

OUTILS DE PRETRAITEMENTS DES IMAGES OPTIQUES KALIDEOS

Bruno Lafrance, Xavier Lenot, Caroline Ruffel, Patrick Cao, Thierry Rabaute

CS SI

Parc de la Plaine, 5, rue Brindejonc des Moulinais, BP 15872 - 31506 Toulouse Cedex 5
bruno.lafrance@c-s.fr

Résumé

La communauté scientifique a besoin de disposer de séries temporelles d'observations récurrentes, couvrant des sites d'intérêt pour le suivi de l'évolution des surfaces terrestres (études agronomiques par assimilation de données, suivi de traits de côte, glissements de terrain, surveillance des volcans, cartographie littorale, etc.). L'analyse de ces séries temporelles demande à avoir des images superposables entre elles qui renseignent sur la réflectance des sites (grandeur physique indépendante du capteur).

Dans l'objectif de rendre accessibles de telles données physiques et de garantir une homogénéité des traitements de séries temporelles d'images, le CNES a mis en place le programme Kalideos. Dans ce cadre, CS SI a développé et opère les chaînes de traitement des images.

Cet article présente les traitements appliqués aux images optiques des bases Kalideos (capteurs Spot et Formosat). Ces traitements permettent de convertir les produits de niveau 1A en ortho-images, donnant la réflectance mesurée au sommet de l'atmosphère et celle estimée au niveau de la surface après correction des effets atmosphériques.

Mots-clés : Kalideos, traitements géométriques et radiométriques, Spot, Formosat, ortho-rectification, corrections atmosphériques.

Abstract

The scientific community needs to have time series of recurrent observations, covering sites of interest to monitor the evolution of land surfaces (agronomic studies using data assimilation, shorelines survey, landslides and volcanoes monitoring, coastal mapping, etc.). The analysis of these time series requests to have overlapping images which give the reflectance of the sites (physical quantity independent of the sensor).

To make such physical data available and to ensure the homogeneity of treatment for time series of images, CNES has initiated the program Kalideos. In this context, CS SI has developed and operates the image processing chains.

This article presents the treatments applied to optical images in the Kalideos databases (Spot and Formosat sensors). These treatments convert Level 1A products to ortho-images, giving the reflectance measured at top of the atmosphere and the estimated one at ground level after the correction of atmospheric effects.

Keywords: Kalideos, geometric and radiometric processing, Spot, Formosat, ortho-rectification, atmospheric corrections.

1. Kalideos : du niveau 1A aux ortho-images de réflectance de surface

1.1. Le projet Kalideos

Afin de favoriser l'utilisation de l'imagerie spatiale par la communauté scientifique, il est nécessaire de disposer de mesures physiques, directement exploitables et comparables aux mesures in-situ réalisées sur le terrain.

Ceci suppose que :

- Les images sont **ortho-rectifiées** de sorte à les corriger des déformations du terrain et projeter dans un système cartographique commun ;
- Les images fournissent des **mesures en unité physique** : la réflectance observée, grandeur physique normalisée indépendante du capteur,

nécessaire au suivi de l'évolution temporelle des phénomènes ;

- Les images disposent de l'**information propre à la surface cible**, non entachée d'une perturbation variable liée à la contribution de l'atmosphère sur le signal observé.

Le CNES a souhaité répondre à ce besoin, émergeant de la communauté scientifique, en mettant en place le programme **Kalideos** (<http://kalideos.cnes.fr>) avec la base **Adam** (Assimilation de Données par Agro Modélisation), dédiée au domaine agricole et au processus d'assimilation de données spatiales dans les modèles agronomiques.

Depuis, trois nouvelles bases ont vu le jour :

- La base **Isle-Réunion**, à vocation plurithématique pour des applications très variées, depuis l'aide à la décision en agriculture tropicale jusqu'à la volcanologie ;

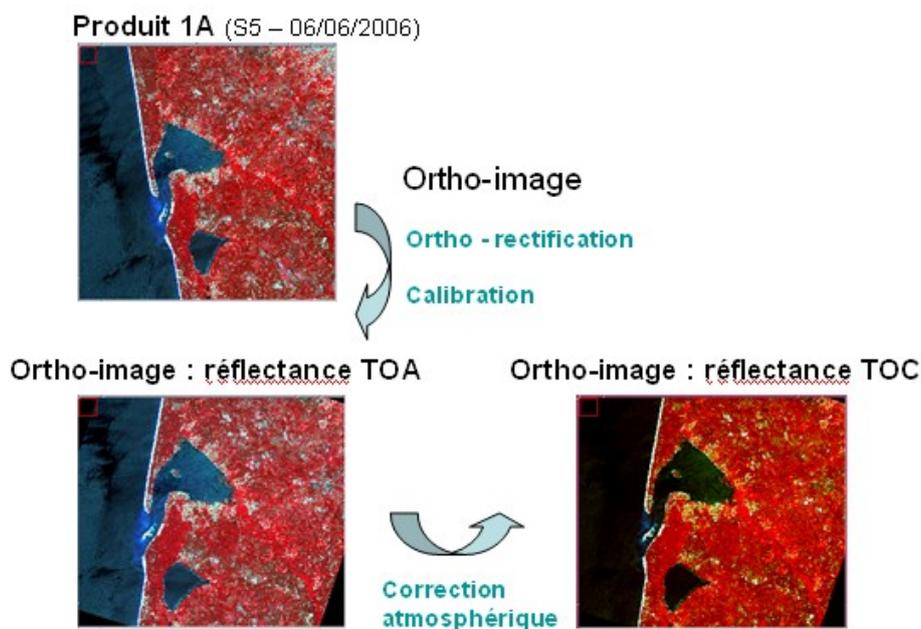


Figure 1 : Illustration du passage du niveau 1A à des ortho-images de réflectance de surface (TOC).

- La base **Littoral**, particulièrement destinée aux études des zones côtières ;
- La base **OSR MiPy**, localisée sur le Sud-Ouest de Toulouse, dédiée à la gestion des ressources hydroagricoles et aux questions d'aménagement du territoire.

1.2. Prétraitement des images des capteurs optiques

Les images des capteurs optiques (Spot, Formosat) retenues pour alimenter les bases Kalideos sont réceptionnées en niveau 1A. Leur prétraitement repose sur deux étapes :

- Le **traitement géométrique** des produits, à partir d'outils CNES permettant l'obtention d'ortho-images à partir d'une image de référence et d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) ;
- Le **traitement radiométrique** des images, à partir d'outils développés spécifiquement par CS, permettant la conversion des comptes numériques en réflectances, puis l'inversion de la réflectance au sol à partir de celle au sommet de l'atmosphère et d'informations suffisantes sur les conditions atmosphériques. La difficulté principale est ici de disposer de données atmosphériques fiables.

Outre la valeur ajoutée apportée aux produits, cette approche trouve aussi un intérêt particulier dans l'homogénéisation des traitements appliqués aux séries d'images d'un site d'étude. En premier lieu, les traitements d'ortho-rectification sont strictement les mêmes, ce qui offre une possibilité de correspondance géographique immédiate entre les images. En second lieu, l'application des coefficients d'étalonnage officiels

(source CNES) assure de disposer d'une série cohérente d'images de réflectance observée. Enfin, les corrections atmosphériques reposent sur les mêmes outils et les mêmes sources d'information concernant les paramètres atmosphériques.

Actuellement, seuls les produits Spot et Formosat sont traités pour Kalideos. Les produits Pléiades le seront prochainement après adaptation des chaînes de traitement.

2. Prétraitements géométriques

La première étape du traitement consiste en l'ortho-rectification des images. Celle-ci est réalisée par des outils du CNES.

Le principe repose sur l'application du modèle géométrique du capteur (avec prise en compte du relief), améliorée par l'identification de points homologues entre l'image traitée et une image de référence, en sorte de mesurer les défauts de localisation initiale et d'ajuster le modèle.

Le choix des images de référence et des Modèles Numériques de Terrain est donc essentiel pour la finesse des traitements. Les MNT utilisés ont une résolution au sol de 25 m. Les images de référence ont été sélectionnées parmi les acquisitions Spot 5 à 2,5 m couleur (THX) sur des critères de faible couverture nuageuse et de visée proche du nadir. Elles ont été ortho-rectifiées par IGN Espace. Des travaux de validation ont ensuite été réalisés par les acteurs du projet à partir de mesures indépendantes.

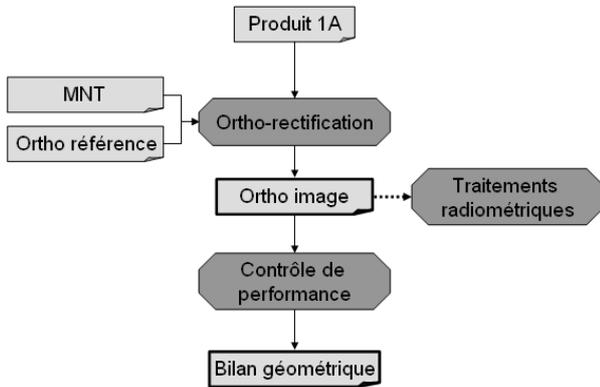


Figure 2 : Traitements géométriques.

La chaîne de traitement Kalideos gère les appels aux outils d'ortho-rectification pour réaliser des traitements automatisés. Elle réalise une mesure de la performance de localisation des images par rapport à l'image de référence (mesure des décalages résiduels par corrélation).

Les performances de localisation des produits Spot sur l'île de La Réunion sont particulièrement remarquables pour un site aussi accidenté, avec des décalages moyens par rapport à l'image de référence de l'ordre de 0,2 pixel au maximum.

3. Prétraitements radiométriques

Les ortho-images produites délivrent des radiométries brutes sans signification physique immédiate. Les traitements radiométriques visent à les convertir en réflectance au sommet de l'atmosphère (en anglais *Top of Atmosphere* ou TOA), puis à estimer la réflectance de surface (en anglais *Top of Canopy* ou TOC) par correction des effets atmosphériques.

La démarche de correction atmosphérique est adaptée à des surfaces terrestres. Elle ne prend toutefois pas en compte la Fonction de Réflectance Spectrale Bidirectionnelle de surface (en anglais Bidirectional Reflectance Distribution Function ou BRDF), variable selon la nature des terrains et pour laquelle nous n'avons pas d'information d'entrée. Sur mer, la correction néglige la présence éventuelle d'une réflexion spéculaire (glitter), ainsi que l'écume produite par les vagues.

La validation des corrections atmosphériques reste délicate. Elle repose sur une analyse visuelle des images, par le contrôle de la cohérence des niveaux de réflectance obtenus sur des cibles sombres, notamment sur mer. L'obtention de valeurs de réflectance nulles sur mer révèle une sur-corrrection atmosphérique. Dans ce cas, une analyse plus poussée des données de pression et d'épaisseur optique des aérosols est entreprise. La difficulté est d'avoir ce cas de figure sur certaines zones seulement de l'image, pouvant traduire une fluctuation locale des composants atmosphériques alors que leur

estimation et que la correction sont globalement les mêmes sur toute l'image.

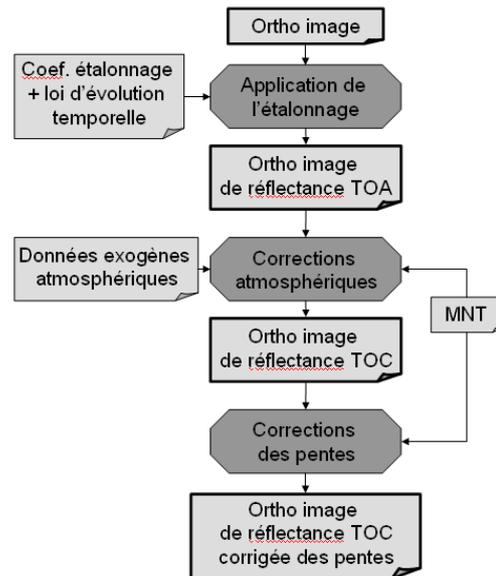


Figure 3 : Traitements radiométriques.

3.1. Conversion des mesures en réflectance

Dans un premier temps, il convient de convertir les valeurs brutes de la radiométrie (comptes numériques) en réflectance TOA. On calcule la luminance observée L_{TOA} , à partir du compte numérique X mesuré :

$$L_{TOA}^k = \frac{X^k}{A_k \cdot G_m^k}$$

avec :

- A_k : coefficient d'étalonnage de la bande k de l'instrument,
- G_m^k : gain analogique pour la bande k .

Les coefficients d'étalonnage peuvent être renseignés par les données auxiliaires associées aux produits. Cependant, il a été préféré d'utiliser les coefficients d'étalonnage officiels du CNES (Meygret, 2007), estimés pour la date de prise de vue, en prenant en compte l'évolution de la sensibilité des instruments dans le temps.

On en déduit la réflectance correspondante :

$$\rho_{TOA}^k = \frac{\pi \cdot L_{TOA}^k}{E_s^k \cdot \cos \theta_s \cdot (d_0/d)^2}$$

où :

- E_s^k est la constante d'éclairement solaire hors atmosphère (constante précalculée pour la bande considérée du capteur) ;

- θ_s est l'angle zénithal solaire
- d/d_0 est le rapport de la distance Terre-Soleil à la date de prise de vue sur la distance Terre-Soleil moyenne.

3.2. Estimation de la réflectance de surface

L'inversion de la réflectance de surface se fait ensuite, pixel par pixel, par comparaison de la réflectance mesurée à des simulations TOA réalisées pour une gamme de réflectances de surface et pour les conditions géométriques et atmosphériques de la mesure.

Le principe consiste à calculer des tables (LUT ou Look-Up Tables) de couples de valeurs de réflectance sol et TOA pour chaque image traitée (une table par bande spectrale). Les tables s'échelonnent entre deux bornes de réflectance de surface (de 0,0 à 0,8 avec un pas de 0,01). À partir des valeurs de réflectances TOA calculées, on interpole dans ces tables pour obtenir la valeur de réflectance de surface correspondant à la mesure de chaque pixel de l'image (Figure 4).

Les simulations sont réalisées à partir du logiciel 6S (Vermote et al., 1997a). Nous avons adapté le code pour permettre de boucler en interne sur les différentes réflectances de surface et de produire directement une LUT par bande spectrale.

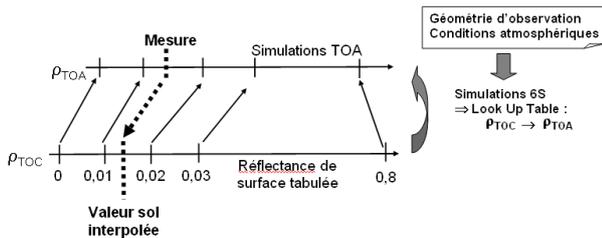


Figure 4 : Illustration de l'utilisation des Look-Up Tables de simulations de la réflectance TOA en fonction de la valeur de surface et des conditions d'observation.

Selon la nature de la zone imagée, il peut être requis de prendre en compte l'élévation du terrain. C'est typiquement le cas pour des scènes dont le relief varie beaucoup, entraînant une fluctuation notable de l'épaisseur optique de la couche atmosphérique dans le champ de l'image. Dans ce cas, il est possible d'utiliser le Modèle Numérique de Terrain de la zone. Les LUTs de simulations 6S sont alors générées pour une gamme d'altitudes. Comme les paramètres atmosphériques sont renseignés pour une altitude donnée (z_{ref}), l'outil ajuste leurs valeurs à chaque niveau d'altitude.

La prise en compte du relief est assurée par des échelles de hauteur appliquées aux profils exponentiels de concentration des composants en fonction de l'altitude. C'est le cas pour la pression atmosphérique, l'épaisseur optique des aérosols et la quantité de vapeur d'eau intégrée sur la colonne atmosphérique :

$$V(z_i) = V(z_{ref}) \times \exp\left(-\frac{z_i - z_{ref}}{h}\right)$$

où :

- V représente la pression atmosphérique, l'épaisseur optique des aérosols ou la quantité de vapeur d'eau,
- Z_i , une altitude de la gamme de niveaux pour lesquels on réalise une simulation 6S,
- Z_{ref} , l'altitude de référence des données atmosphériques,
- h , l'échelle de hauteur du composant.

L'estimation de la réflectance au sol est ensuite réalisée pixel par pixel. Le MNT précise l'élévation z effective du pixel. À partir des LUTs 6S simulées pour les niveaux z_i et z_{i+1} encadrant z , on estime par interpolation linéaire une nouvelle LUT (réflectance sol / réflectance TOA) correspondant à l'élévation z . C'est cette dernière LUT qui est utilisée pour estimer la réflectance de surface correspondant à la réflectance TOA mesurée.

3.3. Correction des pentes

La simulation du transfert radiatif est réalisée en géométrie plan horizontale, tant pour la description du profil atmosphérique que pour la modélisation de la surface. Or, pour des sites vallonnés (notamment pour la base Kalideos Isle-Réunion), il est souhaitable d'affiner la correction en prenant en compte les pentes :

- La surface étant inclinée, le flux solaire incident direct n'est pas le même que sur une surface horizontale ;
- L'éclairement indirect est également modifié du fait que certaines parties du ciel sont masquées par le relief alors que des surfaces voisines peuvent devenir visibles ;
- Comme la réflectance dépend des angles solaires et de visée, et que ces angles sont modifiés par l'inclinaison des pentes, une correction de la BRDF doit être faite.

Au premier ordre, la correction de l'éclairement solaire direct s'exprime par :

$$\rho_{flat} = \rho_{surf} * \frac{\cos(\theta_s)}{\cos(i(l,p))}$$

où :

- ρ_{surf} représente la réflectance de surface estimée en supposant la surface horizontale,
- θ_s , l'angle zénithal solaire
- $i(l,p)$, l'angle d'incidence solaire par rapport à la normale de la pente pour le pixel (l,p) .

En introduisant la correction supplémentaire de la BRDF et de la fraction de sol vue, la réflectance de surface peut s'approximer par :

$$\rho_{flat} = \rho_{surf} * \frac{F_{BRDF}}{\frac{\cos(i(l, p))}{\cos(\theta_s)} + \bar{\rho} \cdot F_{solvu}}$$

où :

- le terme correctif de la BRDF est donné par :

$$F_{BRDF} = \frac{\cos(i(l, p)) + \cos(e(l, p))}{\cos(\theta_s) + \cos(\theta_v)}$$

avec θ_v l'angle zénithal de visée et $e(l, p)$ l'angle d'existence pour le pixel (l, p) , correspondant à l'angle de visée par rapport à la normale de la pente ;

- le terme correctif de la fraction de sol vue est donné selon l'approximation de Kondratiev :

$$F_{solvu} = \frac{1 - \cos(s(l, p))}{2}$$

avec $s(l, p)$ l'angle entre la normale à la pente et la direction zénithale.

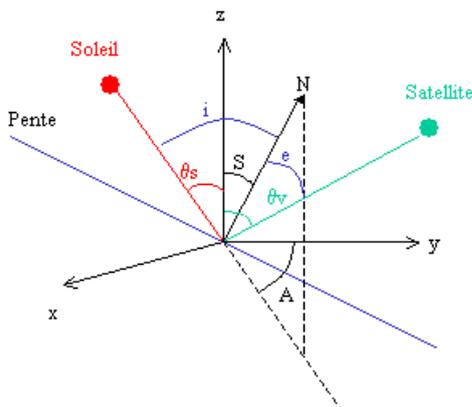


Figure 5 : Représentation des angles d'incidence i et d'existence e par rapport à la normale à la pente et aux directions d'incidence solaire et de visée satellite. Représentation des angles slope S et aspect A par rapport à la normale à la pente et à la direction zénithale.

3.4. Détermination des composants atmosphériques

La qualité de l'inversion de la réflectance de surface repose en grande partie sur la justesse de l'estimation des conditions atmosphériques lors de la prise de vue. Il faut renseigner l'atelier radiométrique sur la pression atmosphérique (pondérant le signal moléculaire), les caractéristiques des aérosols (abondance et nature), les contenus en gaz absorbant.

Les moyens d'accès aux données atmosphériques sont variables. Si le site d'intérêt dispose d'un radiomètre dédié à la caractérisation de l'atmosphère, ces données peuvent être utilisées (cas des sites avec un radiomètre du réseau AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>)). Il

est également possible d'accéder aux données atmosphériques par des informations du NCEP (National Center for Environment Prediction) (<http://www.ncep.noaa.gov>) et par les mesures d'autres capteurs.

L'atelier radiométrique de Kalideos permet l'exploitation directe des données AERONET. Il permet également l'utilisation des données météorologiques provenant du NCEP, des produits ozone des instruments TOMS et TOAST, comme des produits aérosols de niveau 3 de SeaWIFS et MODIS (épaisseur optique). À défaut, des valeurs climatologiques sont utilisées. Elles ont été obtenues par une analyse des données disponibles sur plusieurs années

| Paramètre | Source d'information nominale |
|--------------------------|---|
| Pression atmosphérique | Données météorologiques : NCEP |
| Quantité de vapeur d'eau | Données météorologiques : NCEP |
| | Données in-situ : mesures AERONET |
| Quantité d'ozone | Données TOMS ou TOAST |
| Aérosols | Données in-situ : mesures AERONET |
| | Données globales : mesures SeaWIFS ou MODIS |

Tableau 1 : Moyens d'accès aux paramètres atmosphériques.

La modélisation du signal moléculaire, résultant de la diffusion de la lumière par les molécules atmosphériques, est bien maîtrisée par les codes de transfert radiatif. Sa contribution est prédominante pour les courtes longueurs d'onde (bleu, vert). Elle dépend de l'épaisseur optique moléculaire de la bande spectrale considérée. Cette épaisseur optique est estimée pour une pression atmosphérique standard (1013 mb), pondérée par la pression effective au moment de l'acquisition.

Les absorptions gazeuses sont modélisées par l'atelier radiométrique. Il considère des profils standards pour l'oxygène, le gaz carbonique et le méthane (modèle US62 (Vermote et al., 1997b)). Par contre, il est nécessaire de renseigner l'atelier sur les grandeurs plus fluctuantes :

- La quantité de vapeur d'eau intégrée sur la colonne atmosphérique,
- La quantité d'ozone stratosphérique.

Les absorptions gazeuses affectant les mesures dans le visible et le proche infrarouge (de 0,45 à 0,95 μm) sont :

- L'**ozone** stratosphérique qui dans le visible présente une absorption de 400 à 800 nm avec un maximum autour de 600 nm (bandes de Chappuis). Elle affecte ainsi les bandes B1 et B2 des capteurs Spot ;
- L'**oxygène** avec une absorption forte à 690 nm et à 763 nm (bande A). Elle affecte la bande B2 et, dans une moindre mesure, la bande B3 des capteurs Spot ;

- La **vapeur d'eau** présentant dès 0,6 μm des raies d'absorptions plus ou moins fortes. Elle touche principalement la bande B3 mais aussi légèrement la bande B2 des capteurs Spot.

Les absorptions gazeuses affectant les mesures dans le moyen infrarouge (de 1,4 à 1,9 μm) sont le gaz carbonique, le méthane et la vapeur d'eau. Mais le dimensionnement de la bande MIR des capteurs Spot 4 et 5 est tel que ces absorptions ont un très faible impact sur les mesures.

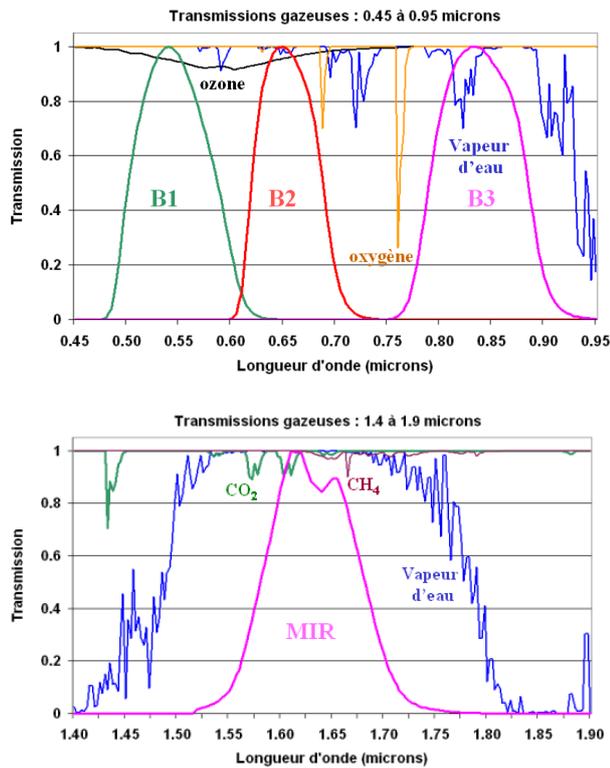


Figure 6 : Représentation des bandes spectrales Spot 5 et des transmissions gazeuses du modèle US62 pour une quantité de vapeur d'eau de $1,424 \text{ g.cm}^{-2}$ et d'ozone de $0,344 \text{ cm}\times\text{atm}$.

Les aérosols troposphériques restent le composant atmosphérique le plus difficile à caractériser. L'atelier demande à disposer de la valeur d'épaisseur optique des aérosols à 550-nm et d'une description du type de particules pour en déduire les propriétés spectrales. L'atelier gère l'utilisation de données provenant du réseau AERONET. Il permet aussi l'utilisation de données provenant d'autres sources (nécessitant une mise en forme compatible avec l'interface de l'atelier).

Le modèle de particules peut être renseigné selon deux approches :

- Le formalisme « *sun-photometer measurements* » de 6S (Vermote et al., 1997b) qui est directement compatible avec le format des produits in-situ du réseau AERONET. Il renseigne sur la granulométrie des aérosols (répartition en tailles des particules) et sur l'indice de réfraction des aérosols pour une

gamme de longueurs d'onde (400, 488, 515, 550, 633, 694, 860, 1536 nm)

- Le formalisme « *external file* » de 6S (Vermote et al., 1997b), qui contient l'information sur les propriétés radiatives des aérosols pour une gamme de longueurs d'onde (400, 488, 515, 550, 633, 694, 860, 1536 nm) : section efficace d'extinction et de diffusion, albédo de simple diffusion, facteur d'asymétrie, fonction de phase. L'atelier radiométrique dispose d'outils permettant de générer de tels fichiers (Lafrance, 2010) pour des granulométries mono-modales (loi log-normale ou de Junge), ainsi que pour des modèles plus complexes comme ceux de la WMO (World Meteorological Organization, 1986) ou de Shettle et Fenn (1979) (modèles continentaux, urbains, maritimes, côtiers, avec une prise en compte de l'humidité relative de l'air). Ceci suppose d'avoir une connaissance du modèle des aérosols à simuler par une source externe.

3.5. Masques Qualité Image factuels

En complément des données images de réflectance, un masque Qualité Image permet d'identifier sur les produits les pixels hors champ, les pixels saturés ou contaminés par la saturation d'un pixel voisin, ainsi que ceux dont la radiométrie a été interpolée pour palier à un détecteur mort ou aberrant. L'information est fournie pour chaque bande spectrale.

Ces masques sont réalisés à partir du seuillage des pixels saturés sur l'image de niveau 1A et du positionnement des pixels aberrants sur l'image (information des données auxiliaires associées au produit 1A). Le masque de niveau 1A est converti en un masque superposable aux ortho-images par rééchantillonnage (outil CNES) en appliquant la grille utilisée pour convertir le produit 1A en ortho-image.

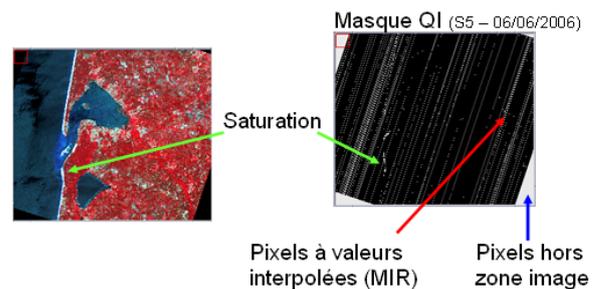


Figure 7 : Masque Qualité Image factuel associé à un produit Spot de la base Littoral.

4. Conclusions

Les outils de prétraitements des images optiques de Kalideos ont permis d'alimenter les bases Kalideos en données Spot et Formosat.

Ainsi, près de 60 images ont été traitées pour la base Adam, 200 pour la base Isle-Réunion et 170 pour la

base Littoral. Enfin, 100 produits Spot seront prochainement traités pour alimenter la base OSR MiPy. La prochaine disponibilité d'un outil pour la prise en compte des images Pléiades permettra de compléter les bases avec ce type de produits.

L'homogénéité des traitements font que les bases contiennent des données cohérentes entre elles : superposables et de radiométries directement comparables (réflectance TOA et sol obtenues avec les mêmes méthodes).

Références

Lafrance B., 2010. Code des Ordres Successifs de Diffusion (version 5.0) - Manuel Utilisateur, Document CNES SOS-MU-001-II, version 3.0.

Meygret, A., 2007. Spot absolute calibration - Synthesis, Document CNES S5-NT-0-2880-CN, version 2.0.

Shettle, E.P., Fenn R.W., 1979. Models for the Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effects of Humidity Variations on Their Optical Properties, Air Force Geophysics Laboratory. AFGL-TR-79-0214. Environmental Research papers, No. 676.

Vermote, E.F., Tanré, D., Deuzé, J.L., Herman, M., Morcette, J.J., 1997a. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 35(3), 675-686.

Vermote, E.F., Tanré, D., Deuzé, J.L., Herman, M., Morcette, J.J., 1997b. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S User Guide, Version 1.

World Meteorological Organization, 1986. World Climate Research Programme, A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation, WCP-112, WMO/TD Report No 24, Genève, Suisse.