

SRP, UNE BASE DE CALAGE 3D DE TRES HAUTE PRECISION SUR LE CONTINENT AFRICAIN

Laure Chandelier¹, Laurent Coeurdevey², Pascal Favé¹, Alexis Barot², Mathilde Jaussaud¹

1 : IGN, 6 avenue de l'Europe, 31520 Ramonville, France

(laure.chandelier, pascal.fave, mathilde.jaussaud)@ign.fr

2 : Airbus Defence and Space, 5 rue des Satellites, BP 14359, 31030 Toulouse Cedex 4, France

(laurent.coeurdevey, alexis.barot)@airbus.com

Résumé

La SRP (« Space Reference Points ») est une base mondiale, précise, dense et homogène de points 3D géoréférencés qui est réalisée à partir de l'archive d'images SPOT6/7. Ce projet, mené en partenariat entre l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) et Airbus Defence and Space (ADS), permet le calage géométrique automatique et donc massif d'images très haute résolution avec une précision de l'ordre de 3 m CE90, partout dans le monde.

La SRP sur l'Afrique a été produite au cours de l'année 2019. Les contrôles qualité confirment le respect des spécifications attendues pour ce produit. Les particularités des paysages (déserts et forêts denses notamment) et les différences climatiques importantes rencontrées sur ce continent ont conduit à intégrer de nouvelles fonctionnalités à la chaîne de production. Tout d'abord, la sélection des images SPOT6/7 a été enrichie sur la zone intertropicale en prenant en compte les masques de nuages fournis avec les images sources, permettant d'obtenir une densité de points SRP optimale pour la zone. Ensuite, un prototype de socle de calage exploitant des ortho-images Sentinel-2 a montré la capacité de cette méthodologie à assurer la spécification de localisation à 3 m sur un archipel d'îles (ici le Cap Vert). Afin de valider pleinement le produit, l'article présente deux tests d'exploitation sur le Nigéria pour des productions 2D et sur la ville de Marrakech pour des productions 3D. Ils démontrent la capacité de la SRP à caler différents types d'images et à atteindre la cible de précision de la base. La SRP est destinée, dès 2021, à assurer le calage d'images dans différents projets et notamment, de façon massive, dans le segment sol Pléiades Neo (résolution de 30 cm).

Mots clés : point d'appui, Space Reference Points, SPOT6/7, calage automatique, affinage géométrique, socle de référence, Sentinel-2, Afrique

Abstract

SRP (Space Reference Points) is a worldwide, accurate, dense and homogeneous 3D GCP database, built from a plethoric SPOT6/7 multi-view archive. The project, carried out as a partnership between « Institut national de l'information géographique et forestière » (IGN) and Airbus Defence and Space (ADS), aims at automatically locating high-resolution imagery with a 3 m accuracy, all around the world.

SRP in Africa was produced in 2019. Quality controls confirm compliance with the expected specification for this product. The particularities of the landscapes (including desert and dense forest) and the climatic variations encountered on this continent have led to the integration of new functionalities into the production chain. First, SPOT6/7 image selection was enhanced in the intertropical zone by taking into account the cloud masks supplied with these images. This allows for optimal SRP density in this region. In addition, a geometric foundation prototype including Sentinel-2 ortho-images was developed in order to fulfil the 3 m location specification on groups of islands (in this case, the Cape Verde islands). Then, to entirely validate the product, the article presents two operational tests on Nigeria for 2D production and on the city of Marrakech for 3D production. These tests prove SRP capacity to locate different types of images and to reach the target location accuracy of the database. As from 2021, SRP is intended to ensure the registration of images in various projects and, especially, on a large scale, in the Pléiades Neo ground segment (30 cm resolution).

Keywords: Ground control point, Space Reference Points, SPOT6/7, automatic registration, geometric model refining, geometric foundation, Sentinel-2, Africa

1. Introduction

L'avènement des images Très Haute Résolution (THR) et l'utilisation conjointe des systèmes de géolocalisation ont accru le besoin de précision des produits géographiques issus des capteurs optiques. Fournir les meilleures performances géométriques de localisation planimétrique et altimétrique, avec une qualité homogène en tout lieu d'observation est un enjeu majeur des produits satellitaires optiques. La gamme de données géographiques attendues s'étend du produit planimétrique prêt à l'emploi tel qu'une ortho-image, aux produits altimétriques tels que les Modèles Numériques de Surface (MNS) et Modèles Numériques de Terrain (MNT). Ces dix dernières années, les besoins exprimés par les utilisateurs finaux en termes

de précision des produits dérivés ont continuellement augmenté pour atteindre 5m CE90 (voire 4 m en ville) afin de :

- faciliter les activités de production courantes : calage, rectification et mosaïquage pour l'ortho-image, corrélation pour le MNS, qualification des produits ;
- garantir une compatibilité des produits avec les autres systèmes de géolocalisation : pour du guidage GPS avec trace sur ortho-image ou carte par exemple.

Concrètement, les exigences géométriques des produits de la nouvelle constellation Pléiades Neo (Airbus, 2020) de satellites optiques à 30 cm de résolution visent à répondre à ces besoins. Le produit standard ortho-image Pléiades Neo après rectification sur le MNS/MNT haute qualité WorldDEM4Ortho (Airbus, 2020-b) a pour objectif une précision planimétrique meilleure que 5 m CE90 (erreur planimétrique avec un niveau de confiance de 90%), sous toutes conditions de pentes modérées (<20%). L'étape de rectification ne pouvant être parfaite, l'expérience acquise montre que la localisation du modèle géométrique de l'image en entrée doit être de l'ordre de 3 m. La localisation native à bord du satellite étant attendue à 5 m, cette cible de calage à 3 m n'est atteignable qu'à l'issue d'un traitement d'affinage *a posteriori* sur une base de référence garantie à ce niveau de précision en planimétrie. Ce traitement sera effectué dans le segment sol (ensemble composé des équipes, matériels et logiciels assurant le contrôle du satellite, la récupération de ses mesures ainsi que leur traitement) de la constellation Pléiades Neo.

La base Space Reference Points (SRP) est une base de points de calage 3D dont l'objectif est d'atteindre ces performances de localisation pour les images des satellites Pléiades Neo et plus généralement, pour toute image spatiale à très haute résolution, quelle que soit sa performance de localisation native.

En complément des besoins traditionnels de calage planimétrique à destination de la production d'ortho-images, le besoin d'un calage maîtrisé et précis en Z pour des productions 3D MNS/MNT émerge nettement aujourd'hui. Le programme CO3D (Lebègue et al, 2020), vise à produire, à l'horizon 2025, un MNS mondial totalement automatique. Il utilisera la base SRP pour le calage planimétrique et, conjointement à d'autres sources, pour le processus de calage altimétrique. La précision altimétrique des points SRP est en cours de qualification avec un premier objectif de 5 m LE90 (erreur altimétrique avec un niveau de confiance de 90%) pour la base actuelle.

Le présent article décrit tout d'abord l'historique des bases de calage mondiales, la genèse de la SRP, son principe, ses principales caractéristiques et le processus de production de la base. La suite fait un zoom sur l'Afrique en présentant les spécificités paysagères du continent, les adaptations menées pour améliorer les résultats sur la zone intertropicale et des résultats qualitatifs de la base produite. Puis, au travers de quelques cas d'études, son exploitation pour le calage d'images SPOT6/7 et Pléiades est illustrée et validée. Enfin, via la description d'un prototype élaboré sur l'archipel du Cap Vert, l'article évoque comment les images Sentinel-2 peuvent aider à constituer des blocs connexes sur des archipels d'îles éparses et proposer ainsi des points SRP sur des terres isolées.

2. SRP, un produit mondial pour le calage d'images optiques

2.1 Historique

La tenue des performances de localisation des images spatiales est traditionnellement assurée par les équipements à bord du satellite (gyromètres, senseurs stellaires, etc.) et/ou par des opérations de calage réalisées *a posteriori*.

Les équipements bord permettent aujourd'hui au mieux une restitution de position de l'ordre de 4m (quelques microradians) qui semble être le seuil ultime des meilleures technologies, pour des coûts élevés, avec un besoin de

calibration régulier et des risques de panne ou de dérive durant la durée de la mission. Même à ce niveau de performance, compte tenu des variations d'angle de prise de vue et de relief terrestre après compensation par un MNS/MNT de rectification, la précision planimétrique à 5 m d'ortho-images n'est pas atteignable à l'échelon mondial.

Une alternative aux équipements embarqués à bord des satellites consiste à affiner la localisation des images par traitement au sol. Les techniques de corrélation automatique sur des bases de données d'images de référence à qualité et précision maîtrisées apportent ainsi une solution directe et économique, même pour des images avec une localisation native très approximative comme c'est le cas pour les constellations de satellites à bas coût. L'architecture classique de ces bases de données combine une couche d'ortho-images pour la composante horizontale et une couche MNS pour la composante verticale. Différentes couches mondiales d'ortho-images de référence pour le calage existent, à l'initiative d'ADS et de l'IGN, telles que Reference3D™, couche ortho SPOT5 à 5 m (SPOT Image, 2011) puis, plus récemment, Premium Accuracy Services, couche ortho SPOT6/7, avec une précision atteignable entre 5 et 10 m.

Le calage sur ortho-image nécessite quelques précautions d'emploi, comme le choix de points au sol, sans lesquelles la mesure terrain s'entache de l'erreur altimétrique liée au MNS et à la rectification de l'ortho-image. Rares sont les traitements automatiques qui prennent en compte cette limite du processus et cela conduit alors à dégrader le calage d'une erreur systématique liée à la référence.

Pour s'affranchir des incohérences entre les références planimétriques et altimétriques, l'IGN a développé vers 2010 le concept d'une base dense de points stéréoscopiques 3D obtenus par « repiquage » sur les images du capteur High Resolution Stereoscopic (HRS) de SPOT5 assemblées par spatiotriangulation mondiale en un unique bloc cohérent et rigide, le « socle géométrique HRS ». Ce socle géométrique, maintenu depuis plus de vingt ans par l'IGN et ADS, est largement décrit dans (Massera et al. 2012). La localisation absolue atteinte dépend de l'équipement en données d'appui. Pour une couverture régulière de données d'appui de précision de l'ordre du mètre, l'expérience a montré que les résultats sont meilleurs que 3 m à 90 %. Les données d'appui peuvent être de différentes natures : points de stéréopréparation, ortho-images, empilements d'images, etc. Des points 3D accompagnés d'images sont extraits de ce socle géométrique et constituent la base « BD Amer ». Cette base possède une densité de l'ordre d'un point tous les 20 km² et une précision de localisation égale à celle du socle géométrique. Elle est disponible sur 70 % des terres émergées avec une précision allant jusqu'à 3 m sur certaines régions. La BD Amer est exploitée par l'IGN en standard dans ses chaînes de production d'ortho-images Pléiades et SPOT6/7 depuis 2015.

2.2 Genèse et caractéristiques de la SRP

En 2017, Airbus et IGN ont proposé trois axes d'amélioration du concept de BD Amer pour le développement de la SRP :

- le remplacement du support image SPOT5 HRS par les images SPOT6/7 offrant une archive pléthorique sur l'ensemble du globe et foisonnante en vues multiples pour la stéréorestitution avec une résolution améliorée à 1,5 m et une meilleure actualité ;
- L'amélioration du socle géométrique HRS et son extension à l'ensemble des terres émergées avec une précision meilleure que 3 m partout (et par

130

voie de conséquence de sa BD Amer) par injection de données d'appui de haute précision dans la spatiotriangulation d'échelle continentale ;

- la mise en place de traitements massifs sur le cloud au regard de la masse des données à traiter et d'un rythme de production de 30 millions de km² par an.

Les caractéristiques principales que doivent vérifier les points 3D de la SRP afin de permettre le recalage d'images, notamment celui, automatique et massif, des images Pléiades Neo sont :

- une précision 3D maîtrisée et qualifiée par multi-intersections des directions de visées ;
- une densité élevée permettant de recalibrer unitairement des images d'emprise limitée (50km² environ) ;
- des points radiométriquement saillants, optimaux pour la corrélation et privilégiés sur des objets pérennes ;
- une résolution compatible avec le calage d'une image tierce d'un facteur 10 de résolution ;
- une couverture mondiale exhaustive ;
- une capacité à caler des images mal localisées nativement, via la mise à disposition d'images basse résolution couvrant une surface plus vaste.

Les spécifications SRP décrites dans le Tableau 1 traduisent cette mise en œuvre. Une description détaillée du format de la base SRP est donnée dans (Chandelier et al., 2020). SRP s'adresse à tout type d'images optiques dans des configurations géométriques de chantiers variés.

	Spécification	Remarque
Couverture	Ensemble des terres émergées (environ 135 millions de km ²)	Hors Antarctique, Groenland et calottes glaciaires locales. Inclus îles.
Densité des points	1 point / 2 km ² en moyenne pour chaque 1/100 ^{ème} de degré carré	Relaxation possible sur certains paysages (forêt dense, désert, etc.)
Précision des points	3 m CE90	Relaxation possible sur certains paysages (relief accidenté et élevé, îles isolées, etc.).
Imagettes	101 x 101 pixels à 2 m de résolution	Accompagné pour chaque point d'une imagette 101 x 101 pixels basse résolution à 20 m.

Tableau 1 : principales spécifications de la SRP

2.3 Processus de traitement

La production de la base SRP a débuté au printemps 2018 et doit s'achever début 2022. Elle est organisée autour d'une douzaine de chantiers géographiques qui permettent d'échelonner la production dans le temps (voir Figure 1). Chandelier et al. 2020 décrit précisément tout le processus de production, le présent article en rappelle les grands principes pour mieux approfondir les spécificités liées à la réalisation du produit sur le continent africain.

2.3.1 Sélection des images SPOT6/7

La SRP exploite la richesse de l'archive SPOT6/7 disponible soit 1,5 millions de segments acquis depuis 2013, plus de 50 fois les terres émergées (voir Figure 3). Cette archive offre une couverture mondiale et extrêmement foisonnante, essentielle pour le principe SRP de visées multi-stéréoscopiques.

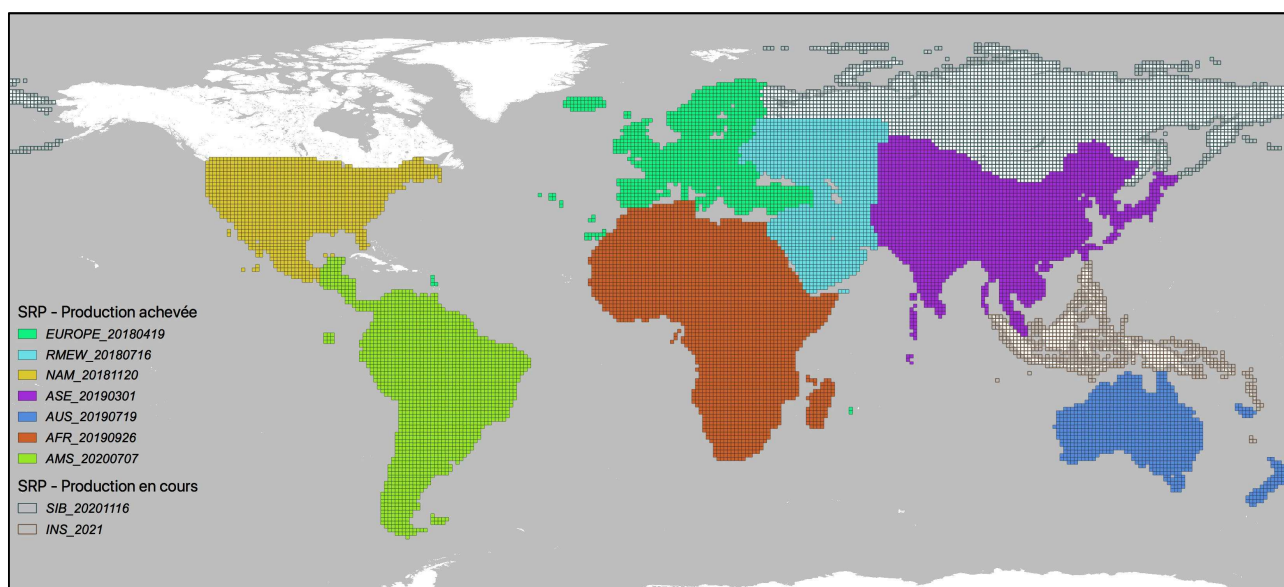


Figure 1 : Avancement de la production SRP – décembre 2020

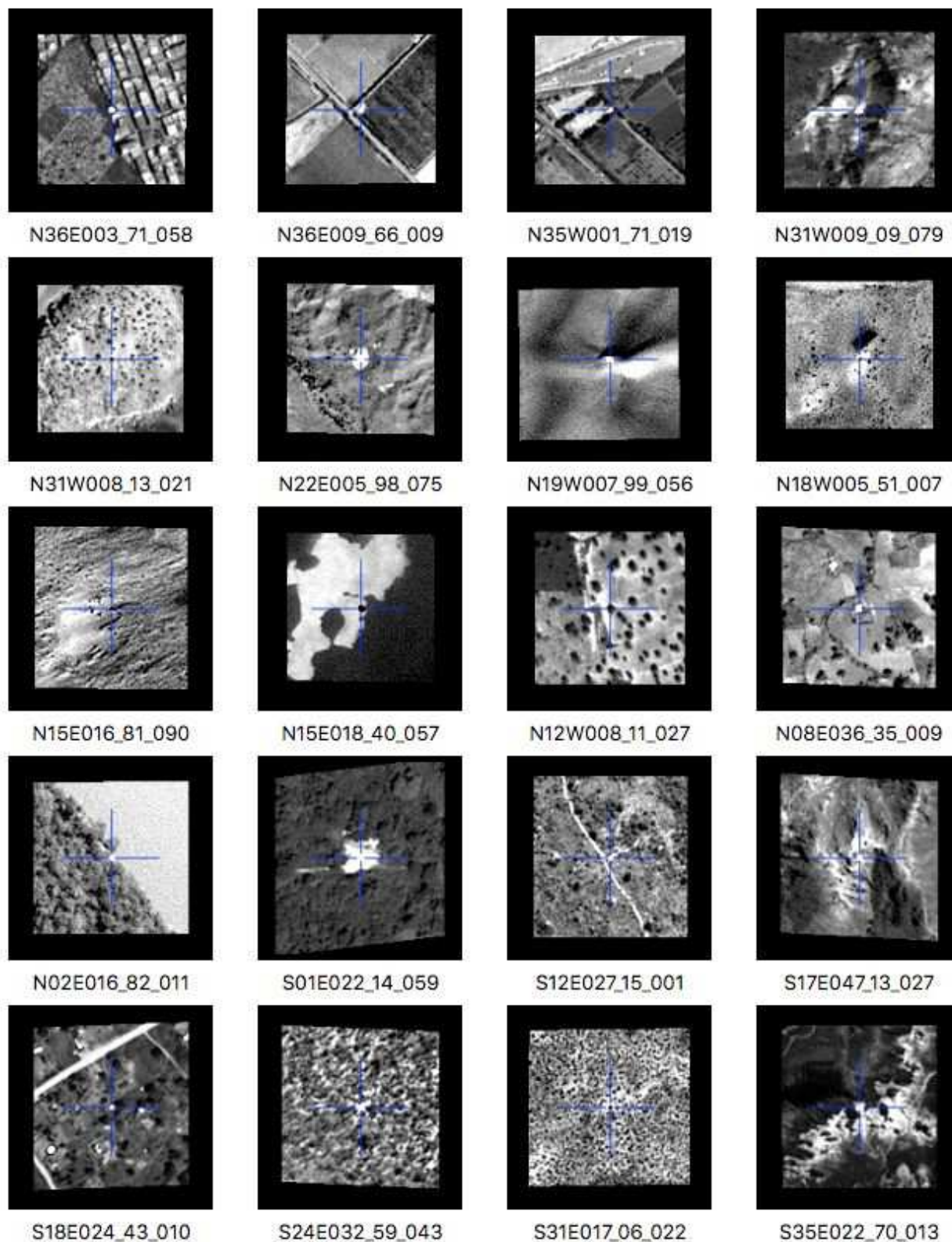


Figure 2 : exemples de points SRP sur l'ensemble du continent africain, du Nord au Sud, de l'Ouest à l'Est. Le point SRP correspond au détail sous la croix. Chaque imagerie livrée mesure 101 x 101 pixels à 2m, soit 202 m x 202 m.

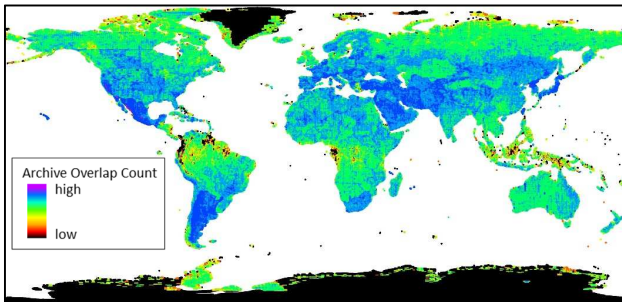


Figure 3 : Foisonnement de l'archive SPOT6/7 de 2013 à mi-2019, acquise avec moins de 15 % de nuages (échelle de 0 à 100 images environ)

L'étape de sélection des images utilise en entrée les seules données du catalogue SPOT6/7 d'Airbus : métadonnées, vues sous-résolues (« quicklook ») masques vecteurs (emprise, nuages) associés à chaque image présente à l'archive. Cette stratégie permet d'éviter de générer des produits en pleine résolution inutiles.

La sélection initiale des données SPOT6/7 recherche le sous-ensemble optimal en archive d'images les plus récentes équipant tout lieu des terres émergées avec les critères nominaux suivants : foisonnement d'au moins 6 images acquises avec moins de 15% de nuages et réputées sans neige saisonnière. Le calcul de la sélection est optimisé pour éviter la surabondance locale d'images. Cette optimisation doit conduire à exclure certaines images de la production tout en favorisant une variabilité des critères 1) de conditions angulaires de prise de vue 2) de saisonnalité. Ce calcul de limitation du foisonnement d'image est réalisé en recherchant par échantillonnage les images en visibilité, en considérant la totalité des masques géocodés disponibles (nuages en particulier). Une sélection locale des images les plus pertinentes est ensuite réalisée selon les deux critères mentionnés plus haut. Des études ont permis de valider que les bases SRP produites sont de qualité similaire (en densité et précision de localisation) là où l'archive est statistiquement surabondante et où la sélection intervient.

A terme, les simulations indiquent que la couverture mondiale SRP utilisera plus de 400 000 images SPOT6/7. Ce nombre peut être comparé aux 20 000 images HRS composant le socle géométrique. La sélection des images SPOT6/7 est synchrone avec chaque chantier de production. La partie 3.2 présente une amélioration apportée à cette méthode de sélection développée et opérée pour le chantier Afrique afin de mieux traiter la région intertropicale et son fort couvert nuageux.

2.3.2 Chaîne de traitement SRP

Pour obtenir la précision de localisation attendue (3 m CE90), la spatiotriangulation des images SPOT6/7 repose sur la BD Amer présentée plus haut, au paragraphe 2.1. Le socle géométrique a ainsi été équipé des données d'appui nécessaires pour atteindre cette précision (voir Figure 4).

En ce qui concerne le traitement du bloc d'images SPOT6/7, la principale spécificité porte sur le volume de données qui est ici particulièrement élevé. De nombreuses optimisations et le recours à différentes ressources de calculs sur le cloud et/ou à la parallélisation des traitements ont permis d'obtenir des temps de calcul compatibles avec une production à grande échelle.

Une fois la localisation des images assurée, des points caractéristiques sont extraits des images et leurs coordonnées 3D sont calculées par intersection de visées.

Un formatage est appliqué comprenant l'extraction des vignettes représentant les détails sur les différentes images valides ainsi que la génération des métadonnées du point.

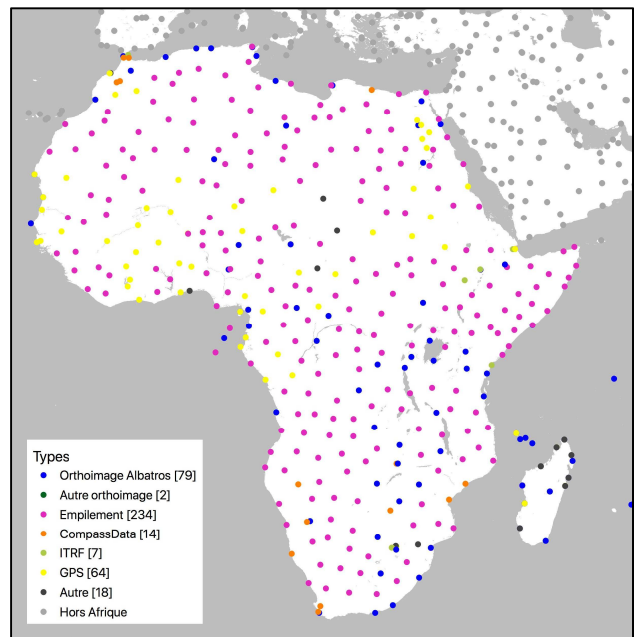


Figure 4 : équipement en données d'appui du socle géométrique sur le continent africain

3. La SRP sur l'Afrique

3.1 Enjeux et spécificités du continent

Le continent africain constitue le cinquième chantier de production de la SRP. Il tire bénéfice de l'expérience acquise sur les 47,5 millions de km² qui l'ont précédé. Pour autant, ce chantier s'est révélé unique par bien des aspects, notamment sa taille de 30 millions de km², inégalée jusqu'alors, ainsi que la diversité de paysages et des climats rencontrés. L'archipel du Cap Vert a fait l'objet d'un traitement spécifique du socle géométrique exposé dans la partie 5.

Les progrès de capacité de traitement ont permis d'aborder l'ensemble du continent africain (dont l'île de Madagascar) comme un unique chantier de production d'environ 75 000 images. La cohérence interne de la base sur le continent (date de production, précision relative du calage des images SPOT6/7) est assurée par ce travail en un unique bloc. Par ailleurs, la cohérence géométrique avec le reste du « super-continent » Eurasiatique est assurée grâce au socle géométrique qui couvre en une spatiotriangulation unique l'Afrique, l'Europe et l'Asie. Cette cohérence est renforcée, sur ses bordures continentales, par ajout d'images SPOT6/7 déjà exploitées dans les chantiers Europe et Moyen-Orient.

Au-delà de sa taille déjà exceptionnelle, le continent africain présente une grande diversité de paysages, conduisant à une typologie des points caractéristiques extraits dans la SRP particulièrement riche (voir Figure 2).

A l'extrême Nord, le Maghreb et la région de l'Atlas offrent des paysages côtiers, ruraux et montagneux pour lesquels les détails de la SRP s'approchent de ceux rencontrés sur le sud de l'Europe : éléments de végétation ponctuels, bâtis isolés en campagne ou saillants en ville, affleurements de roche ou lignes caractéristiques du relief.

La zone saharienne située immédiatement au Sud accueille le plus grand désert chaud du monde. Elle est composée de déserts sableux (ergs) ou rocheux (regs), de plateaux rocaillieux et de montagnes à sols nus. La nature des points de la SRP varie globalement selon cette répartition. Des sommets ou ombres de dunes ont été conservés dans la base puisque, dans certaines régions où le désert est peu mobile, ils peuvent constituer de bons points de calage et qu'ailleurs, les métadonnées de production ou la ré-exploitation permettent de les filtrer (voir partie 4).

Plus au Sud, la bande du Sahel se caractérise par des savanes intertropicales semi-arides. La corne de l'Afrique à l'Est présente des reliefs significatifs et de très hauts plateaux densément agricoles. Les principaux détails extraits des images sur ces zones sont du petit bâti ou de la végétation isolée. L'Afrique équatoriale tropicale et humide offre majoritairement un couvert de formations

arborées hautes et denses. Les détails y sont des arbres remarquables (par exemple, là où la canopée est plus claire), des petites clairières, du bâti dans les rares villages isolés ou, parfois, des formes découpées sur les rives des grands fleuves traversant la zone.

La Figure 5 montre la typologie des détails obtenue par contrôle visuel sur des échantillons de points SRP pour le Sahara et la zone équatoriale.

L'Afrique australe est marquée par des climats tropicaux à alternance humide et sèche et, à l'extrémité Sud du continent, un climat méditerranéen. Dans ces zones, les points de la SRP se situent principalement sur des éléments de végétation ou de bâti à la faveur des paysages rencontrés.

Enfin, la SRP sur l'île de Madagascar est composée de nombreux détails naturels : éléments de végétation, affleurements rocheux ou reliefs structuraux.

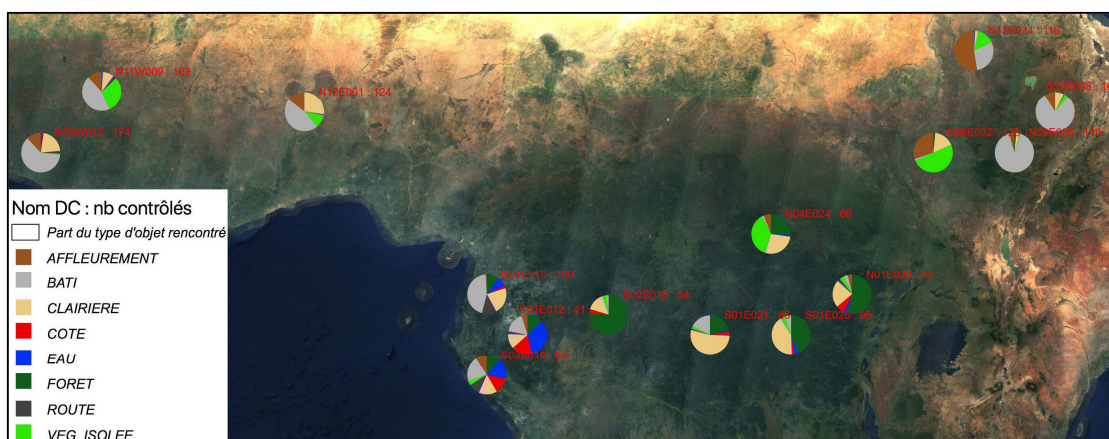


Figure 5 : répartition de la typologie des points par DC (degré carré) sur les zones du Sahel et équatoriale obtenue par contrôle visuel sur un échantillon de points de la SRP (en rouge, « nom du DC : nombre d'échantillons »)

3.2 Amélioration du foisonnement d'images

Le continent Africain constitue un chantier unique de 30,4 millions de km². Selon la méthode nominale présentée dans la partie 2.2.1, 58 500 images sont candidates à la sélection (voir Figure 6).

Cette sélection initiale comporte localement de nombreuses faiblesses de foisonnement, essentiellement dans la zone intertropicale. On estime qu'un foisonnement minimal de 6 images est nécessaire pour qu'à l'issue des opérations de filtrage des données en aval dans la chaîne de traitement SRP, les visées multi-stéréoscopiques conservées soient suffisantes. Ce critère n'est pas vérifié en zone intertropicale, faiblesse qui traduit le fort couvert nuageux de la région. Localement sur ces secteurs, un calcul spécifique de relaxation du seuil de couverture nuageuse des images est réalisé pour enrichir la sélection. Il consiste à introduire des images acquises avec plus de 15% de nuages, incrémentalement sur cette valeur de pourcentage, jusqu'à atteindre un seuil sur la multiplicité des zones vues hors nuages. A la différence de la sélection initiale calculée avec les critères nominaux, cette phase de relaxation locale ne procède plus par échantillonnage mais par empilement et fusion vecteur des masques de nuages.

La SRP Afrique constitue la première mise en œuvre opérationnelle de ce traitement de relaxation nuageuse. Le résultat de cette sélection finale est présenté en Figure 7. Le nombre d'images passe à 75 000, totalisant une couverture SPOT6/7 de 500 millions de km². Le traitement reste insuffisant pour quelques zones restreintes au

Cameroun et dans le bassin du Congo, soumises à un couvert nuageux quasi-permanent. Il faut noter la cohérence de cette sélection avec la densité finale obtenue de points SRP présentée dans la suite (voir Figure 10).

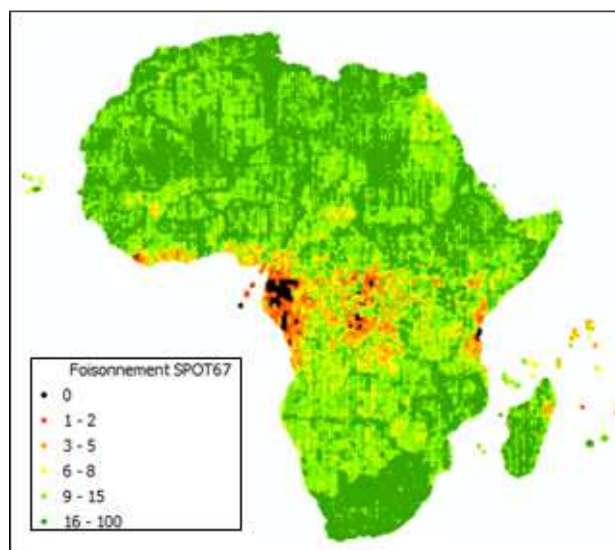


Figure 6 : Sélection initiale SPOT6/7 Afrique avec critères nominaux (images avec moins de 15% de nuages).

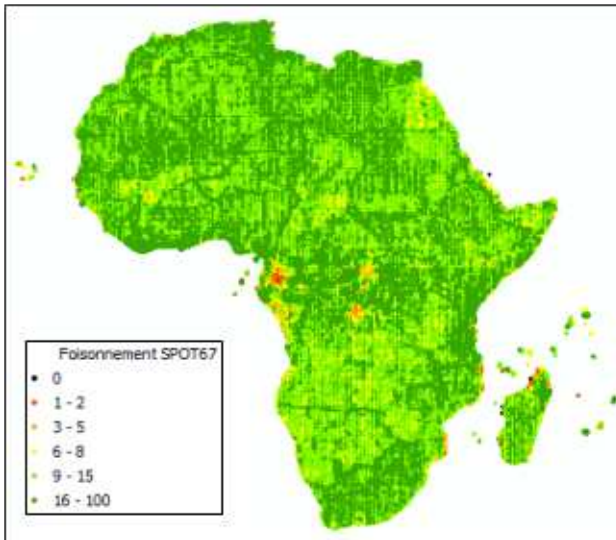


Figure 7 : Sélection SPOT6/7 Afrique finale (sélection initiale avec en plus, localement, des images acquises avec plus de 15% de nuages).

Les images sélectionnées sont produites en pleine résolution en géométrie capteur (PRIMARY) et mises à disposition sur l'infrastructure cloud en entrée de la chaîne de traitement SRP.

3.3 Résultats qualitatifs de la SRP sur l'Afrique

3.3.1 Qualité de localisation planimétrique

La qualité de la localisation planimétrique de la SRP est évaluée via la qualité de localisation des images SPOT6/7. Celle-ci est principalement estimée grâce à la base des produits aéroportuaires dite « Albatros » fabriquée et maintenue par Airbus sur plus de 1500 aéroports dans le monde. Cette base est composée de triplets d'images du satellite Pléiades, de qualité géométrique métrique, pour produire un MNT ainsi qu'une ortho-image à 50 cm de résolution. Certaines de ces données aéroports sont utilisées comme données d'appui dans la spatiosélectronique du socle, d'autres en contrôle. Sur le chantier Afrique, 146 aéroports ont été exploités : 81 (65 %) en contrôle seul et 65 (45 %) en appui et contrôle. Pour évaluer la qualité de localisation des images SPOT6/7 sur chaque aéroport, les 10 images SPOT6/7 les moins inclinées disponibles sont récupérées et orthorectifiées. Des estimations des écarts entre l'ortho-image Albatros et chacune des 10 ortho-images SPOT6/7 sont calculées par comparaison des coordonnées de points caractéristiques corrélés entre les deux types d'images. Les résultats sur le continent africain sont meilleurs que 2,8 m CE90 pour l'ensemble des aéroports et 3,0 m CE90 pour ceux en seul contrôle. La Figure 8 cartographie ces résultats.

Deux aspects doivent venir tempérer ces constatations :

- les contrôles sont effectués entre ortho-images et même si l'on choisit les images les plus nadirs, l'effet du MNT a tendance à dégrader les résultats.
- les contrôles ne sont pas répartis de façon homogène et privilégient par leur nature les centres urbains et les zones bien équipées en données d'appui.

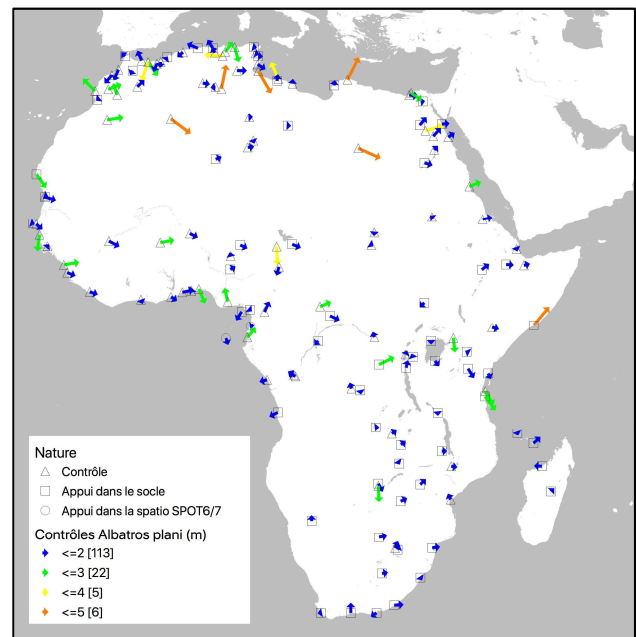


Figure 8 : Résultats des contrôles planimétriques Albatros

3.3.2 Qualité de localisation altimétrique

La qualité de localisation altimétrique est évaluée par comparaison avec le MNT/MNS hybride WorldDEM4Ortho (WD4O) issu du MNS WorldDEM™ (produit par Airbus DS à partir de radar). Il est spécifié avec une précision absolue verticale à 4 m LE90 et une précision relative à 2m LE90 sur les pentes modérées (<20 %) (Airbus, 2020-b). L'expérience acquise montre qu'en pratique la précision verticale absolue est proche de 2 m LE90. Concrètement, les différences entre les altitudes des points de la SRP et la valeur prise sur le MNS sont calculées point à point, conservées pour les zones jugées fiables (hors zones urbaines et de bouchage du MNS WorldDEM™). Des statistiques sont extraites au degré carré pour lisser les résultats et s'affranchir du bruit des mesures point à point. La Figure 9 présente ces résultats.

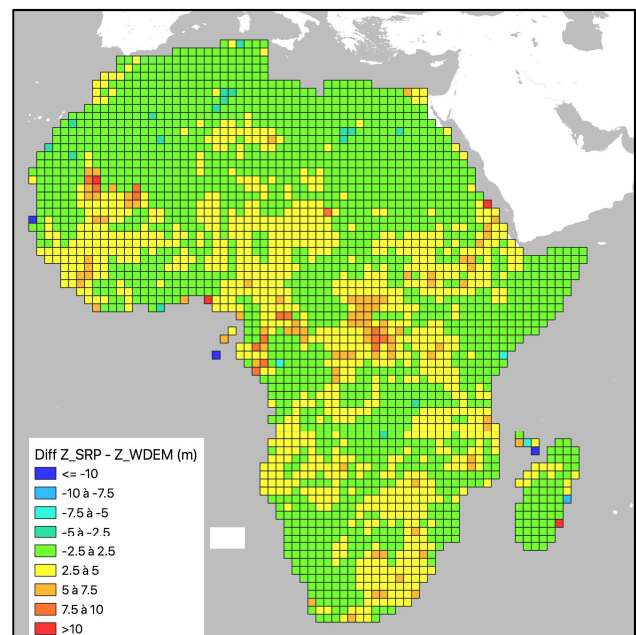


Figure 9 : Résultats des contrôles altimétriques par rapport à WD4O.

La qualité altimétrique de la SRP ainsi estimée est de 4,1 m LE90 en relatif par rapport à WD40 sur l'Afrique. Localement cette mesure doit aussi être appréciée en tenant compte de la nature différente des signaux utilisés pour WD40 (radar) et SRP (optique). Ainsi, en zone de forêt, on peut logiquement expliquer que la mesure SRP soit au-dessus de la mesure WD40 du fait de la pénétration du signal radar dans la végétation. De plus, sur la Figure 9, le résultat en bord de côte peut être significativement pessimiste, les points SRP n'ayant été que partiellement filtrés à cette étape de la production.

3.3.3 Densité obtenue

La spécification de la SRP est une densité nominale de 1 point / 2 km². En pratique, sur ce continent composé de larges régions naturelles dont certaines ne contiennent pas de détails saillants pérennes (forêt dense, désert), 85,8 % des 1/100^{ème} de degrés carrés vérifient cette densité nominale et 96,2 % vérifient une densité de 1 point / 4 km². La figure ci-dessous illustre cette densité sur le continent.

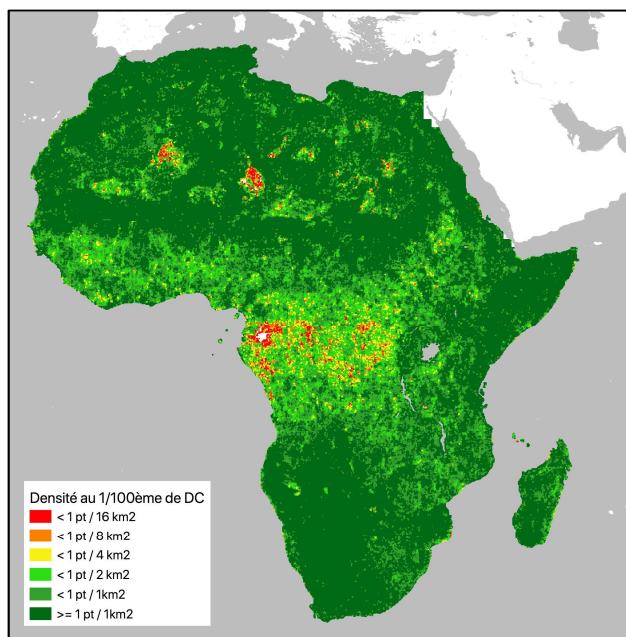


Figure 10 : Densité de la SRP au 1/100^{ème} de degré carré

4. Exploitation de la SRP

Cette partie présente dans un premier paragraphe quelques éléments importants concernant la façon

d'exploiter la SRP. Les deux paragraphes suivants illustrent l'exploitation de la SRP sur deux chantiers d'images, respectivement SPOT6/7 et Pléiades.

4.1 Intérêt et précautions d'usage d'une base de points 3D

4.1.1 De véritables points 3D de stéréopréparation

La BD Amer comme la SRP fournissent de véritables points 3D, calculés par intersection des rayons perspectifs issus des différentes images source (respectivement HRS et SPOT6/7). Ainsi, le choix des points est simplifié : les points « hauts » ne sont plus une problématique car leur altitude est calculée simultanément en complète cohérence avec leur planimétrie. Les points sont sélectionnés en amont sur des critères de radiométrie (contraste), de pérennité et de multiplicité (nombre de visées). L'exploitation des points peut ainsi être automatisée.

4.1.2 Un nombre redondant de vignettes

Dans la SRP, un point est constitué de plusieurs vignettes (6 en nominal, souvent beaucoup plus), imagerie à 2 m de résolution redressées à l'altitude du point, constituant un ensemble de points de vue différents qui vont améliorer la précision de mesure d'appariement d'un point de l'image à caler avec ce point de la SRP (voir Figure 11).

Cette redondance d'images du point de la SRP caractérise le nombre d'images utilisées pour le calcul d'intersection. Cette forte redondance permet en outre de mieux maîtriser en amont la qualité, la précision de détermination du point et de fixer avec justesse la pondération du point dans la spatiotriangulation.

4.1.3 Forte densité

La forte densité de points proposés dans la SRP (0,5 point / km² pour la SRP contre 0,5 point / 10 km² pour la BD Amer) fournit potentiellement un canevas dense et largement redondant dans la plupart des cas :

- environ 100 points par scène Pléiades Neo ;
- 200 points par scène Pléiades ;
- 1800 points pour une scène SPOT6/7.

La qualité du calage d'un ensemble d'images gagne alors en précision, cohérence et fiabilité en facilitant le filtrage, le contrôle et l'évaluation. Le bruit de mesures existant sur les points de la SRP est atténué lors du calage par cette redondance et en calculant la solution la plus probable minimisant les résidus aux points d'appuis et de liaison.

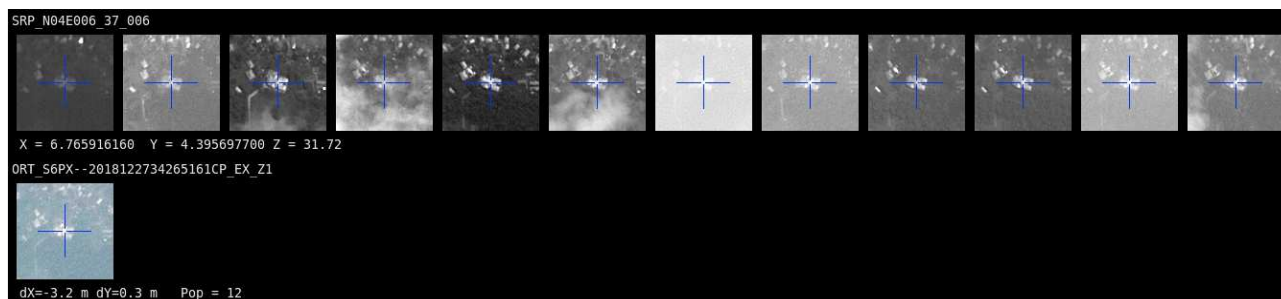


Figure 11 : Exemple des 12 vignettes composant un point d'appui SRP situé sur du sursol (ligne du haut) avec sa mesure dans l'image à caler (ligne du bas)

4.1.4 Une résolution adaptée au calage d'images de très haute résolution

A 2 m de résolution, les points choisis restent pérennes et stables, ce qui n'est pas toujours le cas de points mieux résolus. A 50 cm, par exemple, les cibles privilégiées sont plus petites, certes plus fines, mais souvent éphémères voire mobiles, notamment en ville : pare-brise des autos, trace de parking sur lequel se gare une voiture... De plus, la redondance de points permet de s'assurer que la localisation obtenue est celle de l'ensemble de la base quelle que soit la résolution de l'image à caler.

4.1.5 Précaution d'emploi

Une seule mesure ne suffit pas. La base étant constituée de manière complètement automatique, il peut subsister des points entachés de diverses erreurs souvent aléatoires (points disparus ou déplacés, structures répétitives, points dans l'eau ou sur la neige non filtrés) qui sont de potentielles sources d'erreur de calage s'ils sont exploités seuls, mais qui seront filtrés dès lors que le canevas d'appui est surabondant. Les retours d'expérience actuels montrent que vingt points minimum par image, correctement répartis, permettent d'assurer la fiabilité et la qualité de calage.

4.2 Chantier ortho SPOT6/7 : Nigéria

Le premier chantier est situé sur la côte nigérienne (voir Figure 12). Ce chantier est destiné à de la production d'ortho-images et est constitué de 7 images SPOT6/7. C'est une zone difficile car située sur une région climatique complexe : forte et fréquente présence de brumes et/ou nuages, zone peu anthropisée et paysage principalement composé de forêt dense. Il peut y être délicat de trouver des points d'appui.

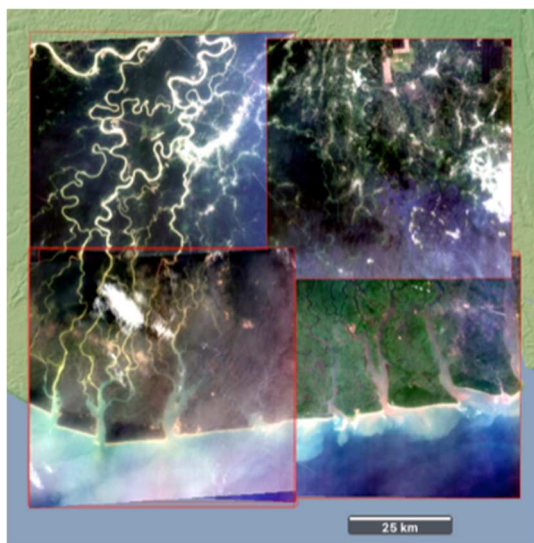


Figure 12 : Images SPOT6/7 sur le Sud du Nigeria

La Figure 13 montre l'équipement en points à l'issue du calage sur la SRP. Pour la localisation absolue, le lot d'images est équipé des mesures appui SRP sur la totalité des emprises des images (en haut). Pour la localisation relative, des mesures de liaison ont été générées dans les zones de recouvrement entre les images qui permettent de minimiser les écarts entre images voisines lors du mosaïquage des ortho-images unitaires (en bas).

Le premier indicateur de la qualité des mesures appui se lit dans la proportion de points d'appui disponibles initialement et filtrés le long du déroulement du processus, soit :

- lors de l'appariement en filtrant tous les points dont le coefficient de corrélation est inférieur à 0,8 (seuil utilisé pour cet exemple) ;
- lors du processus de spatiotriangulation en inactivant de manière itérative les mesures dont l'écart dépasse une certaine tolérance.

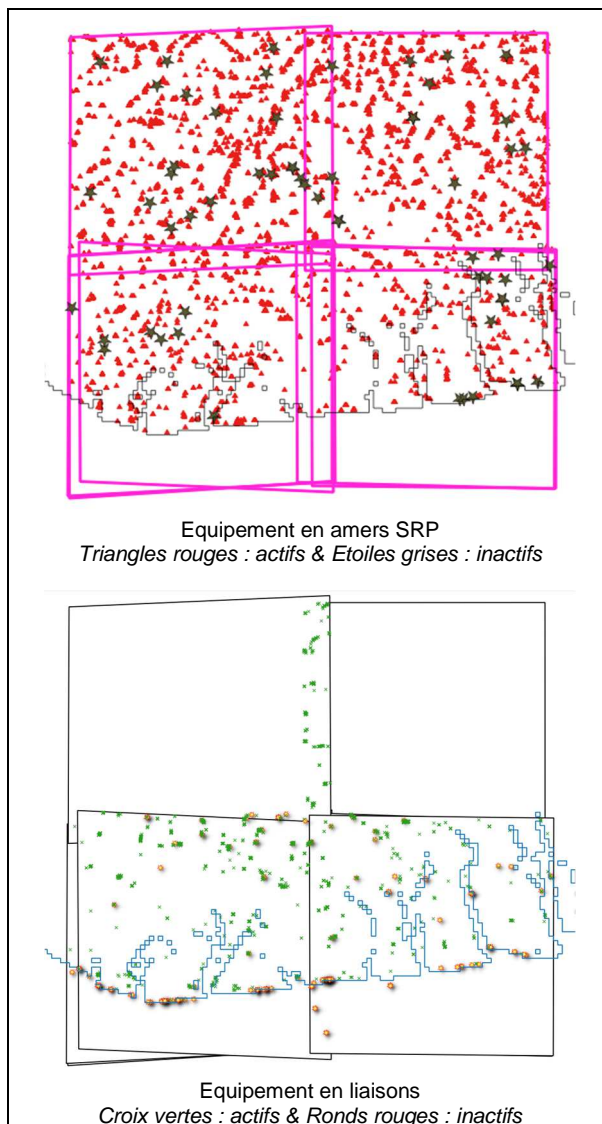


Figure 13 : Equipement du chantier Nigeria

L'équipement final est nominal tant en répartition et nombre de points (voir Tableau 2). L'appariement est toutefois plus ou moins efficace selon la qualité des images en entrée du processus. On relève ici 2 voire 3 images très brumeuses détectées à l'analyse de ces statistiques : S6PX—2018010235129787CP, S6PX—2017021934315036CP et S7PX—2017021834832683CP. Cette étape d'appariement est cruciale dans le bon déroulement du calcul de spatiotriangulation qui serait mis en difficulté si le nombre de points faux était trop élevé en entrée. On note finalement que le taux de points rejetés lors de la spatiotriangulation elle-même (100 - Pct_app, voir Tableau 2) est faible et témoigne là aussi de mesures d'amers fiables, ce que traduisent également les résidus image et terrain finaux associés à chaque image (voir Tableau 3) : la moyenne des résidus est centrée, les écart-types restent inférieurs à la taille du pixel SPOT6/7 (1,5m).

Images	Pct_app	Pct_app-ini	Actif_app	Spatio_app	Poplni_app
S7PX--2017021834832683CP	93,9	49,5	494	526	997
S7PX--2017010434604434CP	98,8	81,2	1444	1462	1779
S6PX--2018122734282036CP	97,3	82,6	800	822	968
S6PX--2018122734265161CP	96,2	88,6	476	495	537
S6PX--2018010235129787CP	99,0	29,6	302	305	1020
S6PX--2017021934315036CP	87,0	46,4	281	323	606
S6PX--2017010335024662CP	98,5	92,5	1805	1833	1952

Poplni_app = nombre de points SRP visibles dans les images

Spatio_app = nombre de points appariés

Actif_app = nombre de points restés actifs dans la spatiotriangulation

$Pct_app_ini = Actif_app / Poplni_app * 100$

$Pct_app = Actif_app / Spatio_app * 100$

Tableau 2 : Equipement des images en points SRP

Résidus en m	dx_app	dy_app	dxxy_app	ectx_app	ecty_app	ectxy_app
S7PX--2017021834832683CP	-0.1	0.1	0.1	1.0	0.7	1.2
S7PX--2017010434604434CP	-0.0	-0.0	0.0	0.6	0.6	0.8
S6PX--2018122734282036CP	-0.0	-0.0	0.0	0.7	0.6	0.9
S6PX--2018122734265161CP	-0.1	-0.0	0.1	1.2	0.8	1.4
S6PX--2018010235129787CP	0.1	0.1	0.1	1.1	0.8	1.4
S6PX--2017021934315036CP	-0.0	0.1	0.1	1.1	0.8	1.4
S6PX--2017010335024662CP	0.0	-0.0	0.0	0.5	0.6	0.8

Résidus en m	dx_amer	dy_amer	ectx_amer	ecty_amer	dZ_amer	ectZ_amer
S7PX--2017021834832683CP	-0.0	-0.0	0.2	0.1	-0.08	1.27
S7PX--2017010434604434CP	0.0	0.0	0.1	0.1	0.01	0.40
S6PX--2018122734282036CP	-0.0	-0.0	0.2	0.1	0.02	1.01
S6PX--2018122734265161CP	0.0	0.0	0.2	0.1	0.06	0.72
S6PX--2018010235129787CP	-0.0	-0.0	0.2	0.1	-0.12	1.55
S6PX--2017021934315036CP	0.0	0.0	0.3	0.1	0.10	0.78
S6PX--2017010335024662CP	-0.0	-0.0	0.1	0.1	-0.04	0.56

Colonnes vertes = résidus image / rouges = résidus terrain (m)

Tableau 3 : Résidus de spatiotriangulation aux points SRP

4.3 Chantier MNS Pléiades : Maroc / Marrakech

Ce chantier sur Marrakech est destiné à la production de MNS / MNT urbain. Il est constitué de 11 images Pléiades (voir Figure 14) : deux triplets et un quintuplé (chaque ensemble étant acquis sur un même passage du satellite). Ces 11 images empilées sur la ville de Marrakech sont acquises sur 3 orbites différentes afin d'augmenter le nombre de points de vue et minimiser les zones du terrain non vues en stéréo.

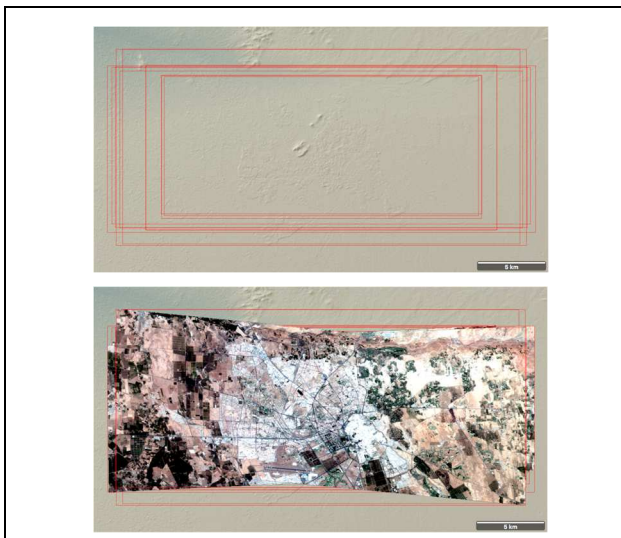


Figure 14 : les 11 images couvrent la ville de Marrakech située sur un relief peu accidenté

En comparaison avec l'exemple précédent composé d'images SPOT6/7, la zone couverte par Pléiades est de faible emprise. Pour autant, les images restent bien

équipées en points d'amers SRP : sur 237 points, seuls 3 points ont été inactivés dans la spatiotriangulation. Les points sont vus et mesurés automatiquement avec une forte multiplicité (nombre de mesures image par point, voir Figure 15), démontrant ainsi la qualité des points proposés et choisis en amont lors du processus SRP pour le calage.

Par rapport à la BD Amer (voir Figure 16), la SRP propose :

- des images actualisées (la plupart des images HRS constituant la BD Amer ont été acquises entre 2005 et 2009) ;
- un ordre de grandeur supplémentaire sur le nombre de points d'appui.

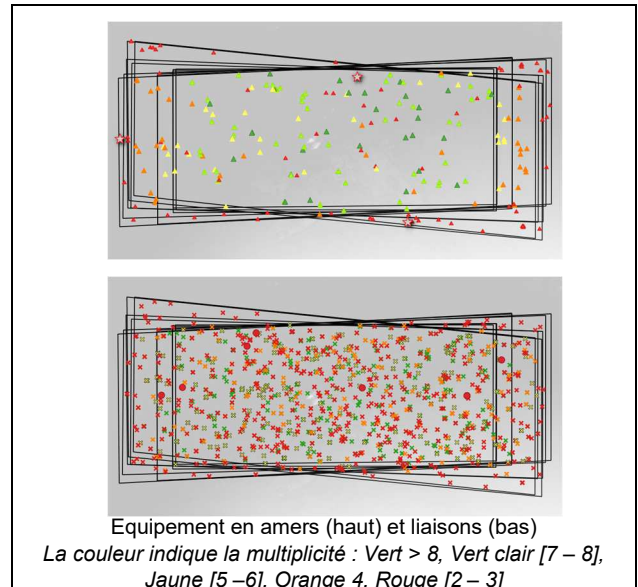


Figure 15 : Equipement du chantier Marrakech pour le calage sur SRP

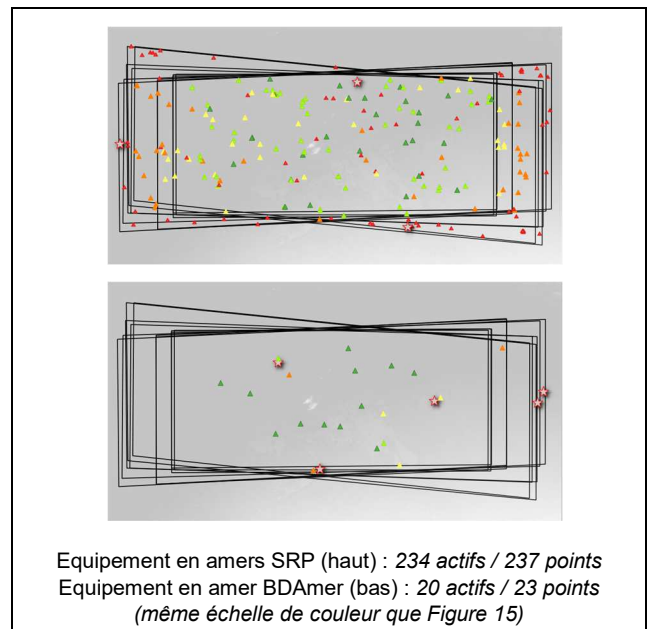


Figure 16 : Equipement du chantier Marrakech : comparaison des calages avec SRP et avec BD Amer

L'efficacité, à savoir le ratio de points disponibles par rapport aux points actifs dans la spatiotriangulation reste le même que sur l'exemple SPOT précédent sur le Nigéria (voir Tableau 4). Le nombre de points est largement suffisant pour la résolution du système : 6 inconnues d'attitude (biais sur les 3 axes + dérive) + focale.

Image	Pct_app	Pct_app-ini	Actif_app	Spatio_app	Poplni_app
P1BPX-201908040104699CP	97,6	71,8	163	167	227
P1BPX-201908040088324CP	96,8	74,1	152	157	205
P1BPX-201908040067449CP	97,7	75,5	173	177	229
P1BPX-2019080641037699CP	96,6	72,0	113	117	157
P1BPX-2019080641008949CP	97,1	77,3	99	102	128
P1BPX-2019080640992449CP	98,3	83,8	119	121	142
P1BPX-2019080640971324CP	96,1	84,1	122	127	145
P1BPX-2019080640943949CP	89,2	71,1	91	102	128
P1BPX-2019080441910949CP	98,2	80,1	165	168	206
P1BPX-2019080441894574CP	98,1	81,6	155	158	190
P1BPX-2019080441873949CP	96,7	79,1	178	184	225

Poplni_app = nombre de points SRP visibles dans les images
Spatio_app = nombre de points appariés
Actif_app = nombre de points restés actifs dans la spatiotriangulation
Pct_app-ini = $Actif_app/Poplni_app*100$
Pct_app = $Actif_app/Spatio_app*100$

Tableau 4 : Equipement des images en points SRP

Les résidus image et terrain aux points de SRP (voir Tableau 5) rendent compte d'un calcul qui s'est parfaitement déroulé et qui se traduit par des résidus centrés et des écarts-types faibles, inférieurs au demi-pixel des vignettes SRP (<1 m).

Résidus en m	dx_app	dy_app	dxy_app	ectx_app	ecty_app	ectxy_app
P1BPX-201908040104699CP	0.1	-0.1	0.1	0.8	1.1	1.4
P1BPX-201908040088324CP	0.2	-0.1	0.2	0.9	0.9	1.3
P1BPX-201908040067449CP	0.2	-0.1	0.2	0.9	0.6	1.1
P1BPX-2019080641037699CP	-2.9	1.3	3.2	3.4	2.0	3.9
P1BPX-2019080641008949CP	-0.1	-0.1	0.1	1.0	0.8	1.3
P1BPX-2019080640992449CP	0.1	-0.1	0.1	0.6	0.6	0.8
P1BPX-2019080640971324CP	0.3	0.0	0.3	1.2	0.8	1.4
P1BPX-2019080640943949CP	1.8	-0.4	1.8	2.9	1.7	3.4
P1BPX-2019080441910949CP	0.1	-0.1	0.1	0.7	0.7	1.0
P1BPX-2019080441894574CP	0.1	-0.1	0.1	0.7	0.8	1.1
P1BPX-2019080441873949CP	0.1	-0.1	0.1	0.8	0.9	1.2

Résidus en m	dx_amer	dy_amer	ectx_amer	ecty_amer	dZ_amer	ectZ_amer
P1BPX-201908040104699CP	-0.0	-0.0	0.4	0.3	-0.22	1.39
P1BPX-201908040088324CP	-0.0	0.0	0.4	0.3	-0.20	1.48
P1BPX-201908040067449CP	0.0	0.0	0.4	0.3	-0.18	1.42
P1BPX-2019080641037699CP	0.1	-0.0	0.4	0.4	-0.34	1.16
P1BPX-2019080641008949CP	0.0	-0.0	0.4	0.4	-0.26	1.66
P1BPX-2019080640992449CP	0.0	-0.0	0.4	0.3	-0.25	1.63
P1BPX-2019080640971324CP	0.0	-0.0	0.4	0.3	-0.28	1.62
P1BPX-2019080640943949CP	-0.0	0.0	0.4	0.4	-0.35	1.71
P1BPX-2019080441910949CP	0.0	0.0	0.4	0.3	-0.22	1.41
P1BPX-2019080441894574CP	0.0	0.0	0.3	0.3	-0.24	1.49
P1BPX-2019080441873949CP	0.0	-0.0	0.3	0.3	-0.22	1.42

Colonnes vertes = résidus image / rouges = résidus terrain (m)

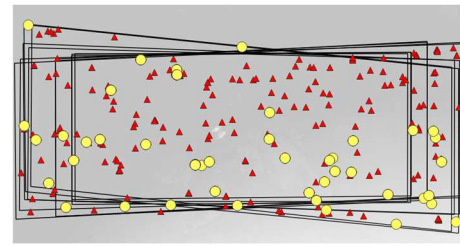
Tableau 5 : Résidus de spatiotriangulation aux points SRP

4.4 Proposition d'une méthode de qualification et évaluation des résultats de calage

Le grand nombre de points de la SRP rend possible la qualification et l'évaluation automatique des résultats. L'une des pistes explorées est de comparer le résultat d'une spatiotriangulation exploitant la totalité des points initiaux à une spatiotriangulation n'utilisant que 80% des points puis d'évaluer le résultat en observant :

- le mouvement des images entre les 2 calculs : de faibles déplacements des coins d'images traduisent alors une grande stabilité et reproductibilité du résultat ;
- les résidus de spatiotriangulation sur les 20 % de points non exploités dans la spatiotriangulation pour un contrôle quasi-indépendant du résultat.

Cette expérimentation a été menée sur le chantier Marrakech en retirant 20 % des points d'appui (Figure 17).



Jaune : points en contrôle. Rouge : points en appui.

Figure 17 : Répartition des points de la SRP pour le contrôle

Les résultats obtenus témoignent d'une grande stabilité de l'affinage (voir Tableau 6). Les écarts aux coins et au centre de chacune des images entre les 2 spatiotriangulations sont très faibles et rassurent sur la reproductibilité du résultat. Les écarts aux points de contrôle sont très faibles (Tableau 7). La moyenne des écarts reste inférieure à 1 m (sauf pour l'image la plus inclinée) traduisant, là aussi, une grande stabilité de l'affinage garantie par une homogénéité de la base SRP.

Ecarts en m	dX0	dY0	dX1	dY1	dX2	dY2	dX3	dY3	dXc	dYc	Incidence (°)
P1BPX-201908040104699CP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	-0,1	0,1	-0,1	0,0	0,0	31,2
P1BPX-201908040088324CP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	30,1
P1BPX-201908040067449CP	0,0	0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	32,2
P1BPX-2019080641037699CP	1,6	-0,5	0,6	-0,1	-0,2	0,0	0,8	-0,5	0,7	-0,3	27,5
P1BPX-2019080641008949CP	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0	11,5
P1BPX-2019080640992449CP	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5
P1BPX-2019080640971324CP	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	11,7
P1BPX-2019080640943949CP	-0,2	0,1	-0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	27,1
P1BPX-2019080441910949CP	0,0	0,0	0,1	0,0	-0,2	-0,1	-0,3	-0,1	-0,1	-0,1	31,0
P1BPX-2019080441894574CP	0,0	0,1	0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,2	0,0	-0,1	0,0	29,0
P1BPX-2019080441873949CP	-0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,2	0,1	-0,1	0,1	30,1

Tableau 6 : Ecart aux coins et au centre scène entre la spatiotriangulation exploitant l'ensemble des points d'appui et la spatiotriangulation utilisant 80 % des points

A24	POP	dX_moy (m)	dX_ect (m)	dY_moy (m)	dY_ect (m)	dXY_moy (m)	dXY_ect (m)	Incidence (°)
P1BPX-2019080441894574CP	30	-0.00	0.69	-0.11	1.04	0.11	1.25	31.2
P1BPX-201908040104699CP	23	0.57	2.85	-0.96	3.81	1.12	4.75	30.1
P1BPX-2019080641037699CP	23	1.82	4.50	2.13	2.10	2.81	4.97	32.2
P1BPX-201908040067449CP	27	0.45	2.27	-0.59	2.30	0.74	3.23	27.5
P1BPX-2019080441910949CP	32	-0.05	0.71	0.05	1.07	0.07	1.29	11.5
P1BPX-2019080641008949CP	23	0.06	0.79	0.11	1.09	0.12	1.35	1.5
P1BPX-2019080640992449CP	23	-0.14	0.23	-0.01	0.69	0.14	0.72	11.7
P1BPX-2019080441873949CP	33	0.38	1.83	-0.85	1.84	0.93	2.59	27.1
P1BPX-201908040067449CP	29	0.35	1.91	-0.54	1.46	0.64	2.40	31.0
P1BPX-2019080640971324CP	23	-0.07	0.44	0.24	0.77	0.25	0.88	29.0
P1BPX-2019080640943949CP	22	0.20	3.24	-0.63	1.76	0.66	3.69	30.1

Tableau 7 : Résidus aux points utilisés en contrôle seul

4.5 Perspectives

L'exploitation mondiale et automatisée de la SRP débutera en 2021 avec l'entrée en service commercial des deux premiers satellites de la constellation Airbus Pléiades Neo, PNEO3 et PNEO4, chacun disposant d'une capacité d'acquisition de 400 000 km²/jour. Toutes les images produites seront préalablement géométriquement affinées sur la SRP avec pour cible une précision à 3 m des modèles géométriques associés. Un historique des calages pourrait être constitué permettant d'identifier les besoins de mise à jour ou les évolutions nécessaires de la base SRP (pérennité, vieillissement, adéquation de certaines vignettes, renforcements locaux en points, etc.).

À l'horizon 2025, le besoin de calage étendu à la production 3D de MNS mondiaux sera appliqué aux images de la constellation CO3D (Lebègue et al, 2020). L'objectif à court terme est de qualifier la précision altimétrique de la base SRP.

La base SRP peut aussi être proposée à tout producteur de données d'imagerie pour le calage d'images ou à des fins de certifications de la précision des produits d'imagerie.

5. Prototypage de socle géométrique pour le traitement des îles isolées

5.1 Besoin et description de la méthode

La spécification de localisation de la SRP est assurée par l'utilisation du socle géométrique HRS au travers de la BD Amer. Cependant, la couverture HRS disponible et exploitable ne permet pas de traiter la totalité des terres émergées. Tout d'abord, de forts couverts nuageux empêchent l'exhaustivité sur les régions équatoriales. Ensuite, les images sont bien souvent de qualité radiométrique insuffisante sur les hautes latitudes du fait de la forte présence de neige qui réduit la dynamique exploitable (pour rappel, les images HRS ont une dynamique de 8 bits). Enfin, quand bien même les images existent et sont de qualité suffisante, elles nécessitent *a minima* une donnée d'appui pour être correctement recalées, la propagation de cette localisation sur une certaine distance étant assurée par spatiotriangulation. L'équipement en données d'appui peut ainsi s'avérer coûteux pour les archipels d'îles lorsqu'ils ne peuvent être couverts par une sélection contiguë de couples HRS.

Pour ces différentes raisons, une solution alternative a été élaborée s'appuyant sur des images Sentinel-2 (S2) de niveau L1C (niveau de traitement fourni par l'ESA sur le Copernicus Open Access Hub, <https://scihub.copernicus.eu/>), éventuellement combinées avec un socle HRS. Les images Sentinel-2 ont été choisies pour leur disponibilité à travers le monde, leur large fauchée de quasiment 300 km et leur qualité de localisation intrinsèque dont on espère qu'elle permette une propagation de la localisation tout au long de l'emprise. L'impact du MNT utilisé pour la rectification est jugé négligeable du fait de la faible inclinaison des directions de visée en bord de champ. La localisation absolue des images mises à disposition par l'ESA, contrôlée à 11 m à 95 % (MPC team, 2020), ne vérifie pas la spécification attendue pour la SRP et implique de recalibrer ces images plus finement. De plus, le niveau de traitement L1C correspondant à une orthorectification, ces images Sentinel-2 sont utilisables uniquement pour un calage planimétrique. Le calage altimétrique doit en complément être assuré par une donnée de référence altimétrique autre.

L'intégration du socle Sentinel-2 dans la spatiotriangulation SPOT6/7 s'appuie ensuite sur une base de données d'amers (la BADAS2) en cours de développement à l'IGN. En effet, ces points caractéristiques extraits des images Sentinel-2 composant la Global Reference Image (GRI, Gascon et al., 2017) fiabilisent la mesure en s'appuyant sur la comparaison d'une pile d'images Sentinel-2 issue du cloud d'Amazon. L'exploitation de cette base dans la spatiotriangulation des images SPOT6/7 est réalisée de la même façon que pour la BD Amer.

5.2 Evaluation d'un prototype de socle Sentinel-2

Afin de valider le principe d'un socle exploitant les images Sentinel-2 dans le cadre du calage planimétrique par rapport à un socle uniquement HRS, un premier prototype a été développé et évalué sur le Cap Vert. La zone s'étend sur 300 km d'Ouest en Est et sur 250 km du Nord au Sud. La couverture image destinée à constituer un socle est composée de 3 images Sentinel-2 et 5 couples d'images HRS. Les images HRS permettent de couvrir les données d'appui mais ne forment pas un socle contigu sur la zone (pas de recouvrement suffisant entre les différents couples). L'intégration des images Sentinel-2 permet d'obtenir une couverture totale de la zone avec recouvrement entre les différentes images L1C. Quatre aéroports Albatros (GVAC, GVBA, GVPN, GVSU) sont

disponibles comme données d'appui sur la zone. La nature des données Albatros est décrite précédemment dans la partie 3.3.1. Il faut noter que chacune de ces données d'appui est mesurée sur un couple de transfert SPOT6/7 pour faciliter leur intégration dans le socle. Ainsi, 7 images SPOT6/7 (une des images couvrant deux aéroports) viennent compléter la couverture image. La Figure 18 montre l'ensemble des données sur la zone.

Les objectifs du test étaient de :

- développer l'algorithme d'intégration des images Sentinel-2 dans le socle ;
- comparer les résultats obtenus avec un socle Sentinel-2 seul et un socle hybride Sentinel-2/HRS ;
- évaluer la qualité de la propagation de la localisation sur les images Sentinel-2 : les aéroports ont été soit mis intégralement en appui soit activés les uns après les autres.

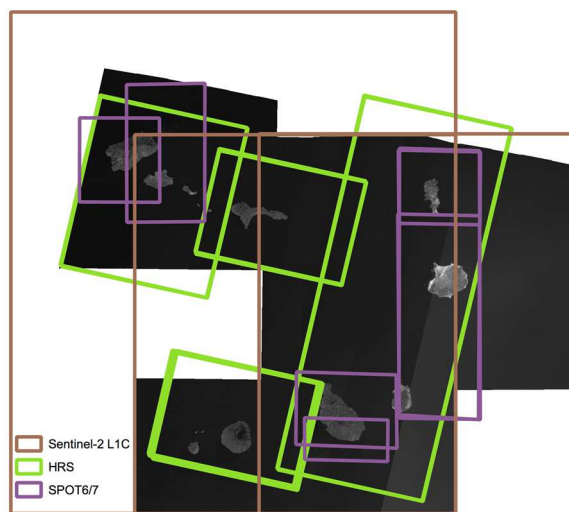


Figure 18 : Données sur le Cap Vert

Au final, 10 calculs ont été réalisés selon les deux configurations du socle :

- 5 calculs avec socle hybride Sentinel-2/HRS et activation des 4 données appui aéroport ou d'une seule de ces données successivement : calculs socle hybride S2-HRS ;
- 5 calculs avec socle Sentinel-2 seul et activation des 4 données appui aéroport ou d'une seule de ces données successivement : calculs socle S2 seul.

Pour une configuration socle image donnée (socle S2 seul ou socle hybride), le calcul avec les 4 données d'appui disponibles actives constitue le calcul de référence. En activant ensuite successivement une des 4 données d'appui uniquement, une analyse est effectuée sur le mouvement des coins de scènes afin de valider la rigidité du socle. Les calculs sont également évalués via l'étude des résidus aux 3 aéroports en contrôle dans le calcul. L'objectif est d'estimer quel serait l'équipement optimal en données d'appui, à savoir connaître la distance maximale entre les données d'appui permettant de garantir la précision de localisation visée (< 3 m) et la stabilité du bloc. La Figure 19 montre les mouvements des coins des images Sentinel-2 pour les deux configurations du socle image (socle hybride Sentinel-2/HRS et socle Sentinel-2 seul) pour le test avec la seule donnée d'appui GVAC active. Les mouvements comparés au bloc le mieux équipé (4 données d'appui actives) sont toujours inférieurs au

mètre ce qui confirme la stabilité et la reproductibilité du calcul et valide le transfert des données d'appui à travers les liaisons entre images.

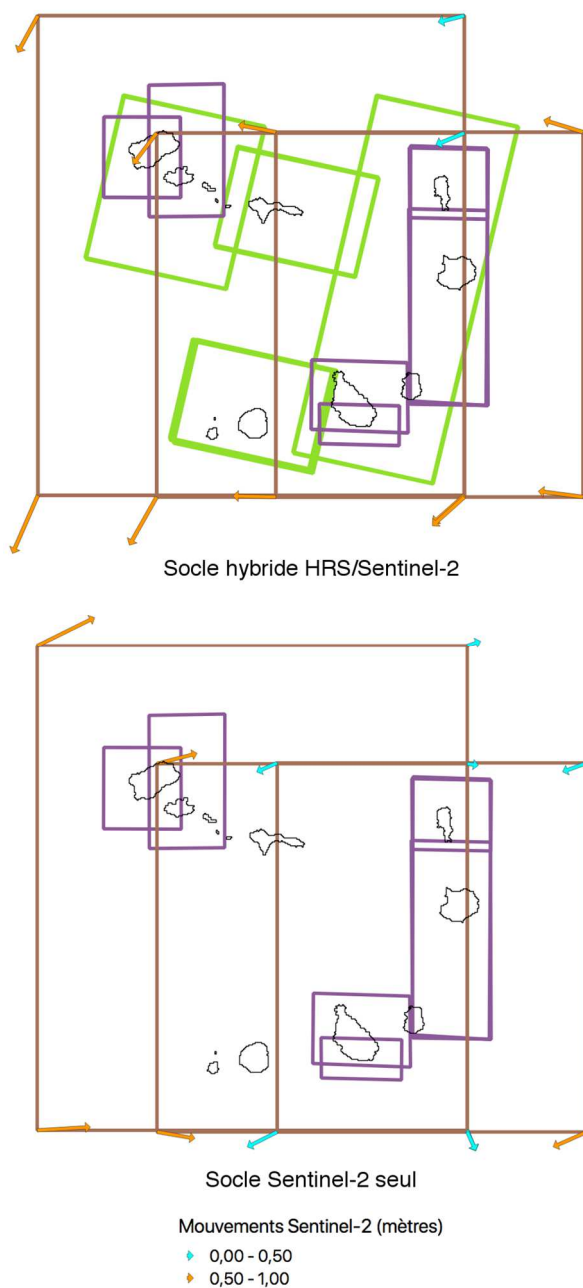


Figure 19 : Mouvements des coins de scènes Sentinel-2 entre le calcul avec GVAC en appui et le calcul avec les 4 appuis pour les deux types de socle (socle hybride en haut et socle Sentinel-2 seul en bas)

Le Tableau 8 synthétise les valeurs des résidus sur les données de contrôle aéroport pour les 8 configurations avec une unique donnée d'appui. La Figure 20 permet d'apprécier un éventuel impact de la distance au point en appui. Ces résultats indiquent que la spécification de localisation à 3 m est bien vérifiée sur la totalité de la zone, que ce soit pour le socle Sentinel-2 seul ou pour le socle hybride Sentinel-2/HRS, ce dernier montrant une meilleure rigidité ici.

Albatros		Distance (km)	Socle image	
Actif	Contrôle		Socle S2 seul	Socle Hybride S2 - HRS
			Résidu sur contrôle (m)	
GVAC	GVBA	67	0,83	1,08
	GVNP	207	1,97	1,96
	GVSV	225	1,85	0,78
GVBA	GVAC	67	0,80	1,11
	GVNP	147	2,57	2,88
	GVSV	245	2,57	1,40
GVNP	GVAC	207	1,58	1,74
	GVBA	147	2,20	2,66
	GVSV	269	2,11	1,35
GVSV	GVNP	269	1,84	0,67
	GVAC	225	2,68	1,27
	GVBA	245	2,11	1,57

Tableau 8 : Résidus sur les points de contrôles des deux tests de socle Sentinel-2 avec activation d'une unique donnée d'appui aéroport

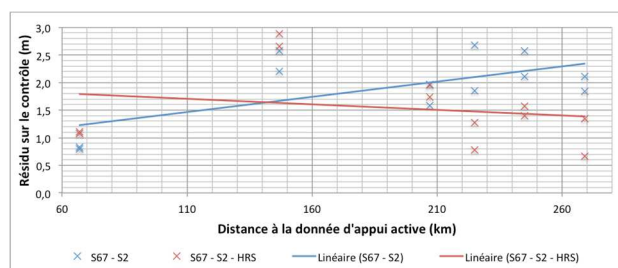


Figure 20 : Résidus sur les points de contrôles des deux tests de socle Sentinel-2

En conclusion, le prototype de socle géométrique utilisant des images Sentinel-2 conduit à des résultats satisfaisants sur l'archipel du Cap-Vert. Des travaux complémentaires sont actuellement menés sur une zone plus étendue afin de valider définitivement le concept.

6. Conclusion

L'Afrique est le cinquième chantier produit par le projet SRP. A ce jour (décembre 2020), 76 % des terres émergées ont été réalisées et 17 % sont en cours de production, soit au total 126 millions de km². L'ensemble des 135 millions de km² de terres émergées sera achevé début 2022.

Ce chantier a profité du retour d'expérience du début de projet notamment pour la capacité à traiter l'intégralité du continent en un unique bloc cohérent et la définition de méthodes de qualification globales. Il a lui-même contribué à améliorer la méthodologie que ce soit lors de l'exploitation des masques de nuage pour optimiser la couverture SPOT6/7 et mieux sélectionner les points SRP ou pour le traitement des archipels d'îles avec un socle s'appuyant sur les images Sentinel-2.

Les premières exploitations de la base montrent que la densité de points de la SRP permet un calage fiable, que ce soit à l'échelle d'une image de type Pléiades Neo ou d'un bloc de plusieurs images. Ainsi, la SRP permet bien d'affiner des modèles géométriques avec une précision égale à celle de la base elle-même, soit 3 m en planimétrie. Les retours massifs d'exploitation permettront de consolider cette performance et d'identifier les cas éventuels moins favorables et les potentielles améliorations. L'ensemble des travaux effectués sur l'Afrique valide le concept proposé par la base SRP.

7. Remerciements

Nous remercions tout d'abord l'ensemble des personnes qui, à l'IGN et à Airbus DS GEO SA, contribuent depuis plus de vingt ans aux travaux dans le domaine des bases mondiales de référence. La SRP n'aurait pu voir le jour sans cet héritage.

Pour le projet SRP lui-même, nous remercions à la fois les équipes de production et d'expertise qui permettent de disposer aujourd'hui d'une base de qualité, disponible bientôt partout dans le monde. Nous remercions également l'ensemble de l'ingénierie qui a permis un passage à l'échelle réussi, via la recherche constante d'innovations. La SRP s'est concrétisée grâce à la confiance et au financement du Programme Pléiades Neo pour le bénéfice des nouvelles constellations de satellites optiques.

REFERENCES

Airbus, 2020. Pléiades Neo Trusted Intelligence. <https://www.intelligence-airbusds.com/en/8671-pleiades-neo-trusted-intelligence> (23 January 2020).

Airbus, 2020-b. WorldDEM4Ortho. <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2017/07/airbus-releases-worlddem4ortho--the-most-accurate-elevation-mode.html> (23 January 2020).

Chandelier, L., Coeurdevey, L., Bosch, S., Favé, P., Gachet, R., Orsoni, A., Tilak, T., and Barot, A.: A WORLDWIDE 3D GCP DATABASE INHERITED FROM 20 YEARS OF MASSIVE MULTI-SATELLITE OBSERVATIONS, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, V-2-2020, 15–23, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2020-15-2020>, 2020.

Gascon, F., Bouzinac, C., Thépaut, O., Jung, M., Francesconi, B. et al., 2017. Copernicus Sentinel-2A Calibration and Products Validation Status. *Remote Sensing*, MDPI, 2017, 9 (6), pp.1-81. 10.3390/rs9060584. Hal-01853316

Lebègue, L., Cazala-Hourcade, E., Languille, F., Artigues, S., and Melet, O.: CO3D, A WORLDWIDE ONE ONE-METER ACCURACY DEM FOR 2025, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B1-2020, 299–304, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-299-2020>, 2020.

Massera, S., Favé, P., Gachet, R., Orsoni, A., 2012. Toward a global bundle adjustment of SPOT 5 – HRS Images. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXXIX-B1, 251-256, doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-251-2012.

MPC team, 2020. Sentinel-2 L1C Data Quality Report Issue 57. ESA technical document. <https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2-L1C-Data-Quality-Report-November-2020.pdf>, (2 December 2020)

SPOT Image, 2011. Reference3D Product Description. Version 6.1. https://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r469_9_reference3d_product_description_201105.pdf, (2 December 2020)

TITRE ET LEGENDES EN ANGLAIS

SRP, a very high precision 3D basis of support points on the African continent

Figure 1 : Production status – December 2020.

Figure 2 : Examples of SRP points throughout the African continent, from North to South, and from West to East.

Figure 3 : SPOT6/7 image archive overlap count, from 2013 to mid-2019, with less than 15 % cloud cover over the image.

Figure 4 : GCP of the geometric foundation over the African continent.

Figure 5 : SRP point typology per square degree on Sahel and equatorial areas.

Figure 6 : Initial SPOT6/7 selection with nominal criteria (images with less than 15 % cloud cover).

Figure 7 : final SPOT6/7 selection over Africa.

Figure 8 : Albatros planimetric check results.

Figure 9 : Altimetric check results compared to WD40.

Figure 10 : SRP density per 1/100 square degree.

Figure 11 : 12 image chips composing a SRP point on an above-ground feature (upper) and its measurement in the image to register (lower).

Figure 12 : SPOT6/7 images on the South of Nigeria.

Figure 13 : Point equipment for the Nigeria test.

Figure 14 : 11 images over Marrakech city on smooth relief.

Figure 15 : Point equipment for the Marrakech project for registration on SRP.

Figure 16 : Point equipment for the Marrakech project: comparison between registration on SRP and on BD Amer.

Figure 17 : SRP check points distribution.

Figure 18 : Cape Verde dataset.

Figure 19 : Sentinel-2 corner scene displacement between calculations using one GCP (GVAC) and using 4 GCP for both types of geometric foundation (upper: hybrid foundation, lower: Sentinel-2 foundation).

Figure 20 : check points residual for the two Sentinel-2 geometric foundation tests.

Table 1 : SRP main specifications.

Table 2 : Image equipment with SRP points.

Table 3 : Spatiotriangulation residuals at SRP points.

Table 4 : Image equipment with SRP points.

Table 5 : Spatiotriangulation residuals at SRP points.

Table 6 : Difference at corner and centre images between spatiotriangulation using all SRP and spatiotriangulation using only 80 % of the points.

Table 7 : Check point residuals.

Table 8 : Check point residuals for the two Sentinel-2 geometric foundation tests using a single airport data point as GCP.