

# L'ORTHOMOSAÏQUE A ECHELLE DEPARTEMENTALE : LES PERFORMANCES DE L'IMAGERIE PLEIADES COMPAREES AU PRODUIT BD ORTHO®

Jean-François Hangouët<sup>1</sup>, Jean-Philippe Cantou<sup>2</sup>, Michel Pausader<sup>2</sup>

1 : IGN/DPR/SCOP, 73 avenue de Paris, 94165 Saint-Mandé Cedex, France

2 : IGN/DPDE/IGN Espace, Parc technologique du canal, 6 avenue de l'Europe, BP 42116, 31521 Ramonville Cedex, France

## Résumé

Les performances de l'imagerie des satellites Pléiades permettent-elles d'envisager de l'utiliser pour la production d'orthomosaïques d'emprises départementales qui soient conformes aux spécifications de la BD ORTHO® de l'IGN? Tel est l'enjeu technique des tests de faisabilité que rapporte cet article. Quatre orthomosaïques départementales ont été constituées à partir de scènes fournies par le CNES et Airbus Defence and Space dans le cadre de la Recette Thématique Utilisateurs des données Pléiades. Les deux premiers prototypes, réalisés à partir de premières images de 2012 du satellite 1A, souffraient principalement de défauts d'exhaustivité (du fait de la combinaison des contraintes de programmation et des aléas climatiques) et de défauts planimétriques (du fait de la combinaison de trop forts angles d'incidence et d'inexactitudes dans le modèle numérique de terrain utilisé pour l'orthorectification). L'aspect, qui reste inhabituel pour les familiers de l'imagerie aérienne, n'était pas encore optimal (du fait de la version utilisée à l'époque de l'algorithme de fusion radiométrique des images). L'amélioration de l'algorithme de fusion, le travail sur la programmation de l'acquisition, facilitée par le lancement du satellite 1B, et le renforcement des contraintes sur les angles d'incidence et le taux de nébulosité ont permis de produire les deux prototypes suivants (sur des acquisitions de 2013) à un meilleur niveau de conformité à ce qui est attendu de la BD ORTHO®. L'imagerie Pléiades se montre ainsi potentiellement complémentaire de l'imagerie aérienne dans le cycle de renouvellement des couvertures nationales, ce qu'illustre notamment un autre test que nous avons mené, consistant à incruster l'orthorectification du massif du Mont-Blanc, vu par Pléiades, dans l'orthomosaïque BD ORTHO® d'origine aérienne du département de la Haute-Savoie (74).

**Mots-clés :** Orthoimagerie, satellite Pléiades, BD ORTHO®

## Abstract

*The present article reports on feasibility tests carried out regarding the following issue: From Pléiades imagery, is it possible to produce département-wide orthomosaics that comply with the specifications of BD ORTHO® products? Two full départemental orthomosaics were first produced from images captured early in the life of Pléiades satellite 1A: on the Lozère on the one hand (midsummer images), on the Hautes-Alpes on the other hand (late 2012 summer acquisition). Requirements on planimetric accuracy were shown to be globally satisfied, although orthorectification proved to be highly sensitive to DTM errors (the incidence angles of the images available for the tests, up to 23°, departed too widely from the vertical). Requirements on exhaustiveness of ground-based information could not be met: input images were locally marred with opaque clouds, in places irreparably (the combined constraints on programming, in terms of orbital period and imaging availability, on meteorological conditions, and on the somewhat large geographical extents to be covered, had proved irreducible with each other). Regarding radiometry, dynamic ranges and visual aspect, Pléiades imagery, with the pan-sharpening algorithm applied at the time, and oversampled to a 50 cm GSD, failed to convey the same feeling of richness of information that is inherent to the kind of undersampled aerial imagery that is constitutive of BD ORTHO®. Geographic phenomena however (if not the contingent, fixed or mobile details that underline them) were clearly visible and legible. The several gaps between tested achievements and specifications come with their explanations and likely solutions: our further efforts on two other départements (Allier and Puy-de-Dôme, summer 2013), proved more successful. Image quality had been enhanced, thanks to the new fusion algorithm by CNES, and many acquisition constraints (in terms of cloud coverage, incidence angle, and delays) had been met, thanks to the agility brought to programming now that satellite 1B was operational. Pléiades orthoimagerie thus comes closer still to standard BD ORTHO®, and shows potential complementarity with aerial imagery in the systematic observation of the national territory. This is further illustrated in yet another test, where Pléiades orthoimagerie (satellite 1A, August 2012) on the Mont-Blanc range was substituted to its aerial counterpart (August 2012 also) within the BD ORTHO® mosaic of the whole Haute-Savoie département.*

**Keywords:** Orthoimagerie, Pléiades satellite, BD ORTHO®

## 1. Introduction

Les hautes performances de l'imagerie Pléiades ont conduit les techniciens de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN France) à s'interroger, en termes de faisabilité opérationnelle et de qualité, sur la compatibilité de l'imagerie Pléiades avec les données orthophotographiques que l'IGN génère et diffuse actuellement sous le nom de BD ORTHO®. Notre article présente les prototypes et

les évaluations réalisés sur ce sujet dans le cadre de la Recette Thématique Utilisateurs des images issues du satellite Pléiades.

## 2. Présentation de la BD ORTHO®

La BD ORTHO® est le produit que réalise et diffuse l'IGN au titre de la couche orthophotographique du Référentiel géographique à Grande Échelle (RGE), défini par arrêté du 19 avril 2005 du ministère de

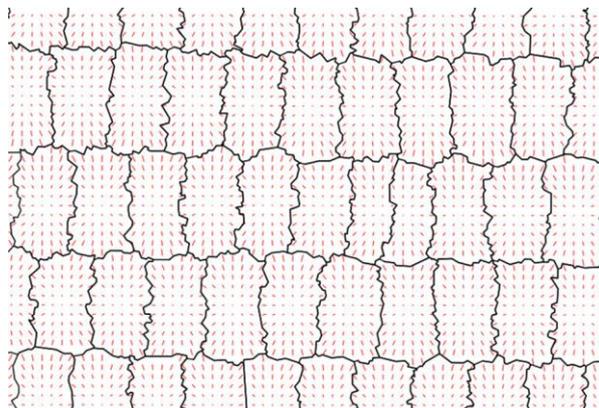
l'équipement, des transports, de l'aménagement du territoire, du tourisme et de la mer (NOR : EQUI0500495A).

Il s'agit d'une orthomosaïque numérique couvrant le territoire français, dont les lots unitaires sont produits et diffusés sur la base de l'emprise administrative qu'est le département. La projection cartographique est celle du système national de référence de coordonnées géographiques (Lambert-93 sur le territoire métropolitain). La résolution (au sens de « Ground Sampling Distance », GSD) de la BD ORTHO® est de 50 cm dans les deux directions principales (autrement dit : le côté, en X ou en Y, d'un pixel de l'image orthorectifiée occupe une longueur de 50 cm dans le plan de projection). L'orthoimagerie est produite en couleurs naturelles d'une part, et en fausses couleurs conventionnelles d'autre part (pour véhiculer et rendre apparente l'information apportée par la bande spectrale de l'infrarouge proche). Son rythme de renouvellement, qui était de 5 ans il y a 5 ans encore, tend à diminuer et est aujourd'hui de 3 à 4 ans.

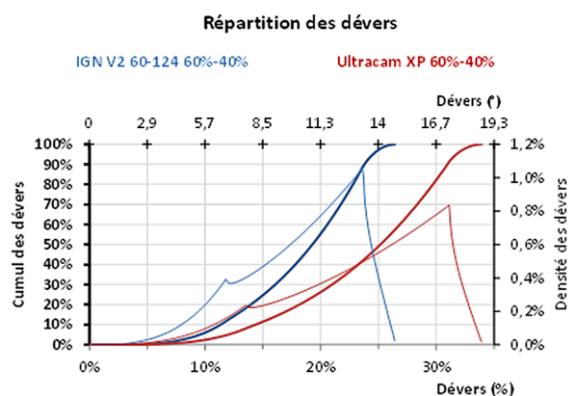
Ce sont ainsi plus de 350 mosaïques départementales de BD ORTHO® qui existent aujourd'hui. La quasi-totalité est issue d'imagerie aérienne, d'abord réalisée par des moyens argentiques (jusqu'au début des années 2000), puis par des technologies numériques. La plus grande part des images aériennes numériques a été acquise avec des capteurs matriciels fabriqués par le laboratoire LOEMI de l'IGN (Souchon *et al.* 2006, Souchon *et al.* 2012). Depuis 2009, la résolution des images à l'acquisition (soit l'ordre de grandeur du rapport de la longueur de l'emprise terrain de l'image aérienne au nombre de photosites disposés sur la longueur du capteur) est de 50 cm, ou 35 cm, ou 25 cm voire 20 cm. Le facteur de pansharpening de la caméra IGN V2 est un excellent 2<sup>2</sup> ; pour la caméra Vexcel Ultracam XP, qui a été aussi utilisée au début de la décennie 2010, c'est un appréciable 3<sup>2</sup>.

Des milliers d'images aériennes, chacune en recouvrement avec ses voisines (de l'ordre de 60% entre deux images successives, de 35% entre deux bandes de vol voisines), entrent dans la composition d'une mosaïque départementale. Du fait de la technologie d'acquisition, couplant capteurs matriciels et dispositifs optiques à perspective conique, les angles d'incidence (aussi appelés *dévers*) varient dans la mosaïque comme ils varient dans la portion d'une image aérienne qui entre dans la mosaïque (Figure 1).

Les limites de ces portions sont contraintes à rester proches de la limite mathématique optimale, soit le diagramme de Voronoï (au sens le plus ordinaire, avant toutes les généralisations que présentent, par exemple, Okabe *et al.*, 1992, 2000) construit dans le plan de projection cartographique à partir des sites ponctuels que sont les coordonnées X et Y des sommets de la prise de vues. En ces sites, les angles d'incidence sont nuls. La figure 2 dresse la répartition statistique, en cumul et en densité, des dévers dans une portion d'image limitée par le diagramme de Voronoï, pour deux types de capteur utilisés dans des configurations identiques. En pratique, la ligne de mosaïquage étant amenée à zigzaguer dans le paysage, afin que les effets de raccord restent discrets, elle s'éloigne légèrement par endroits du diagramme de Voronoï : les angles d'incidence maximale qu'on trouve dans une mosaïque orthophotographique ne sont cependant supérieurs à 22° qu'en des occasions exceptionnelles.



**Figure 1 :** Illustration de l'accroissement radial (de 0 à l'aplomb de la caméra jusqu'à des valeurs maximales sur la ligne de raccord) des incidences dans la mosaïque de clichés aériens (chaque cellule fait ici environ 800 m x 1600 m).



**Figure 2 :** Courbes de répartition et de densité statistiques des angles d'incidence (dévers) dans l'orthophotographie mosaïquée par le diagramme de Voronoï des sommets de prise de vues, pour deux capteurs aériens utilisés dans une même configuration (recouvrements de 60% entre deux clichés successifs et de 40% entre deux bandes successives).

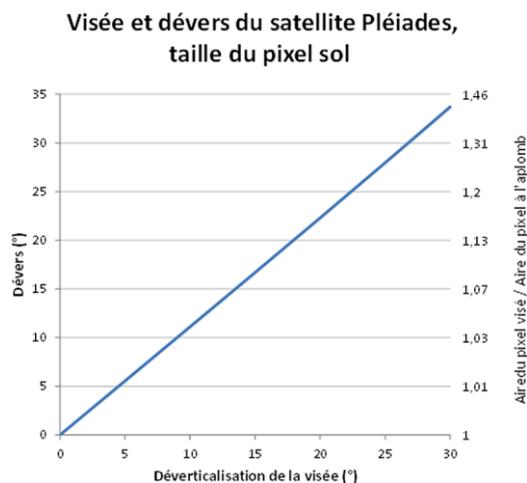
### 3. Le potentiel de Pléiades

La résolution (GSD) des images Pléiades dans le canal panchromatique est de 70 cm à l'aplomb du satellite, pour un facteur de pansharpening de 4<sup>2</sup>. En outre, le *Pléiades Imagery User Guide* d'Airbus Defence and Space justifie le choix de diffuser des images suréchantillonnées à 50 cm par l'argument que des phénomènes géographiques sont enregistrés avec des résolutions plus fines que le côté du pixel (jusqu'à 1,4 fois plus fines, lorsque leur structure se déploie en diagonale du maillage des pixels de l'image), et que le rééchantillonnage à 50 cm restitue la lisibilité de telles conformations. Voilà qui laisse envisager sereinement l'orthorectification à la résolution de 50 cm.

La dynamique d'acquisition de Pléiades, sur 12 bits, promet quant à elle un riche contenu informatif des images.

Sur le plan géométrique, la technologie du capteur de Pléiades, dite à barrettes (« pushbroom »), jointe à son éloignement du sol (quelque 694 km), entraîne (au contraire cette fois du cas aérien) une relative homogénéité des angles d'incidence dans la scène

photographiée, dont la valeur varie peu autour de l'angle d'incidence moyen (Figure 3). Autre différence avec le cas aérien : du fait de la rotondité de la Terre, les pixels de Pléiades enregistrent des superficies de terrain variables en fonction des angles de visée.



**Figure 3 :** Valeur des angles d'incidence dans la scène Pléiades et évolution de la superficie pixellaire, en fonction de l'angle de visée.

#### 4. Premiers tests

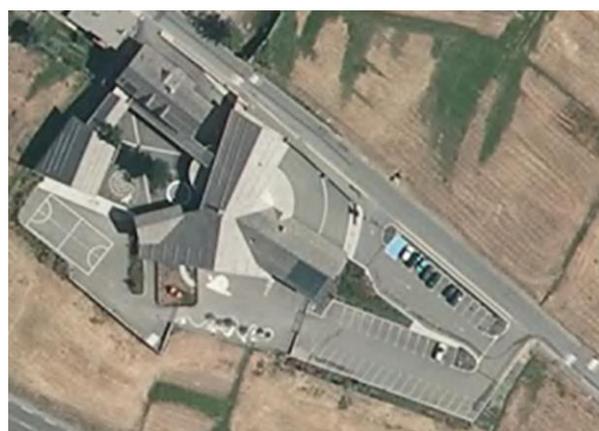
Deux premiers tests de production d'une mosaïque orthophotographique départementale à la résolution de 50 cm furent effectués à partir d'acquisitions du premier satellite Pléiades sur le département de la Lozère (48) au cours de l'été 2012 et sur le département des Hautes-Alpes (05) à la fin de l'été 2012.

Les résultats se sont montrés globalement compatibles avec les critères de la BD ORTHO® : l'information géographique est, dans l'ensemble, correctement positionnée, et elle se laisse lire sans efforts particuliers. La conformité aux exigences n'est cependant pas parfaite, principalement sur les deux critères de la qualité planimétrique et de l'exhaustivité de l'information géographique.

En effet, de nombreuses déformations planimétriques sont apparues. Celles-ci trouvent leur origine dans la combinaison de deux facteurs défavorables à l'exactitude de l'orthophotographie : d'une part le modèle numérique de terrain (MNT) alors disponible pour l'orthorectification souffrait de défauts d'actualité (voire d'imprécisions altimétriques localement importantes), d'autre part l'angle d'incidence des images commandées pour le test atteignait jusqu'à 23° en certaines larges scènes. L'opération d'orthorectification de ces images ne pouvait que conduire à des décalages planimétriques valant environ 0,5 fois toute erreur altimétrique  $dz$  locale. L'impact de la qualité du MNT se manifeste clairement : un nouveau test réalisé en 2013 sur ces images de 2012 sur la Lozère, avec le même modèle géométrique, mais en utilisant un MNT de meilleure qualité, à la fois plus actuel et deux fois plus exact en altimétrie, a cette fois fortement minimisé les déformations planimétriques de l'orthomosaïque.

Les défauts d'exhaustivité de l'information (parfois de plusieurs dizaines de kilomètres carrés) provenaient,

quant à eux, des trop nombreux masques nuageux présents dans les images, conséquence des contraintes de programmation du satellite combinées à l'aléa météorologique.



**Figure 4 :** Extrait, sur les Hautes-Alpes (05), de l'orthomagerie Pléiades prototypale (en haut) comparé à son homologue à même résolution de la BD ORTHO® d'origine aérienne (en bas). L'information géographique est lisible et correctement positionnée mais, nourrie de moins de détails à l'acquisition, elle demande plus d'efforts d'interprétation.

En plus de ces écarts aux spécifications de la BD ORTHO®, sur les plans de la géométrie et de l'exhaustivité, l'orthomagerie d'origine Pléiades sur ces tests départementaux présentait un aspect inhabituel, moins « flatteur », aux regards formés par l'orthomagerie d'origine aérienne (Figure 4). Cela est dû, à nouveau, à deux raisons objectives, bel et bien séparables des questions de beauté ou d'esthétique (lesquelles mobilisent avant tout la subjectivité d'un jugement personnel ou l'adoption tout aussi subjective, tant qu'il n'est pas imposé par des spécifications, d'un critère canonique).

La première raison, propre aux traitements à effectuer sur les enregistrements bruts de Pléiades, est que l'algorithme de fusion (pan-sharpening) qui avait été appliqué pour établir les scènes utilisées restait encore, en ce tout début de vie du satellite, à optimiser (il a été modifié depuis). La seconde raison relève des mécanismes de la perception impliqués dans la lecture de l'orthophotographie : même si l'information géographique, dans toute la gamme des échelles d'intelligibilité attendues de la BD ORTHO®, est clairement lisible dans l'orthomagerie Pléiades, elle s'y

manifestera, à pleine résolution, avec moins de détails subgéographiques que dans l'orthoimagerie aérienne et le travail d'interprétation de l'œil, si on lui propose la comparaison, y trouvera moins de confort. Joue ici en défaveur de l'orthoimagerie Pléiades le *taux de concentration géographique* par lequel caractériser intuitivement l'informativité visuelle d'une image géographique résultant de la transformation d'une version antérieure de cette image (il s'agit, dans sa forme la plus simple, du rapport de l'aire d'un pixel conventionnel de l'image résultante, non indûment sur- ou sous-échantillonnée, à l'aire, supposée être elle aussi significative, du pixel homologue dans la version initiale de l'image). La BD ORTHO® à 50 cm, fabriquée traditionnellement à partir d'images aériennes acquises, nous l'avons vu, à des résolutions allant de 50 cm à 20 cm, bénéficie (sans qu'il soit imposé par les spécifications) d'un taux de concentration géographique supérieur à 1, qui peut aller jusqu'à  $(50/20)^2$ . Pour Pléiades, le taux de concentration géographique est de  $(50/70)^2$  : il est ainsi quelque 12 fois moindre que celui de l'orthoimage issue de l'imagerie aérienne la plus finement résolue. C'est là raisonner sur le seul canal panchromatique à l'aplomb du satellite : la différence est plus grande encore pour la contribution du canal couleur à l'information de l'image, et elle s'accroît toujours avec l'angle de visée du satellite.

## 5. Seconds tests

La seconde série de tests fut menée à nouveau en 2013 sur deux départements entiers : l'Allier (03) et le Puy-de-Dôme (63). Cette fois, grâce notamment au nouvel algorithme de fusion des images Pléiades, et au doublement de la fréquence d'acquisition consécutive au lancement du satellite 1B qui a permis de mieux limiter les problèmes de couverture nuageuse et de dévers dans les scènes, les mosaïques départementales produites ont pu être jugées, à quelques défauts résiduels près (dont on trouvera un exemple en Figure 5), conformes aux spécifications de la BD ORTHO®.

## 6. Complémentarité

L'ensemble des tests montre que l'orthoimagerie d'origine Pléiades peut atteindre, sur le plan technique, un niveau de compatibilité avec les spécifications de la BD ORTHO® — à la double condition cependant d'imposer de strictes contraintes sur les modalités de l'acquisition (angle de visée limité, absence de couverture nuageuse) et de l'orthorectification (utilisation d'un très bon MNT), et que les post-traitements des enregistrements radiométriques soient opérés avec le soin optimal.



**Figure 5 :** Extrait, sur l'Allier (03), de l'orthoimagerie Pléiades (satellite 1B, le 5 août 2013) (en haut) comparé à son homologue de la BD ORTHO® d'origine aérienne en août 2009 (en bas). L'angle d'incidence de Pléiades, ici fort (24°), entraîne une légère ondulation de la voie ferrée (au nord).

De cette compatibilité conditionnelle, il découle la possibilité d'envisager l'utilisation de l'imagerie Pléiades dans la production de la BD ORTHO®. La substitution systématique de l'imagerie Pléiades à l'imagerie aérienne n'est pas envisageable : ne citons, en arguments défavorables à ce scénario, que les difficultés qui se poseraient au niveau de la programmation (assurer annuellement des acquisitions très contraintes sur un tiers de la France) ou la mise à mal d'applications qui réclament des produits constitutivement inaccessibles à l'imagerie Pléiades (l'imagerie aérienne acquise à de très fines résolutions sert à d'autres usages que ceux de la BD ORTHO®, sous la forme par exemple de l'orthophotographie à la résolution de 20 cm). C'est bien plutôt sur le mode de la *complémentarité* avec l'imagerie aérienne qu'il convient d'envisager l'exploitation de Pléiades pour la production de la BD ORTHO®.

Deux formes de complémentarité (dont les atouts sont eux-mêmes combinables) se présentent d'emblée. La première est une répartition des chantiers départementaux à entreprendre : seraient confiées à l'imagerie Pléiades une partie des orthomosaïques départementales attendues à la seule résolution de 50 cm, le reste des orthomosaïques départementales (le reste de celles qui sont à produire à la résolution de 50 cm, et toutes celles qui sont programmées à des résolutions plus fines) étant produites à partir d'acquisitions aériennes. Dans cette perspective, qui

est celle qui a présidé aux tests dont il a été rendu compte plus haut, Pléiades est avant tout considéré comme un vecteur supplémentaire d'acquisition d'images à l'échelle départementale, apportant une souplesse accrue au système général de production de la BD ORTHO®. Dans la perspective de la seconde forme de complémentarité, Pléiades est plutôt considéré comme un moyen d'optimisation économique du système de production de la BD ORTHO® : en effet, là où l'avion ne peut voler et acquérir ses images qu'avec des difficultés exceptionnelles (en termes de délais imposés par exemple par des obtentions d'autorisation de survol, ou de coûts entraînés par des nécessités géographiques), on lui préférerait l'imagerie satellitaire. Tel est le cas, pour prendre un exemple topographique, de tout massif avec des reliefs importants dans un département, configuration qui impose à l'avion photographe de gagner des altitudes à la fois exceptionnelles et variables.

Nos tests, sur ce cas précis, ont consisté à opérer l'incrustation du massif du Mont-Blanc, orthomosaïqué à partir d'une acquisition Pléiades, dans la mosaïque départementale BD ORTHO® de la Haute-Savoie (74) produite, quant à elle, à partir d'images aériennes (caméra IGN V2). La configuration des deux acquisitions était favorable : elles étaient à peu de jours près contemporaines (le 19 août 2012 pour les scènes Pléiades, du 8 au 11 août de la même année pour la caméra aérienne). L'angle d'incidence relativement faible des images Pléiades, en l'occurrence inférieur à 9°, était proche des dévers aériens et propre à contenir dans des limites raisonnables les effets d'éventuelles erreurs de MNT sur la planimétrie de l'orthomagerie. Enfin, la radiométrie des différentes scènes Pléiades était très homogène, de même que celle des images aériennes. Cela ne signifie pas pour autant que l'incrustation put être immédiate : en dehors de la préparation des données à combiner, et du formatage des données produites, il a fallu peser certaines alternatives et mener à bien les opérations décidées en conséquence (Figures 6 à 9).

C'est ainsi qu'il a d'abord fallu réaliser l'égalisation colorimétrique des deux mosaïques disponibles, après avoir décidé d'asseoir les couleurs de l'orthomagerie Pléiades du Mont-Blanc sur les couleurs de la BD ORTHO® départementale, équilibrées déjà pour leur part sur l'ensemble de la Haute-Savoie et de ses paysages topographiques variés.

Ce travail d'égalisation colorimétrique mobilise des compétences certes de photographe mais surtout de géographe multi-échelle, capable d'une part d'évaluer la conformité des effets globaux et locaux des couleurs aux configurations topographiques et paysagères globales et locales, et apte d'autre part à restituer, par des manipulations sur les teintes, les corrélations qui auraient été perdues entre les couleurs de l'image et les composants de la géographie.

Il a fallu ensuite délimiter la zone de l'incrustation, qui fut un corridor d'une largeur kilométrique contenant la trace planimétrique de l'isohypse de 2000 m, choisi en tant que séparateur moyen, sur les Alpes, entre zones de végétation arborée et zones de rochers. Et dans ce corridor, il a fallu établir la ligne de raccord exacte, pixel par pixel, entre l'orthomagerie d'origine Pléiades, d'un côté, et l'orthomagerie d'origine aérienne, de l'autre côté. Ceci a demandé, au préalable, d'adapter au mosaïquage de mosaïques les outils que l'IGN avait conçus pour le mosaïquage d'images ou de scènes.



**Figure 6 :** Incrustation du massif du Mont-Blanc Pléiades dans la BD ORTHO® de la Haute-Savoie (74). De haut en bas : la BD ORTHO® 2012, la superposition brute de l'orthomosaïque Pléiades, l'incrustation après homogénéisation colorimétrique et mosaïquage.



**Figure 7 :** Le long de la ligne de mosaïquage de l'incrustation finale du Mont-Blanc dans la Haute-Savoie (la largeur de la portion de terrain est d'environ 330 m). Portion nord-ouest : origine BD ORTHO, portion sud-est : origine Pléiades.



**Figure 8 :** Le long de la ligne de mosaïquage de l'incrustation finale du Mont-Blanc dans la Haute-Savoie (la largeur de la portion de terrain est d'environ 350 m). Portion ouest : origine BD ORTHO, portion est : origine Pléiades.



**Figure 9 :** Le long de la ligne de mosaïquage de l'incrustation finale du Mont-Blanc dans la Haute-Savoie (la largeur de la portion de terrain est d'environ 230 m). Portion ouest : origine BD ORTHO, portion est : origine Pléiades.

Techniquement, le résultat est probant et, avec lui, un mode opératoire a été établi.

## 7. Conclusion

Nos tests montrent que les performances de l'imagerie Pléiades, lorsqu'elle respecte de strictes conditions d'acquisition, tant géométriques que météorologiques, et qu'elle se trouve couplée à un modèle numérique de

terrain relativement précis, la portent à des niveaux de qualité informative qui sont compatibles avec les spécifications de la BD ORTHO®. Nos tests n'ont cependant porté que sur les aspects les plus techniques, intrinsèques aux données et aux outils, de la faisabilité. La pleine appréciation de l'exploitabilité de l'imagerie Pléiades pour la production de la BD ORTHO® proprement dite réclame des études supplémentaires, sur des sujets aussi variés que le potentiel de la programmation Pléiades en régime standard pour l'acquisition de départements entiers, ou le potentiel d'optimisation économique de la complémentarité imagerie Pléiades / imagerie aérienne, ou encore l'analyse de retours d'expérience d'utilisateurs de la BD ORTHO®... Mais nous nous écartons là de notre sujet, qui était bien l'évaluation de l'orthoimagerie d'origine Pléiades à l'aune des spécifications de la BD ORTHO®.

## Remerciements

*Les auteurs tiennent à exprimer leur reconnaissance à tous les experts de l'IGN qui ont contribué à ces tests d'orthoimagerie, et notamment à Jean-François Daures, pour l'impulsion et le suivi des expérimentations ; à Jacques Desir et à François Becirspahic, pour l'évaluation de la qualité des orthomosaïques d'origine Pléiades ; à Jérôme Galmard et à Claude Solon, pour leur expertise photographique et géographique multi-échelle ; à Antoine Pinte, pour son expertise sur le mosaïquage et ses développements informatiques ; à Amélie Lombard, pour avoir assuré l'interopérabilité des données et des outils à des étapes cruciales des tests ; à Éric Breton et à Marie-Cécile Bosert pour le travail sur les métadonnées. Les auteurs remercient aussi les relecteurs anonymes de la RFPT pour la précision constructive de leurs corrections et recommandations.*

Images d'origine Pléiades qui ont servi à l'orthorectification par l'IGN : © CNES (2012, 2013), distribution Airbus DS / Spot Image.  
Images BD ORTHO® : IGN.

## Références

Okabe A., Boots B., Sugihara, K., Chiu S.N., 1992, 2000. Spatial Tessellations. Concepts and Applications of Voronoi Diagrams. Chisester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore. John Wiley & Sons.

Airbus Defence and Space, 2012. Pléiades Imagery User Guide V2.0, octobre 2012.

Souchon J.-Ph., Paparoditis N., Martin O., Meynard Ch., Thom Ch., 2006. Is there an ideal aerial digital camera?. International Archives of Photogrammetry,

Souchon J.-Ph., Thom Ch., Meynard Ch., Martin O., 2012. A large format camera system for national mapping purposes. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 200:48-53.