoi que ce soit sur l'utilisation future des clichés, c'est la seule opération de traitement d'image à laquelle nous pouvons nous livrer. Nous laissons aux clients aval le soin d'effectuer les corrections qui leur conviennent », explique Florence Coupez, l'une des opératrices PC.

[Image : stationcameranumerique2

.png ; Légende : Sur ce PC de traitement d'image, les fichiers bruts sont assemblés pour former une image TIFF multi-spectrale, qui sont à leur tour retravaillées sous Photoshop pour en éliminer le voile, avant d'être archivés sur l'un des disques durs amovibles visibles à droite.]

Les images une fois constituées, elles sont archivées sur les bandes de 100 Go, du même type que celles utilisées pour les numérisations. Une technologie qui pose problème : « Nous avons souvent des incidents : bande qui bourre, relecture impossible, ... la technologie est loin d'être fiable. Malheureusement, comme nous n'employons aucune technique de compression d'image, il est difficile d'utiliser un autre support. Même les DVD-Rom, avec leurs 4,7 Go, ont une capacité trop limitée pour nos besoins », déplore Didier Thery, collègue de Florence Coupez. Cet archivage sur bande est effectué en double, l'établissement de Saint-Mandé recevant une copie systématique.

La capacité informatique actuelle (2 PC) paraît tout juste suffisante pour assurer le traitement des quelques campagnes menées cette année. L'année prochaine devrait voir l'arrivée de quatre nouveaux PC haut de gamme (Pentium 4, 1 à 2 Go de RAM, fréquence processeur supérieure à 3 GHz) pour soutenir le surcroît de travail. Reste que l'environnement Windows et l'obligation de retoucher manuellement chaque image constituent un frein évident à la productivité : il ainsi par exemple impossible d'opérer du travail de nuit en mode batch.

Quel avenir pour le cliché aérien ?

Au-delà du prochain avènement de la caméra numérique et de ses évolutions futures (capteurs CMOS, ajout de bandes, etc.) comme unique moyen de prise de vue, se pose la question de l'avenir d'un service de photographie aérienne, moyennant l'apparition de satellites capables de prendre

des clichés à précision submétrique. Le service monopolise en effet beaucoup de ressources, dont les appareils et leurs équipages, qui sont contraints de rester à terre l'hiver pendant les opérations de maintenance et de réparation, sauf mission ponctuelle hors du territoire métropolitain. « Pour l'instant, confirme cependant Alain Reynes, il n'est absolument pas question de remplacer la photographie aérienne par des clichés satellites, dont la précision multispectrale reste insuffisante. De plus il est important de conserver une source interne de clichés qui répond à nos critères et exigences en matière de qualité. Mais l'interrogation est récurrente et se pose régulièrement à chaque saut technologique de l'imagerie satellite. »

Au-delà de cette question de rentabilité, il convient également de prendre en compte la mission de service public de l'IGN. L'orthophotographie, composante essentielle du RGE, pourrait-elle faire l'objet d'une sous-traitance, que ce soit à un avionneur privé ou à un exploitant d'images satellites comme Spot ? Ce serait prendre de gros risques : autant soustraire la fabrication d'un produit fini est - à la limite - concevable, autant déléguer celle de la prise de vue aérienne, brique de base de toute la filière cartographique paraît extrêmement risqué. Si les rouages se grippent entre le sous-traitant privé et l'IGN, l'ensemble du RGE pourrait être menacé. Il semble donc plus que souhaitable que les clichés satellites puissent servir, pourquoi pas ?, à des mises-à-jour intermédiaires de la BD Ortho, mais que les campagnes aériennes quinquennales continuent à exister.

Encadré : les films aériens et leur process

Les clichés aériens de l'IGN sont réalisés sur des films inversibles (procédé AR-5) en rouleaux de 120 m fabriqués par Kodak (sur support de polyacétate). La surface exposée mesure 228x228

mm², ce qui donne donc environ 4 clichés par mètre, soit à peu près 500 clichés par rouleau. La sensibilité de l'émulsion est de l'ordre de 32 ISO (ASA) pour une granularité quadratique moyenne d'environ 13 µm. L'image argentique latente comprend donc environ 180 millions de « pixels », pour une densité d'environ 2000 ppp. les archives.

L'émulsion possède une sensibilité chromatique spéciale, différente des films ordinaires. En effet, la prise de vue aérienne, effectuée à grande distance, pâtit à la fois d'un effet de brume (l'atmosphère n'étant pas totalement transparente) et d'un manque de saturation des couleurs (diffusion). Pour pouvoir minimiser ces effets, l'émulsion est volontairement déséquilibrée, privilégiant les longueurs d'ondes élevées, moins sensibles à l'effet de brume que les bleus (sensibilité étendue dans l'infrarouge, utilisation de filtres jaunes à 420 nm).

Une fois exposés, les films sont développés dans une machine automatique à 16 bains. Auparavant, ceux-ci subissaient un développement croisé, qui produisait des négatifs à saturation exacerbée. Ce procédé a été abandonné, notamment en raison des difficultés à maîtriser le chromatisme du négatif (effet de bascule) et du tirage qui en était issu (il fallait utiliser des techniques de masquage et de compensation dans l'agrandisseur couleur pour obtenir un rendu colorimétrique homogène). L'utilisation de films inversibles permet un passage au scanner facile, sans avoir à compenser la dominante orange propre aux émulsion négatives.

[Image : développeuse.png ; Légende : La machine à développer de l'IGN, une mécanique impressionnante à seize bains.]

En même temps que la photographie, la caméra imprime sur l'émulsion la date et l'heure de la prise de vue, les coordonnées, l'altitude, l'échelle et d'autres métadonnées qui serviront par la suite pour indexer les clichés dans