



Suivi de la turbidité des rivières guyanaises par télédétection multispectrale SENTINEL 2

Acquisitions, algorithmes et portions de rivières valides

Rapport final

BRGM/RP-67008-FR
Juin 2017

ROUZEAU O., CAPAR L.
Avec le concours du Parc Amazonien Guyanais



Document public

Suivi de la turbidité des rivières guyanaises par télédétection multispectrale SENTINEL 2

Acquisitions, algorithmes et portions de rivières valides

Rapport final

BRGM/RP-67008-FR
juin 2017

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques du BRGM 2011-2017 avec le soutien de la DEAL Guyane

ROUZEAU O., CAPAR L.
Avec le concours du Parc Amazonien Guyanais

Vérificateur :

Nom : PROGNON C.

Fonction : Responsable d'unité

Date : 20/06/2016

Signature :



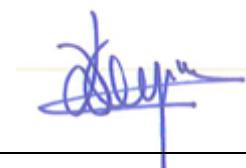
Approbateur :

Nom : VERNEYRE L.

Fonction : Directrice régionale

Date :
21/06/2017

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés :

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

ROUZEAU O., CAPAR L. (2017) – Suivi de la turbidité des rivières guyanaises par télédétection multispectrale SENTINEL 2. - Acquisitions, algorithmes et masques des portions de rivières valides. Rapport final. BRGM/RP-67008-FR, 91 p., 42 fig., 7 ann., CD.

Synthèse

La qualité de l'eau des rivières servant notamment à l'alimentation en eau potable de Guyane est malaisée à mesurer compte tenu de l'ampleur du réseau hydrographique et des difficultés d'accès du territoire. L'objectif du projet est de pouvoir suivre cette qualité et les pressions s'exerçant sur la masse de surface de Guyane, à travers le paramètre de la turbidité, par télédétection en minimisant ainsi les déplacements sur le terrain.

Depuis 2011, le BRGM travaille pour obtenir une estimation de la turbidité des rivières guyanaises par télédétection acquise en mode multispectral. Des résultats probants ont déjà été obtenus à partir d'images SPOT (5, 6 et 7) et LANDSAT 8. Les résultats du projet montrent qu'il est également possible d'évaluer la turbidité des rivières guyanaises par télédétection multispectrale issue des satellites européens SENTINEL 2.

Cependant, si cette méthode est maintenant opérationnelle et reproductible, il manque actuellement la possibilité de masquer de façon automatique toutes les parties de rivières où l'on observe des perturbations faussant les résultats : nuages, ombres de nuages, zones de réflexion spéculaire, hauts-fonds. Un algorithme est proposé dans ce rapport pour délimiter ces perturbations, mais reste perfectible. Des études avec d'autres algorithmes sont en cours de finalisation au niveau national et européen pour obtenir des masques fiables sur les nuages et leurs ombres. Des solutions sont proposées pour les zones de réflexion spéculaire et les zones de hauts-fonds.

En complément à cette étude, un travail a été mené à partir de BD_CARTHAGE de Guyane pour à la fois trouver le moyen d'avoir tous les 10 m la valeur de la largeur des cours d'eau et de voir quel est le réseau hydrographique qui peut être vu par SENTINEL 2. En définitive, on estime que 3 300 km de cours d'eau peuvent être étudiés par la méthode mise au point.

Si l'imagerie SENTINEL 2 semblant être l'outil adéquate, il est maintenant nécessaire de conforter la loi de passage d'une réflectance en turbidité obtenue par d'avantage de mesures et d'acquisitions d'images.

On peut déjà penser que le produit innovant obtenu, permettant de suivre l'évolution saisonnière, annuelle et pluriannuelle de la turbidité tout en identifiant des phénomènes anormaux, pourrait être intégré au futur Réseau d'Animation Régionale en Télédétection (RART) Guyanais issus de la mise en place prochaine de la phase 3 de la station de réception SEAS Guyane. Si ce dispositif était jugé pertinent, il conviendrait de discuter de l'articulation avec le réseau turbidité ainsi que l'Observatoire de l'activité minière avec les partenaires concernés.

Sommaire

1. Introduction.....	9
1.1. TRAVAUX ANTERIEURS.....	9
1.2. OBJECTIF DE L'ETUDE	10
1.3. PLAN DU RAPPORT	10
2. Les données satellites utilisées.....	13
2.1. COMPARAISON ENTRE LES DONNEES LANDSAT 8 ET SENTINEL 2.....	13
2.2. METHODES D'ACQUISITION DES DONNEES	14
3. Identification de la largeur des rivières.....	17
3.1. LARGEUR DE RIVIERES VISIBLES PAR LES DIFFERENTS CAPTEURS.....	17
3.2. CARTOGRAPHIE DE LA LARGEUR DES RIVIERES.....	19
3.2.1. Définition de la BD CARTHAGE.....	19
3.2.2. Les couches utilisées	20
3.3. METHODOLOGIE UTILISEE	21
4. Détermination et contour des perturbations à la surface des rivières	27
4.1. METHODOLOGIE	27
4.1.1. Choix de la meilleure bande spectrale	27
4.2. CALCUL DE L'INDICE NORMALISE	31
4.3. CHOIX DU SEUIL.....	32
4.4. CONCLUSIONS	36
5. Corrélations des réflectances de SENTINEL 2 avec des mesures de turbidité in situ ..	37
5.1. PRESENTATION.....	37
5.2. RECHERCHE DE LOI DE CORRELATION	38
5.2.1. Pour la bande 2	39
5.2.2. Pour la bande 3	40
5.2.3. Pour la bande 4	41
5.2.4. Pour la bande 8	41
5.2.5. Conclusions	42
5.3. VERIFICATION DE LA LOI DE TRANSFORMATION ET NOUVELLE LOI	44
5.4. UTILISATION DE LA LOI DE PASSAGE SUR LA CAMOPI.....	47
5.5. MISSION DE LA DEAL SUR L'EMBOUCHURE DE LA CAMOPI	49
5.6. CONCLUSION.....	52
6. Conclusions générales et perspectives futures	53
7. Bibliographie.....	55

Liste des figures

Figure 1 : Rivière Guyanaise survolée en hélicoptère présentant des zones de réflections spéculaires.....	11
Figure 2 : Vue d'artiste du satellite SENTINEL 2A	13
Figure 3 : Les bandes spectrales comparatives de SENTINEL 2 et LANDAT 7 et 8 en fonction des fenêtres d'absorption de l'atmosphère.....	14
Figure 4 : Caractéristiques des bandes spectrales utilisées de SENTINEL 2	14
Figure 5 : Site lv.eosda.com	15
Figure 6 : Site amazonaws.com	15
Figure 7 : Représentation des pixels purs et impurs le long d'un cours d'eau d'une rivière	17
Figure 8 : Limite de l'emprise de la couche HYDROGRAPHIE_SURFACIQUE sur l'Inini par rapport à la carte topographique de l'IGN à 1/50 000	18
Figure 9 : Limite de l'emprise de la couche HYDROGRAPHIE_SURFACIQUE sur l'Inini par rapport à l'orthophoto de l'IGN.....	18
Figure 10 : Limite de la couche HYDROGRAPHIE_SURFACIQUE sur l'Inini par rapport à une image SENTINEL 2	19
Figure 11 : Limite de la couche HYDROGRAPHIE_SURFACIQUE sur l'Inini par rapport à une image LANDSAT 8	19
Figure 12 : Schéma méthodologie d'obtention de la largeur des cours d'eau	22
Figure 13 : suppression des tronçons	23
Figure 14 : Passage en fichiers de points	23
Figure 15 : Représentation des largeurs sous forme de zones tampons.....	24
Figure 16 : Représentation des largeurs sous forme de zones tampons.....	24
Figure 17 : Carte des largeurs de rivières utilisables pour les images SENTINEL 2 et LANDSAT 8.....	25
Figure 18 : Profil en long sur l'Inini	27
Figure 19 : Scène SENTINEL 2 du 13 août 2016	28
Figure 20 : Bande 8 (SWIR) de la scène SENTINEL 2A du 13/08/2016	29
Figure 21 : Valeurs de réflectance du profil en long sur l'Inini (Image SENTINEL 2 du 13/08/2016).....	30
Figure 22 : Bande 8 (SWIR) de la scène SENTINEL 2A du 22/09/2016	31
Figure 23 : Indice normalisé des nuages INB8 sur la bande 8 du satellite Sentinel-2.....	32
Figure 24 : Choix des seuils pour la sélection des zones correspondant aux nuages, ombres et zones de réflexion spéculaires. (en fond : Bande 8 de l'image SENTINEL 2A du 22 septembre 2016).	33
Figure 25 : Inverse de l'indice normalisé sur la bande 8. En jaune les valeurs comprises entre -10 et 0.....	34
<i>Figure 26 : Processus d'obtention du masque des nuages, leurs ombres et des réflexions spéculaires sur les portions de rivière</i>	35
Figure 27 : Image résultante du contourage des nuages, des ombres des nuages et de la réflexion spéculaire sur l'Inini le 22/09/2016.....	36

Figure 28 : Image SENTINEL 2 sur l'ININI du 11/11/2016.....	37
Figure 29 : Image SENTINEL 2 sur la CAMOPI du 01/06/2016	38
Figure 30 : Points de mesure de turbidité sur l'image SENTINEL du 11/11/2016	39
Figure 31 : Loi de régression de la Bande 2	40
Figure 32 : Loi de régression de la Bande 3	40
Figure 33 : Loi de régression de la Bande 4	41
Figure 34 : Loi de régression de la Bande 8	42
Figure 35 : Saut Sonnelle (haut-fond)	42
Figure 36 : Transformation de l'image SENTINEL 2A du 13/08/2016 en terme de turbidité	43
Figure 37 : Zoom sur l'embouchure de l'Inini de l'image transformée	44
Figure 38 : Extrait de la scène SENTINEL 2A du 09/09/2016 sur la Camopi	45
Figure 39 : Loi de regression permettant le passage de la réflectance de la bande 4 en turbidité	46
Figure 40 : Image de turbidité du 09/09/2016	47
Figure 41 : Valeurs de turbidité mesurées (12/06/2016) et calculées (11/07/2016)	48
Figure 42 : Représentation graphique des valeurs de turbidité mesurées (12/06/2016) et calculées (11/07/2016)	48
Figure 43 : image du 11/07/2016 avec les point de mesures du 12/06/2016	49
Figure 44 : image du 16/06/2017 avec les point de mesures du 24/06/2017	51
Figure 45 : Nouvelle loi de regression permettant le passage de la réflectance de la bande 4 en turbidité	52

Liste des annexes

Annexe 1 Mesures de la campagne du PAG sur la rivière CAMOPI	57
Annexe 2 Mesures de la campagne du BRGM/PAG sur l'Inini	61
Annexe 3 Mesures des campagnes du PAG en Guyane de septembre 2016 à février 2017 ...	65
Annexe 4 Mesures de la campagne de la DEAL/FAG sur la rivière CAMOPI	69
Annexe 5 Valeurs de turbidité retenues pour la définition de la loi de transfert.....	71
Annexe 6 Procédure d'obtention de la turbidité par SENTINEL 2 (ArcGis)	75
Annexe 7 Procédure d'obtention de la turbidité par SENTINEL 2 (QGis).....	83

1. Introduction

La grande majorité de la population guyanaise est alimentée en eau potable à partir des eaux prélevées dans les différents fleuves du département. Cependant, ces eaux peuvent être rendues improches à la consommation en fonction de dégradations issues des marées ou de l'activité d'orpaillage en amont des prélèvements.

Afin de garantir leur potabilité, il est nécessaire de suivre la qualité de ces eaux et d'évaluer les pressions s'exerçant sur les masses d'eau de surface. Cependant en Guyane ce travail est rendu délicat du fait de la difficulté à se déplacer sur une grande majorité du territoire.

L'alternative serait de pouvoir mesurer ces dégradations, notamment les quantités de matières en suspension liées à la turbidité des eaux, grâce à des données satellites, limitant ainsi les déplacements sur le terrain.

1.1. TRAVAUX ANTERIEURS

Le BRGM travaille depuis 2011 pour obtenir une estimation de la turbidité des rivières guyanaises par télédétection acquise en mode multispectral. Après une étude bibliographique (rapport BRGM/RP-60354-FR de 2011) et malgré le couvert nuageux inhérent au climat guyanais, des résultats expérimentaux probants ont pu être obtenus.

Combinant mesures de turbidité en rivière synchrones ou quasi synchrones avec le survol des rivières par les satellites, il a été possible d'obtenir des lois de régression linéaires satisfaisantes permettant de transformer le signal enregistré par les capteurs spatiaux en valeurs de turbidité (exprimée en NTU).

Ce travail a été réalisé :

- en 2012 sur la rivière de Kourou (données du satellite SPOT 5 qui est arrivé en fin vie en mars 2015, rapport BRGM/RP-61632-FR édité en 2014) ;
- en 2014 et 2015 sur la rivière la Camopi à son embouchure avec l'Oyapock (données des satellites SPOT 6 ou 7 et LANDSAT 8) et sur la rivière Inini à son embouchure avec le Maroni (données des satellites SPOT 6 ou 7 ; rapports BRGM-RP-64981-FR et BRGM-RP-65110-FR édités en 2015).

A l'état actuel de l'étude, il apparaît que:

- les données des satellites SPOT sont coûteuses et leur mode d'acquisition quasi systématique en visée oblique entraîne sur certaines rivières d'importantes zones constantes de réflexion spéculaire à la surface des eaux qui empêche toutes calibrations du signal radiométrique en termes de turbidités de surface (Maroni, Inini...).
- les données du satellite américain LANDSAT 8, à visée toujours verticale, sont bien adaptées au niveau spectral, mais leur relativement faible résolution spatiale ne permettent leur utilisation que pour des rivières de grande largeur avec une répétitivité de passage mensuelle.

Les données des satellites européens SENTINEL 2A et 2B, à visée toujours verticale, semblent présenter des caractéristiques à la fois spectrales, spatiales, de répétitivité au sol en totale adéquation avec une estimation de la turbidité des rivières de largeur moyenne. De plus, ces données sont fournies déjà corrigées des conditions d'éclairement ce qui n'est pas le cas pour les données LANDSAT.

1.2. OBJECTIF DE L'ETUDE

L'objectif de cette étude est d'acquérir gratuitement des données SENTINEL 2 afin d'obtenir une calibration de la réflectance enregistrée par les différentes bandes spectrales du satellite et des mesures de turbidité de surface effectuées au même moment.

Pour faire cette calibration, des campagnes de mesures en rivière au turbidimètre portatif, synchrones avec le passage des satellites, seront réalisées en collaboration avec les équipes de terrain du Parc Amazonien Guyanais (PAG). Les sites d'étude retenus sont l'embouchure de la rivière Camopi avec l'Oyapock et l'embouchure de la rivière Inini avec le Maroni.

En complément à ce travail et en préparation d'un travail sur l'ensemble du territoire guyanais, l'identification sous forme de masques des portions valides du réseau hydrographique pouvant faire l'objet de mesures de turbidité par SENTINEL 2 ou LANDSAT 8 sera effectuée.

Enfin une méthode automatique ou semi-automatique pour cartographier les perturbations atmosphériques (nuages, leurs ombres, zones de réflexion spéculaire¹ à la surface des eaux) sera recherchée afin de ne tenir compte que de la partie valide des rivières en phase totalement opérationnelle.

1.3. PLAN DU RAPPORT

Pour des raisons de compréhension, le plan du présent rapport sera :

1. Une comparaison rapide des données LANDSAT 8 et SENTINEL 2 et leur méthode d'acquisition commune (Chapitre 1).
2. L'identification des largeurs de rivières à partir des données de la BD CARTHAGE guyanaise (Chapitre 2).
3. La définition d'une méthode originale permettant la cartographie semi-automatique des nuages, leurs ombres et les zones de réflexions spéculaires à la surface des eaux présents sur les images SENTINEL 2 (Chapitre 3).
4. La calibration du signal des données SENTINEL 2 en termes de turbidité à l'aide de mesure effectuées in situ (Chapitre 4).

¹ La réflexion est dite spéculaire lorsque le rayon incident donne naissance à un rayon réfléchi unique. Idéalement, l'énergie du rayon incident se retrouve totalement dans le rayon réfléchi, en pratique une partie de l'énergie peut être absorbée, diffusée ou réfractée au niveau de l'interface.



Figure 1 : Rivière Guyanaise survolée en hélicoptère présentant des zones de réflections spéculaires

2. Les données satellites utilisées

2.1. COMPARAISON ENTRE LES DONNEES LANDSAT 8 ET SENTINEL 2

Grâce à la disponibilité de la nouvelle génération des capteurs multispectraux à résolution moyenne installées à bord de LANDSAT 8 et des satellites SENTINEL 2, de nouvelles possibilités terme de surveillance peuvent être proposées.

Grâce également à une quantification du signal sur 12 bits, ces capteurs fournissent une qualité radiométrique améliorée qui peut augmenter l'étendue des applications pour la surveillance notamment pour les océans et d'eau intérieure (HEDLEY J. & al. (2012)).

LANDSAT 8

Lancé en 2013, LANDSAT 8 fournit les images multispectrales de haute qualité à la résolution de 30 mètres (15 pour panchromatique) en mode visible et proche infrarouge (capteur OLI (Operational Land Imager)) et de 100 m en infrarouge thermique (radiomètre TIRS (Thermal Infrared Sensor) avec une répétitivité de 16 jours (heure de passage à l'équateur à 10h GMT) (Figure 3).

Chaque scène OLI représente une surface de 185 x 185 km². Chaque bande est fournie en luminance sous forme d'un fichier geoTIFF géoréférencé en UTM et non corrigé des effets atmosphériques (Level-1T).

SENTINEL 2

La mission SENTINEL 2 prévoit une combinaison de deux satellites (SENTINEL 2A et SENTINEL 2B) équipés avec les instruments multispectraux identiques (MSI) capables d'acquérir des données dans 13 bandes à différentes résolutions spatiales (entre 10 m et 60 m du visible à l'infrarouge thermique). Les orbites sont conçues pour assurer une répétitivité de passage d'environ cinq jours à l'équateur (heures de passage 10h30) (Figure 4).

SENTINEL 2A (Figure 2) a été lancé en juin 2015, et il est maintenant opérationnel, alors que SENTINEL 2B, lancé le 7 mars 2017, est toujours en phase de recette.

Chaque scène MSI représente une surface de 290 x 290 km². Chaque bande est fournie en réflectance et corrigée des effets atmosphériques au sommet de l'atmosphère (TOA : Top Of Atmosphere) sous forme d'un fichier en Jpeg2000 géoréférencé en UTM (Level-1C).

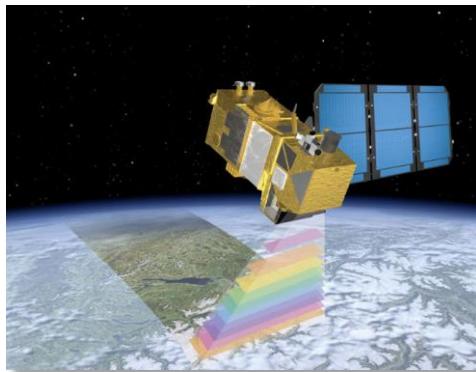


Figure 2 : Vue d'artiste du satellite SENTINEL 2A

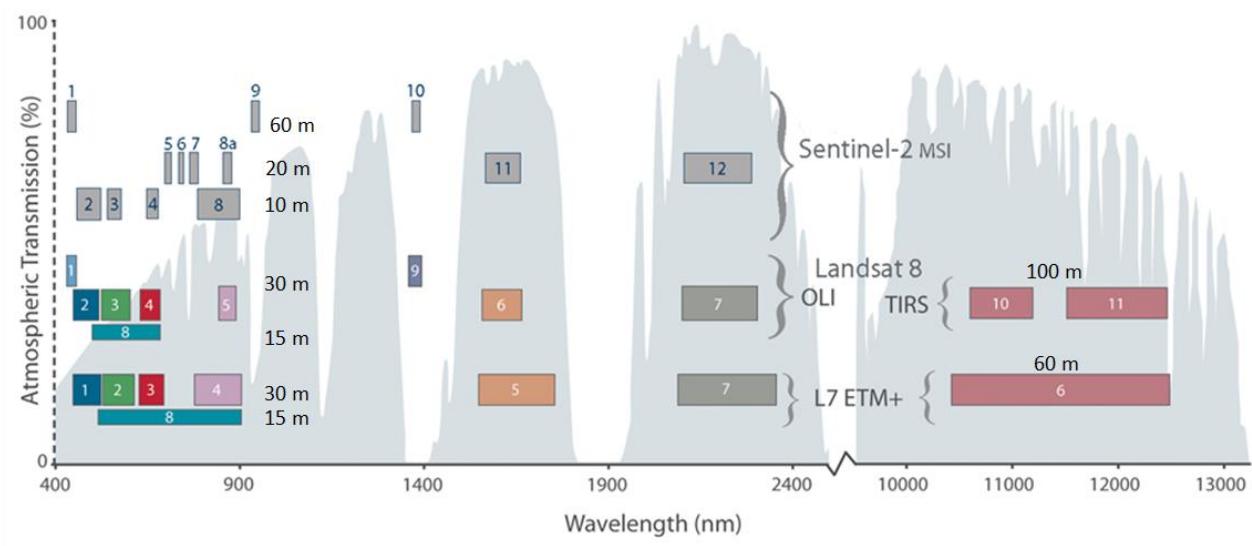


Figure 3 : Les bandes spectrales comparatives de SENTINEL 2 et LANDSAT 7 et 8 en fonction des fenêtres d'absorption de l'atmosphère

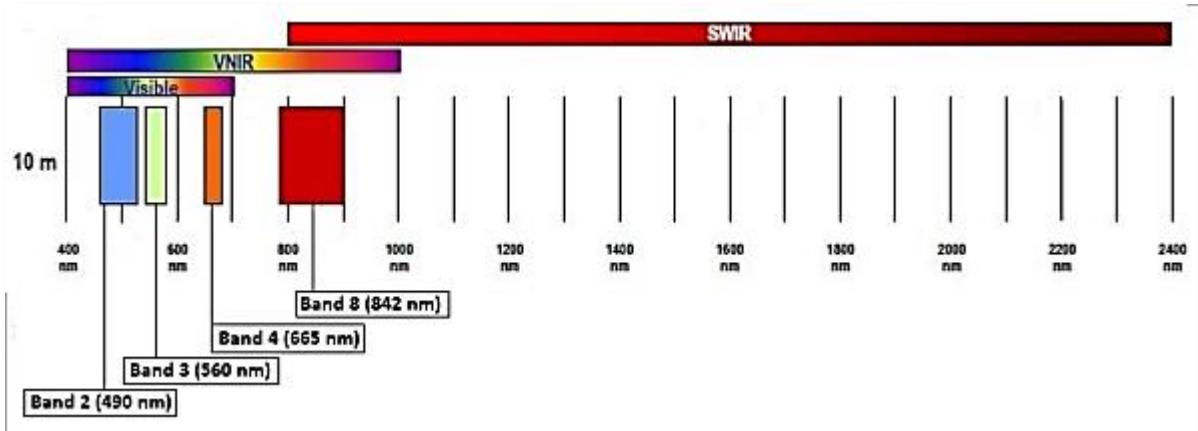


Figure 4 : Caractéristiques des bandes spectrales utilisées de SENTINEL 2

2.2. METHODES D'ACQUISITION DES DONNEES

Les données LANDSAT et SENTINEL peuvent d'être directement disponibles et téléchargeables gratuitement via différents sites internet (comme <https://lv.eosda.com> ou <http://sentinel-pds.s3-website.eu-central-1.amazonaws.com/image-browser/> , Figure 5 et Figure 6) qui, après s'être enregistré, permettent de choisir son satellite, la période d'archive retenue, le pourcentage de couverture nuageuse et télécharger les bandes retenues.

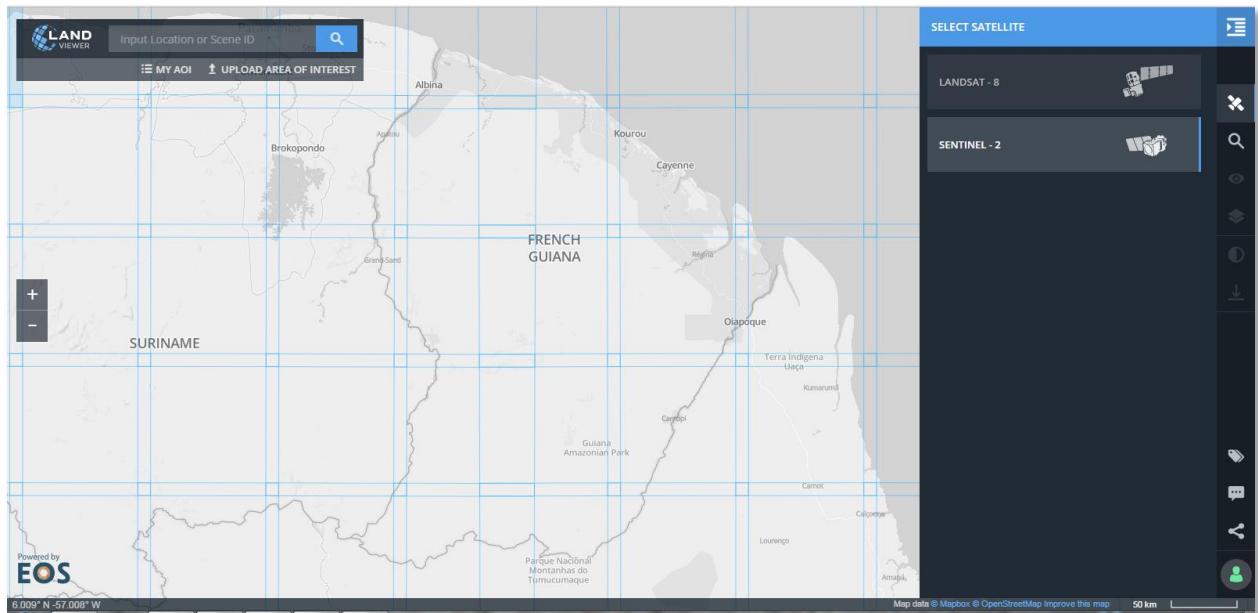


Figure 5 : Site lv.eosda.com

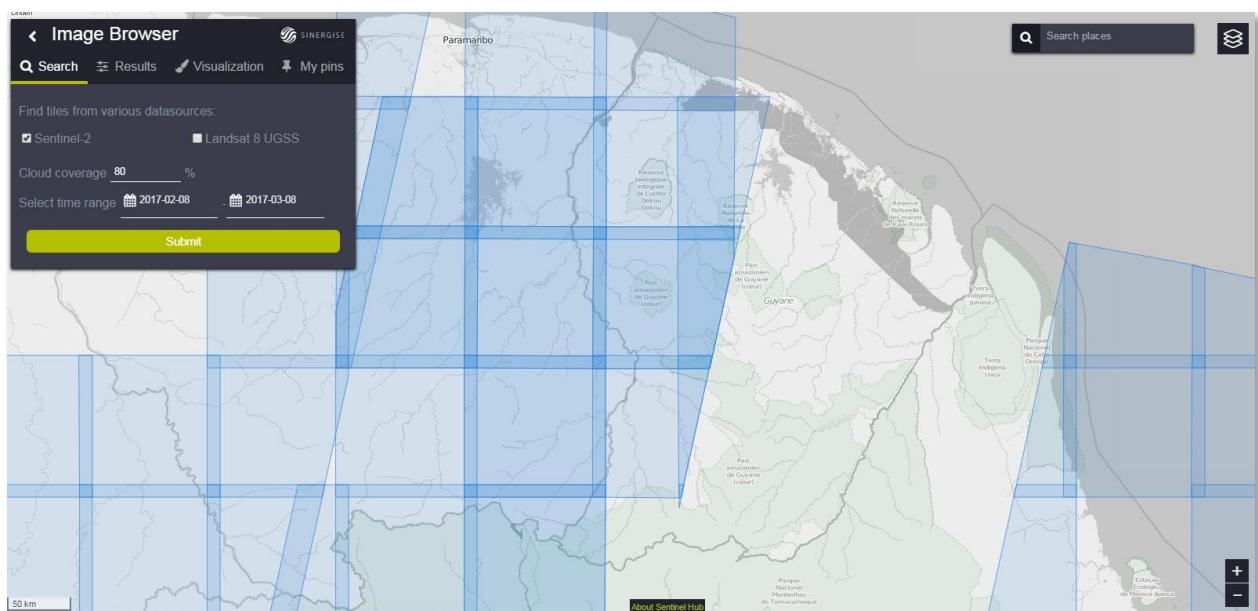


Figure 6 : Site amazonaws.com

3. Identification de la largeur des rivières

L'objectif de ce travail est de savoir, en fonction de leur largeur, quelles sont les rivières ou parties de rivières guyanaises qui peuvent être étudiées par les satellites SENTINEL 2 et LANDSAT 8.

Le travail du calcul de la largeur des rivières a été effectué à partir de la BD CARTHAGE de Guyane correspondant à la version du 30/06/2011 projeté en RGFG_1995_UTM_22N.

Les traitements ont été réalisés à l'aide du Système d'Information Géographie ArcGis©, Version 10.0.

3.1. LARGEUR DE RIVIERES VISIBLES PAR LES DIFFERENTS CAPTEURS

Pour que la valeur radiométrique d'un pixel de rivière soit représentative de la couleur et donc de la turbidité de l'eau d'une rivière (pixel pur), on estime que la largeur de celle-ci fasse au minimum 5 fois la taille d'un pixel. Cette évaluation empirique est illustrée par les figures présentées ci-après sur un méandre de l'Ilini en aval de Saut Sonnelle.

Cette estimation tient compte à la fois de :

- la courbure possible du cours de la rivière en fonction de la position des pixels des images spatiales (Figure 7) ;
- la précision de la digitalisation des informations de la BD_CARTHAGE aux échelles d'étude (Figure 8) ;
- l'ombre portée de la forêt bordière sur la surface des eaux de la rivière (Figure 9) ;
- de la précision du calage géographique des images satellites (Figure 10 et Figure 11).

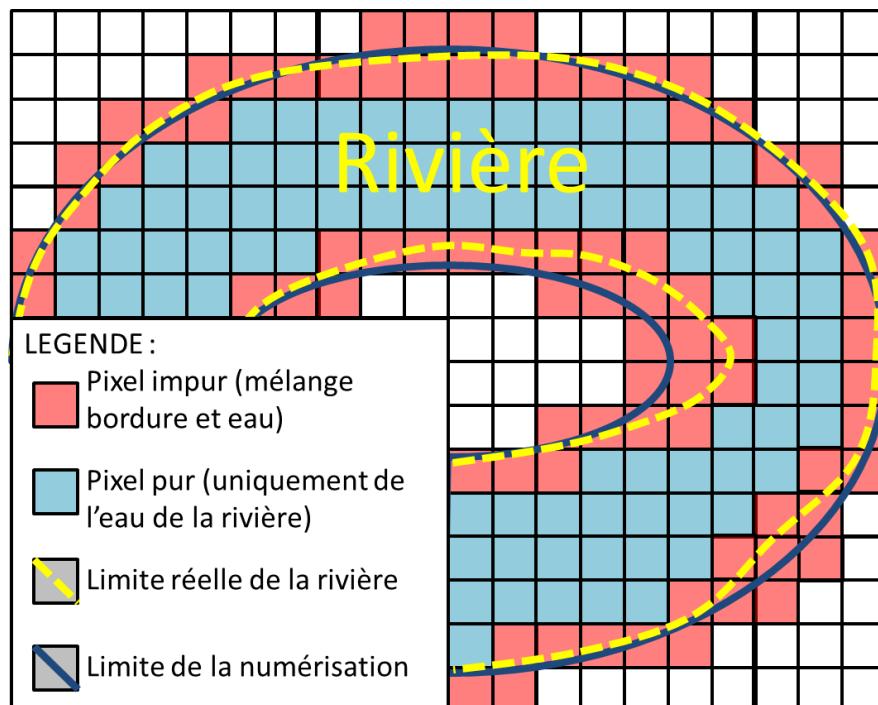


Figure 7 : Représentation des pixels purs et impurs le long d'un cours d'eau d'une rivière

Suivi de la turbidité par télédétection

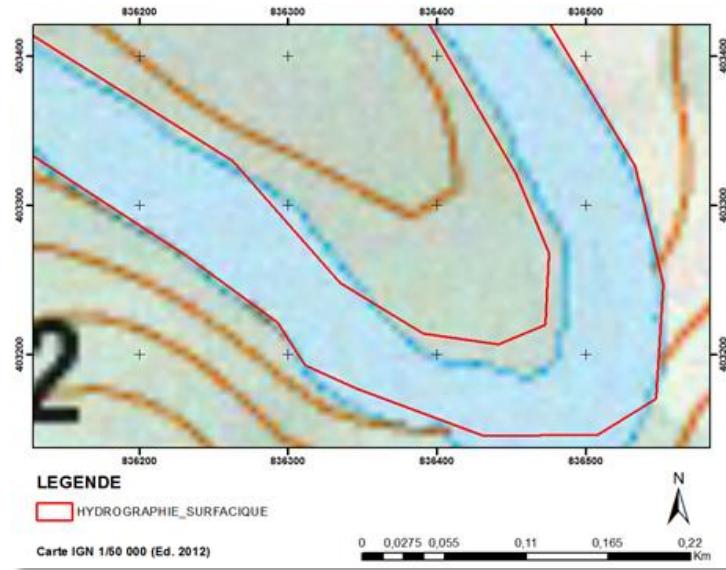


Figure 8 : Limite de l'emprise de la couche HYDROGRAPHIE_SURFACIQUE sur l'Inini par rapport à la carte topographique de l'IGN à 1/50 000

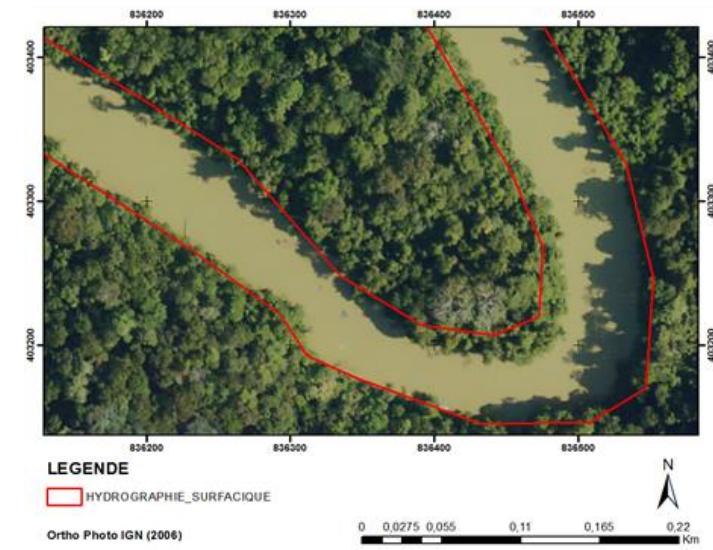


Figure 9 : Limite de l'emprise de la couche HYDROGRAPHIE_SURFACIQUE sur l'Inini par rapport à l'orthophoto de l'IGN.

On peut voir l'importance de l'ombre portée de la forêt bordière sur l'eau

Les cartes des 2 figures ci-dessous montrent, pour un coude de la rivière Inini l'effet de la résolution spatiale sur une image SENTINEL 2 (Figure 10) et une image LANDSAT 8 (Figure 11).

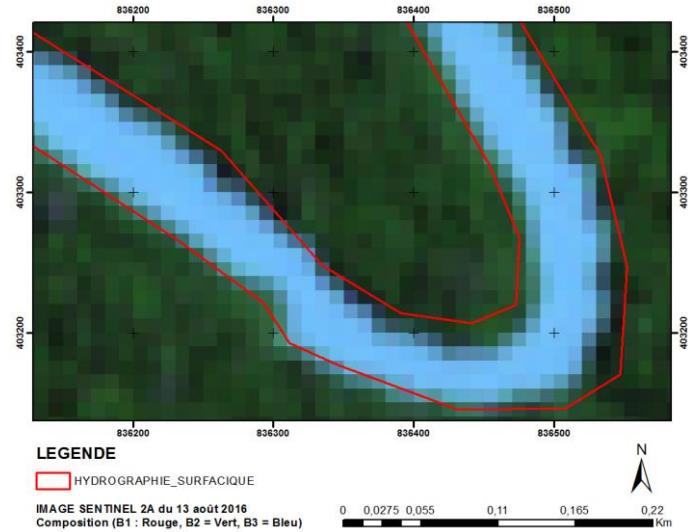


Figure 10 : Limite de la couche HYDROGRAPHIE_SURFACIQUE sur l'Inini par rapport à une image SENTINEL 2

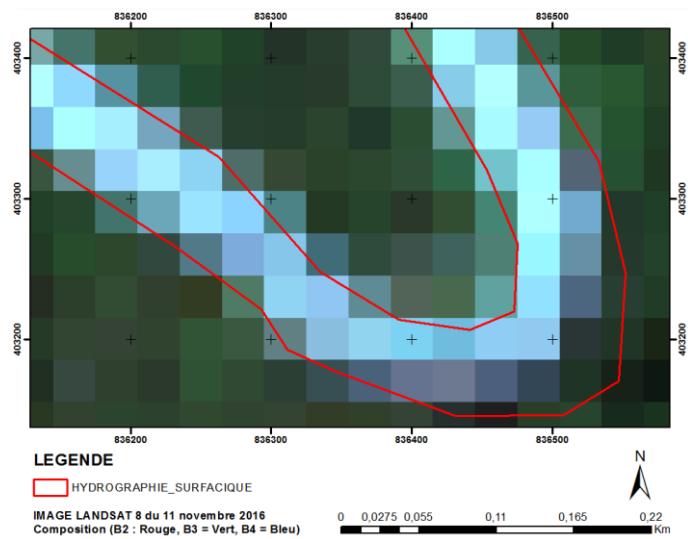


Figure 11 : Limite de la couche HYDROGRAPHIE_SURFACIQUE sur l'Inini par rapport à une image LANDSAT 8

Ainsi, la largeur des rivières visibles par les images SENTINEL 2 doit être supérieure à 50 m et pour les images LANDSAT 8 supérieure à 150 m (Figure 17).

3.2. CARTOGRAPHIE DE LA LARGEUR DES RIVIERES

3.2.1. Définition de la BD CARTHAGE

Le référentiel BD CARTHAGE couvre l'ensemble du territoire hydrographique de la Guyane, ce qui comprend en plus de la Guyane, les parties surinamaises et brésiliennes des bassins versants des fleuves Maroni et Oyapock. L'extraction des bassins versants a été réalisée à partir du modèle numérique

de terrain SRTM² (maille d'une seconde d'arc). Les zones hydrographiques ont été créées en premier. Les régions, secteurs et sous-secteurs ont été constitués ensuite par regroupement des zones générées initialement. Extraction des bassins versants par exploitation du SRTM.

La BD CARTHAGE regroupe les entités ayant trait à l'hydrographie : réseau hydrographique et équipement hydrographique.

Les tronçons hydrographiques élémentaires et les nœuds hydrographiques décrivent le réseau hydrographique structuré par la logique de l'écoulement des eaux.

Définition Sandre : "Le découpage hydrographique est l'ensemble des quatre partitions hiérarchisées du territoire français réalisé selon des aires hydrographiques décroissantes : - région hydrographique (1er ordre), - secteur hydrographique (2ème ordre), - sous-secteur hydrographique (3ème ordre), - zone hydrographique (4ème ordre). Un secteur est découpé suivant un maximum de 10 sous-secteurs et un sous-secteur est découpé suivant un maximum de 10 zones hydrographiques." Le nombre de régions hydrographiques a été fixé à 5 pour la Guyane selon les règles de codification du SANDRE arrêtée en 2004. La détermination de leurs limites est sous la responsabilité de la DEAL Guyane.

3.2.2. Les couches utilisées

Hydrographie surfacique

L'entité hydrographique est un cours d'eau naturel ou aménagé, un bras naturel ou aménagé, une voie d'eau artificielle (canal,...), un plan d'eau ou une ligne littorale. La nature d'une entité hydrographique n'est pas constante sur toute l'entité. Par exemple, un cours d'eau naturel peut être aménagé sur une partie. Tous ces changements peuvent être indiqués en distinguant des sous-milieux sur l'entité. Les entités hydrographiques sont décomposées en deux types :

- les entités hydrographiques linéaires ou cours d'eau,
- les entités hydrographiques surfaciques correspondant aux plans d'eau et aux entités linéaires dont les zones larges (supérieures à 50 mètres) sont représentées par des éléments surfaciques.

Une entité hydrographique surfacique peut être traversée par un cours d'eau, qui sera nommé cours d'eau principal.

Une entité hydrographique est décomposée en éléments hydrographiques de surface. Dans certains cas, une entité hydrographique de surface peut être traversée par un ou plusieurs cours d'eau - cas des plans d'eau. Néanmoins, il n'est retenu qu'une seule entité hydrographique, dit cours d'eau principal du plan d'eau. Par contre, une entité hydrographique peut être traversée / contenir par un ensemble de tronçons élémentaires.

Tronçons hydrographiques élémentaires

Un tronçon hydrographique élémentaire correspond à l'axe du lit d'une rivière, d'un ruisseau ou d'un canal. Les polylignes sont tracées à priori dans le sens de l'écoulement du tronçon. La longueur minimale d'un tronçon est de 200 mètres sur le terrain. Le découpage des tronçons est effectué selon:

- Un changement d'attribut dans les champs de la table,
- Un changement du type de milieu: le tronçon traverse une zone surfacique par exemple,
- Une modification du faciès morphologique du cours d'eau (bras unique, anastomose),
- La présence d'un saut (exprimé par une rupture de pente),

² SRTM : Shuttle Radar Topography Mission fait référence à des fichiers matriciels et vectoriels topographiques fournis par deux agences américaines : la NASA et la NGA (ex-NIMA). Ces données altimétriques ont été recueillies au cours d'une mission de 11 jours en février 2000 par la navette spatiale Endeavour (STS-99) à une altitude de 233 km en utilisant l'interférométrie radar.

- Ces modifications sont identifiées par photo-interprétation des orthoimages disponibles. Cependant, parfois le tronçon hydrographique ne se trouve pas parfaitement au milieu de l'axe de la rivière.

3.3. METHODOLOGIE UTILISEE

La méthodologie est expliquée étape par étape dans le schéma de la Figure 12.

Sur la couche HYDROGRAPHIE_SURFACIQUE :

1. L'ensemble des surfaces hydrographiques hors du territoire guyanais et les zones d'eau libre (lac, étangs...) sont supprimées manuellement.
2. L'ensemble des entités polygonales sont fusionnées entre elles.
3. Le polygone obtenu est transformé en polylignes.
4. Chaque polyligne est transformée en une couverture de points espacés de 10 m entre eux. Le résultat est une couche appelée HYDROGRAPHIE_POINTS10.

Sur la couche TRONCON_HYDROGRAPHIQUE :

1. Les rivières ayant une largeur inférieure de 50 m, c'est-à-dire celles qui ne sont pas incluses dans la couche HYDROGRAPHIE_SURFACIQUE, sont supprimé automatiquement.
2. Les amorces des confluences restantes sont supprimées manuellement (Figure 13).
3. Toutes les polylignes sont fusionnées en une seule.
5. La polyligne est transformée en une couverture de points espacés de 10 m entre eux. Le résultat est une couche appelée TRONCON_POINTS10.

On recherche automatiquement pour chaque point de la couche TRONCON_POINTS10 la distance au point de la couche HYDROGRAPHIE_POINTS10 le plus proche. Cette distance correspond donc à la demi-largeur de la rivière dans l'environnement concerné. En traçant pour chaque point de TRONCON_POINTS10 des cercles ayant comme rayon la distance précédente (zones tampons), on obtient le résultat proposé dans la Figure 15.

Cependant, la distance peut être inférieure à la réelle largeur de la rivière si, à l'origine, la position de la polyligne de TRONCON_HYDROGRAPHIQUE n'était pas parfaitement au milieu de l'axe médian de la rivière (représentée sur HYDROGRAPHIE_SURFACIQUE). C'est ce que l'on peut voir sur la Figure 15 où la couleur bleue de la couche HYDROGRAPHIE_SURFACIQUE apparaît quelque fois.

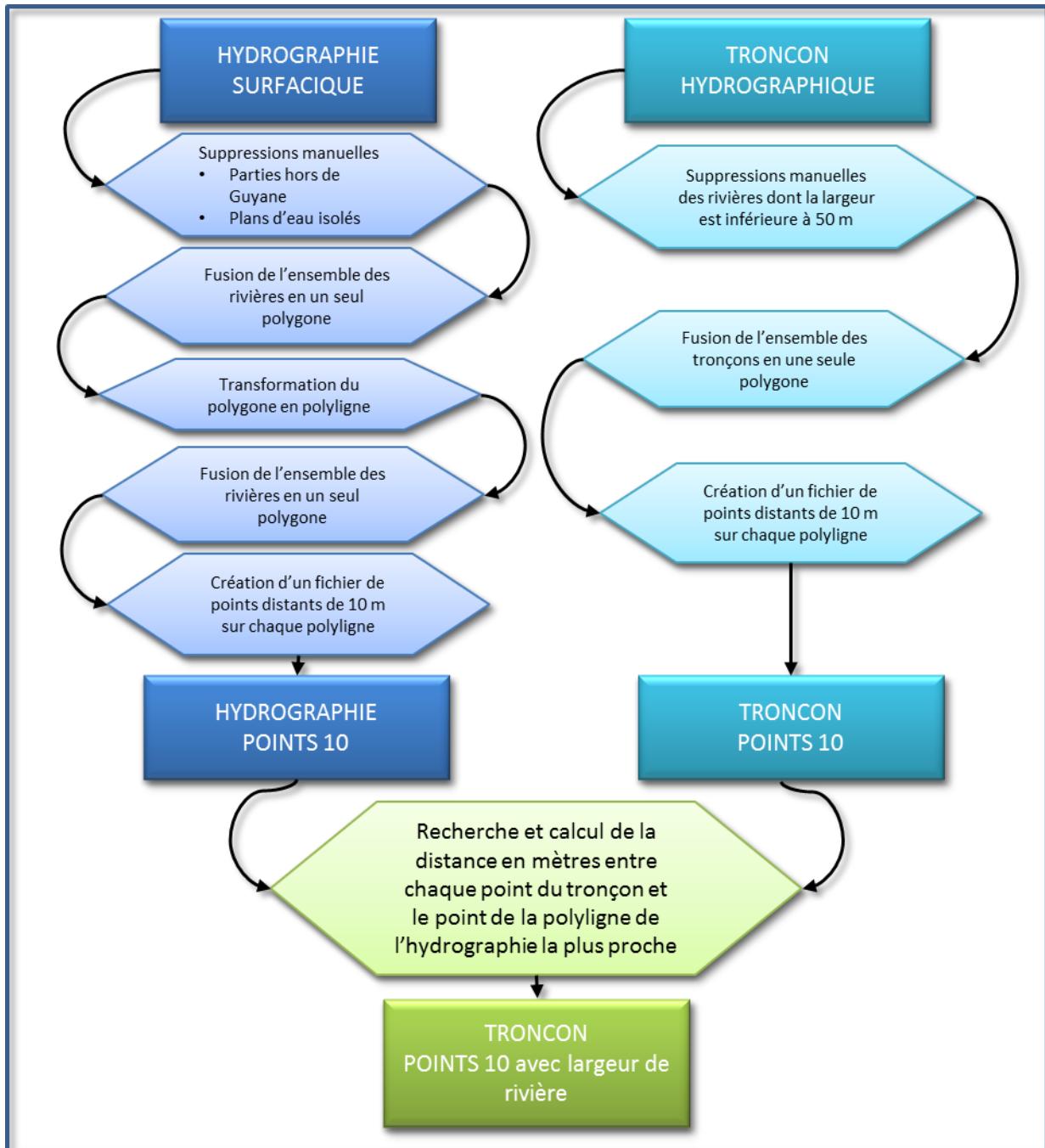


Figure 12 : Schéma méthodologie d'option de la largeur des cours d'eau

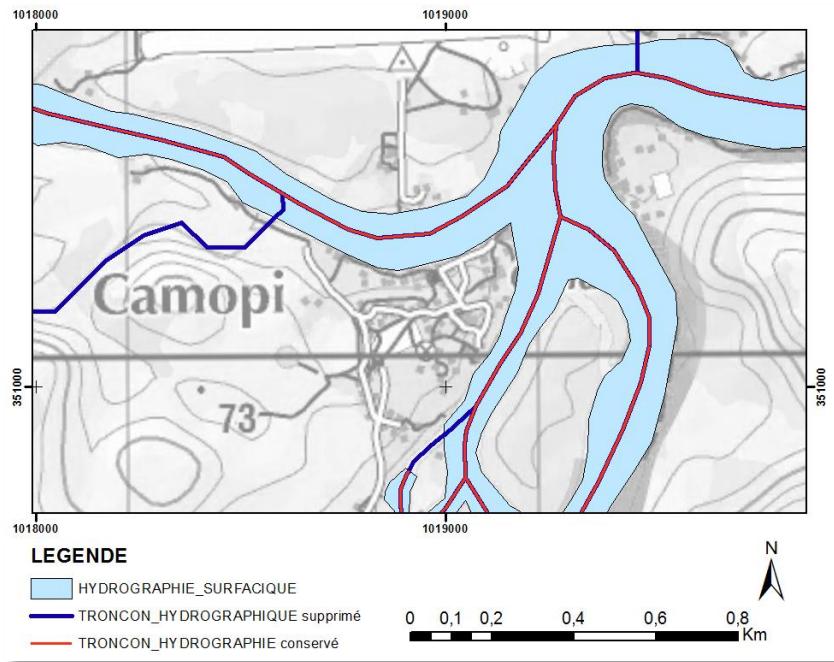


Figure 13 : suppression des tronçons

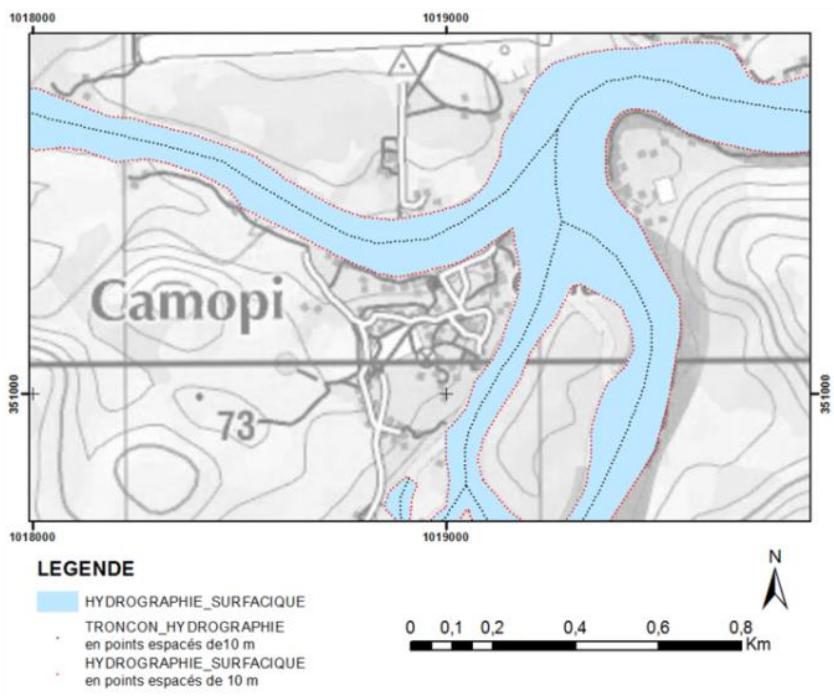
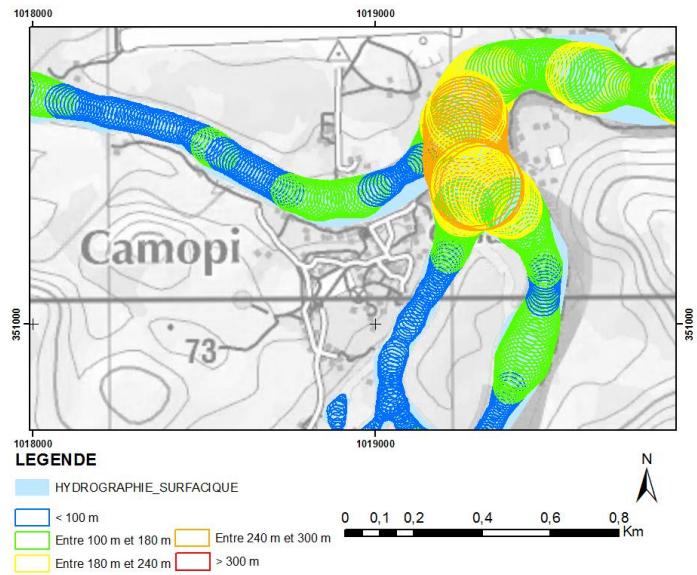


Figure 14 : Passage en fichiers de points



*Figure 15 : Représentation des largeurs sous forme de zones tampons
(Zoom sur la région de l'embouchure de la rivière Camopi)*

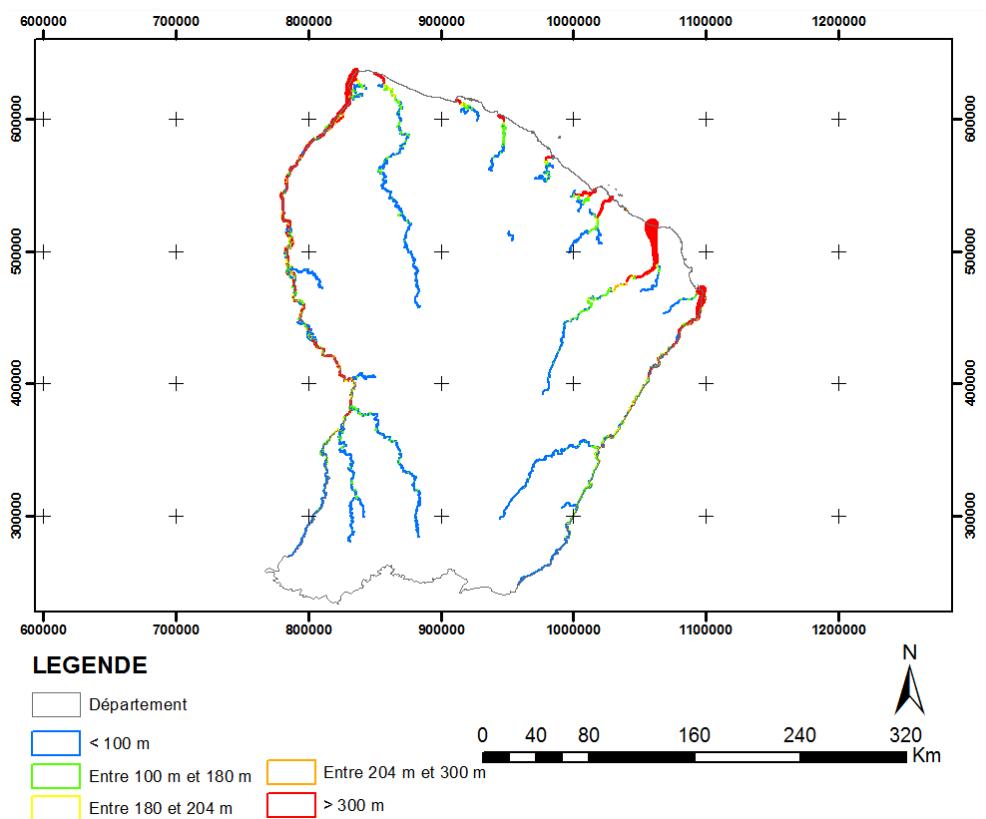


Figure 16 : Représentation des largeurs sous forme de zones tampons

Si l'on parle en distance cumulée, 3 300 km de rivières sont théoriquement utilisables pour calculer des valeurs de turbidité grâce à des images SENTINEL 2 et 700 km par des images LANDSAT 8. Pour mémoire, et d'après les informations de la BD_CARTHAGE, la longueur cumulée du réseau hydrographique guyanais (fichier COUR_EAU de la BD_CARTAGE) est d'environ 110 000 km.

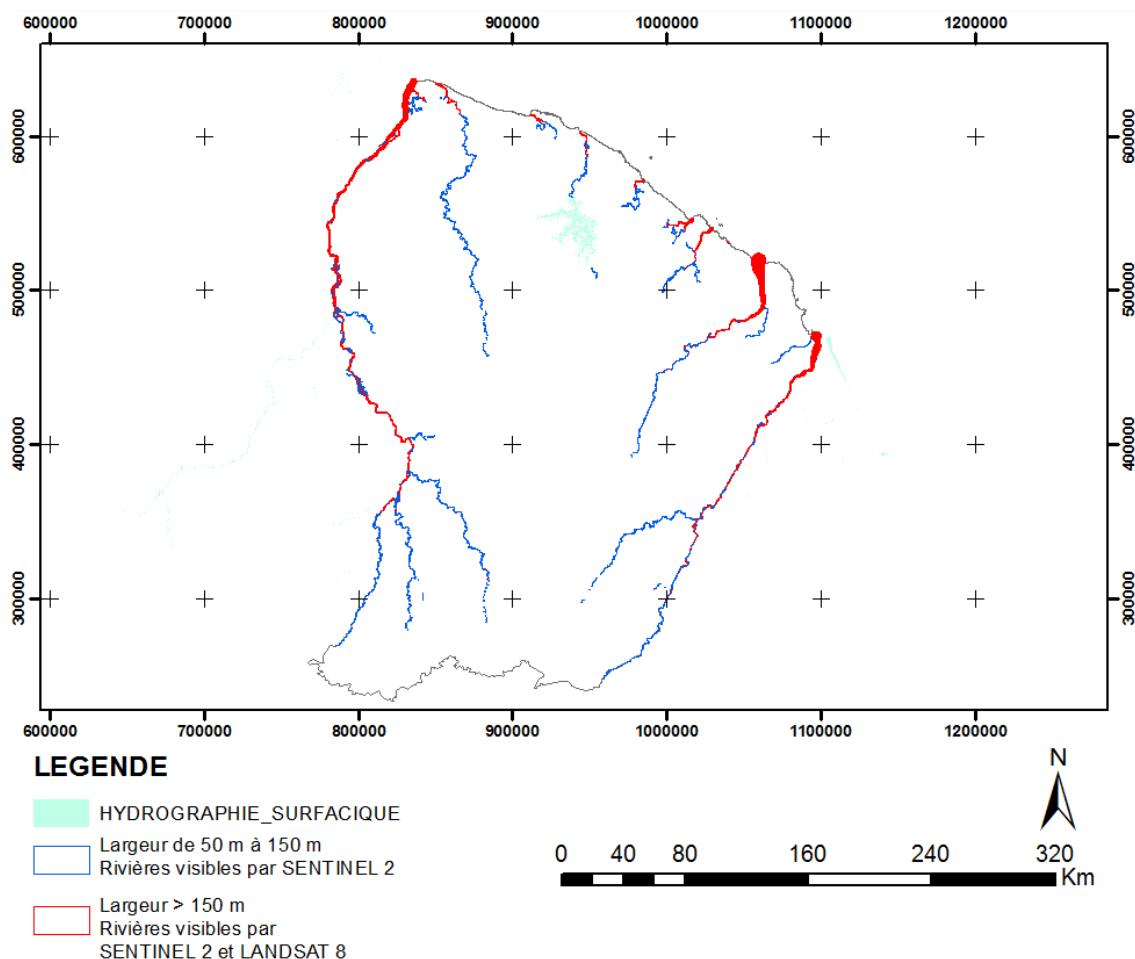


Figure 17 : Carte des largeurs de rivières utilisables pour les images SENTINEL 2 et LANDSAT 8

Les données calculées sont disponibles sous forme de couches de type Shapefile facilement intégrables dans un système d'information géographique.

4. Détermination et contour des perturbations à la surface des rivières

4.1. METHODOLOGIE

L'objectif de cette étude est de trouver une méthode originale pour aider à l'indentification des zones de nuages, leurs ombres et les zones de réflexion spéculaire présente sur les images SENTINEL-2.

Après une étude bibliographique (BERBAR M.A. & al. (2004) ; HAGOLLE O. & al (2010) ; HEDLEY J. & al., (2012) ; LIU K. & al. (2013) ; MANDANICI E. & al., (2016) ; SINGH K.K. & al. (2012)), CESBIO (2015), la méthode proposée est basée sur une approche multiday dont l'une des scènes présente le moins de perturbations atmosphériques possibles.

4.1.1. Choix de la meilleure bande spectrale

Une première tâche a consisté à déterminer quelle serait la bande spectrale la plus discriminante pour permettre ce travail.

Pour ce faire, nous avons réalisé un profil en long de la rivière Inini sur l'image SENTINEL 2A du 13 août 2016 (image sans nuage) en relevant les valeurs radiométriques enregistrées des bandes 2, 3, 4 et 8 (Figure 18).



Figure 18 : Profil en long sur l'Inini

Ces valeurs ont été reportées dans le graphe de la Figure 21.

NB : Les droites linéaires de cette figure représentent la courbe tendance pour le calcul des moindres carrés du type $y = mx + b$ (m étant la pente et b l'ordonnée à l'origine). Pour cette date et quelle que soit la bande spectrale observée, on note une décroissance de la valeur moyenne de la réflectance de l'amont vers l'aval. D'après les études déjà réalisées, cette baisse de réflectance indique une diminution de la turbidité de l'amont vers l'aval.

On s'aperçoit que les valeurs de la bande 8 (proche infrarouge ou SWIR) présentent les plus grandes variabilités radiométriques, notamment pour l'indentification de zones perturbées le long du cours de la rivière (zone de réflexion spéculaire ou de hauts-fonds, zones d'ombre). C'est donc avec cette bande que notre expérimentation multiday sera réalisée.

Notre expérimentation multiday a été réalisée à partir de 2 scènes SENTINEL 2A situées sur l'embouchure de la rivière Inini :

- la scène sans nuage datée du 13 août (Figure 19 et Figure 20) ;
- une scène présentant un relativement faible taux de couvert nuageux sur la zone étudiée datée du 22 septembre.

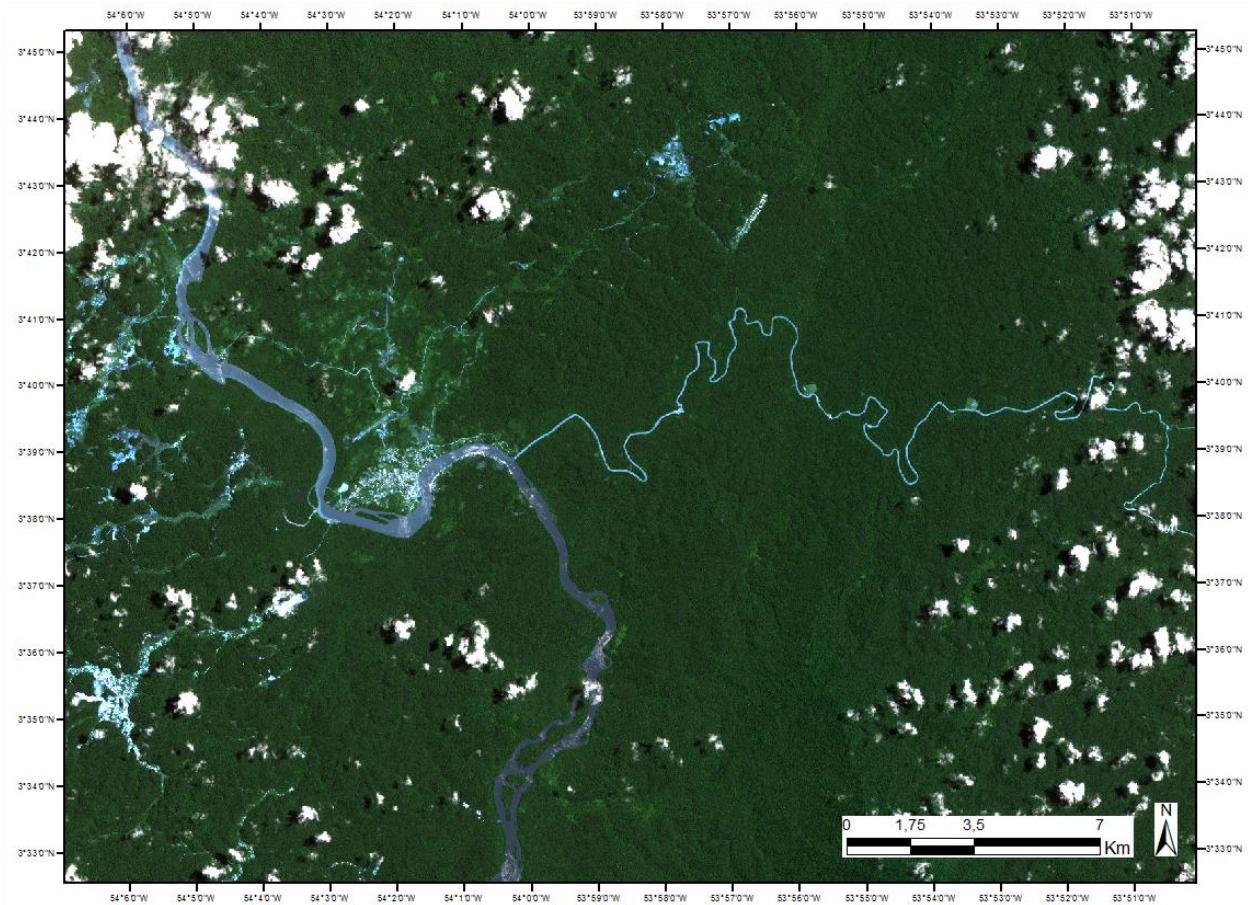


Figure 19 : Scène SENTINEL 2 du 13 août 2016

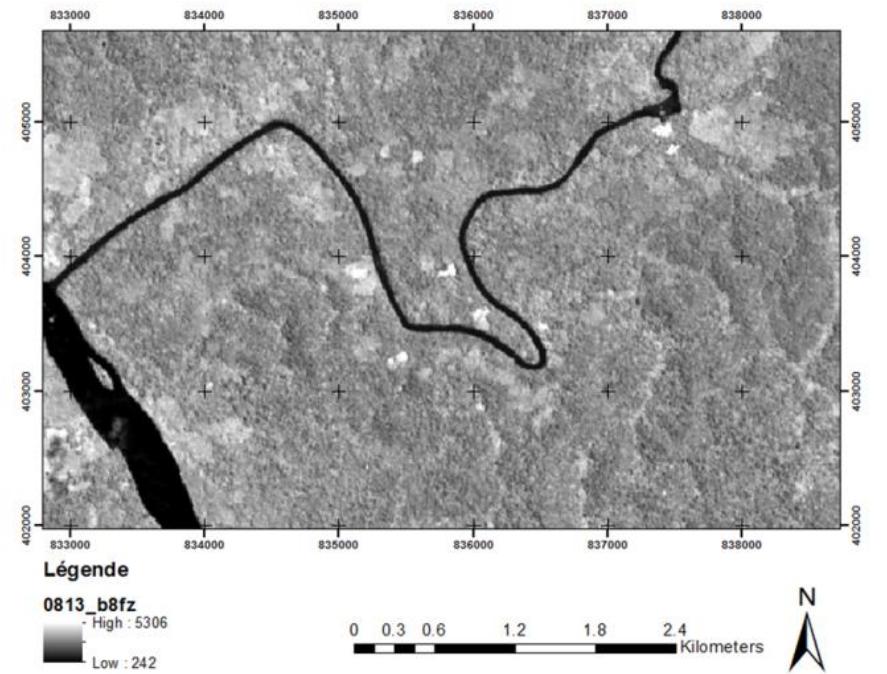


Figure 20 : Bande 8 (SWIR) de la scène SENTINEL 2A du 13/08/2016

Suivi de la turbidité par télédétection

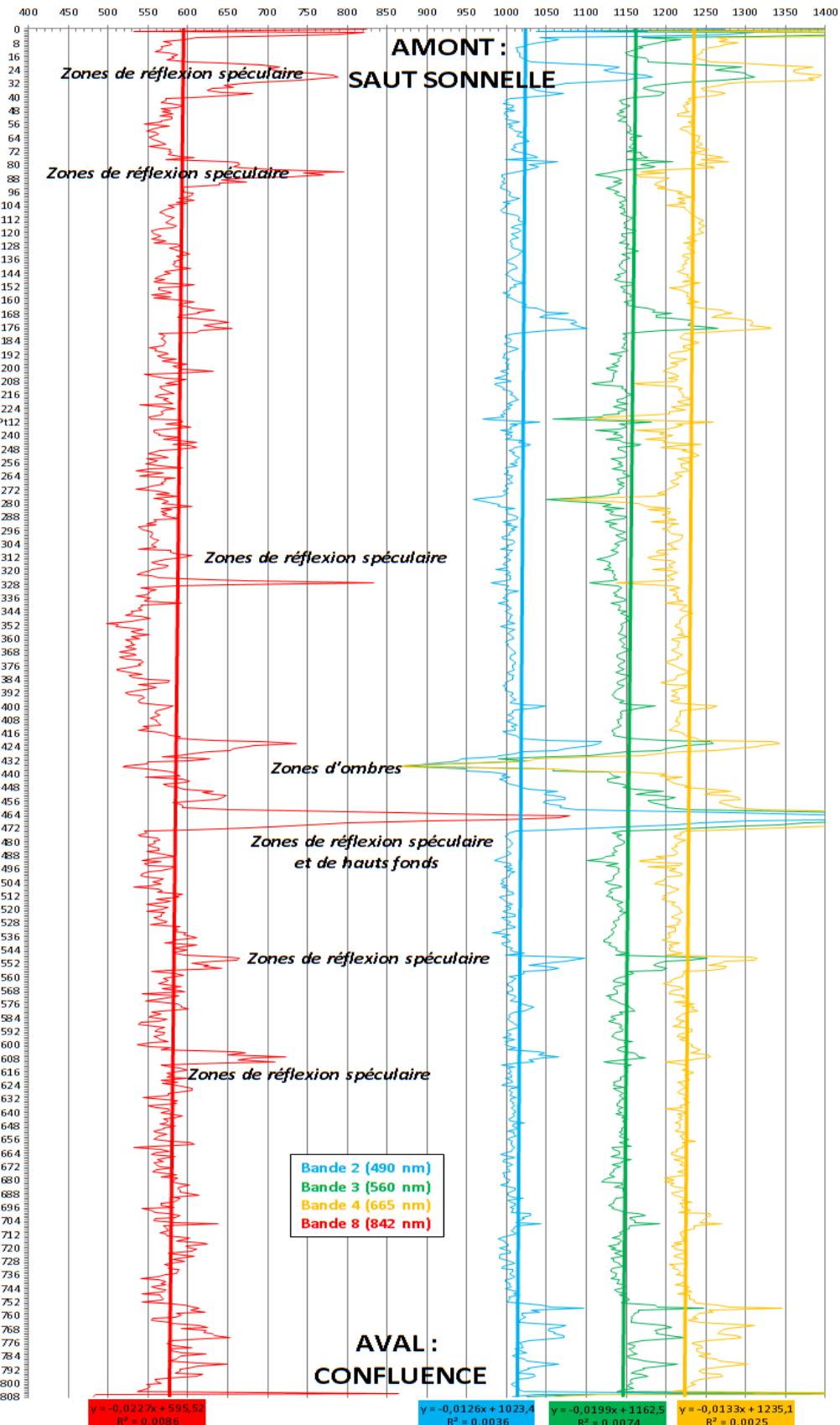


Figure 21 : Valeurs de réflectance du profil en long sur l'Inini (Image SENTINEL 2 du 13/08/2016)

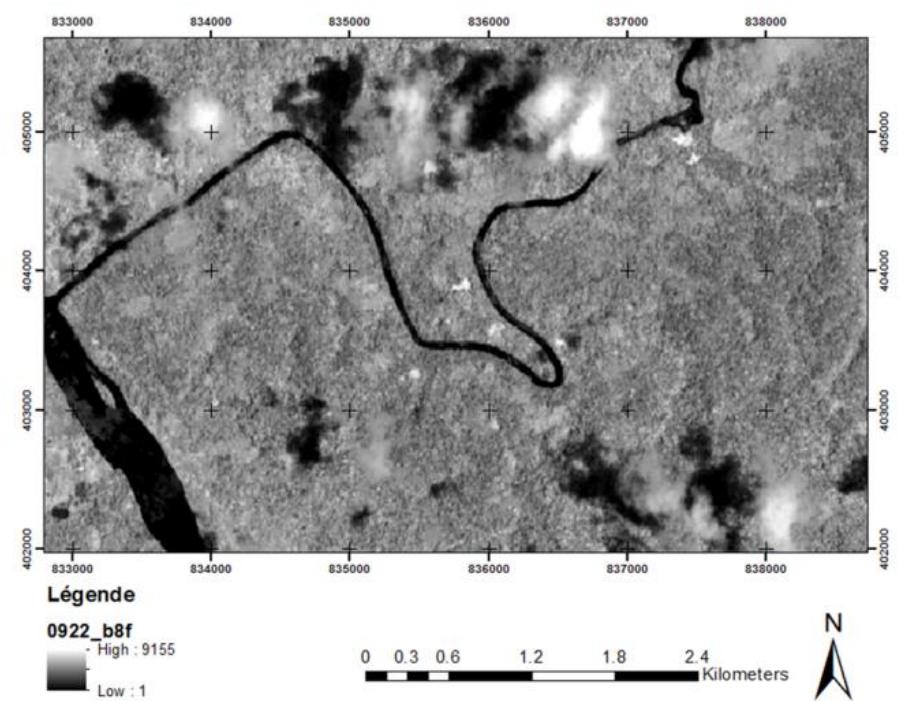


Figure 22 : Bande 8 (SWIR) de la scène SENTINEL 2A du 22/09/2016

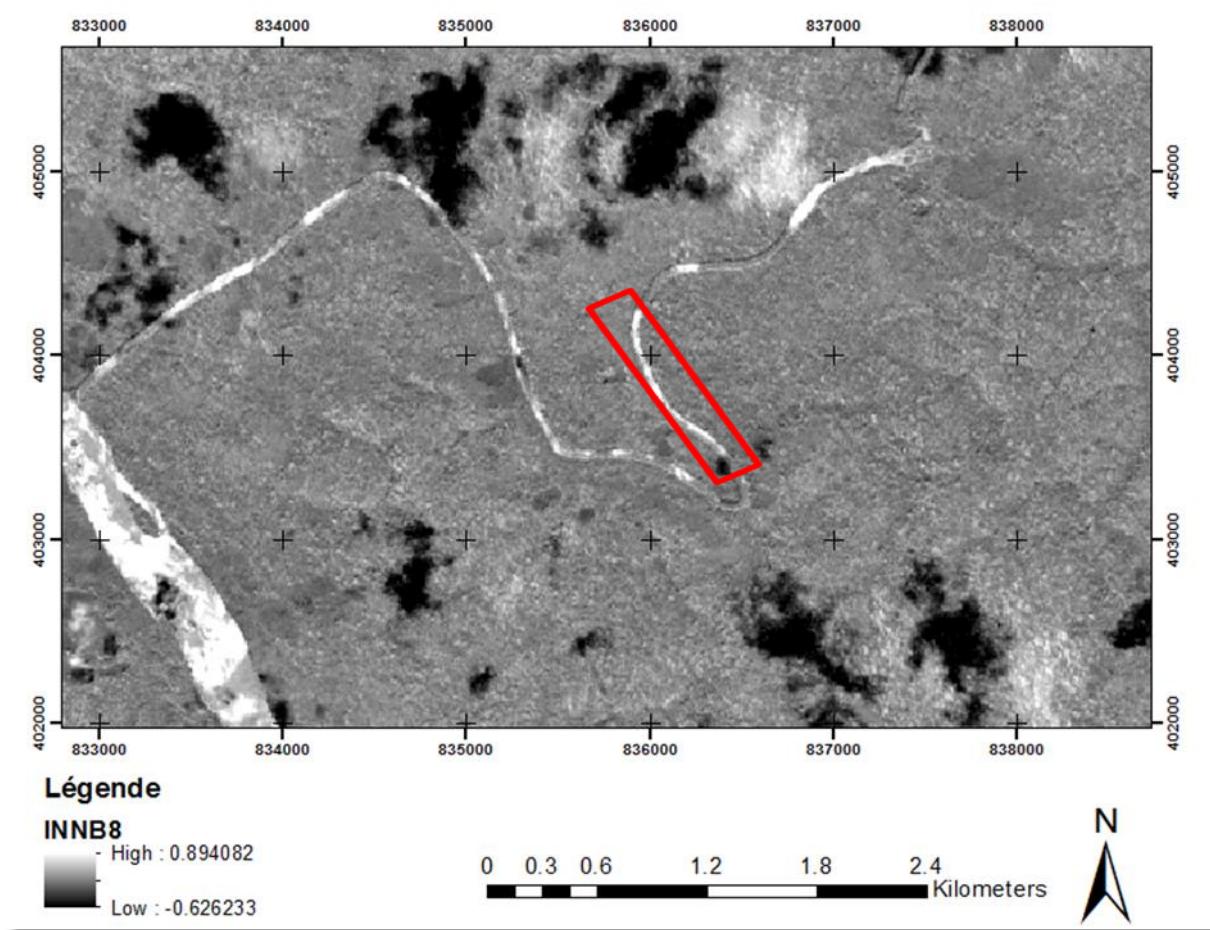
4.2. CALCUL DE L'INDICE NORMALISE

Le principe est basé sur le calcul d'un indice normalisé axé sur l'utilisation de la bande 8 (SWIR) de SENTINEL :

$$IN_{B8} = \frac{B8_{\text{avec nuage}} - B8_{\text{sans nuage}}}{B8_{\text{avec nuage}} + B8_{\text{sans nuage}}}$$

Le résultat est montré dans la Figure 23.

Le résultat de l'indice normalisé des nuages sur les rivières permet également de mettre en évidence les zones de réflexion spéculaire entre les deux dates d'acquisition des images (Figure 23).



*Figure 23 : Indice normalisé des nuages IN_{B8} sur la bande 8 du satellite Sentinel-2
En blanc les zones avec un fort indice. En noir les zones avec un faible indice. Dans le rectangle rouge,
un exemple de zones de réflexion spéculaire (en clair).*

4.3. CHOIX DU SEUIL

Pour faire apparaître les nuages, leurs ombres et les zones de réflexion spéculaire, il est nécessaire d'effectuer un seuillage manuel et visuel des valeurs obtenues dans IN_{B8} .

Ainsi, dans notre cas (image du 22/09/2016) si $IN_{B8} < 0$ ou si $IN_{B8} > 0,2$, alors il y a présence de nuages, d'ombres ou de réflexion spéculaire (Figure 24).

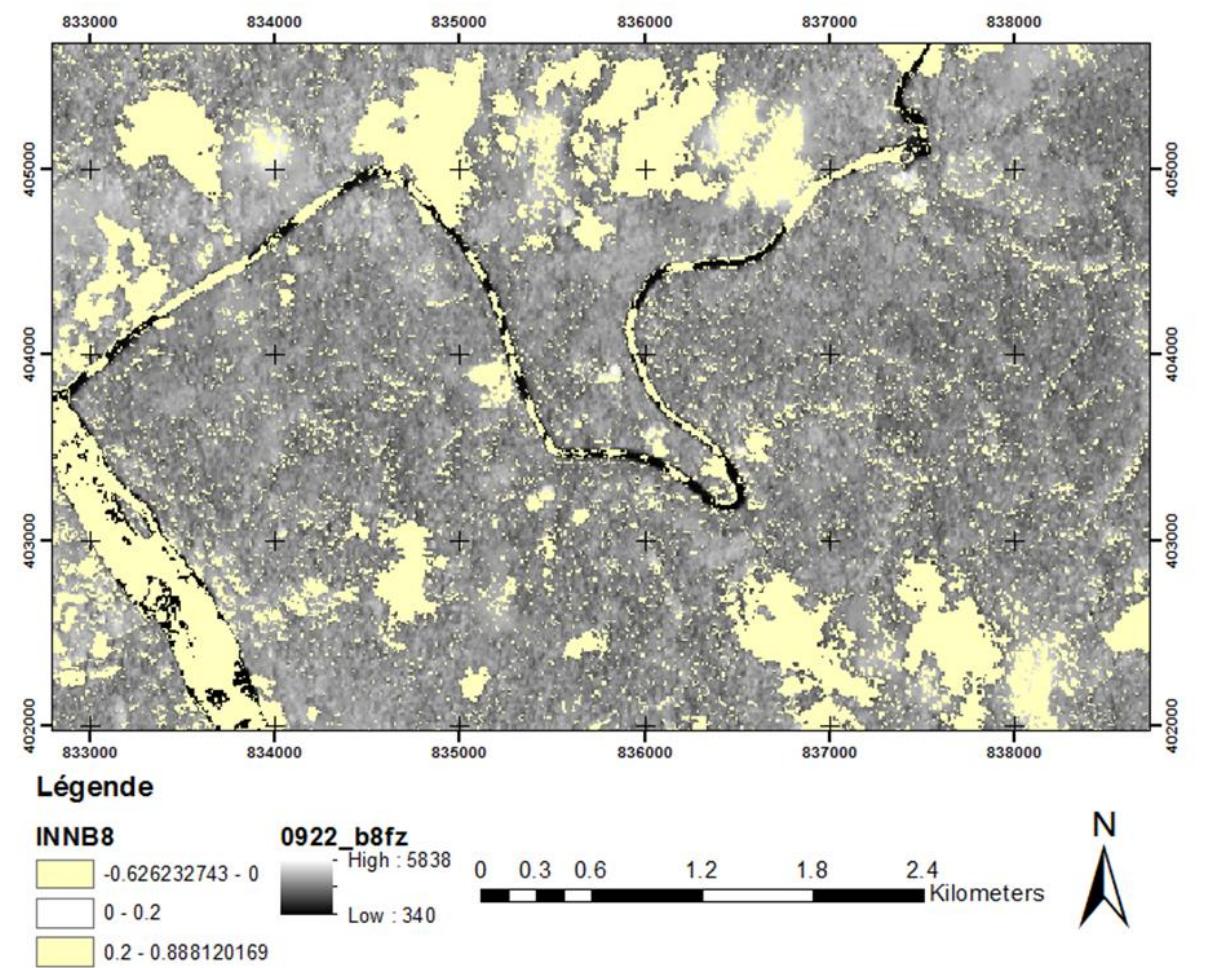


Figure 24 : Choix des seuils pour la sélection des zones correspondant aux nuages, ombres et zones de réflexion spéculaires. (en fond : Bande 8 de l'image SENTINEL 2A du 22 septembre 2016).

Cependant cette technique ne permet pas bien de mettre en évidence les ombres des nuages au niveau des rivières.

La technique proposée pour tenter de résoudre ce problème est de réaliser l'inverse de l'indice normalisé précédent à savoir :

$$IIN_{B8} = \frac{B8_{\text{avec nuage}} + B8_{\text{sans nuage}}}{B8_{\text{avec nuage}} - B8_{\text{sans nuage}}}$$

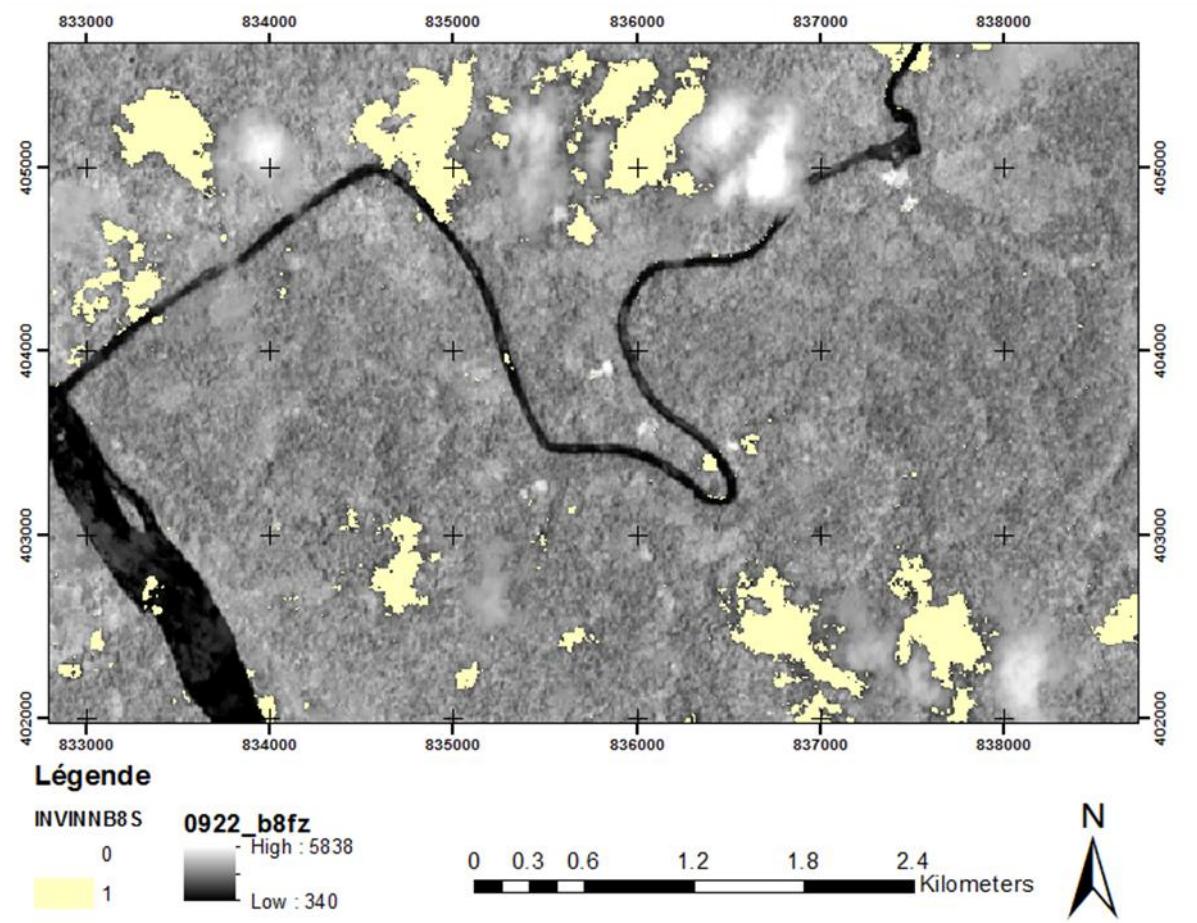


Figure 25 : Inverse de l'indice normalisé sur la bande 8. En jaune les valeurs comprises entre -10 et 0. (en fond : Bande 8 de l'image SENTINEL 2A du 22 septembre 2016).

Le schéma de la Figure 26 montre le processus permettant d'obtenir les zones de rivières présentant soit des nuages, leurs ombres ou des réflexions spéculaires à partir des index calculés précédemment.

1. La première étape consiste à calculer les deux index IN_{B8} et IIN_{B8} précédemment explicités.
2. Les index sont ensuite seuillés manuellement. Ainsi dans le cas présenté :
 - Les valeurs l' IN_{B8} retenues doivent être positives et inférieur à 0,2 ;
 - Les valeurs l' IIN_{B8} retenues doivent être comprises entre -10 et 0.
3. Les résultats obtenus étant en mode raster (image), l'étape suivante consiste en leur vectorisation automatique sous forme de polygones.
4. En ce qui concerne le résultat vectorisé de l' IIN_{B8} , celui-ci doit être augmenté (zones tampons) afin que les ombres sur les rivières, non décelables en SWIR, puissent être quand-même prises en compte. La taille de la zone tampon utilisée est donc égale à une valeur légèrement plus importante que la moitié de la largeur moyenne de la partie de rivière étudiée. Dans notre cas, l'Inini possède une largeur moyenne de 50 m. Nous avons donc pris une zone tampon de 28 m.
5. Les résultats obtenus en 3 et 4 sont ensuite découpés sur la rivière à l'aide du fichier HYDROGRAPHIE_SURFACIQUE de la BD_CARTAGE et fusionnés entre eux.

Le résultat final est présenté par la Figure 27. Il en résulte que peu de portions de rivière peuvent être utilisées pour permettre une évaluation de la turbidité sur l'image du 22 septembre 2016.

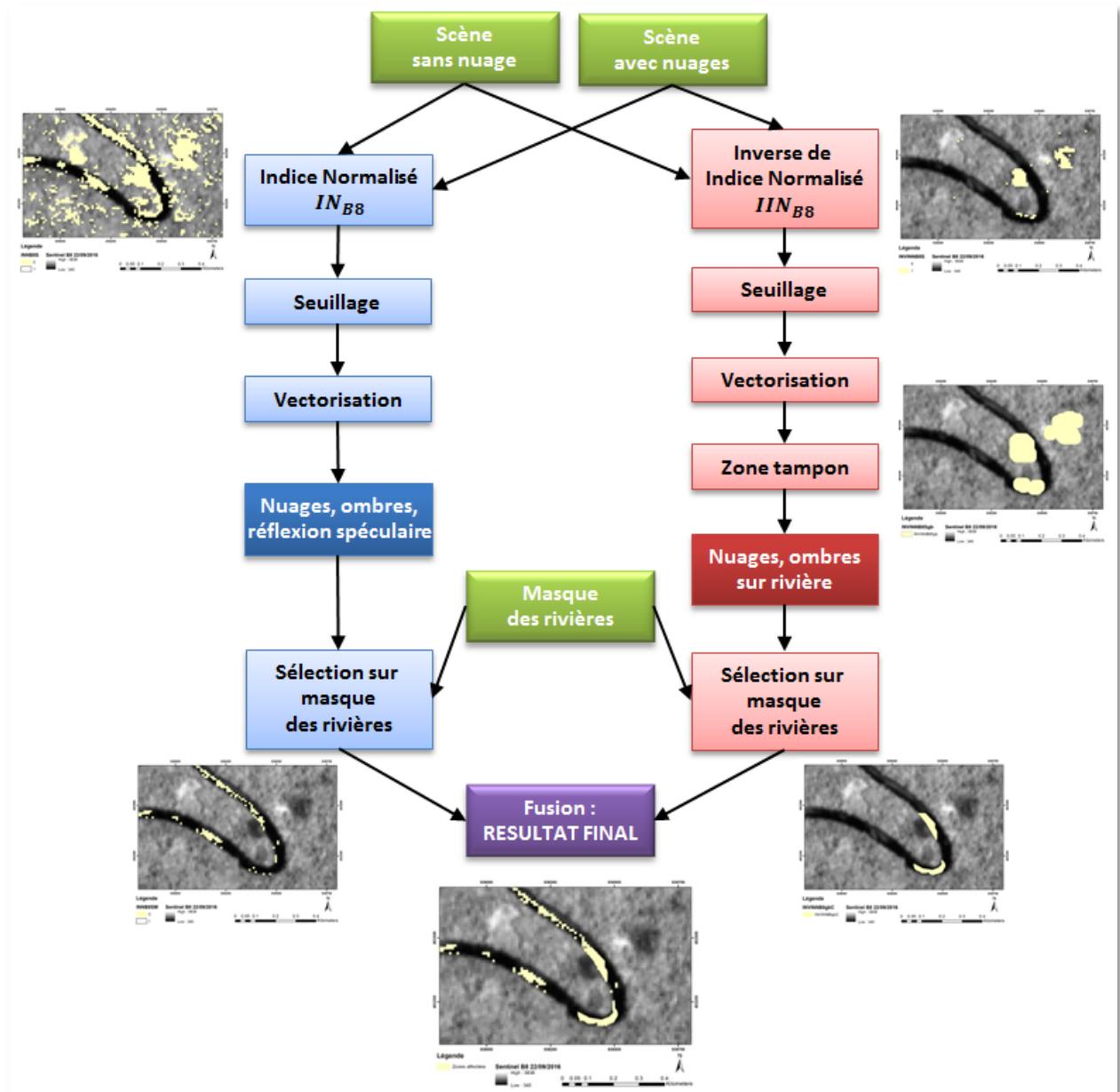


Figure 26 : Processus d'obtention du masque des nuages, leurs ombres et des réflexions spéculaires sur les portions de rivière

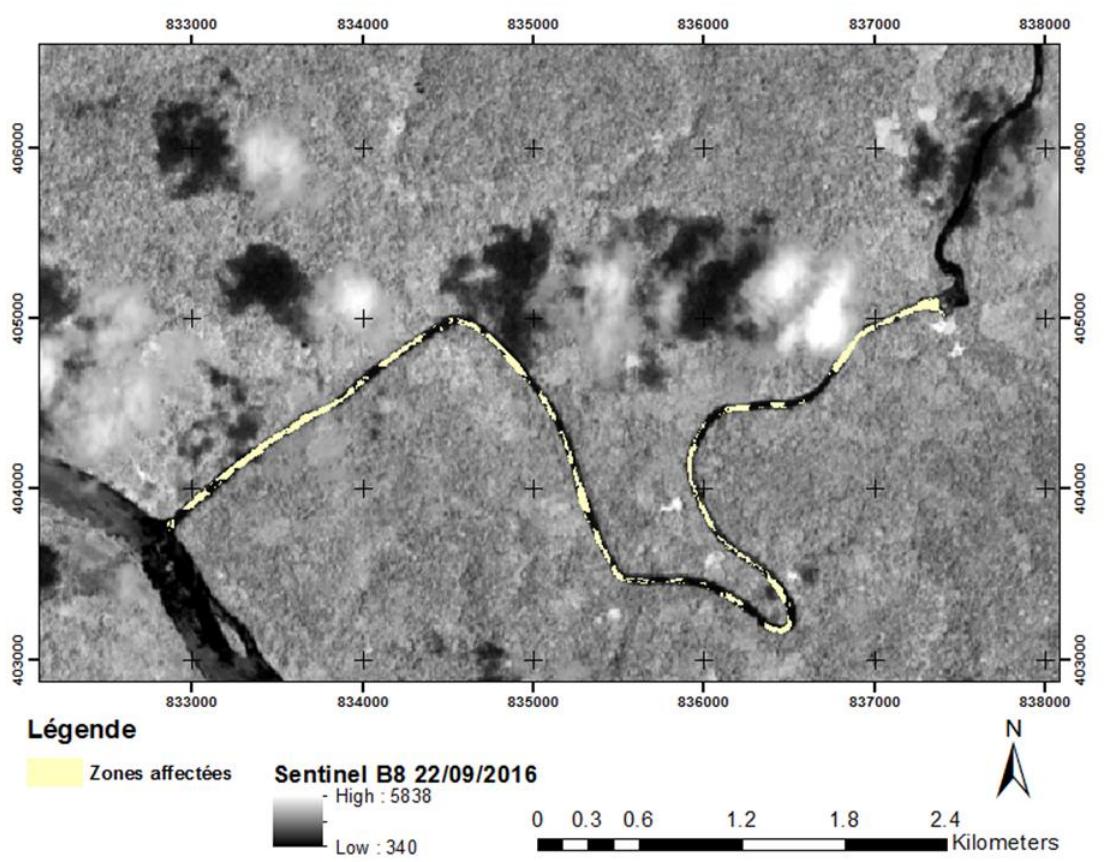


Figure 27 : Image résultante du contournage des nuages, des ombres des nuages et de la réflexion spéculaire sur l'Inini le 22/09/2016.

4.4. CONCLUSIONS

Si une méthode simple a été trouvée pour essayer de délimiter les zones de nuages, d'ombre et de réflexion spéculaires, celle-ci doit tout de même être seuillée manuellement. Pour l'instant, aucune méthode ne semble être universelle pour permettre une identification automatique des nuages et de leurs ombres.

Une étude menée par le CESBIO³ (HAGOLLE, 2017) qui a permis de comparer des masques obtenus par différents algorithmes (MACCS/MAYA, Sen2Cor de l'ESA) avec une étude de photo-interprétation visuelle menée par la société GEOSYS, montre à chaque fois des résultats différents. Cet auteur conclue tout de même que les résultats obtenus avec la chaîne MACCS/MAYA sont les plus proches de la réalité.

C'est ce traitement MACCS/MAYA qui est donc utilisé pour délivrer les images SENTINEL 2 en produit de niveau 2A c'est-à-dire sous forme d'une image monodate ortho-rectifiée, exprimée en réflectance de surface, accompagnée d'un masque de nuages/ombres de nuages/neige/eau.

Actuellement, Le CESBIO et THEIA⁴ proposent ce niveau de traitement uniquement sur la métropole. On peut peut-être espérer des images sur la Guyane après la mise en opérationnalité de SENTINEL 2B.

³ Le Centre d'Etudes Spatiales de la BIosphère CESBIO a la vocation de développer les connaissances sur le fonctionnement et la dynamique de la Biosphère continentale à différentes échelles spatiales et temporelles.

⁴ Le Pôle Thématique Surfaces Continentales THEIA a pour vocation de faciliter l'usage des images issues de l'observation des surfaces continentales depuis l'espace. THEIA met à disposition de la communauté scientifique et des politiques publiques une vaste panoplie d'images à différentes échelles, des méthodes et des services.

5. Corrélations des réflectances de SENTINEL 2 avec des mesures de turbidité in situ

5.1. PRESENTATION

Pour tenter de calibrer le signal enregistré par SENTINEL 2 en termes de turbidité de surface, deux campagnes de mesures ont été spécifiquement réalisées (voir annexe 1 et 2) :

- L'une par le BRGM en collaboration avec le PAG (Parc Amazonien Guyanais) sur l'Inini le 14 novembre 2016 ;
- L'autre uniquement par le PAG sur la Camopi le 12 juin 2016 ;

Malheureusement, pour l'une comme pour l'autre date, nous n'avons pas pu avoir des données SENTINEL sans nuage aux dates concernées. Les deux dates d'acquisition les plus proches sont :

- le 11/11/2016 pour l'ININI (Figure 28) soit 3 jours de décalage ;
- le 01/06/2016 pour la CAMOPI (Figure 29) soit 11 jours de décalage. Cette image présente trop de perturbations atmosphériques, notamment au niveau des points de mesures in situ, ce qui ne nous a permis de l'utiliser pour le reste de notre étude.

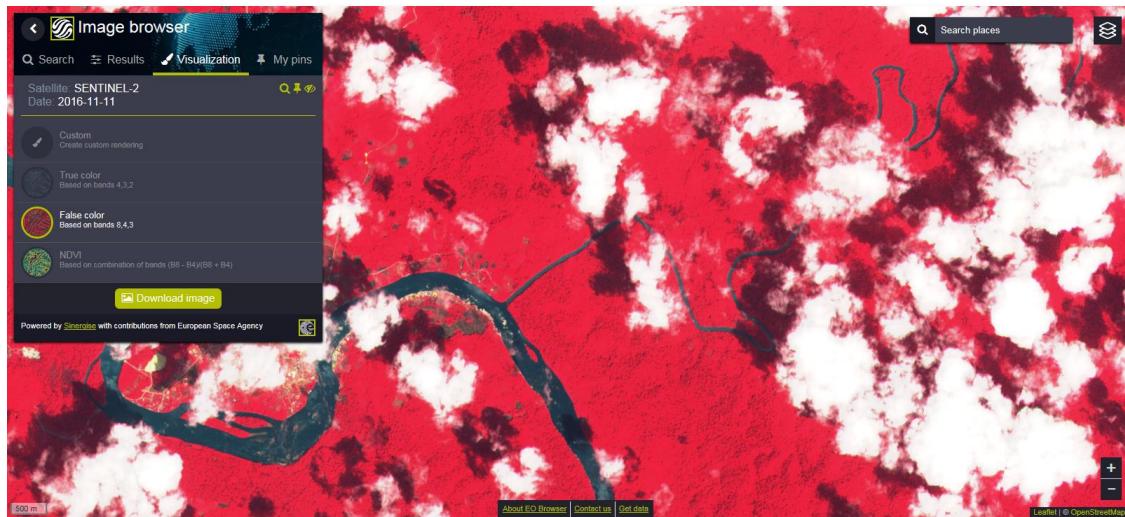


Figure 28 : Image SENTINEL 2 sur l'ININI du 11/11/2016

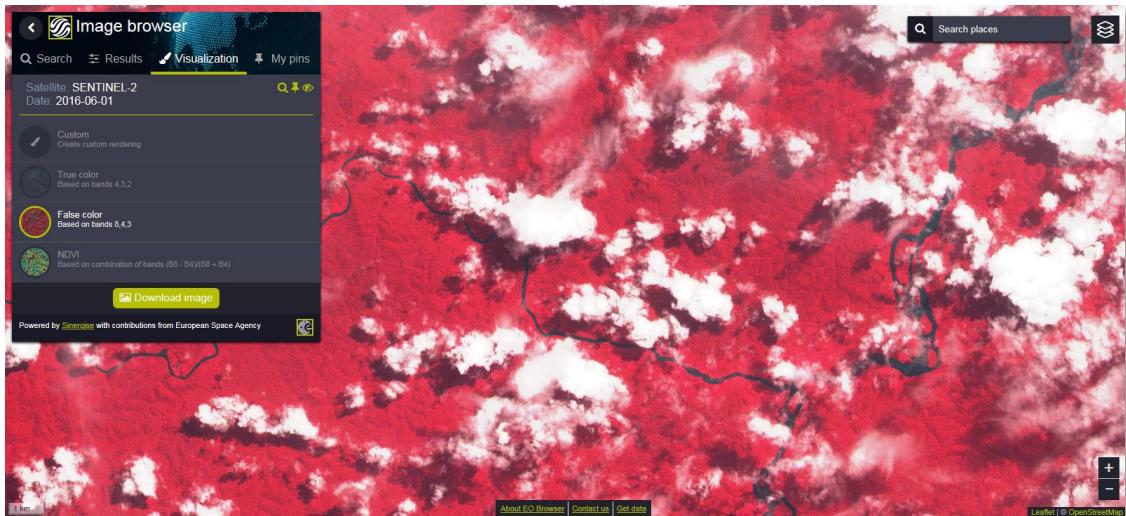


Figure 29 : Image SENTINEL 2 sur la CAMOPI du 01/06/2016

5.2. RECHERCHE DE LOI DE CORRELATION

Nous avons essayé de calibrer le signal enregistré par les 4 bandes à 10 m de résolution de l'image SENTINEL 2A acquises le 11/11/2016 avec la campagne de mesure in situ effectuée par le BRGM le 14 novembre (Figure 30). Seuls les points de mesures de turbidité 1, 2, 4, 8, 9, 13, 15 et 19 ont été retenus du fait de l'absence de nuage, d'ombre ou de réflexion spéculaire.

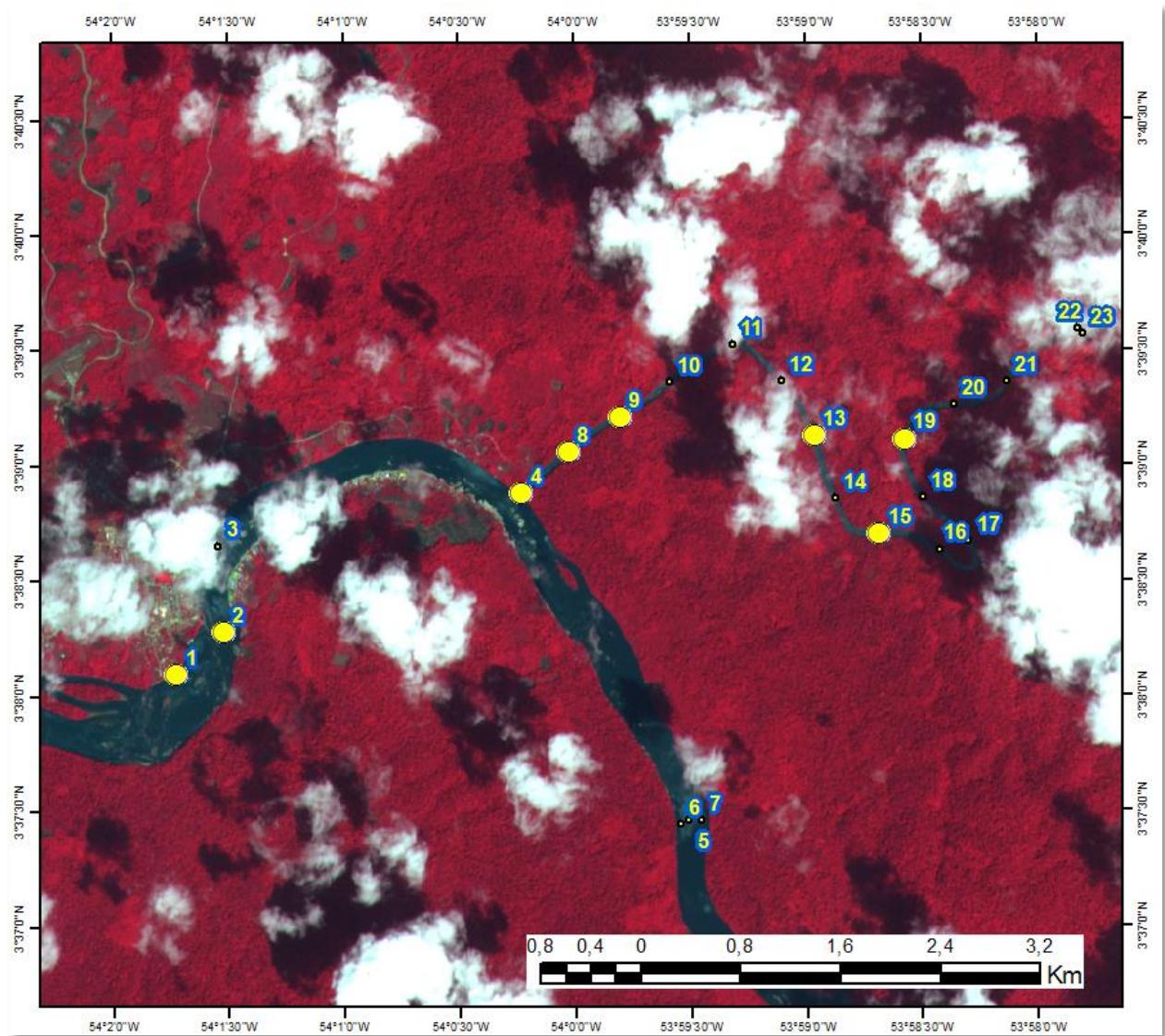


Figure 30 : Points de mesure de turbidité sur l'image SENTINEL du 11/11/2016
Les gros points en jaune sont ceux qui ont été retenus

Les résultats des lois de régression linéaire bande par bande sont fournis ci-après.

5.2.1. Pour la bande 2

Cette bande correspond aux longueurs d'onde dans le bleu. Les résultats sont les suivants (Figure 31) :

$$\text{Turbidité NTU} = 0,106 * \text{Réflectance B2} - 86,722$$

Avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,812$ et un intervalle de confiance de 95%.

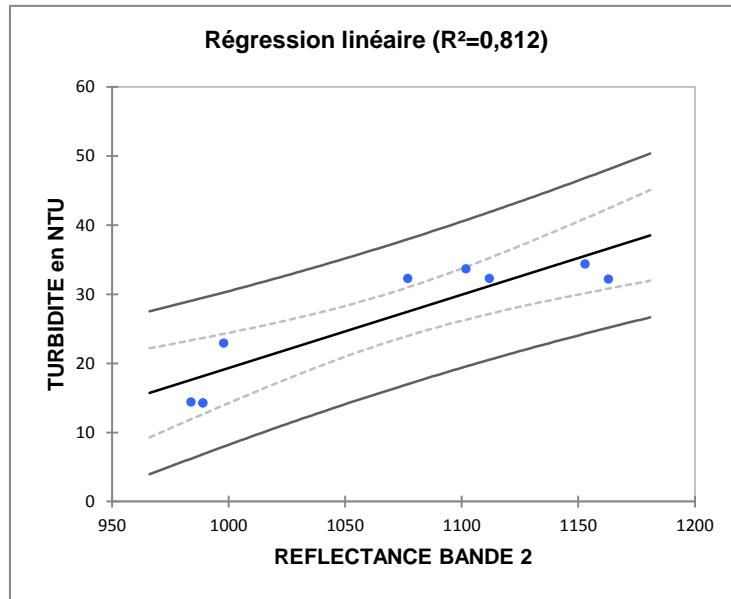


Figure 31 : Loi de régression de la Bande 2

5.2.2. Pour la bande 3

Cette bande correspond aux longueurs d'onde dans le vert. Les résultats sont les suivants (Figure 32) :

$$\text{Turbidité}_{\text{NTU}} = 0,064 * \text{Réflectance}_{\text{B3}} - 41,436$$

Avec un $R^2 = 0,969$ et un intervalle de confiance de 95%.

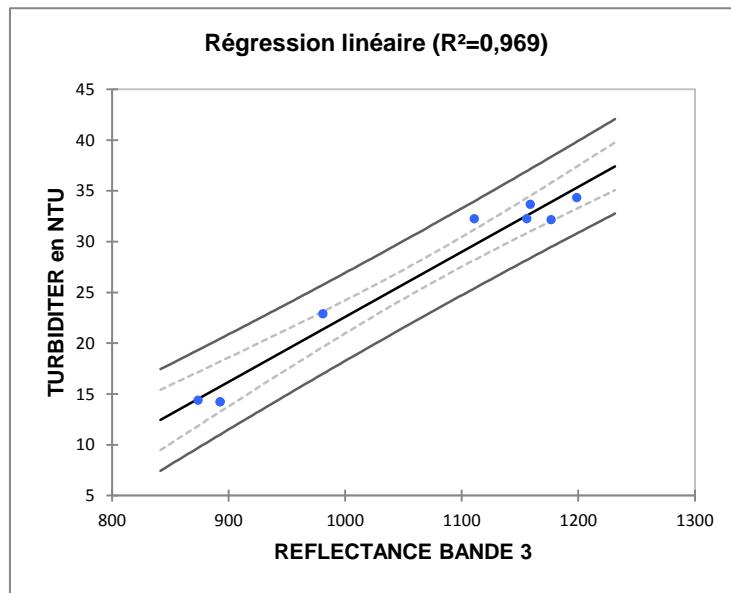


Figure 32 : Loi de régression de la Bande 3

5.2.3. Pour la bande 4

Cette bande correspond aux longueurs d'onde dans le rouge. Les résultats sont les suivants (Figure 33) :

$$\text{Turbidité NTU} = 0,054 * \text{Réflectance B}_4 - 23,516$$

Avec un $R^2 = 0,976$ et un intervalle de confiance de 95%.

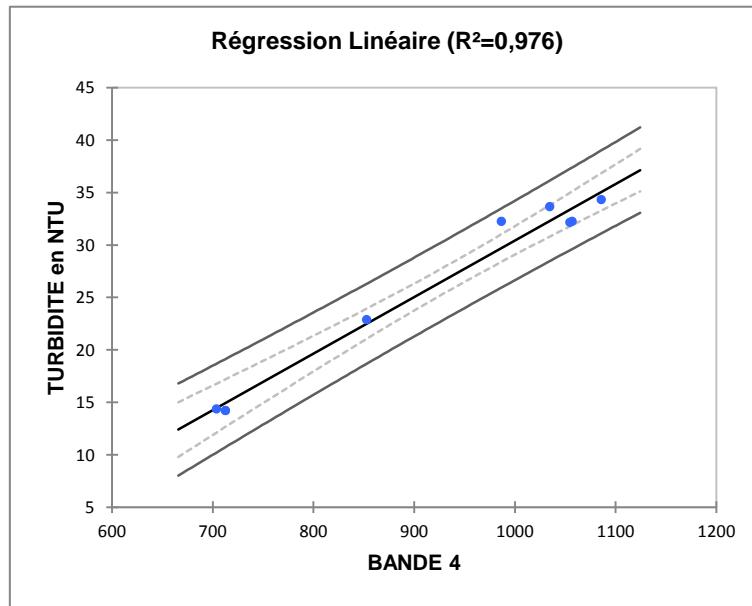


Figure 33 : Loi de régression de la Bande 4

5.2.4. Pour la bande 8

Cette bande correspond aux longueurs d'onde dans le proche infrarouge. Les résultats sont les suivants (Figure 34) :

$$\text{Turbidité NTU} = 0,043 * \text{Réflectance B}_8 - 1,349$$

Avec un $R^2 = 0,776$ et un intervalle de confiance de 95%.

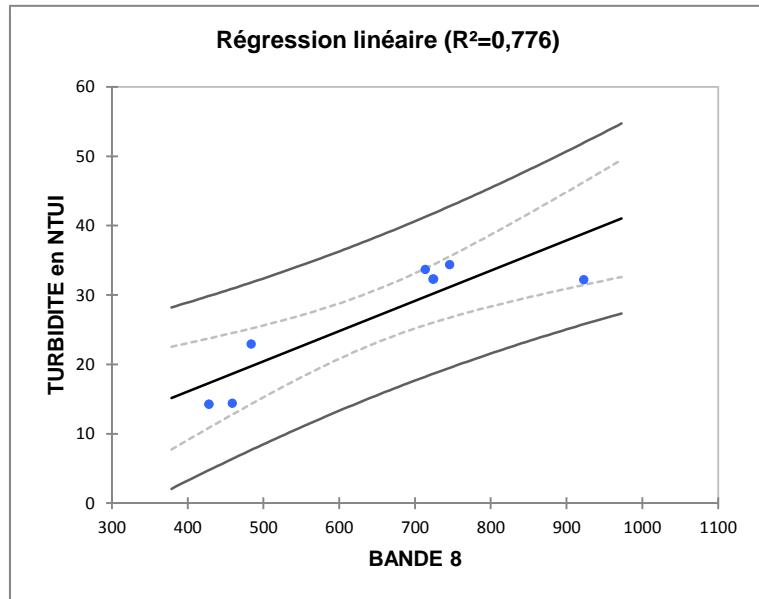


Figure 34 : Loi de régression de la Bande 8

5.2.5. Conclusions

Il apparaît que la bande 4 de SENTINEL 2 A (bande dans le rouge centrée à 670 nm) semble la mieux corrélée aux mesures de turbidité effectué sur l'ININI.

Tous les travaux complémentaires cherchant à associer 2, 3 ou 4 bandes n'ont pas permis d'obtention d'une loi de régression dont le R^2 soit supérieur à celui de la bande 4 seule ($R^2=0,976$).

A titre de démonstration, si l'on applique la loi de la bande 4 à l'image SENTINEL, on obtient le résultat des Figure 36 et Figure 37.

Les zones plus turbides dans le lit de la rivière Inini correspondent principalement à des hauts fonds comme à Saut Sonnelle (Figure 35).



Figure 35 : Saut Sonnelle (haut-fond)

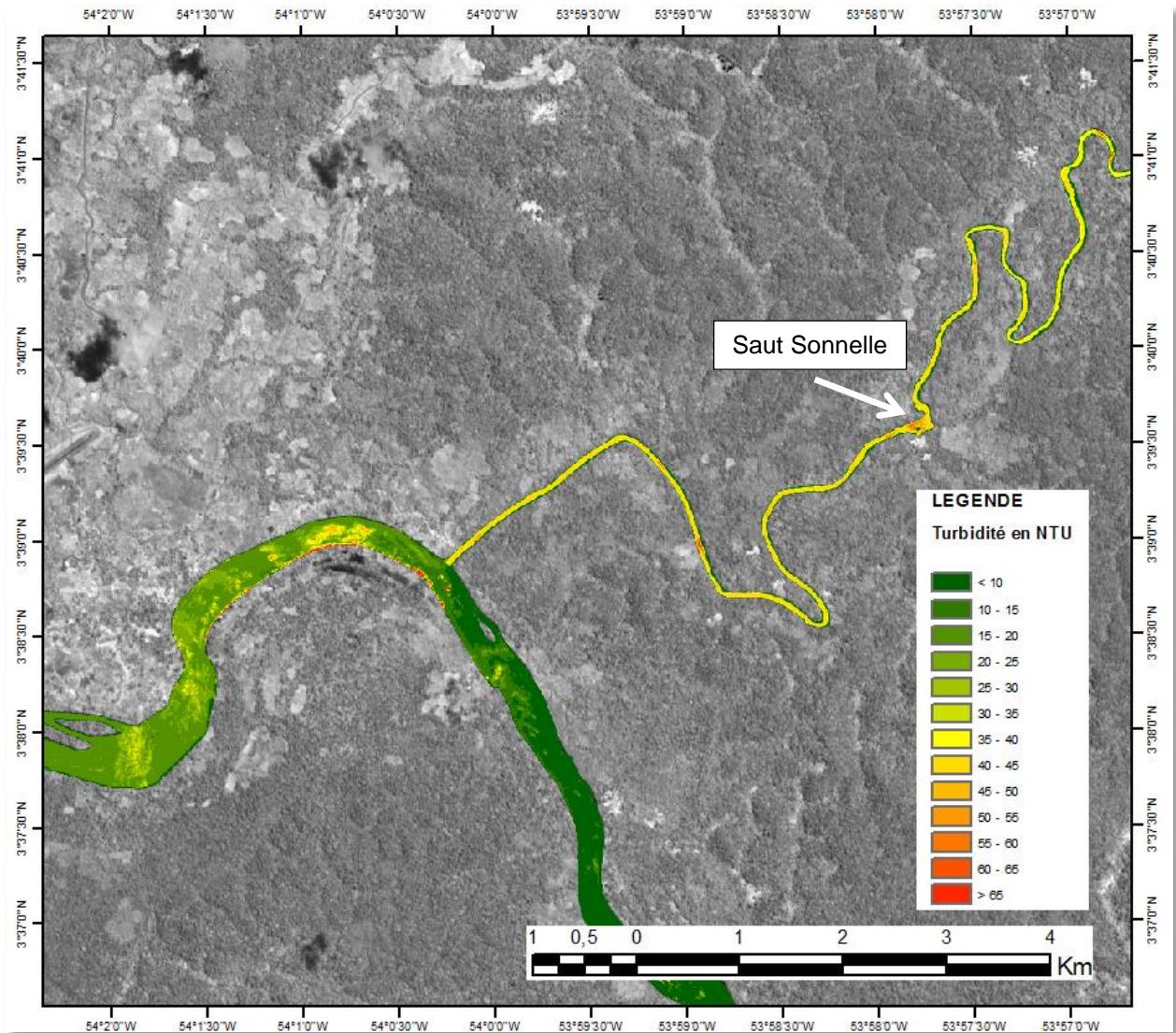


Figure 36 : Transformation de l'image SENTINEL 2A du 13/08/2016 en terme de turbidité

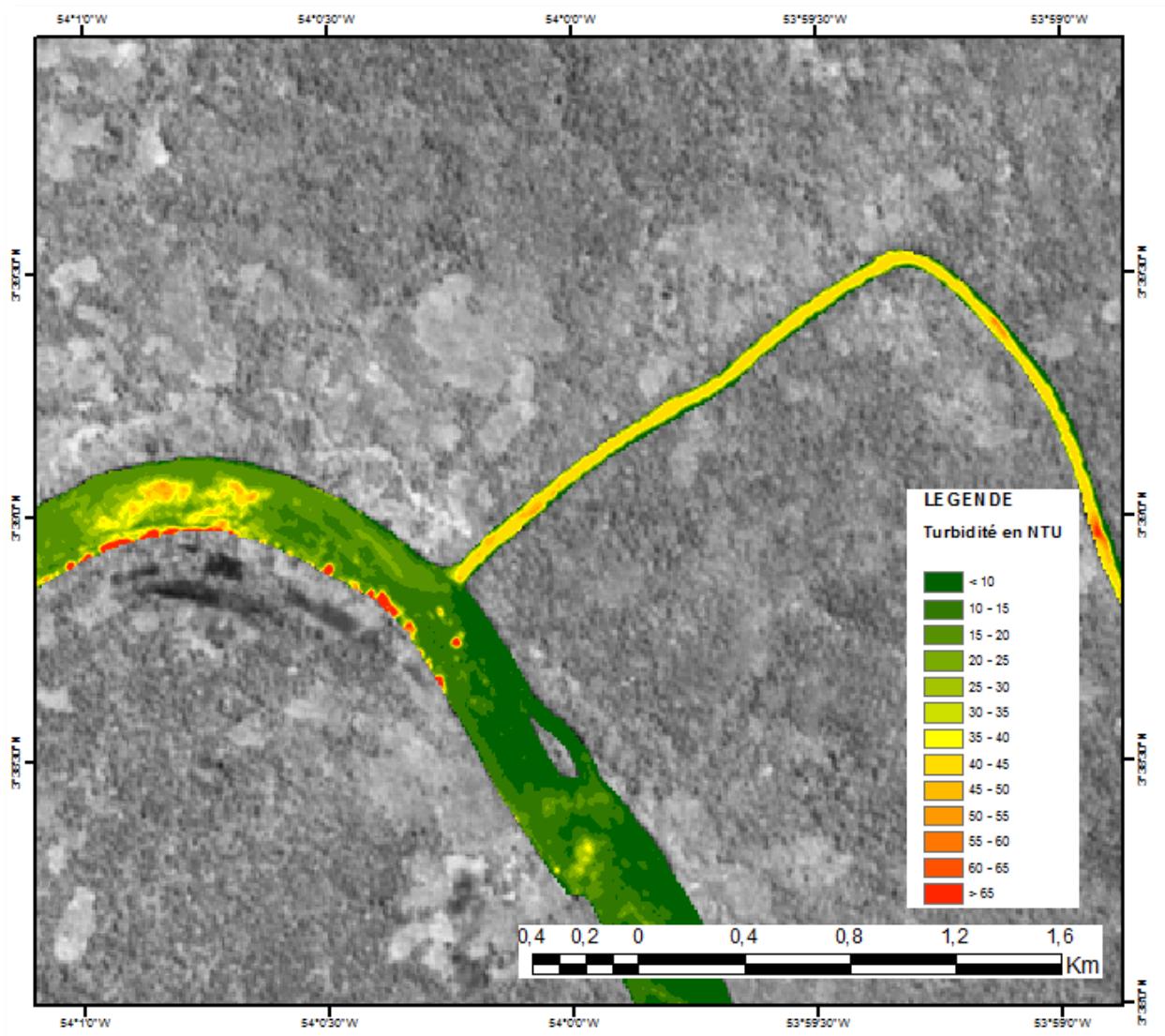


Figure 37 : Zoom sur l'embouchure de l'Inini de l'image transformée

5.3. VERIFICATION DE LA LOI DE TRANSFORMATION ET NOUVELLE LOI

Suite aux chapitres précédents, une loi a été obtenue à partir de la bande 4 de SENTINEL 2A.

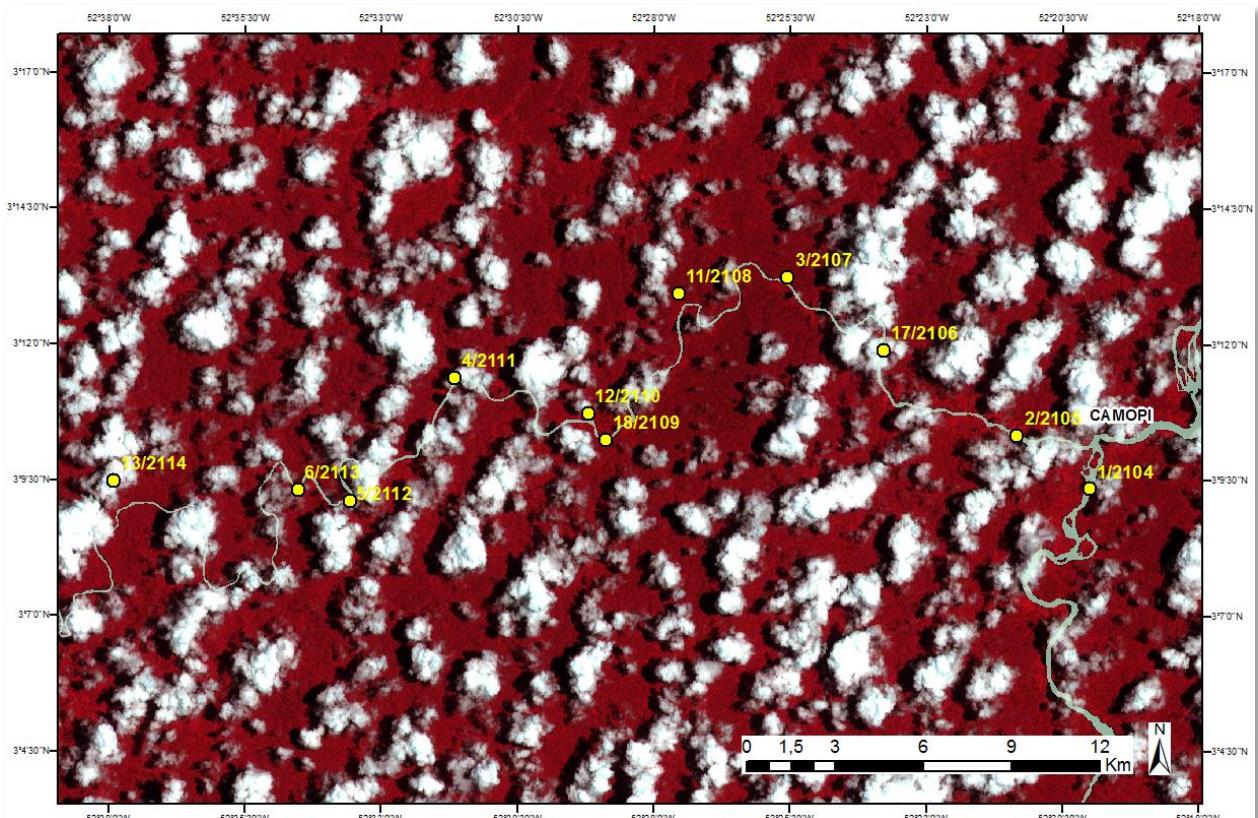
Malheureusement, la campagne spécifique effectuée par la PAG en juin 2016 sur l'embouchure de la Camopi (voir annexe 1), présente trop de décalage dans le temps pour permettre de vérifier la loi précédemment obtenue.

De plus, la période de grèves accompagnées de barrages routiers n'ont pas permis de faire d'autres campagnes de terrain notamment au premier semestre de cette année.

Cependant, le PAG a mis à notre disposition l'ensemble de ses mesures de turbidité effectuées durant la période de septembre 2016 à février 2017 (voir Annexe 3). Peu de mesures effectuées correspondent à la fois aux dates de passage sur satellite SENTINEL 2A tout en étant hors de perturbations atmosphériques.

Néanmoins, le point de mesure appelé Illet Saut Chien (noté 18/2109 sur la Figure 38) du 09/09/2016 ayant la valeur de turbidité de **12,84 NTU** est le seul qui soit sans perturbation atmosphérique de la scène SENTINEL 2A acquise le même jour.

La valeur radiométrique de réflectance mesurée étant de étant de 603, selon la formule du chapitre 5.2.3 correspond à une turbidité calculée de **9,046 NTU** soit légèrement inférieure à la valeur mesurée.



*Figure 38 : Extrait de la scène SENTINEL 2A du 09/09/2016 sur la Camopi
(en bleu-gris : rivières visibles par SENTINEL 2)*

Ce nouveau point permet d'affiner le modèle et de définir une nouvelle loi de régression linéaire (Figure 39) :

$$\text{Turbidité}_{\text{NTU}} = 0,0498 * \text{Réflectance}_{\text{B4}} - 19,3574$$

Avec un **R² = 0,970** et un intervalle de confiance de 95%.

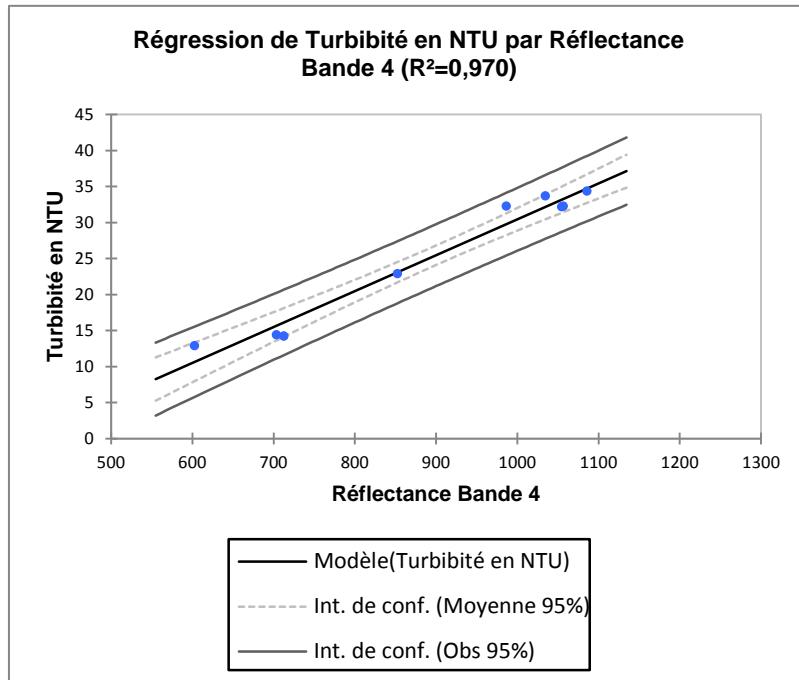


Figure 39 : Loi de régression permettant le passage de la réflectance de la bande 4 en turbidité

L'image de la Figure 40 montre le passage en turbidité de l'image SENTINEL du 09/09/2016. Le masquage des zones de nuages, d'ombre ou de réflexion spéculaire à la surface de l'eau a été établi visuellement et manuellement.

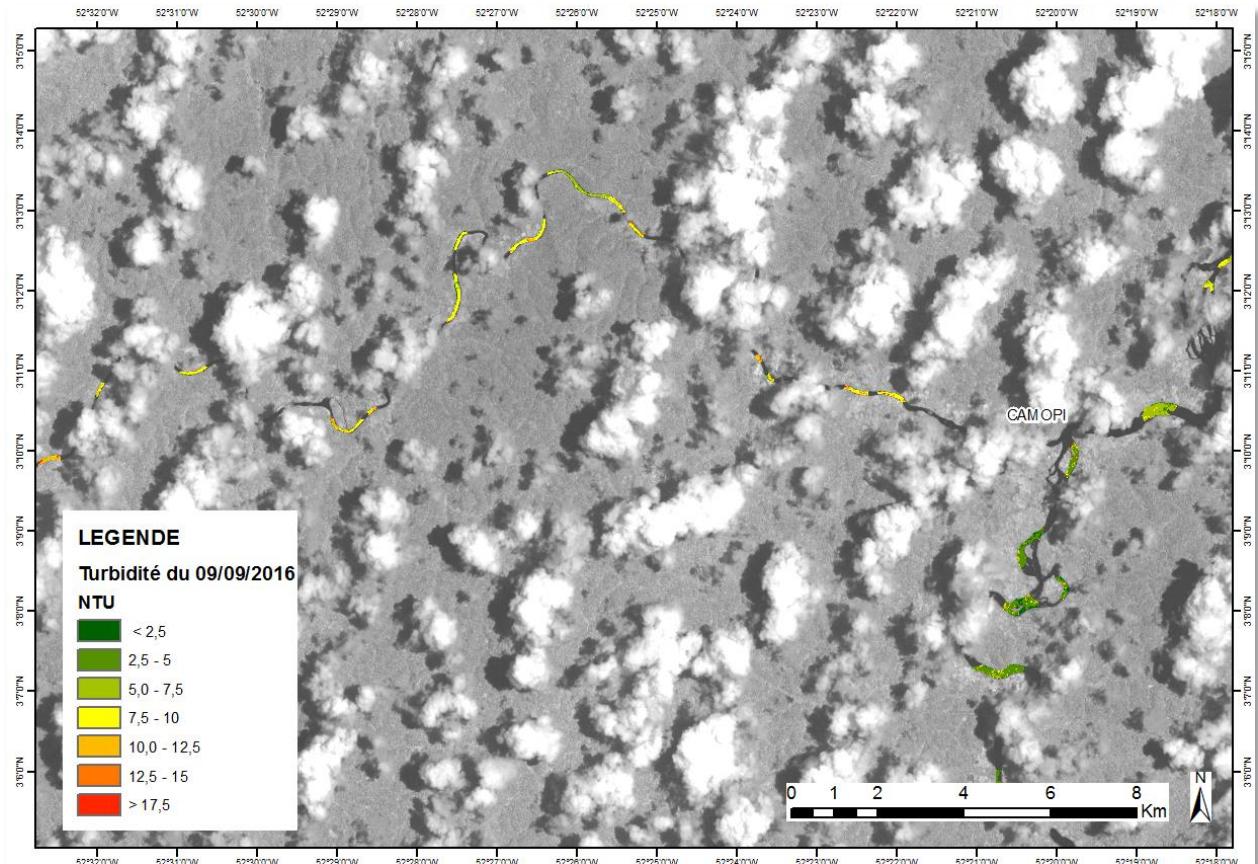


Figure 40 : Image de turbidité du 09/09/2016

5.4. UTILISATION DE LA LOI DE PASSAGE SUR LA CAMOPI.

Notre protocole a été d'appliquer la loi précédemment obtenue sur une image SENTINEL de la Camopi ayant peu de couverture nuageuse au niveau des points de mesure. L'image retenue est celle du 11/07/2016 par rapport aux mesures du 12/06/2016 effectuées in situ, soit un décalage de 29 jours (Figure 43).

Suivi de la turbidité par télédétection

Rivière	Point	R_Pt	Turb_mes	Turb_calc
OYAPOCK	11	Oy-11	9,54	7,1362
OYAPOCK	12	Oy-12	9,11	6,8374
OYAPOCK	13	Oy-13	9,54	7,684
OYAPOCK	10	Oy-10	9,62	7,5346
OYAPOCK	9	Oy-9	9,62	7,7836
OYAPOCK	8	Oy-8	9,61	9,82
OYAPOCK	15	Oy-15	9,46	8,8792
OYAPOCK	7	Oy-7	12,8	9,6262
CAMOPI	1	Ca-1	13,9	12,7636
CAMOPI	11	Ca-11	14,52	11,9668
CAMOPI	2	Ca-2	13,72	13,66
CAMOPI	10	Ca-10	14,46	13,6102
CAMOPI	3	Ca-3	14,18	14,0086

Figure 41 : Valeurs de turbidité mesurées (12/06/2016) et calculées (11/07/2016)

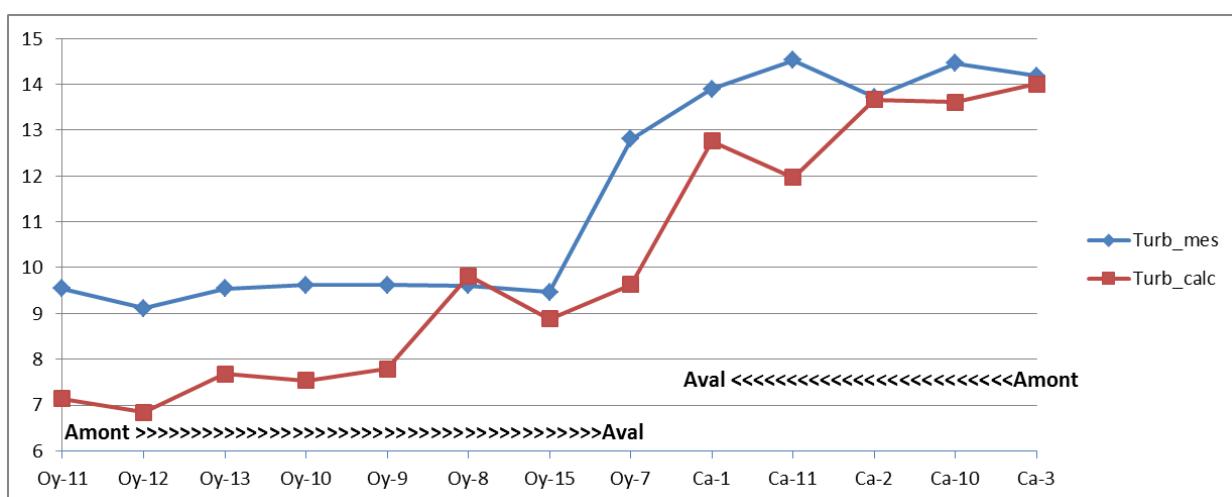


Figure 42 : Représentation graphique des valeurs de turbidité mesurées (12/06/2016) et calculées (11/07/2016)

On s'aperçoit (Figure 42) que les écarts de turbidité sur l'Oyapock restent à peu près constants jusqu'à l'embouchure de la Camopi. Concernant cette dernière, la turbidité varie très peu de l'amont vers laval.

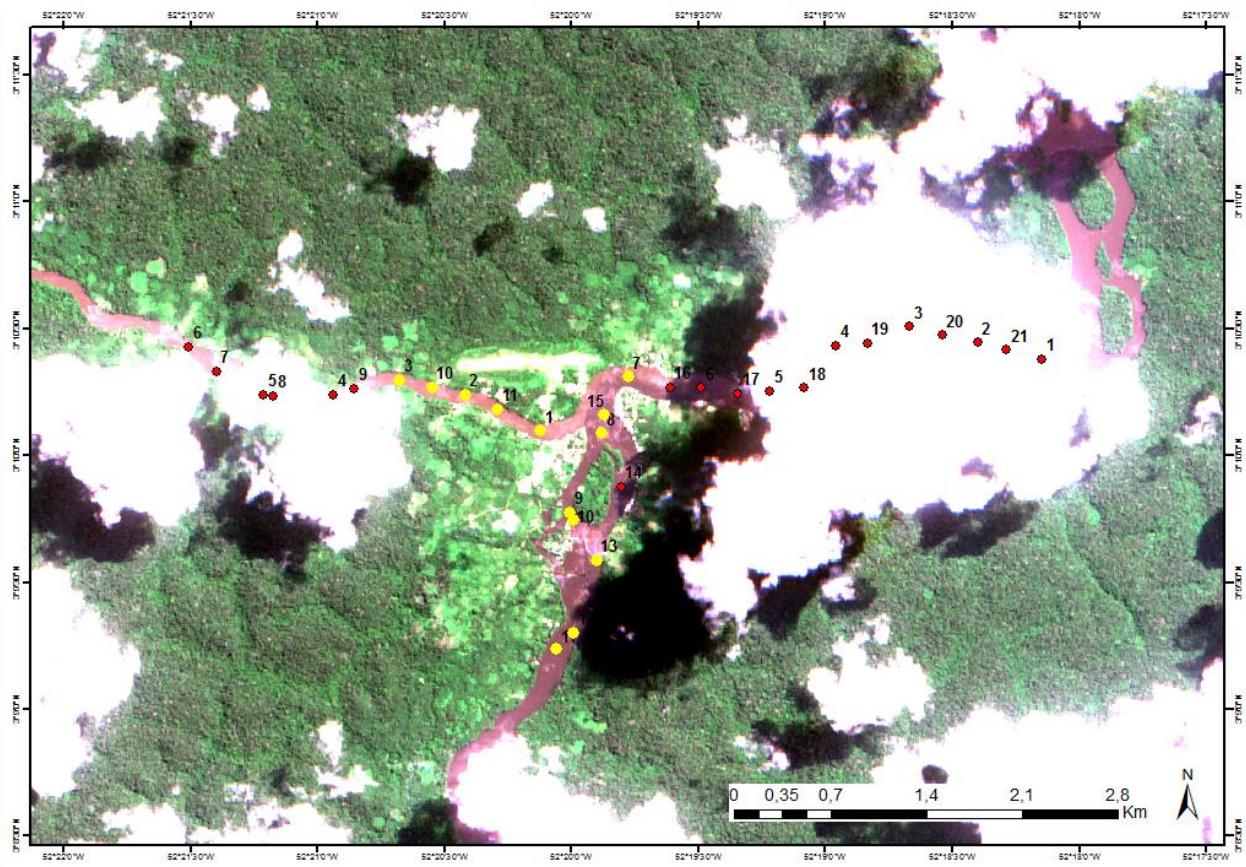


Figure 43 : image du 11/07/2016 avec les point de mesures du 12/06/2016
(les points jaunes représentent les points de mesure de turbidité conservés)

5.5. MISSION DE LA DEAL SUR L'EMBOUCHURE DE LA CAMOPI

Une mission de mesure de turbidité in situ sur l'embouchure de la Camopi a été réalisée par la DEAL Guyane avec l'aide des FAG (Force Armée en Guyane) le 24 juin 2017 (voir Annexe 4)

En consultant le catalogue des images SENTINEL 2 disponibles, une image acquise le 16 juin 2017 était disponible ne présentant pas trop de nuages sur la zone investigée (

Suivi de la turbidité par télédétection

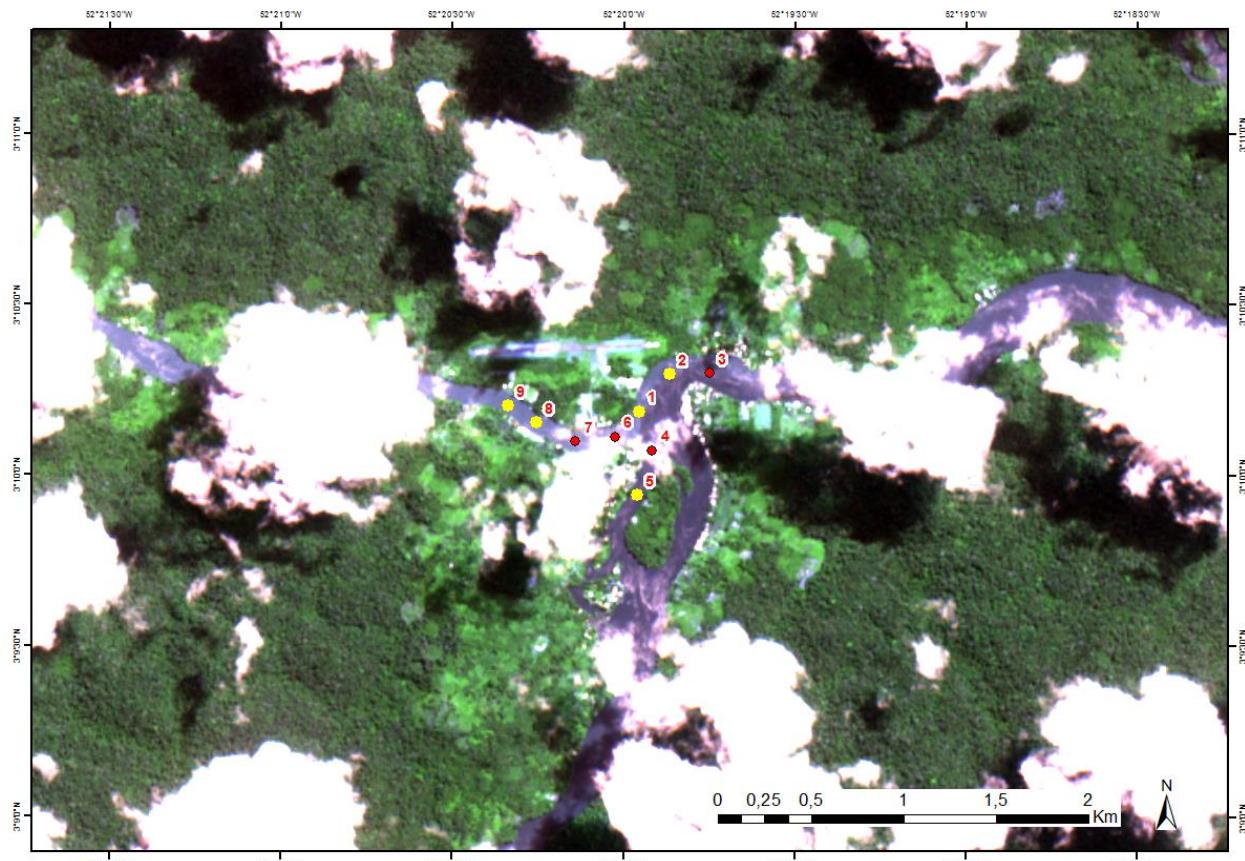


Figure 44), soit un décalage de 8 jours avec les mesure in situ.

Sur les 9 points mesurés, 5 peuvent être retenus pour essayer d'affiner la loi de transfert (points 1, 2, 5, 8 et 9).

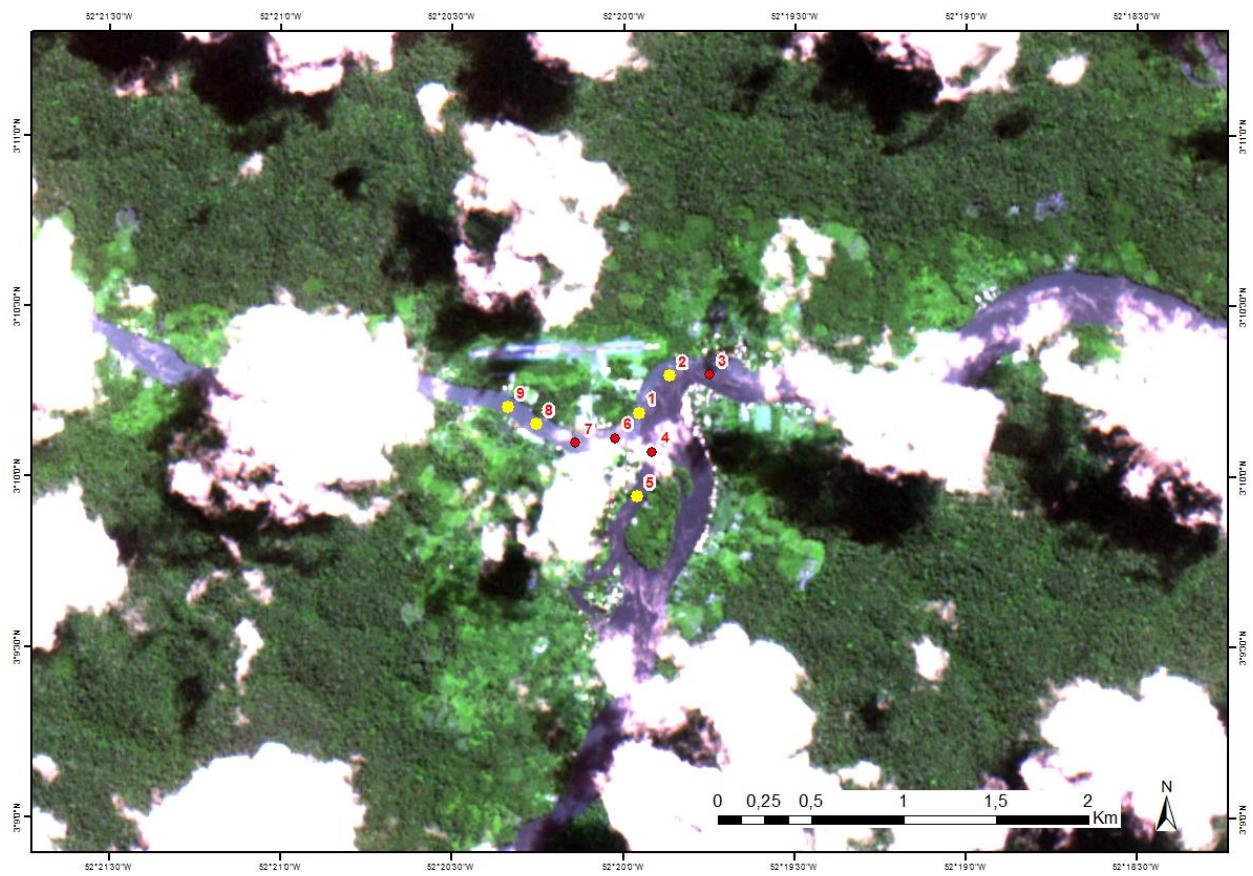


Figure 44 : image du 16/06/2017 avec les point de mesures du 24/06/2017
(les points jaunes représentent les points de mesure de turbidité conservés)

Une nouvelle loi de transfert a pu être calculée à partir de ces nouveaux points (Figure 45) en supprimant les 3 plus mauvaises valeurs obtenues (annexe 5).

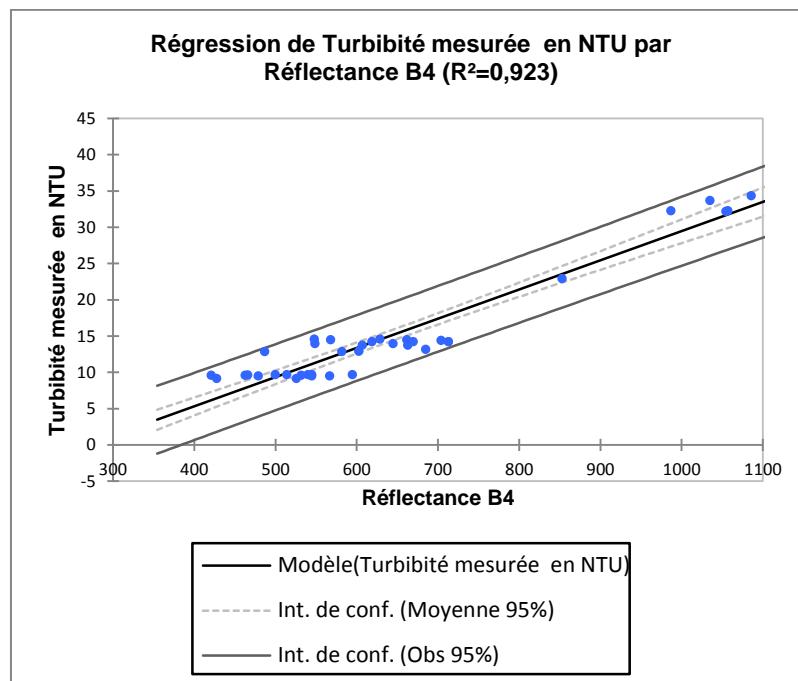


Figure 45 : Nouvelle loi de régression permettant le passage de la réflectance de la bande 4 en turbidité

$$\text{Turbidité NTU} = 0,0402 * \text{Réflectance B}_4 - 10,7978$$

5.6. CONCLUSION

Malgré les conditions nuageuses importantes, ne permettant pas d'avoir des scènes SENTINEL 2 synchrones avec des mesures in situ (sauf pour seule valeur), il a été possible d'obtenir une loi de passage (régression linéaire simple) d'une réflectance de la bande 4 de SENTINEL 2 en turbidité. La procédure pas à pas en utilisant ArcGis est expliquée en annexe 4.

Cependant, cette loi demande à être affinée par l'apport d'autres points de mesures dans des gammes de turbidité de plus de 40 NTU et inférieure à 10 NTU. Ainsi, il se pourrait que la loi de passage ne soit pas linéaire mais pourquoi pas exponentielle compte tenu des valeurs obtenues.

Par exemple et pour de fortes valeurs de turbidité, ce travail pourrait être fait à partir de valeurs mesurées sur des bassins de décantation d'exploitations minières ou de carrières.

6. Conclusions générales et perspectives futures

Le travail de l'évaluation de la turbidité des rivières guyanaises par télédétection multispectrale a montré qu'il est possible de transformer la réflectance enregistrée dans la bande 4 SENTINEL 2A (bande dans le rouge centrée à 670 nm) en une valeur de turbidité exprimée en NTU.

Bien que peu de cas et de points de mesures aient pu être traités, il apparaît que la réflectance s'accroît en fonction de la turbidité. Ces résultats encourageants nous poussent à continuer à bancariser des valeurs de mesures réalisées *in situ* en rivière avec des scènes SENTINEL 2 acquises de façon la plus synchrone possible afin de finaliser la loi de régression linéaire obtenue. De plus l'opérationnalité proche de SENTINEL 2B permettra d'accroître le nombre d'images à traiter.

Une étude sur la largeur des rivières de Guyane déduite de la BD_CARTHAGE a montré que l'ensemble des cours d'eau guyanais de plus de 50 m de large peut être étudié de façon multi temporelle par acquisition facile et gratuite de ces images satellites. Des masques de portions de rivières peuvent maintenant être réalisés facilement. Pour SENTINEL, environ 3 300 km de linéaire de cours d'eau peuvent être ainsi traités.

Si la méthode du passage en turbidité est maintenant opérationnelle, il manque actuellement la possibilité de masquer toutes les parties de rivières où l'on observe des perturbations faussant les résultats : nuages, ombres de nuages, zones de réflexion spéculaire, hauts-fonds.

Des études et des algorithmes sont en cours de finalisation au niveau national et européen pour obtenir des masques fiables sur les nuages et leurs ombres. Une réflexion doit cependant être menée pour la mise en évidence des zones de réflexion spéculaire et de hauts-fonds. Les zones de réflexions spéculaires peuvent facilement être mises en évidence par comparaison avec une image n'en présentant pas (méthode proposées dans ce rapport). Pour les hauts-fonds, visibles parfois qu'à certaines périodes de l'année, des masques manuels systématiques doivent être envisagés.

Après discussion avec des agents de l'IRD Guyane (Institut de Recherche pour le Développement) en charge avec la CTG (Collectivité Territoriale de Guyane) pour la mise en place de la phase 3 de la station de réception SEAS Guyane⁵ (le protocole étant toujours en phase de signature), les images de turbidité des rivières guyanaises obtenues à partir d'images multispectrales SENTINEL 2 pourraient faire partie d'un produit innovant basé sur des méthodes validées et opérationnelles au travers de la mise en place d'un Centre d'Expertise Scientifiques (CES). Ce CES, sous la responsabilité de la DEAL avec l'appui du BRGM, pourrait faire partie du Réseau d'Animation Régionale en Télédétection (RART) Guyanais. Il pourrait être axé sur l'évolution saisonnière, annuelle et pluriannuelle de la turbidité permettant l'identification rapide de phénomènes anormaux dont les origines seraient à élucider (orpailage, travaux, épisodes climatiques importants...). Si ce dispositif était jugé pertinent, il conviendrait de discuter de l'articulation avec le réseau turbidité ainsi que l'Observatoire de l'activité minière avec les partenaires concernés.

Dans cette optique et suite à la dernière réunion du réseau turbidité qui s'est tenue à Cayenne le 21 juin dernier, le PAG s'est porté volontaire pour tester la méthodologie mise au point en vue de son opérationnalité sur les sites actuellement suivis par cet organisme. Si cette action devait se concrétiser, la DEAL Guyane, toujours avec l'appui du BRGM, pourrait, quant à elle, suivre sous forme de stations virtuelles les autres zones d'intérêt du réseau, notamment au niveau et à proximité des zones de vie et des stations de mesure DCE.

⁵ La plateforme technologique SEAS Guyane (Surveillance de l'Environnement Amazonien Assistée par Satellite) est un outil permettant de recevoir en temps réel les télémesures acquises par des satellites d'Observation de la Terre (SPOT, PLEIADE, mais bientôt SENTINEL et LANDSAT) et des moyens de calcul à valeur ajoutée.

7. Bibliographie

BERBAR M.A., GABER S.F. (2004) - Clouds and shadows detection and removing from remote sensing images, *Conference Paper, Source IEEE Xplore, ResearcheGate*, 8 p.

BLUM.A., ROUZEAU.O., BOURDAA.S., JOSEPH.B., GUIRAUD.A. (2014) - Suivi de la turbidité des eaux de Guyane. Etat des lieux et recommandations. Approche par télédétection. Rapport final. *Rapport BRGM/RP-61632-FR*, 86 p. 7 ann.

CESBIO (2015) - MACCS/MAJA, comment ça marche ? <http://www.cesbio.ups-tlse.fr/multitemp/?p=6050>

HAGOLLE O., HUC M., VILLA PASCUAL D., DEDIEU G. (2010) – A multi-temporal method for cloud detection, applied to FORMOSAT-2, VENµS, LANDSAT and SENTINEL-2 images, *Remote Sensing of Environment* 114, pp. 1747-1755

HAGOLLE O. (2017) - Comparaison quantitative des masques de MAJA et Sen2Cor vis à vis des masques manuels de GEOSYS, <http://www.cesbio.ups-tlse.fr/multitemp/?p=10062>

HEDLEY J., ROELFSEMA C., KOETZ B. & PHINN S. (2012) - Capability of the Sentinel 2 mission for tropical coral reef mapping and coral bleaching detection. *Remote Sens. Environ.* 2012, 120, pp. 145–155.

LIU K., KOU Z. (2013) – The Study on the Segmentation of Remote Sensing Cloud Imagery, *atlantis-press.com, icmt-13*, pp. 1372-1379

MANDANICI E. & BITELLI G. (2016) - Preliminary Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 Imagery for a Combined Use, *Remote Sens.* 2016, 8, 1014.

ROUZEAU O. (2011) - Mesure et suivi de la turbidité des eaux de Guyane par télédétection : Analyse bibliographique. Rapport final. *Rapport BRGM/RP-60354-FR*, 36 p.

ROUZEAU.O. (2015) - Suivi par télédétection de la turbidité des cours d'eau de Guyane - Etude de faisabilité pour l'utilisation des données satellites SPOT 6/7 et LANDSAT 8 - Rapport d'avancement. *Rapport BRGM/RP-64981-FR*, 43 p.

SINGH K.K., PAL K., NIGAM M.J. (2012) – Shadow Detection and Removal from Remote Sensing Images Using NDI and Morphological Operators, *Int. J. of Computer Application (0975-8887)*, vol. 42-No 10, pp.37-40

Annexe 1

Mesures de la campagne du PAG sur la rivière CAMOPI

CAMPAGNE TURBIDITE SENTINEL du dimanche 12 juin 2016

<u>LIEU</u>	Commune de CAMOPI
<u>FLEUVE</u>	Relévé dans l'Oyapock (aval et amont), puis relevé dans la rivière Camopi
<u>ORG. EN CHARGE</u>	PAG
<u>AGENTS</u>	Piroguier : Steve REUNAUD Relevé : Arnould EBER

N°	Fleuve	Conditions			Mesures			Calculs			
		DISTANCE (approx. en m)	COORDONNEES GPS	HEURE	METEO	MESURE 1 (NTU)	MESURE 2 (NTU)	MESURE 3 (NTU)	MOYENNE	ECART TYPE	MEDIANE
1	Oyapock aval	0	X 355285 Y 350804	11h08		12,91	12,43	13,35	12,90	0,46	12,91
2	Oyapock aval	500	X 354814 Y 350924	11h13		13,17	11,26	12,93	12,45	1,04	12,93
3	Oyapock aval	1000	X 354318 Y 351040	11h16		12,72	11,92	12,55	12,40	0,42	12,55
4	Oyapock aval	1500	X 353780 Y 350905	11h18		11,98	13,02	13,37	12,79	0,72	13,02
5	Oyapock aval	2000	X 353295 Y 350572	11h21		12,7	13,05	13,5	13,08	0,40	13,05
6	Oyapock aval	2500	X 352795 Y 350598	11h25		12,64	12,63	12,92	12,73	0,16	12,64
7	Oyapock aval	3000	X 352265 Y 350680	11h28		13,16	12,23	13,03	12,81	0,50	13,03
8	Oyapock amont	3500	X 352071 Y 350269	11h30		9,97	8,97	9,89	9,61	0,56	9,89
9	Oyapock amont	4000	X 351839 Y 349698	11h34		10,06	9,93	8,87	9,62	0,65	9,93
10	Oyapock amont	4500	X 351862 Y 349642	11h38		10,43	9,94	8,49	9,62	1,01	9,94
11	Oyapock amont	5000	X 351739 Y 348705	11h41		10,8	9,49	8,32	9,54	1,24	9,49
12	Oyapock amont	4750	X 351865 Y 348823	11h45		10,41	8,07	8,86	9,11	1,19	8,86
13	Oyapock amont	4250	X 352032 Y 349347	11h50		10,35	9,51	8,77	9,54	0,79	9,51
14	Oyapock amont	3750	X 352209 Y 349882	11h55		10,85	8,84	8,78	9,49	1,18	8,84
15	Oyapock amont	3250	X 352084 Y 350402	11h58		10,5	9,67	8,2	9,46	1,16	9,67
16	Oyapock aval	2750	X 352568 Y 350600	12h01		13,29	13,55	12,77	13,20	0,40	13,29
17	Oyapock aval	2250	X 353066 Y 350558	12h04		11,63	12,49	12,38	12,17	0,47	12,38
18	Oyapock aval	1750	X 353548 Y 350598	12h06		11,58	12,79	12,3	12,22	0,61	12,3
19	Oyapock aval	1250	X 354012 Y 350919	12h08		12,29	11,6	11,89	11,93	0,35	11,89
20	Oyapock aval	750	X 354557 Y 350979	12h10		12,72	11,82	10,84	11,79	0,94	11,82
21	Oyapock aval	250	X 355024 Y 350871	12h14		11,69	12,29	11,75	11,91	0,33	11,75
1	Riv.Camopi	0	X 351623 Y 350288	12h29		13,21	14,72	13,78	13,90	0,76	13,78
2	Riv.Camopi	500	X 351072 Y 350549	12h33		14,63	13,09	13,45	13,72	0,81	13,45
3	Riv.Camopi	1000	X 350597 Y 350656	12h36		15,32	13,28	13,96	14,19	1,04	13,96
4	Riv.Camopi	1500	X 350113 Y 350553	12h39		14,4	13,44	13,23	13,69	0,62	13,44
5	Riv.Camopi	2000	X 349601 Y 350553	12h42		15,59	13,86	13,51	14,32	1,11	13,86
6	Riv.Camopi	2500	X 349055 Y 350900	12h45		15,14	13,33	14,05	14,17	0,91	14,05
7	Riv.Camopi	2250	X 349258 Y 350721	12h48		15,94	13,59	13,9	14,48	1,28	13,9
8	Riv.Camopi	1750	X 349672 Y 350546	12h52		15,61	13,82	13,99	14,47	0,99	13,99
9	Riv.Camopi	1250	X 350262 Y 350598	12h55		15,49	14,75	13,74	14,66	0,88	14,75
10	Riv.Camopi	750	X 350832 Y 350604	12h58		14,48	15,1	13,8	14,46	0,65	14,48
11	Riv.Camopi	250	X 351305 Y 350444	13h02		15,4	13,68	14,48	14,52	0,86	14,48

Annexe 2

Mesures de la campagne du BRGM/PAG sur l'Inini

CAMPAGNE TURBIDITE SENTINEL du 14 novembre 2016

LIEU	Maripalousa
FLEUVE	Relévé dans le Maroni (aval et amont), puis relevé dans la rivière Inini
ORG. EN CHARGE	BRGM + PAG
AGENTS	Relevé : Nicolas BRISSET (BRGM)

N°	Cours d'eau	Conditions			Mesures			Calculs		
		Coordonnées GPS	HEURE	METEO	MESURE 1 (NTU)	MESURE 2 (NTU)	MESURE 3 (NTU)	MOYENNE	ECART TYPE	MEDIANE
1	Maroni aval	X -54,0288 Y 3,63494	11h08		15	13,9	14,14	14,35	0,58	14,14
2	Maroni aval	X -54,0254 Y 3,63801	11h13		13,7	14,42	14,49	14,20	0,44	14,42
3	Maroni aval	X -54,0258 Y 3,64419	11h16		13,21	13,95	13,64	13,60	0,37	13,64
4	Inini	X -54,0039 Y 3,64797	11h18		25,3	20,4	22,9	22,87	2,45	22,9
5	Maroni amont	X -53,9919 Y 3,62427	11h21		11,37	11,18	11,17	11,24	0,11	11,18
6	Maroni amont	X -53,9925 Y 3,624	11h25		10,85	11,4	11,49	11,25	0,35	11,4
7	Maroni amont	X -53,991 Y 3,62424	11h28		11,45	11,77	11,39	11,54	0,20	11,45
8	Inini	X -54,0005 Y 3,65098	11h30		33,7	33,8	33,4	33,63	0,21	33,7
9	Inini	X -53,9968 Y 3,65343	11h34		34,3	34,1	34,5	34,30	0,20	34,3
10	Inini	X -53,9932 Y 3,656	11h38		33,3	33,1	34	33,47	0,47	33,3
11	Inini	X -53,9887 Y 3,65866	11h41		32,2	34,9	32,9	33,33	1,40	32,9
12	Inini	X -53,9852 Y 3,65604	11h45		32,8	32,4	32,9	32,70	0,26	32,8
13	Inini	X -53,9828 Y 3,65207	11h50		31,8	33,8	30,8	32,13	1,53	31,8
14	Inini	X -53,9813 Y 3,64753	11h55		32	32,8	31,7	32,17	0,57	32
15	Inini	X -53,9781 Y 3,64504	11h58		30	33,4	33,3	32,23	1,93	33,3
16	Inini	X -53,9738 Y 3,64383	12h01		29,9	30,8	30,9	30,53	0,55	30,8
17	Inini	X -53,9717 Y 3,64442	12h04		30,9	29,3	31,2	30,47	1,02	30,9
18	Inini	X -53,975 Y 3,64757	12h06		31,3	30,6	32,2	31,37	0,80	31,3
19	Inini	X -53,9763 Y 3,65185	12h08		32,3	32,4	32	32,23	0,21	32,3
20	Inini	X -53,9727 Y 3,65433	12h10		31,8	32,4	33,3	32,50	0,75	32,4
21	Inini	X -53,9689 Y 3,656	12h14		32,2	32,9	31,8	32,30	0,56	32,2
22	Inini	X -53,9638 Y 3,6598	12h29		31,9	32,3	33	32,40	0,56	32,3
23	Inini	X -53,9634 Y 3,65942	12h33		31,8	31,7	31,6	31,70	0,10	31,7

Annexe 3

Mesures des campagnes du PAG en Guyane de septembre 2016 à février 2017

Suivi de la turbidité par télédétection

Cours d'eau	Commune	Organisme en charge de la prééveur	Nom du prééveur	X	Y	Référentiel pour	Date de la mesure	Heure	Turbidité	Unité	Référence du turbidimètre	Etalonnage avant mesure?	Sous influence du maréchage?	Lieu de mesure (rive gauche, rive droite)	Activités humaines à proximité, pont, port	Moyens accès	Pluviométrie	ID_PAG	ID_unique
OYAPOCK	Camopi	PAG	AE	351805	348894	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		9,31	NTU	TN100							1	2104
Aval St Mauvais	Camopi	PAG	AE	349383	350716	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		12,53	NTU	TN100							2	2105
Polydor	Camopi	PAG	AE	344835	353597	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		13,26	NTU	TN100							17	2106
Crique ALIKENE	Camopi	PAG	AE	341589	356076	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		61,6	NTU	TN100							3	2107
Crique Diable	Camopi	PAG	AE	337875	355546	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		4,93	NTU	TN100							11	2108
Het Saut Chien	Camopi	PAG	AE	335385	350574	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		12,84	NTU	TN100							18	2109
Crique Chien	Camopi	PAG	AE	334800	351455	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		33,2	NTU	TN100							12	2110
Crique TAMPACK	Camopi	PAG	AE	330249	352680	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		38,8	NTU	TN100							4	2111
Crique JALBOT	Camopi	PAG	AE	326701	348484	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		5,24	NTU	TN100							5	2112
Aval St Hocco	Camopi	PAG	AE	324940	348879	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		11,91	NTU	TN100							6	2113
Crique Citron (St Pierre)	Camopi	PAG	AE	318673	349178	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		6,62	NTU	TN100							13	2114
Degrat St-Pierre	Camopi	PAG	AE	316379	344893	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		14,34	NTU	TN100							19	2115
Crique ALICORNE	Camopi	PAG	AE	312413	344484	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		18,49	NTU	TN100							7	2116
Crique Deux Amis	Camopi	PAG	AE	310167	342234	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		17,76	NTU	TN100							16	2117
Crique Yanide	Camopi	PAG	AE	307438	341028	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		34,5	NTU	TN100							8	2118
Crique INIFI	Camopi	PAG	AE	305239	341814	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		45,4	NTU	TN100							9	2119
Riviere CAMOPI	Camopi	PAG	AE	305227	340923	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		8,51	NTU	TN100							10	2120
Crique Pian bois	Camopi	PAG	AE	295623	351691	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		81,1	NTU	TN100							14	2121
Crique Inipi (Kounakai)	Camopi	PAG	AE	295215	351827	UTM22 Nord WGS84	09/09/2016		37,9	NTU	TN100							15	2122
Bamba	Papaïchton	FB		154451	419959	UTM22 Nord WGS84	12/09/2016		33,9	NTU	TN100	non			pont	1,4 m	9737009	2123	
Amadou	Papaïchton	FB		148958	421536	UTM22 Nord WGS84	12/09/2016		10,33	NTU	TN100	non			pont	0,5m	9737008	2125	
Tampok Milieu	Maripasoula	PAG	FT	174758	375279	UTM22 Nord WGS84	12/09/2016		105	NTU	TN100							9737005	2126
Tampok RD	Maripasoula	PAG	FT	174751	375317	UTM22 Nord WGS84	12/09/2016		105	NTU	TN100							9737006	2127
Tampok RG	Maripasoula	PAG	FT	174764	375243	UTM22 Nord WGS84	12/09/2016		105	NTU	TN100							9737007	2128
Bostock	Maripasoula	PAG	FT	171419	376761	UTM22 Nord WGS84	12/09/2016		15	NTU	TN100							9737002	2129
Amadou	Papaïchton	FB		148958	421536	UTM22 Nord WGS84	03/10/2016		7,21	NTU	TN100	non			pont	0,3m	9737008	2130	
Bamba	Papaïchton	FB		154451	419959	UTM22 Nord WGS84	03/10/2016		8,05	NTU	TN100	non			pont	0,85m	9737009	2131	
OYAPOCK	Camopi	PAG		351805	348894	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016		3,34	NTU	ODEON							1	2133
Aval St Mauvais	Camopi	PAG		349383	350716	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016		8,89	NTU	ODEON							2	2134
Polydor	Camopi	PAG		344835	353597	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016		7,21	NTU	ODEON							17	2135
Crique ALIKENE	Camopi	PAG		341589	356076	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016		10,8	NTU	ODEON							3	2136
Crique Diable	Camopi	PAG		337875	355546	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016		5,95	NTU	ODEON							11	2137
Het Saut Chien	Camopi	PAG		335385	350574	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016		9,28	NTU	ODEON							18	2138
Crique Chien	Camopi	PAG		334800	351455	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016		27,7	NTU	ODEON							12	2139
Crique TAMPACK	Camopi	PAG		330249	352680	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016		35,6	NTU	ODEON							4	2140
Crique JALBOT	Camopi	PAG		326701	348484	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016		4,26	NTU	ODEON							5	2141
Aval St Hocco	Camopi	PAG		324940	348879	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016		6,03	NTU	ODEON							6	2142
Crique Citron (St Pierre)	Camopi	PAG		318673	349178	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016		5,03	NTU	ODEON							13	2143
Degrat St-Pierre	Camopi	PAG		316379	344893	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016		9,23	NTU	ODEON							19	2144
Crique ALICORNE	Camopi	PAG		312413	344484	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016		20,08	NTU	ODEON							7	2145
Crique Deux Amis	Camopi	PAG		310167	342234	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016		8,85	NTU	ODEON							16	2146
Crique YANIDUE	Camopi	PAG		307438	341028	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016		4,54	NTU	ODEON							8	2147
Crique INIFI	Camopi	PAG		305239	341814	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016		25	NTU	ODEON							9	2148
Riviere CAMOPI	Camopi	PAG		305227	340923	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016		4,33	NTU	ODEON							10	2149
Crique Pian bois	Camopi	PAG		295623	351691	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016			NTU	ODEON							14	2150
Crique Inipi (Kounakai)	Camopi	PAG		295215	351827	UTM22 Nord WGS84	11/10/2016			NTU	ODEON							15	2151
OYAPOCK	Camopi	PAG		351805	348894	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017		8,15	NTU	ODEON							1	2133
Aval St Mauvais	Camopi	PAG		349383	350716	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017		18,43	NTU	ODEON							2	2134
Polydor	Camopi	PAG		344835	353597	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017		15,51	NTU	ODEON							17	2135
Crique ALIKENE	Camopi	PAG		341589	356076	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017		35,52	NTU	ODEON							3	2136
Crique Diable	Camopi	PAG		337875	355546	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017		14,79	NTU	ODEON							11	2137
Het Saut Chien	Camopi	PAG		335385	350574	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017		19,23	NTU	ODEON							18	2138
Crique Chien	Camopi	PAG		334800	351455	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017		118	NTU	ODEON							12	2139
Crique TAMPACK	Camopi	PAG		330249	352680	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017		27,82	NTU	ODEON							4	2140
Crique JALBOT	Camopi	PAG		326701	348484	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017		9,43	NTU	ODEON							5	2141
Aval St Hocco	Camopi	PAG		324940	348879	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017		15,79	NTU	ODEON							6	2142
Crique Citron (St Pierre)	Camopi	PAG		318673	349178	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017		14,44	NTU	ODEON							13	2143
Degrat St-Pierre	Camopi	PAG		316379	344893	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017		16,79	NTU	ODEON							19	2144
Crique ALICORNE	Camopi	PAG		312413	344484	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017		25,71	NTU	ODEON							7	2145
Crique Deux Amis	Camopi	PAG		310167	342234	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017		17,61	NTU	ODEON							16	2146
Crique YANIDUE	Camopi	PAG		307438	341028	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017		11,35	NTU	ODEON							8	2147
Crique INIFI	Camopi	PAG		305239	341814	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017		44,5	NTU	ODEON							9	2148
Riviere CAMOPI	Camopi	PAG		305227	340923	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017		10,3	NTU	ODEON							10	2149
Crique Pian bois	Camopi	PAG		295623	351691	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017			NTU	ODEON							14	2150
Crique Inipi (Kounakai)	Camopi	PAG		295215	351827	UTM22 Nord WGS84	14/02/2017			NTU	ODEON							15	2151

Annexe 4**Mesures de la campagne de la DEAL/FAG sur la rivière CAMOPI**

CAMPAGNE TURBIDITE - DATE : 24/06/2017											
Mesures profils en long CAMOPI											
Organisme en charge des mesures : FAG						Opérateurs : Laurent Boudevin, Hadrien Biondo					
Conditions	Mesures						Calculs				
N°	Fleuve	CoordX WGS84 utm22	CoordY WGS84 utm22	HEURE	METEO	MESURE 1 (NTU)	MESURE 2 (NTU)	MESURE 3 (NTU)	MOYENNE	ECART TYPE	MEDIANE
1	Oyapock aval	351934	350455	7h31		11,3	14	14,1	13,13	1,59	14
2	Oyapock aval	352101	350654	7h33		9,76	10,4	8,78	9,65	0,82	9,76
3	Oyapock aval	352313	350661	7h36		12,5	11,3	12,4	12,07	0,67	12,4
4	Oyapock amont	352006	350245	7h38		9,82	9,08	9,51	9,47	0,37	9,51
5	Oyapock amont	351926	350002	7h40		10,1	9,45	8,88	9,48	0,61	9,45
6	Oyapock amont	351803	350319	7h42		14	14,6	13,4	14,00	0,60	14
7	Riv.Camopi	351592	350295	7h44		11,5	11,9	9,53	10,98	1,27	11,5
8	Riv.Camopi	351380	350395	7h46		9,91	8,51	8,93	9,12	0,72	8,93
9	Riv.Camopi	351225	350484	7h47		9,19	8,9	7,94	8,68	0,65	8,9

Annexe 5

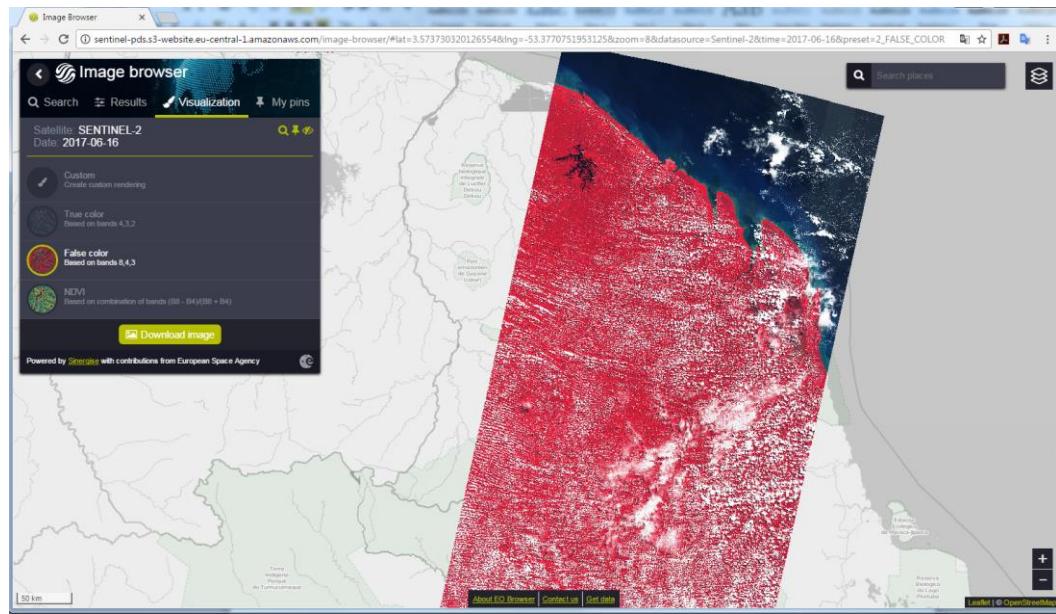
Valeurs de turbidité retenues pour la définition de la loi de transfert

Cours	Station	Organismes	Date de la mesure in situ (en NTU)	Date de l'image SENTINEL	différence en jours	Turbidité mesurée en NTU	Réflectance Bande 4	Résidu	Résidu std.	Ecart-type sur la préd. (Moyenne)	Borne inférieure 95% (Moyenne)	Borne supérieure 95% (Moyenne)	Ecart-type sur la préd. (Observation)	Borne inférieure 95% (Observation)	Borne supérieure 95% (Observation)		
ININI	1	BRGM/PAG	14/11/2016	11/11/2016	3	14,35	704	-3,188	-1,451	0,386	16,749	18,319	2,231	13,001	22,068		
ININI	2	BRGM/PAG	14/11/2016	11/11/2016	3	14,20	713	-3,693	-1,681	0,392	17,099	18,694	2,232	13,361	22,432		
ININI	4	BRGM/PAG	14/11/2016	11/11/2016	3	22,87	853	-0,664	-0,302	0,558	22,397	24,665	2,267	18,924	28,137		
ININI	8	BRGM/PAG	14/11/2016	11/11/2016	3	33,63	1035	2,778	1,264	0,866	29,095	32,615	2,361	26,056	35,655		
ININI	9	BRGM/PAG	14/11/2016	11/11/2016	3	34,30	1086	1,392	0,634	0,959	30,958	34,858	2,397	28,036	37,780		
ININI	13	BRGM/PAG	14/11/2016	11/11/2016	3	32,13	1055	0,473	0,215	0,902	29,826	33,494	2,375	26,834	36,487		
ININI	15	BRGM/PAG	14/11/2016	11/11/2016	3	32,23	987	3,310	1,506	0,780	27,338	30,509	2,331	24,186	33,662		
ININI	19	BRGM/PAG	14/11/2016	11/11/2016	3	32,23	1057	0,493	0,224	0,906	29,899	33,582	2,376	26,911	36,570		
OYAPOCH	11	PAG	12/06/2016	01/06/2016	11	9,54	532	-1,072	-0,488	0,428	9,743	11,481	2,238	6,064	15,161		
OYAPOCH	12	PAG	12/06/2016	01/06/2016	11	9,11	526	-1,261	-0,574	0,434	9,489	11,253	2,239	5,820	14,922		
OYAPOCH	9	PAG	12/06/2016	01/06/2016	11	9,62	545	-1,516	-0,690	0,415	10,293	11,978	2,236	6,592	15,679		
OYAPOCH	10	PAG	12/06/2016	01/06/2016	11	9,62	540	-1,314	-0,598	0,420	10,082	11,787	2,237	6,389	15,480		
OYAPOCH	7	PAG	12/06/2016	01/06/2016	11	12,80	582	0,175	0,080	0,386	11,841	13,408	2,231	8,092	17,158		
OYAPOCH	15	PAG	12/06/2016	01/06/2016	11	9,46	567	-2,561	-1,166	0,396	11,216	12,826	2,232	7,484	16,558		
CAMOPI	1	PAG	12/06/2016	01/06/2016	11	13,90	645	-1,260	-0,574	0,366	14,416	15,904	2,227	10,634	19,686		
CAMOPI	11	PAG	12/06/2016	01/06/2016	11	14,52	629	0,004	0,002	0,367	13,770	15,262	2,227	9,989	19,043		
CAMOPI	2	PAG	12/06/2016	01/06/2016	11	13,72	663	-2,164	-0,985	0,368	15,136	16,633	2,228	11,357	20,412		
CAMOPI	10	PAG	12/06/2016	01/06/2016	11	14,46	662	-1,384	-0,630	0,368	15,096	16,592	2,228	11,317	20,371		
CAMOPI	3	PAG	12/06/2016	03/06/2016	11	14,18	670	-1,986	-0,904	0,370	15,414	16,919	2,228	11,638	20,694		
CAMOPI	Illet Saut Chie	PAG	09/09/2016	09/09/2016	0	12,84	603	-0,630	-0,287	0,375	12,709	14,231	2,229	8,941	17,999		
OYAPOCH	11	PAG	12/06/2016	11/07/2016	29	9,54	463	1,705	0,776	0,513	6,794	8,877	2,256	3,251	12,420		
OYAPOCH	12	PAG	12/06/2016	11/07/2016	29	9,11	428	2,683	1,221	0,564	5,281	7,573	2,268	1,817	11,036		
OYAPOCH	13	PAG	12/06/2016	11/07/2016	29	9,54	421	3,395	1,545	0,575	4,978	7,313	2,271	1,530	10,760		
OYAPOCH	10	PAG	12/06/2016	11/07/2016	29	9,62	500	0,296	0,135	0,464	8,382	10,267	2,245	4,761	13,888		
OYAPOCH	9	PAG	12/06/2016	11/07/2016	29	9,62	514	-0,268	-0,122	0,447	8,979	10,797	2,242	5,332	14,444		
OYAPOCH	8	PAG	12/06/2016	11/07/2016	29	9,61	466	1,654	0,753	0,508	6,923	8,989	2,255	3,373	12,539		
OYAPOCH	15	PAG	12/06/2016	11/07/2016	29	9,46	479	0,981	0,446	0,491	7,482	9,477	2,251	3,905	13,054		
OYAPOCH	7	PAG	12/06/2016	11/07/2016	29	12,8	487	3,999	1,820	0,480	7,825	9,777	2,249	4,231	13,372		
CAMOPI	1	PAG	12/06/2016	11/07/2016	29	13,9	549	2,604	1,185	0,411	10,461	12,132	2,235	6,754	15,839		
CAMOPI	11	PAG	12/06/2016	11/07/2016	29	14,52	548	3,264	1,486	0,412	10,419	12,093	2,235	6,714	15,799		
CAMOPI	2	PAG	12/06/2016	11/07/2016	29	13,72	607	0,089	0,041	0,373	12,873	14,389	2,228	9,102	18,159		
CAMOPI	10	PAG	12/06/2016	11/07/2016	29	14,46	568	2,399	1,092	0,395	11,258	12,864	2,232	7,525	16,598		
CAMOPI	3	PAG	12/06/2016	11/07/2016	29	14,18	619	0,066	0,030	0,369	13,363	14,864	2,228	9,586	18,641		
OYAPOCH	1	DEAL/FAG	24/06/2017	16/06/2017	8	13,13	685	-3,640	-1,657	0,376	16,006	17,534	2,229	12,240	21,299		
OYAPOCH	2	DEAL/FAG	24/06/2017	16/06/2017	8	9,65	595	-3,498	-1,592	0,378	12,379	13,916	2,229	8,617	17,678		
OYAPOCH	5	DEAL/FAG	24/06/2017	16/06/2017	8	9,48	545	-1,659	-0,755	0,415	10,293	11,978	2,236	6,592	15,679		
CAMOPI	8	DEAL/FAG	24/06/2017	16/06/2017	8	9,12	695	Valeurs non retenues									
CAMOPI	9	DEAL/FAG	24/06/2017	16/06/2017	8	8,68	678										
OYAPOCH	8	PAG	12/06/2016	01/06/2016	11	9,61	664										

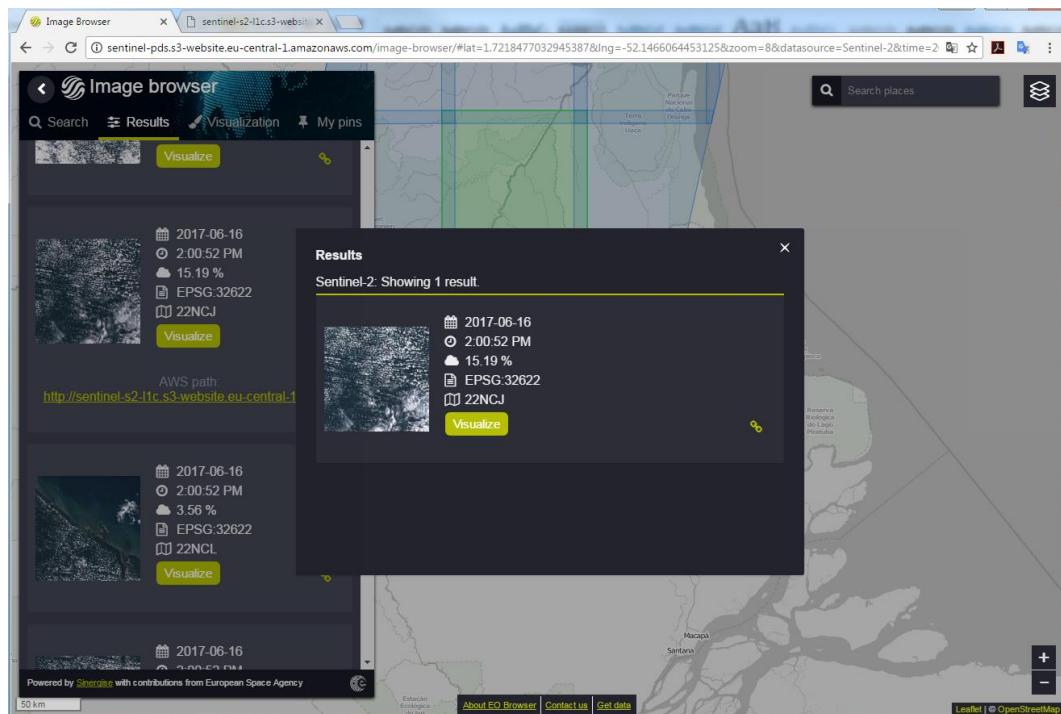
Annexe 6

Procédure d'obtention de la turbidité par SENTINEL 2 (ArcGis)

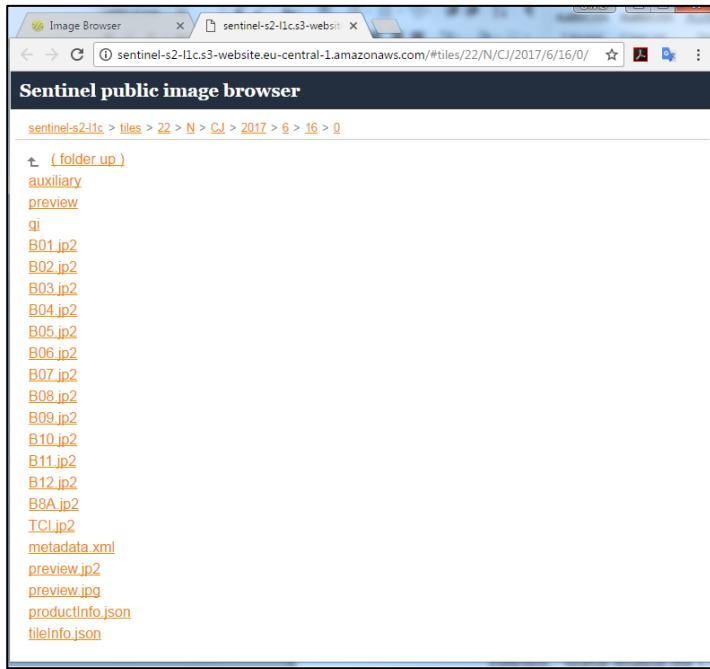
1. Aller sur le site <http://sentinel-pds.s3-website.eu-central-1.amazonaws.com/image-browser/#lat=3.8149271085491847&lng=-53.009033203125&zoom=8>



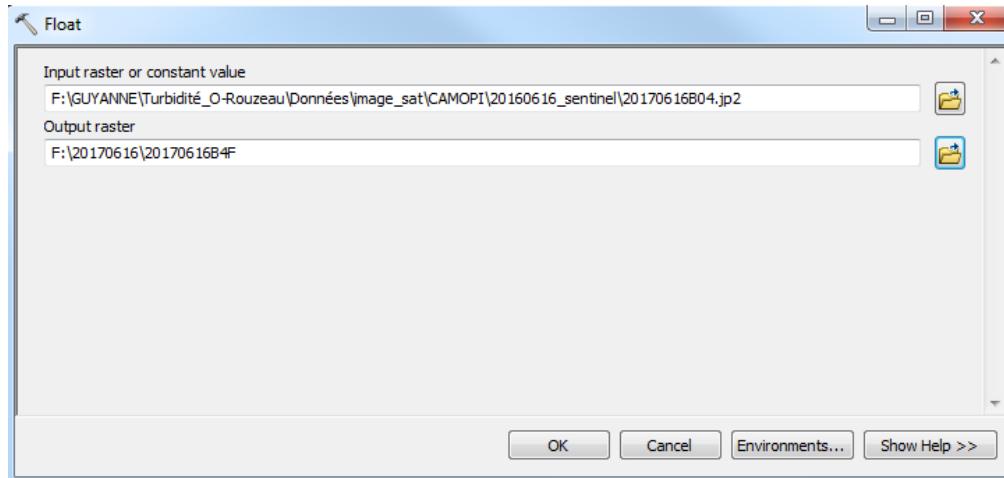
2. Télécharger les bandes 2,3 4 et 8 des scènes SENTINEL 2 (exemple ici : la scène 22NCJ du 16/06/2017)



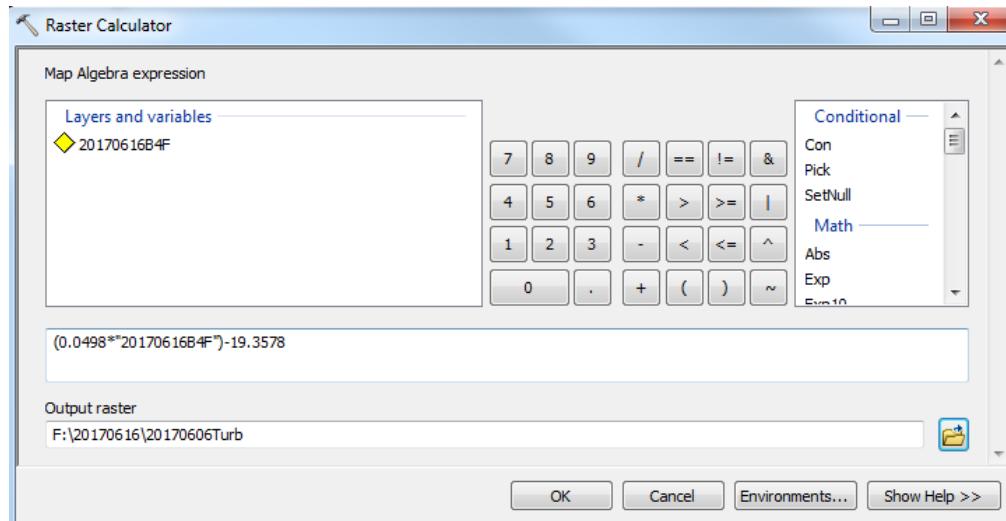
Suivi de la turbidité par télédétection



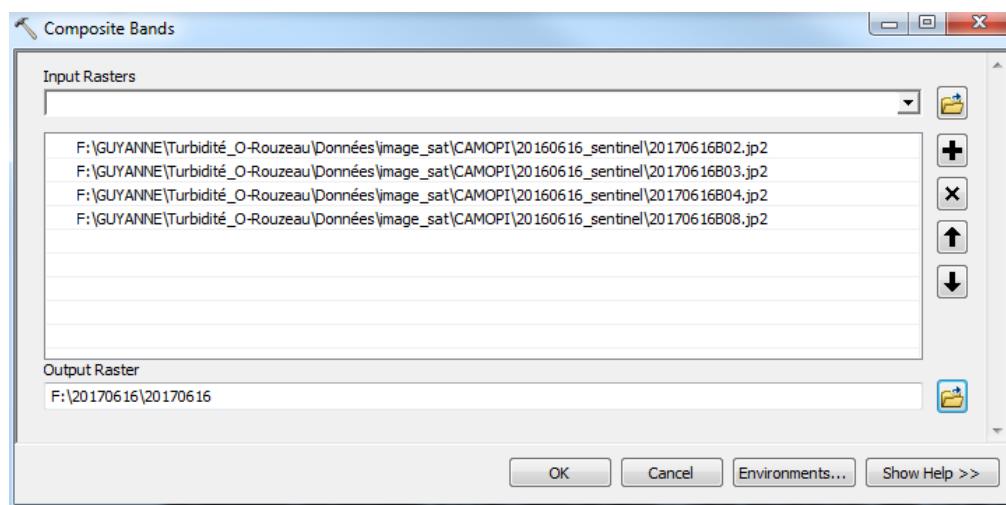
3. transformer la bande 4 fournie en valeurs entières en valeurs flottantes
Fonction ArcGIS : Spatial Analyse.tbx \ Tools \ Math \ Float



1. Calculer la fonction à partir de la formule **Turbidité NTU = 0,0498 * Réflectance B4 - 19,3574**
Fonction ArcGIS : Spatial Analyst Tools.tbx \ Map Algebra \ Raster Calculator

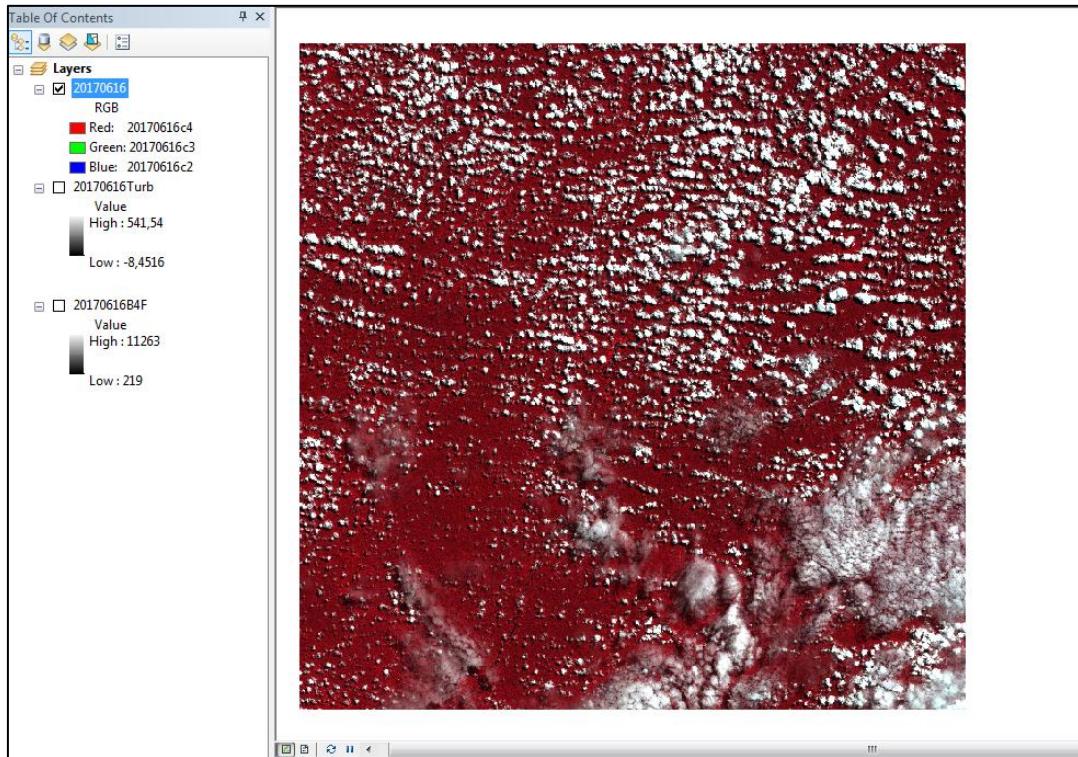


2. Créer un fichier image multibandes à partir avec les 4 bandes précédemment chargées.
Fonction ArcGIS : Data Management Tools.Tbx \ Raster \ Raster Processing \ Composite Bands

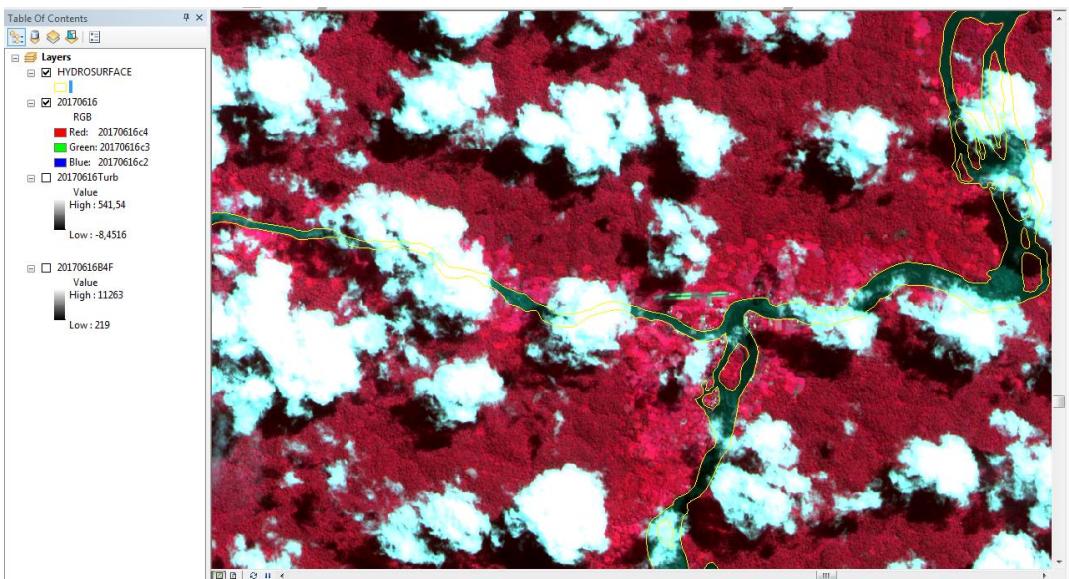


3. Afficher, à partir de l'image multibande, une image en fausse couleur et appliquer un étalement de dynamique permettant d'optimiser la visualisation des rivières.
 Rouge/Vert/Bleu : 4(bande8)/ 3(bande4) / 2(bande3)

Suivi de la turbidité par télédétection

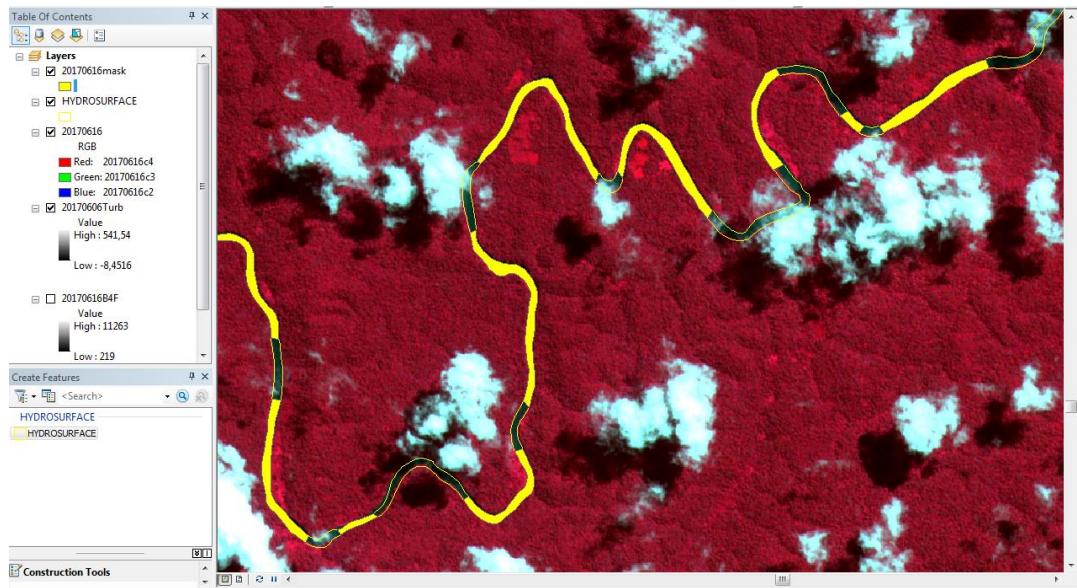


4. Afficher la couche vecteur HYDROSURFACE sur la composition colorée 432 (ici sur Camopi).

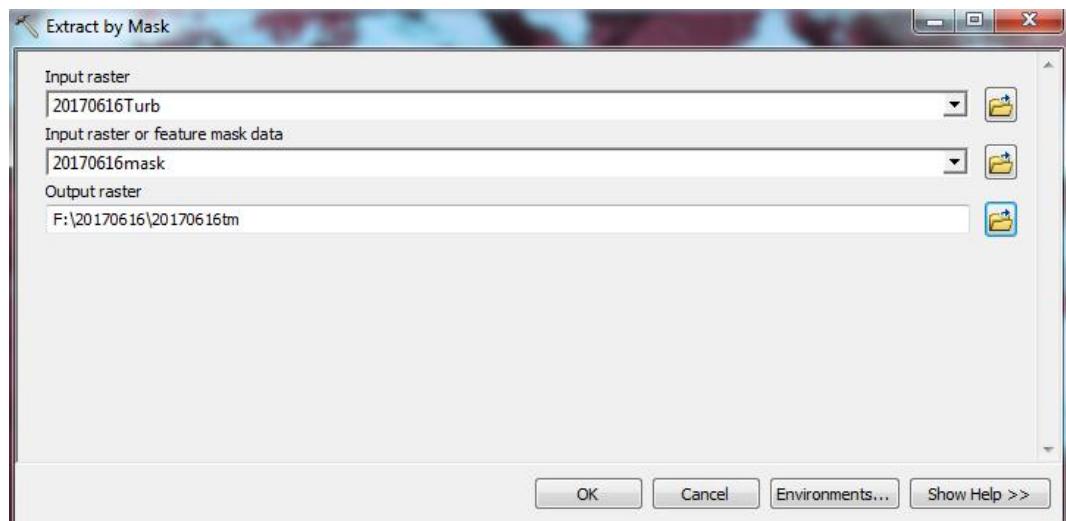


5. Rendre modifiable la couche HYDROSURFACE et supprimer manuellement toutes les zones où l'on a des nuages, des ombres de nuages, des zones de réflexion spéculaire et des hauts-fonds afin d'obtenir un masque uniquement des parties valides de rivière (ici en jaune). Sauver ce résultat (fichier 20170616mask).

NB : ce travail ne sera plus nécessaire lorsqu'il sera mis au point une méthode de masquage automatique.



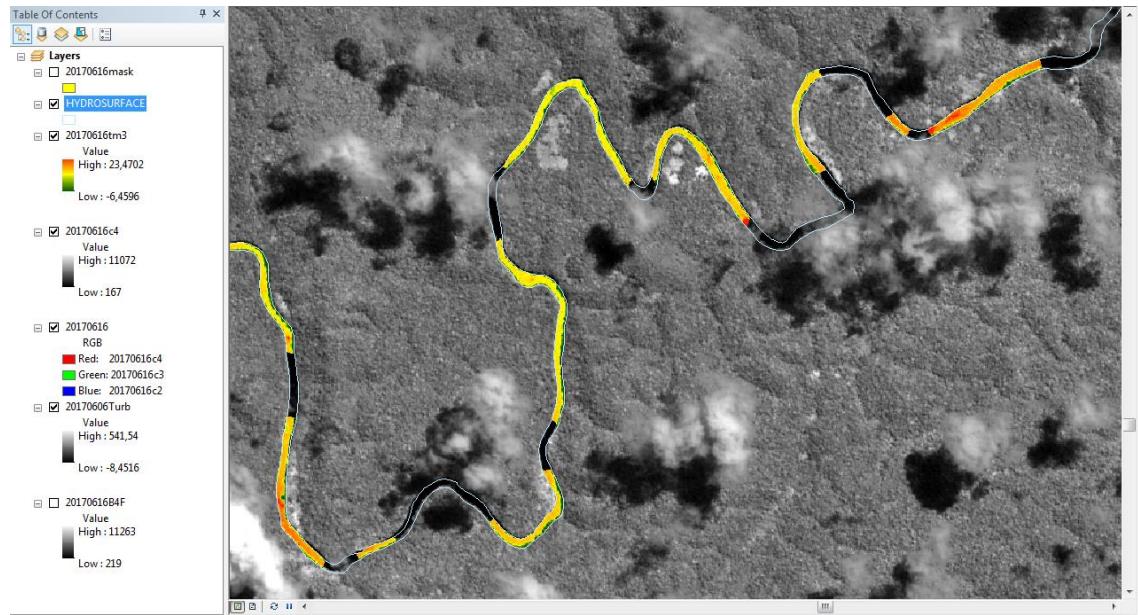
6. Ne retenir que les zones de rivières valides en utilisant le masque précédemment généré.
Fonction ArcGIS : Spatial Analyst Tools.Tbx \ Extraction\ Extract By Mask



7. Afficher le fichier précédemment avec une charte de couleur.

NB : les valeurs négatives obtenues correspondent à des zones d'ombre de forêt bordière. Les plus fortes peuvent correspondre à des zones de hauts-fonds et/ou de réflexion spéculaire.

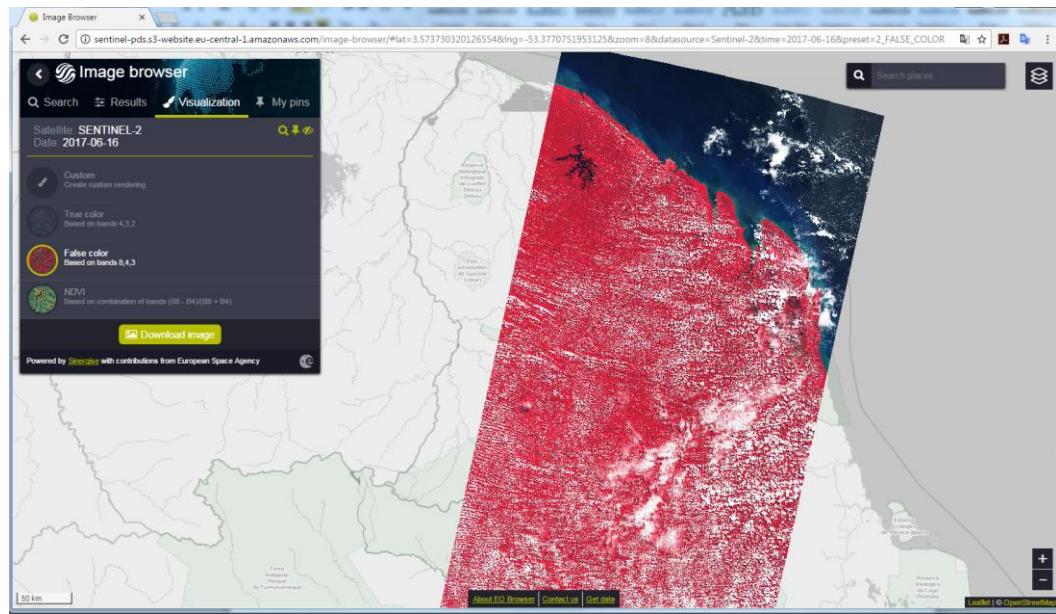
Suivi de la turbidité par télédétection



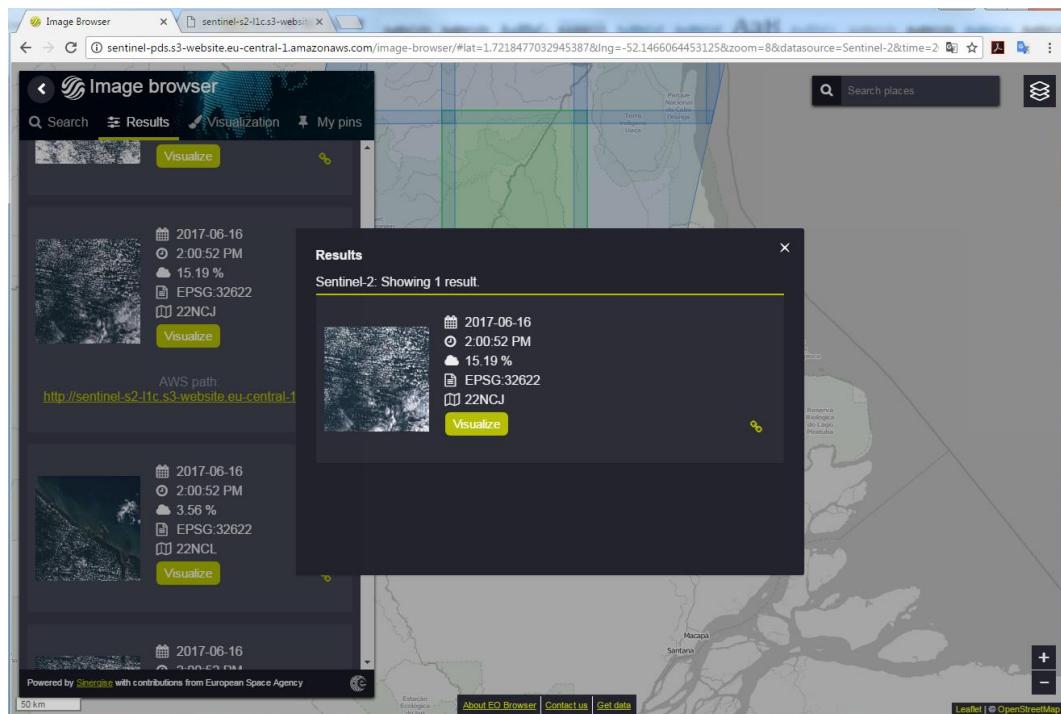
Annexe 7

Procédure d'obtention de la turbidité par SENTINEL 2 (QGis)

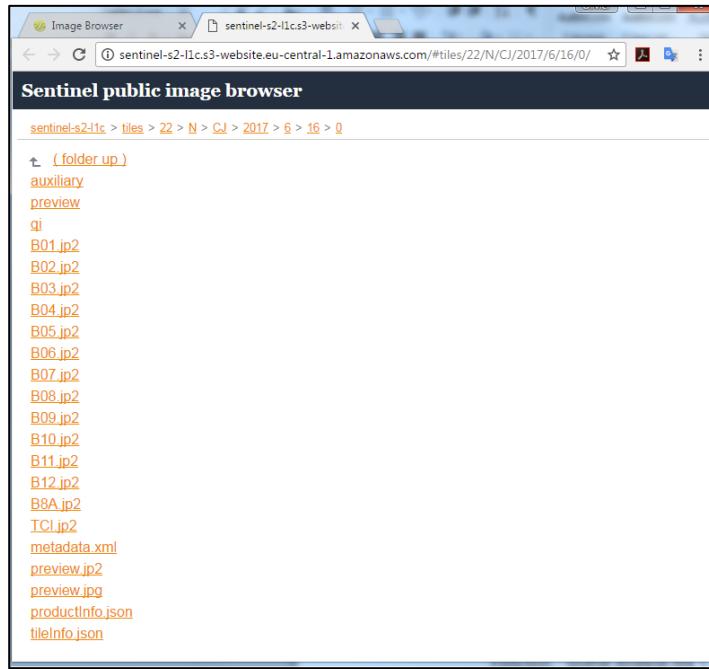
1. Aller sur le site <http://sentinel-pds.s3-website.eu-central-1.amazonaws.com/image-browser/#lat=3.8149271085491847&lng=-53.009033203125&zoom=8>



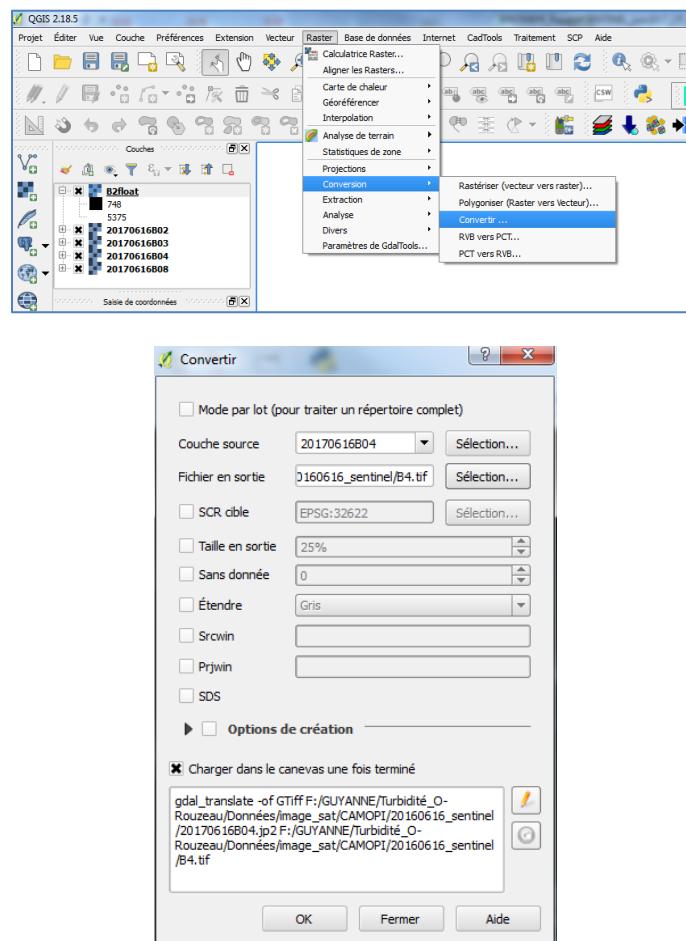
2. Télécharger les bandes 2,3 4 et 8 des scènes SENTINEL 2 (exemple ici : la scène 22NCJ du 16/06/2017)



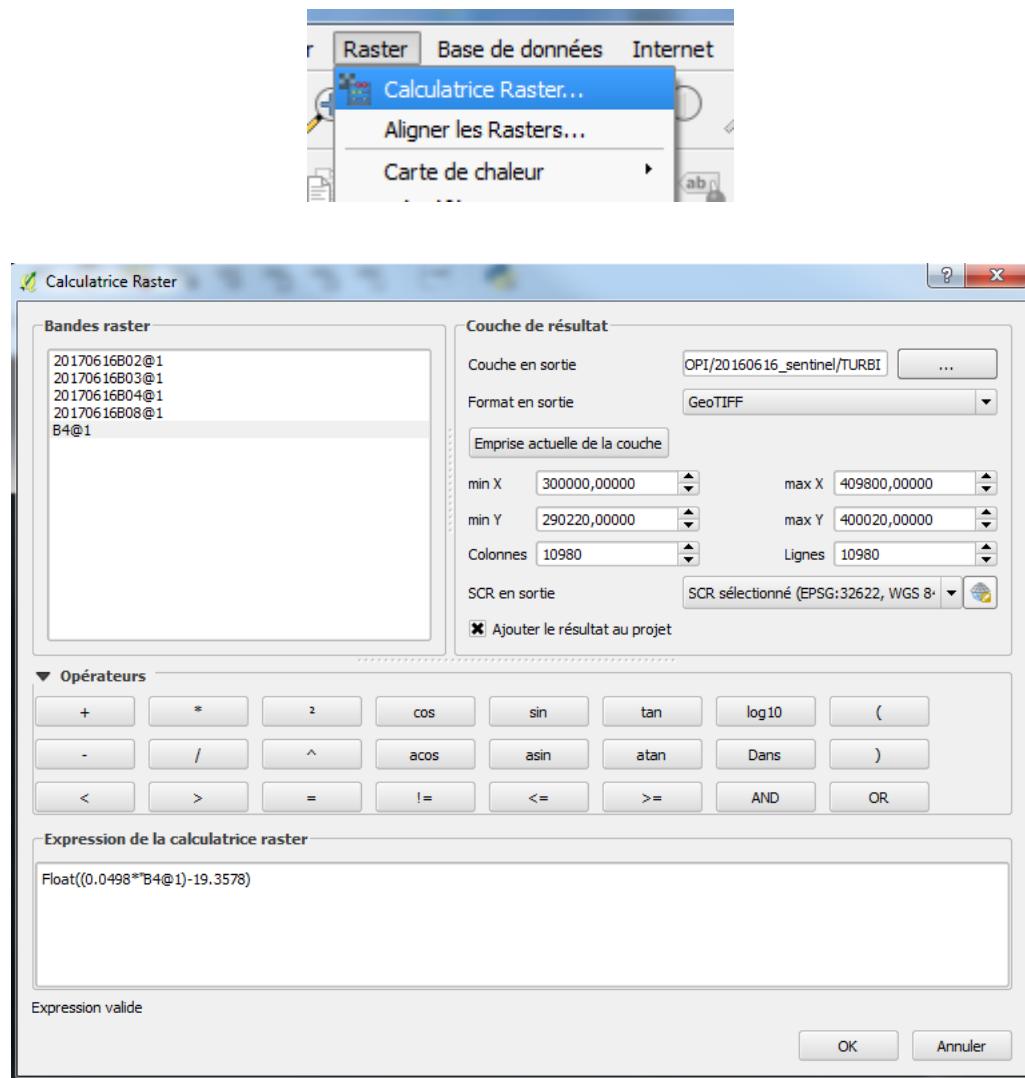
Suivi de la turbidité par télédétection



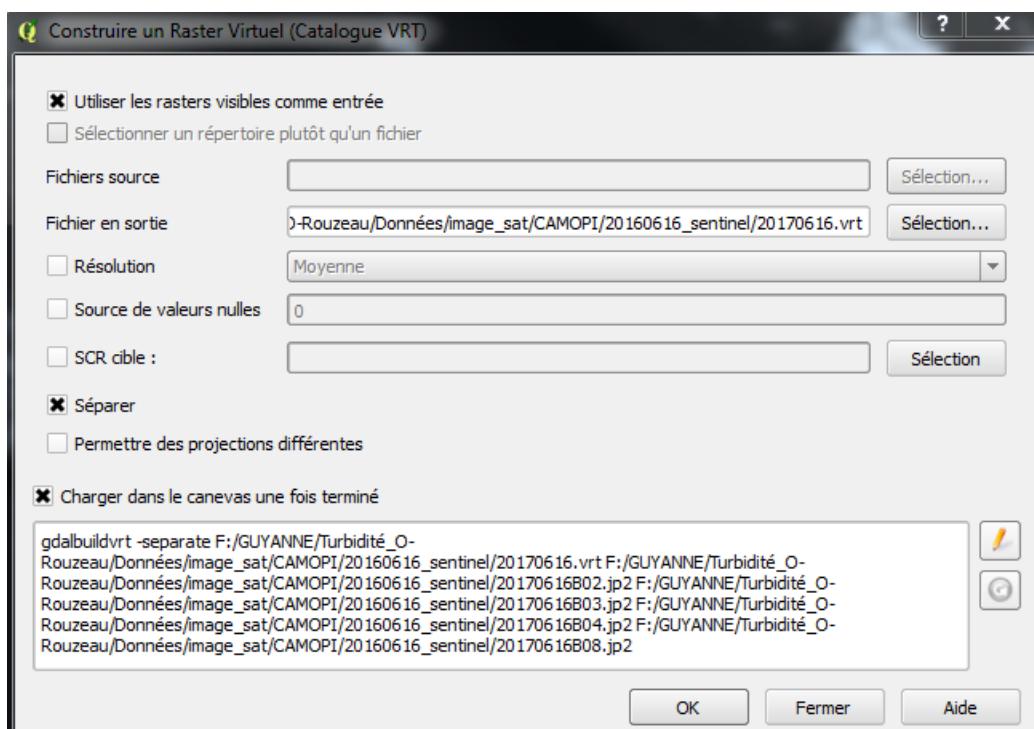
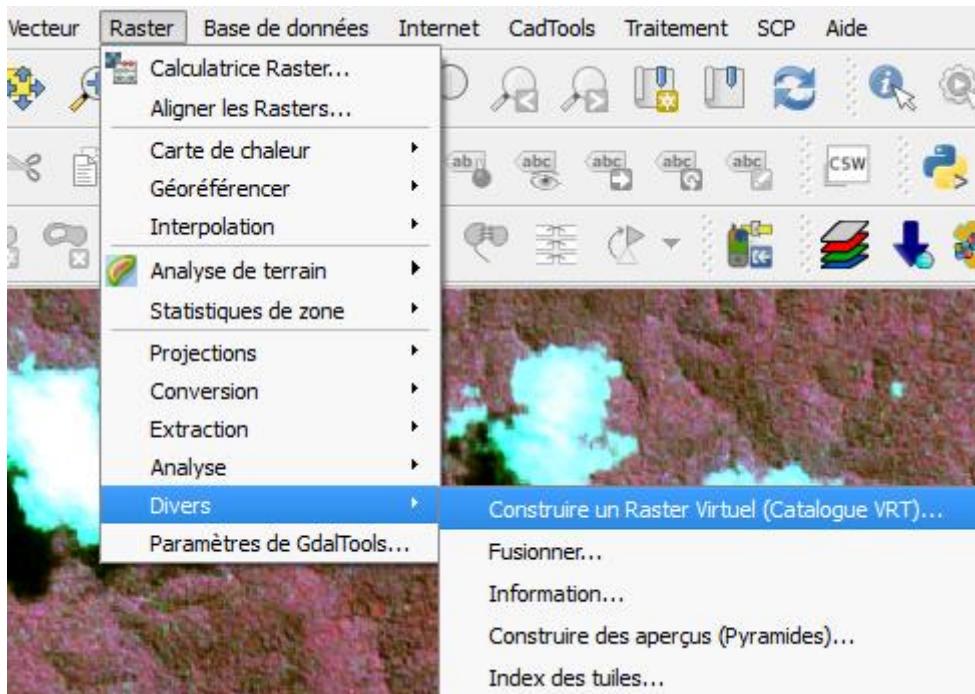
3. Convertir le fichier correspondant à la bande 4 de jp2000 en GeoTiff Fonction QGis : Raster / Conversion / Convertir



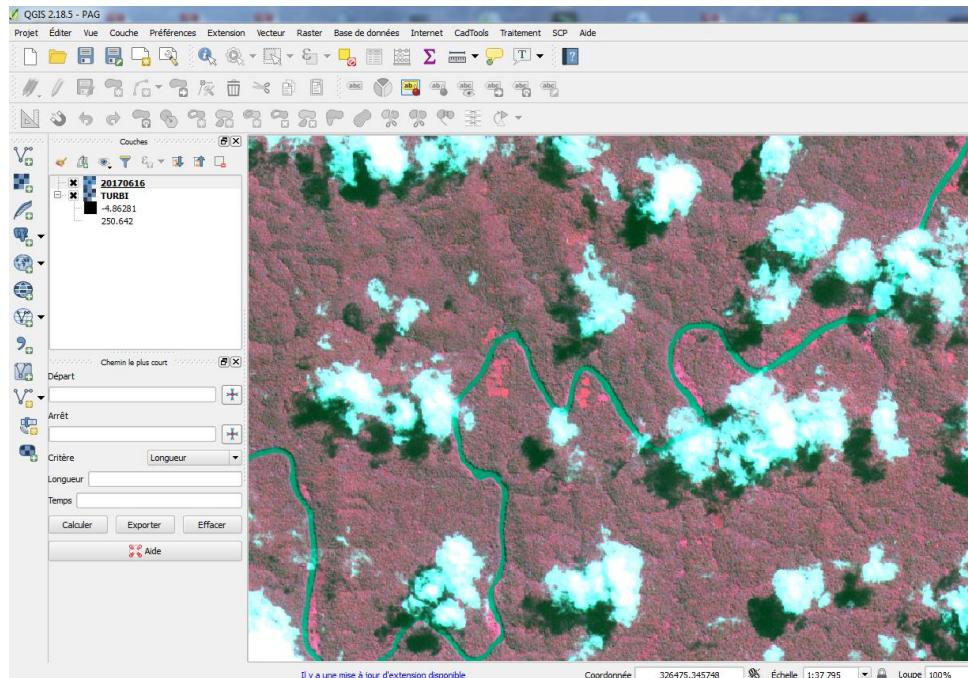
4. Créer le fichier de turbidité selon la loi **Turbidité_{NTU} = 0,0498 * Réflectance_{B4} – 19,3574**
Fonction QGis : Raster / Calculatrice Raster



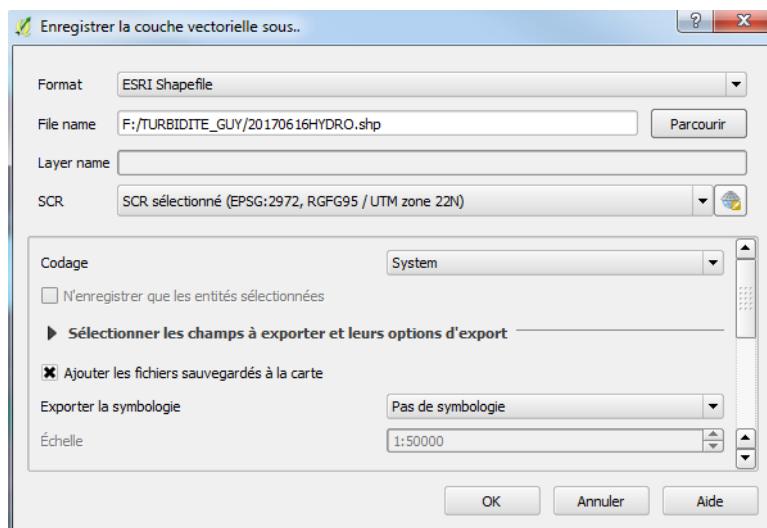
5. Créer un fichier image multibandes à partir avec les 4 bandes précédemment chargées.
Fonction QGis : Raster / Divers / Construire un Raster Virtuel (Catalogue VRT)



6. Afficher, à partir de l'image multibande, une image en fausse couleur et appliquer un étalement de dynamique permettant d'optimiser la visualisation des rivières.
Rouge/Vert/Bleu : 4(bande8)/ 3(bande4) / 2(bande3)

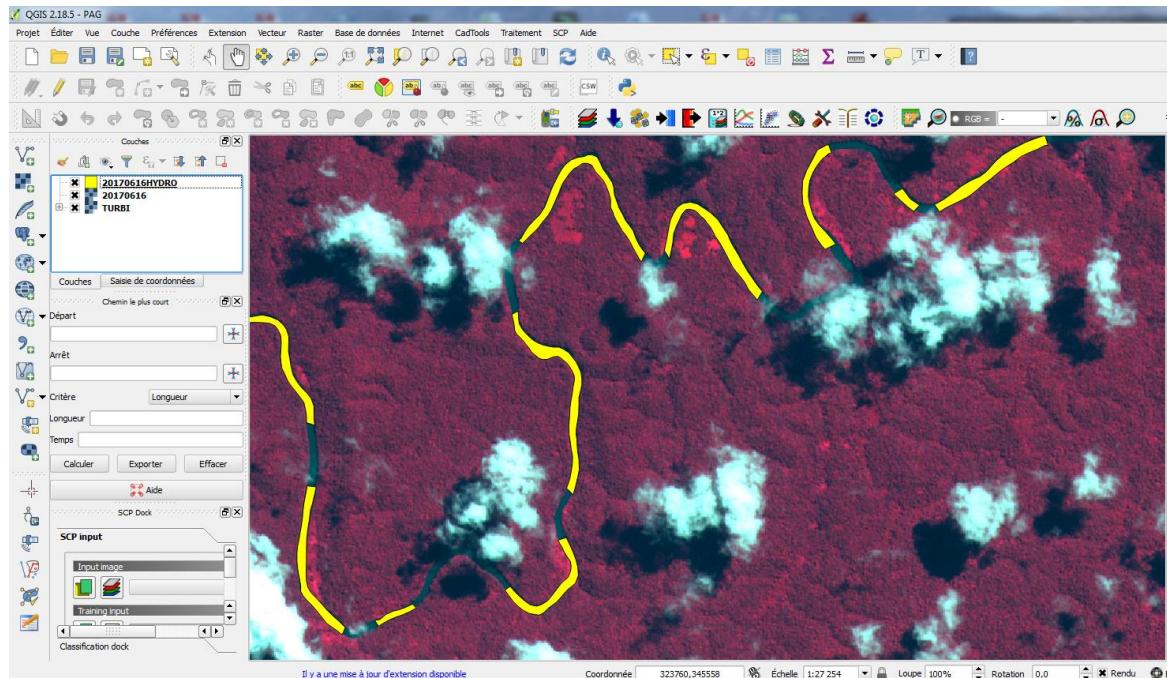


7. Afficher le fichier vecteur HYDROSURFACE. Le sauver sous 20170616HYDRO

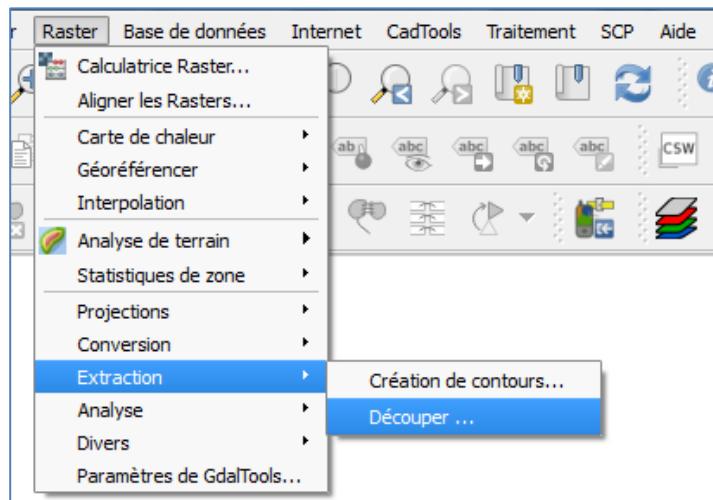


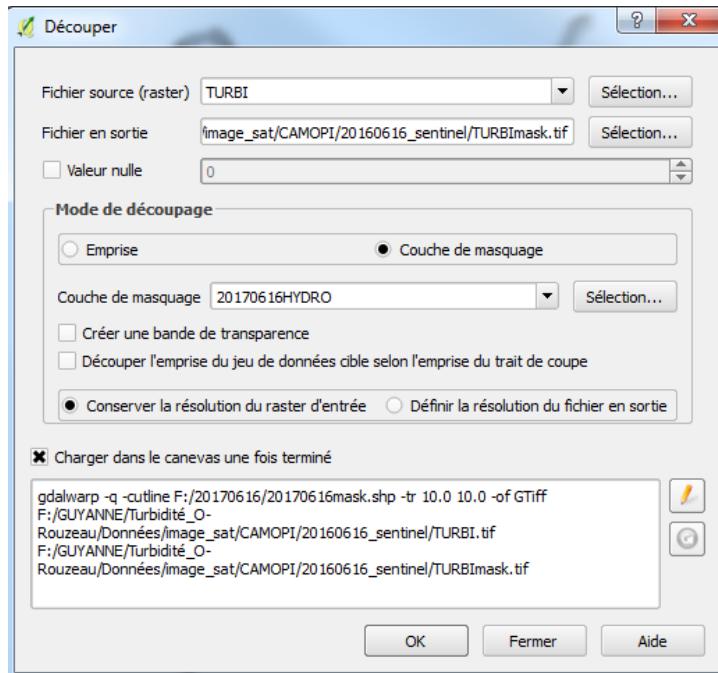
8. Rendre 20170616HYDRO modifiable et supprimer manuellement les parties où il y a des nuages, des ombres, de la réflexion spéculaire ou des hauts-fonds.

Suivi de la turbidité par télédétection



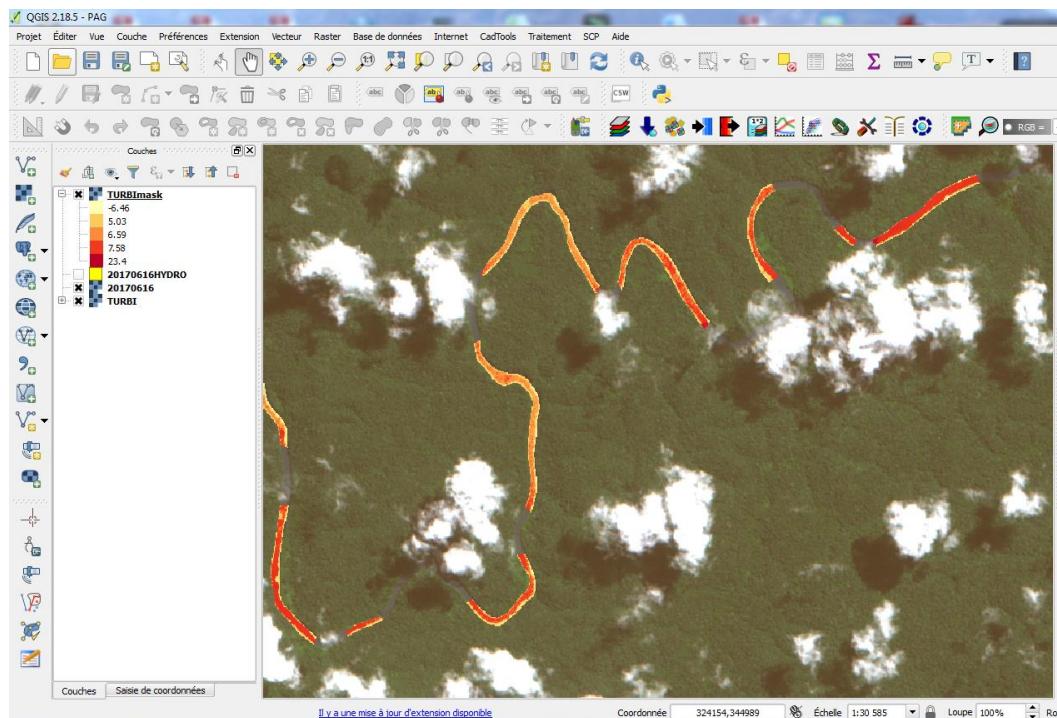
9. Extraire de la couche TURBI uniquement les parties valides de rivières
- Fonction QGis : Raster / Extraction / Découper





10. Afficher le fichier précédemment avec une charte de couleur.

NB : les valeurs négatives obtenues correspondent à des zones d'ombre de forêt bordière. Les plus fortes peuvent correspondre à des zones de hauts-fonds et/ou de réflexion spéculaire.





Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale de Guyane
Domaine de Suzini - Route de Montabo
BP 552
97333 Cayenne Cedex 2
Tél. : 05 94 30 06 24