

5 Boulevard Descartes
Cité Descartes
77420 Champs-Sur-Marne

6 & 8 Avenue Blaise Pascal
Cité Descartes
77420 Champs-Sur-Marne

Les éruptions volcaniques : une catastrophe naturelle aux multiples répercussions sur la biodiversité réunionnaise

Projet de Télédétection du
12/12/2018 au 15/03/2019



Remerciements

Nous tenons à remercier particulièrement Monsieur Pierre-Louis FRISON, responsable UPEM du Master 2 IGAST : Informations Géographiques, Analyses Spatiales et Télédétection, pour nous avoir enseigné les principes fondamentaux de la télédétection, tant d'un point de vue théorique que pratique.

Nous tenons à remercier Monsieur Nicolas VILLENEUVE, spécialiste en Télédétection affecté au centre de volcanologie de l'île de La Réunion, qui nous a aiguillé sur une piste de recherche qui fait l'objet d'une grande importance aujourd'hui dans la prévention des risques d'incendie sur l'île d'une part, puis d'autre part, nous a donné accès à des données optiques/radars, centralisés sur cette île.

Nous terminons en remerciant particulièrement les administrateurs de la plate-forme KALIDEOS, qui a bien voulu nous laisser un accès privilégié aux images, en échange d'un compte-rendu de notre projet. Ce dispositif est à l'initiative du CNES, vise à promouvoir et à démontrer l'usage des données spatiales en apportant un soutien aux actions de R&D.

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble du corps enseignant de l'ENSG et de l'UPEM, Monsieur Marc POUPÉE, ainsi que Monsieur Benoît TOULOUSE pour leurs connaissances en télédétection.

Introduction

Le Piton de la Fournaise, dont le point culminant est situé à 2 632 mètres d'altitude, est le volcan actif de l'île de La Réunion. Il correspond au sommet et au flanc oriental du massif du Piton de la Fournaise, un volcan bouclier qui constitue 40 % de l'île dans sa partie sud-est.

Le Piton de la Fournaise compte parmi les volcans les plus actifs de la planète : par la fréquence des nouvelles éruptions (en moyenne une tous les neuf mois au cours des dix dernières années), il tient probablement le premier rang mondial par le volume moyen émis de lave (estimé à $0,32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Depuis l'installation en 1979 de l'observatoire volcanologique, le Piton de la Fournaise est l'un des volcans les plus surveillés. L'accès est relativement aisé, notamment par la route forestière du Volcan ou par la route des Laves, ce qui permet parfois au public d'assister au spectacle des projections et des coulées de lave.

Ce projet a été réalisé dans le cadre de la formation Master 2 IGAST (Informations Géographiques, Analyses Spatiales et Télédétection) enseignée à l'École Nationale Des Sciences Géographiques, en partenariat avec l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée, localisée à Champs-Sur-Marne. Le but du projet aura été, suite à un entretien téléphonique avec Monsieur Nicolas VILLENEUVE, d'essayer de caractériser le mieux possible l'expansion du lichen dans la zone du Grand Brûlé, sur le flanc Est du Piton De La Fournaise, afin de comprendre au mieux le comportement de l'incendie qui s'est déclaré dans ce milieu, le 20 Janvier 2019, et qui aurait causé près de 2000ha de dégâts d'après les premières informations.

Dans la section 1, nous présentons en détail le contexte de notre étude, c'est-à-dire la zone d'étude précisément, et les causes et conséquences de cet incendie. Nous terminerons par une brève présentation du lichen, notre mousse que nous tenterons de caractériser tout au long de ce projet.

Dans la section 2, nous établissons un suivi saisonnier et annuel de l'évolution de la végétation au Piton De La Fournaise. Nous utiliserons et interpréterons différents indices en télédétection comme le NDVI, l'indice de forme et de couleur. Nous aurons préalablement délimité les zones recouvertes de végétation des zones de sols nus.

Dans la section 3, nous essayerons de faire de la prévention et de l'analyse d'un incendie. En effet, à l'issu des classifications, notamment d'une image Pléiades d'une résolution spatiale de 3m, nous cartographierons la zone de végétation basse (mousse), que nous superposerons à la zone qui a réellement brûlée durant l'incendie, et nous pourrions estimer la superficie du parc naturel qui a été ravagée par les flammes. Cette étude optique sera comparée à une cartographie issue d'un traitement RADAR.

Le travail relaté dans ce rapport a donné lieu à diverses analyses et pistes d'optimisations notamment par rapport à la gestion des nuages, qui ont un impact sur nos estimations de surfaces.

REMERCIEMENTS.....	2
INTRODUCTION	3
1. PRESENTATION DU CONTEXTE DE L'ETUDE	6
1.1. ZONE D'ETUDE : LE GRAND BRULE (COTE EST)	6
1.2. CONTEXTE DE L'ETUDE	7
1.3. PROLIFERATION DU LICHEN A LA REUNION	8
2. SUIVI PERIODIQUE DE LA VEGETATION	10
2.1. COMPREHENSION DE LA ZONE PAR DES INDICES DE TELEDETECTION	10
2.1.1. Classification binaire, via l'utilisation d'Orfeo Tool Box sur un NDVI.....	10
2.1.2. Indice du NDVI sur une année civile	11
2.1.3. Indice de forme sur une année civile.....	13
2.1.4. Indice de couleur sur une année civile.....	14
2.2. ÉVOLUTION DE LA VEGETATION AU COURS DE L'ANNEE	16
2.2.1. Édition des ROI	16
2.2.2. Résultats obtenus.....	17
2.2.3. Analyse et critique.....	19
2.2.4. Estimation de la surface recouverte de mousse.....	21
2.3. COMPORTEMENT SPECTRAL IR DE LA MOUSSE	22
2.3.1. Forte activité chlorophyllienne.....	23
2.3.2. Activité chlorophyllienne perturbée	25
3. GESTION, PREVENTION ET ANALYSE D'UN INCENDIE FORESTIER.....	26
3.1. DONNEES DE REFERENCES.....	26
3.2. ÉTUDE DES DONNEES SENTINEL 2 DU 21 FEVRIER 2019	26
3.3. CALCUL DE CLASSIFICATION SENTINEL-2 DU 21 FEVRIER 2019	27
3.4. COMPARATIF D'UNE ANALYSE RADAR AVEC L'OPTIQUE.....	28
3.4.1. Analyse et résultat	29
CONCLUSION	30

Table des figures

Figure 1 Carte topographique (à gauche) et image satellite (à droite) du Piton De La Fournaise avec localisation du Grand Brûlé.	6
Figure 2 Image aérienne sur la Zone Du Grand Brûlé, avec coulée de lave.....	6
Figure 3 Incendie du 20 Janvier 2019, où plus de 2000ha ont brûlé, dans la zone du Grand Brûlé.....	7
Figure 4 Carte géologique du BRGM, sur Le Piton De La Fournaise.	7
Figure 5 Traitement RADAR SENTINEL-1 pour déterminer la zone impactée par l'incendie.....	8
Figure 6 Cartographie de la zone impactée par l'incendie superposée à une image SENTINEL-2.	8
Figure 7 Exemple de lichen poussant sur une végétation basse.	9
Figure 8 Vue microscopique du Campylopus aureonitens.	9
Figure 9 Ensemble des images Sentinel-2 utilisées pour notre étude.....	10
Figure 10 Masque définissant l'emprise de notre zone d'étude autour du Piton De La Fournaise.	10
Figure 11 Classification Random Forest sol divers / végétation (OTB), image Sentinel-2, datant du 28 Mars 2016.....	11
Figure 12 Calcul du NDVI sur la zone d'étude (OTB), image Sentinel-2, datant du 28 Mars 2016.	11
Figure 13 Ensemble des indicateurs NDVI calculés sur les images Sentinel-2 pour une année.....	12
Figure 14 Indice de forme sur les images Sentinel-2.	14
Figure 15 Indice de couleurs sur les images Sentinel-2.	15
Figure 16 Différents ROI sur nos classes qui nous serviront de vérités terrains.	16
Figure 17 Exemple d'ombre de nuage sur une zone végétalisée.	17
Figure 18 Exemple d'hyperplan du SVM, sur 2 classes.	17
Figure 19 Classifications des images Sentinel-2.....	19
Figure 20 Séparabilité des classes une fois les ROI dessinées sur l'image Sentinel-2 du 16/07/2018.	19
Figure 21 Exemple d'une matrice de confusion suite à une SVM, sur l'image Sentinel-2, datant du 16/07/2018. ...	20
Figure 22 Image Pléiades de résolution spatiale 3m, du 01/07/2018.	21
Figure 23 Classification supervisée de l'image Pléiades.	22
Figure 24 ROI sur une composition PIR (Sentinel B08) après incendie.....	23
Figure 25 ROI sur une composition PIR (Sentinel B08) avant incendie.	23
Figure 26 Signature spectrale de la mousse lors d'une forte activité chlorophyllienne.....	24
Figure 27 Signature spectrale de la mousse lors d'une activité chlorophyllienne perturbée (coulée de lave).....	25
Figure 28 Signature spectrale de la mousse lors d'un incendie.....	25
Figure 29 Composition vraies couleurs de l'image Sentinel-2 du 21/02/2019.....	26
Figure 30 Composition PIR de l'image Sentinel-2 du 21/02/2019.....	26
Figure 31 Analyse de la composition du sol en PIR le 19/02/2019.....	27
Figure 32 Indice du couleur, le 19/02/2019.....	27
Figure 33 Indice de NDVI, le 19/02/2019.....	27
Figure 34 Analyse du NDVI suivant un segment de découpe.	28
Figure 35 Exemple de ROI pour la classification supervisée.....	28
Figure 36 Classification supervisée du 19/02/2019.....	29
Figure 37 Matrice de confusion en sortie de la classification supervisée du 19/02/2019.	29

1. Présentation du contexte de l'étude

1.1. Zone d'étude : Le Grand Brûlé (côte Est)

La délimitation du Grand Brûlé est la zone côtière faisant face à l'Océan Indien sur la côte Est de l'île de La Réunion, en amont de la route Nationale 2. C'est la dernière caldera formée par le Piton de la Fournaise. Elle est située à 150m d'altitude en moyenne et est composée de végétation haute (grands arbres feuillus) et de végétation basse (repousses issues des coulées de laves). De plus, nous pouvons distinguer des zones sans végétations apparentes car ce sont les stigmates des coulées de laves. Il est important de noter qu'il faut en moyenne 10 ans afin de revoir de la végétation recoloniser le sol, suite au passage de la lave. La figure suivante est une représentation cartographique tirée du Géoportail (IGN) qui nous permet de localiser précisément notre zone d'étude.



Figure 1 Carte topographique (à gauche) et image satellite (à droite) du Piton De La Fournaise avec localisation du Grand Brûlé.



Figure 2 Image aérienne sur la Zone Du Grand Brûlé, avec coulée de lave

1.2. Contexte de l'étude

Dans la matinée du 20 janvier 2019, un incendie a eu lieu dans la zone dite du Grand Brûlé. Cet incendie s'est propagé des hauteurs vers la route reliant Sainte-Rose et Saint-Philippe. L'incendie a proliféré 5 jours sur les flancs du volcan avant d'être maîtrisé. Il a au total brûlé entre 1500 et 2500 ha selon les sources (Pompiers & Centre de Recherche IRD à Montpellier).

Ce qui est intéressant, c'est que les incendies sont très rares dans cette zone. Même en présence de lave, la végétation ne brûle pas, ou peu. Des études terrains ont donc été réalisées pour savoir quelle pouvait être l'origine précise de cet incendie. Nous entrons pleinement dans ce cadre.



Figure 3 Incendie du 20 Janvier 2019, où plus de 2000ha ont brûlé, dans la zone du Grand Brûlé.

Les pompiers s'intéressent notamment à la végétation présente dans cette zone. En effet, cette zone est principalement composée de mousse et de lichen. Selon un témoignage de pompier, la vitesse de brûlage était rapide, mais ce n'est pas le vent qui est en cause mais l'ensemble de la végétation.

Selon la carte géologique livrée par le BRGM (figure suivante), nous sommes dans une zone composée exclusivement de basalte datant de moins de 5000 ans. Le basalte est une roche magmatique volcanique issue d'un magma refroidi assez rapidement. Ce qui est intéressant également, c'est que lorsqu'une éruption a lieu, la chaleur magmatique peut remonter jusqu'à la surface, et donc chauffer le basalte présent sur ces sols. Il peut donc être à l'origine de l'incendie.

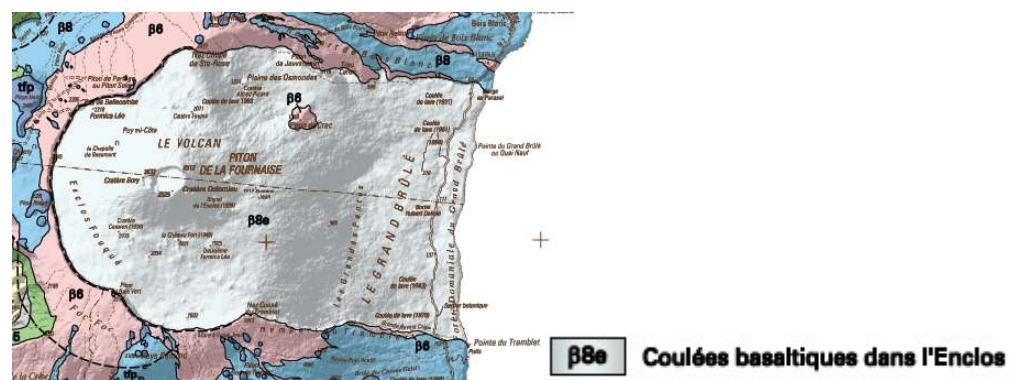


Figure 4 Carte géologique du BRGM, sur Le Piton De La Fournaise.

A la suite de cet incendie, une étude a été réalisée afin de pouvoir estimer au mieux la zone du Grand Brûlé qui a été le plus impactée, et combien d'hectares n'ont pas échappé aux flammes. L'auteur de cette première étude est Monsieur Thibault CATRY, ingénieur de Recherche IRD à Montpellier. Sur son produit cartographique, on peut voir spécifiquement la zone du Grand Brûlé concerné. Son étude pourra nous servir de référence lors de l'identification de l'incendie avec la télédétection optique. En effet, T.CATRY s'est appuyé sur des données RADAR pour extraire cette première délimitation. A l'aide d'un couple d'images Sentinel-1 datant du 17 et 29 Janvier 2019, d'une résolution spatiale de 10m mises à disposition librement par l'Agence Spatiale Européenne (ESA), il a été approximé que 1500ha ont brûlé. La figure suivante nous montre le résultat obtenu (région rouge) superposé à une image Sentinel-2 datant de l'une des dernières éruptions du volcan, le 19 Septembre 2018.

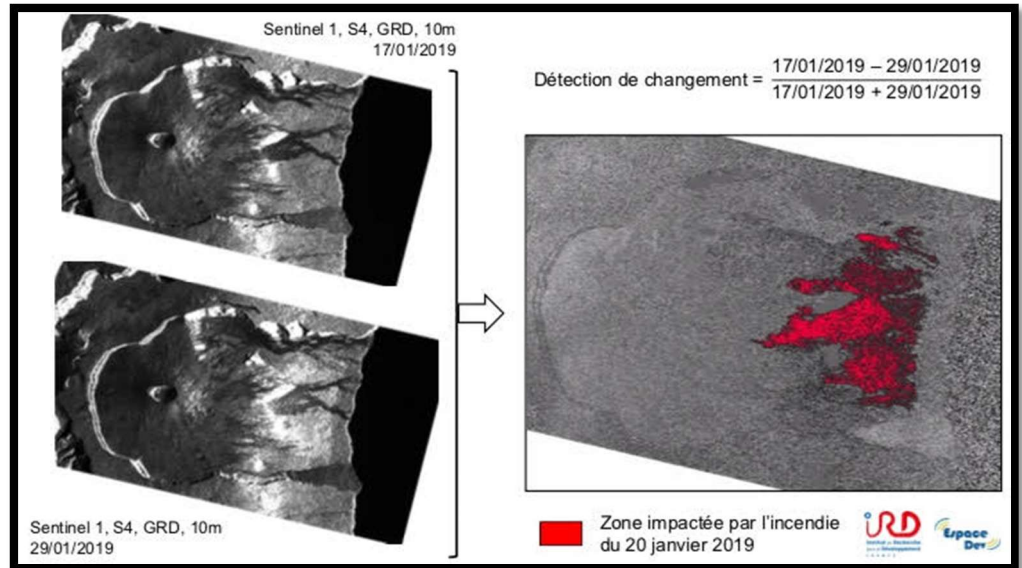


Figure 5 Traitement RADAR SENTINEL-1 pour déterminer la zone impactée par l'incendie.

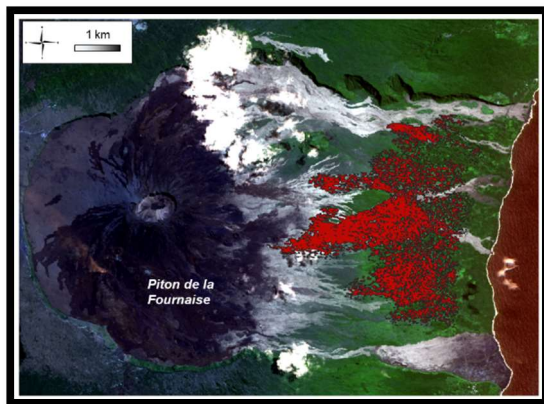


Figure 6 Cartographie de la zone impactée par l'incendie superposée à une image SENTINEL-2.

La mousse est donc à l'origine de l'incendie. Nous rechercherons donc dans cette étude comment elle prolifère sur plusieurs années et comment éviter que de tel incendie ne se reproduisent à l'avenir.

1.3. Prolifération du lichen à La Réunion

Les lichens et les mousses sont les premiers organismes à reprendre possession des lieux après une éruption et des coulées de laves. Les espèces de Stereocaulon Vulcani (Lichen) et les Campylopus aureonitens (mousse) sont les premières à reprendre vie. Des fougères (Nephrolepis abrupta) également se développent dans les fissures et blocs de laves, mais celles-ci restent d'une densité amoindrie du fait de l'exposition faible à la lumière du jour. Toutes ces espèces sont capables de vivre sur ces sols très pauvres en minéraux, et de supporter des conditions climatiques extrêmes, notamment les périodes de sécheresses et de fortes humidités.

Compte-rendu

Le Lichen appelé *Stereocaulon Vulcani* est une des premières espèces à recouvrir le sol après une éruption. Il faut en moyenne 2 ou 3 siècles après une coulée de lave avant qu'une forêt ne réapparaisse. Cette espèce donne une couleur blanche assez caractéristique à des coulées « noires ». Ces lichens sont apportés par le vent, et il lui faut en moyenne 5 ans pour que l'ensemble de la surface éclairée soient recouvertes. Quand la végétation a repris vie, le lichen peut la recouvrir. Il recouvre notamment les végétations basse (arbustes), et les troncs d'arbres pour une végétation hautes.



Figure 7 Exemple de lichen poussant sur une végétation basse.

La mousse appelé *Campylopus aureonitens* est une mousse qui recouvre la plupart de l'île de la Réunion. Elle peut atteindre une taille de 6 à 7 cm. Cette espèce est pionnière car c'est également une des premières à se régénérer après des coulées de laves. Elle se forme notamment sur des gros blocs de laves (composés de roches basaltiques). Elle pousse plutôt en basse altitude du Piton de la Fournaise.



Figure 8 Vue microscopique du *Campylopus aureonitens*.

2. Suivi périodique de la végétation

Tout au long de cette section, nous avons travaillé sur des années recouvrant 1 année civile. En effet, nous avons 5 images Sentinel-2A, définissant les datent suivantes :



Sentinel-2, 28 Mars
2016

Sentinel-2, 12 Avril
2017

Sentinel-2, 16 Juillet
2018

Sentinel-2, 24
Octobre 2018

Sentinel-2, 13
Décembre 2018

Figure 9 Ensemble des images Sentinel-2 utilisées pour notre étude.

2.1. Compréhension de la zone par des indices de télédétection

2.1.1. Classification binaire, via l'utilisation d'Orfeo Tool Box sur un NDVI

Dans cette section, nous avons décidé d'utiliser différents indices de télédétection afin de pouvoir distinguer de façon « vraie » notre végétation sur la zone étudiée. Pour ce faire, nous avons créé un masque spécifique à notre zone d'étude dans le but, des différents traitements à venir, minimiser le temps de calcul. La figure suivante nous montre l'emprise de notre masque sur notre zone.

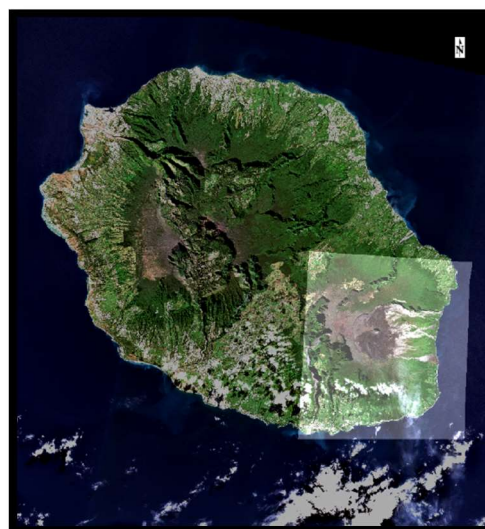


Figure 10 Masque définissant l'emprise de notre zone d'étude autour du Piton De La Fournaise.

Afin de suivre une certaine progression dans notre analyse de la végétation, nous avons tout d'abord effectué une classification sur une bande NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) afin d'obtenir une classification dite binaire de notre zone (sol divers / végétation). Sur les figures 2 figures suivantes nous pouvons bien distinguer la séparation entre une zone végétalisée et une zone non végétale. L'utilisation du NDVI est une bonne référence car il est directement lié à la végétation dans son interprétation. Nous aurions pu utiliser aussi le canal IR de Sentinel-2.

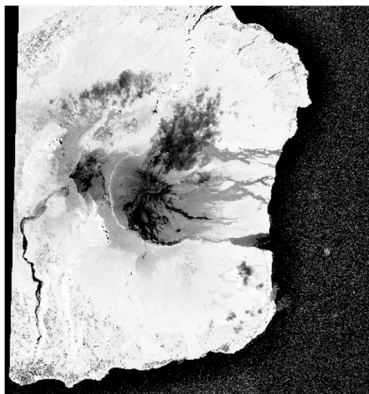


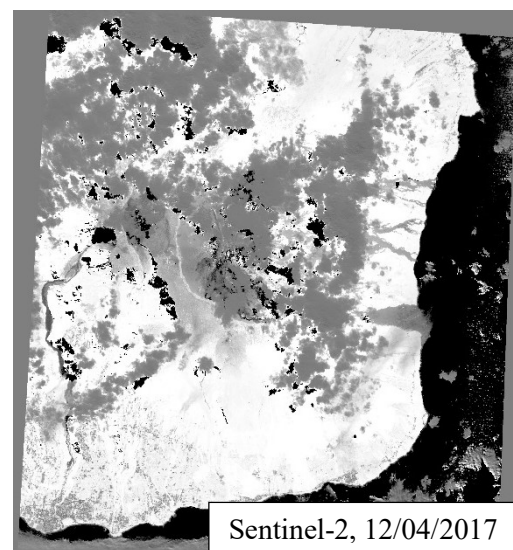
Figure 12 Calcul du NDVI sur la zone d'étude (OTB), image Sentinel-2, datant du 28 Mars 2016.



Figure 11 Classification Random Forest sol divers / végétation (OTB), image Sentinel-2, datant du 28 Mars 2016.

2.1.2. Indice du NDVI sur une année civile

Le premier indice de télédétection calculé sur notre zone d'étude est le NDVI. Cet indice met en valeurs la différence entre la bande visible du Rouge et celle du PIR. Cet indicateur est sensible à la vigueur et à la quantité de végétation. Les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du PIR. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le PIR, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Dans les images suivantes, nous avons calculé cet indicateur, et nous nous rendons compte d'une bonne séparabilité des sols nus, des nuages du couvert végétal. Cependant, il ne nous permet pas forcément de distinguer les différentes « intensités » liées aux types de végétations.



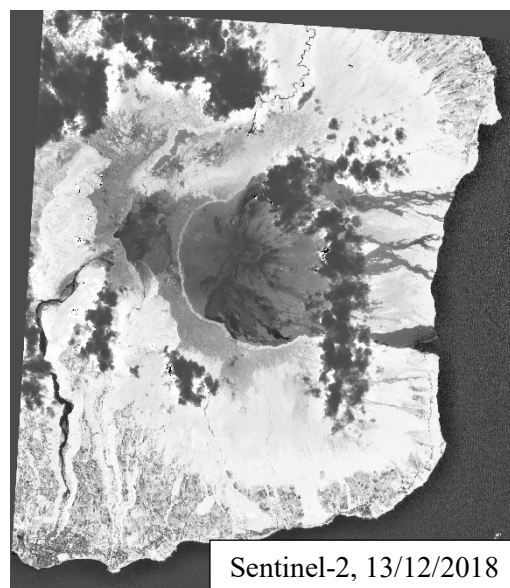
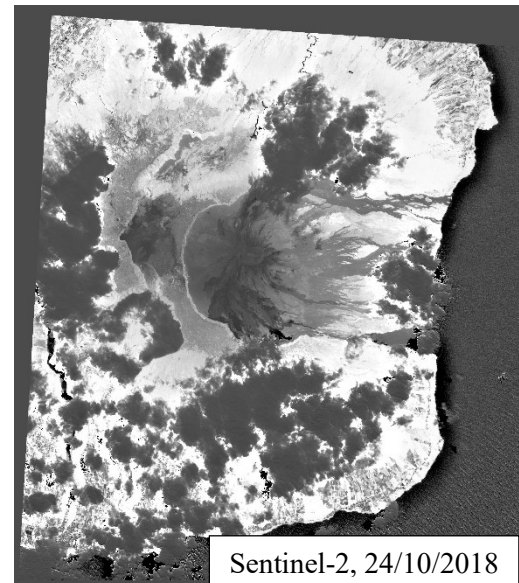
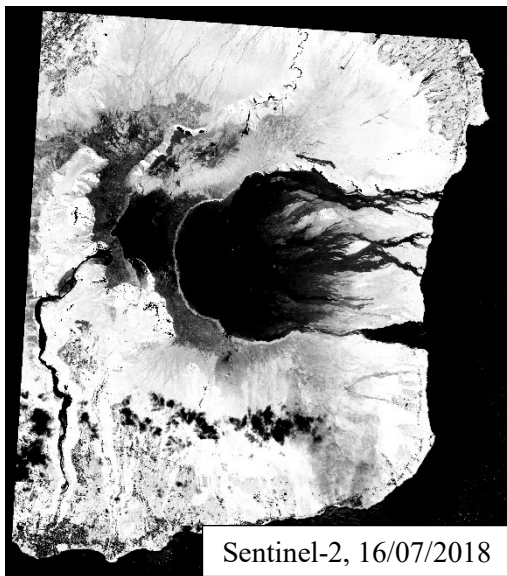


Figure 13 Ensemble des indicateurs NDVI calculés sur les images Sentinel-2 pour une année.

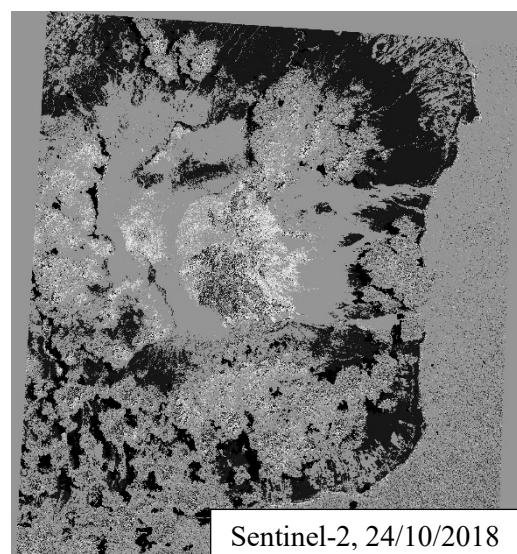
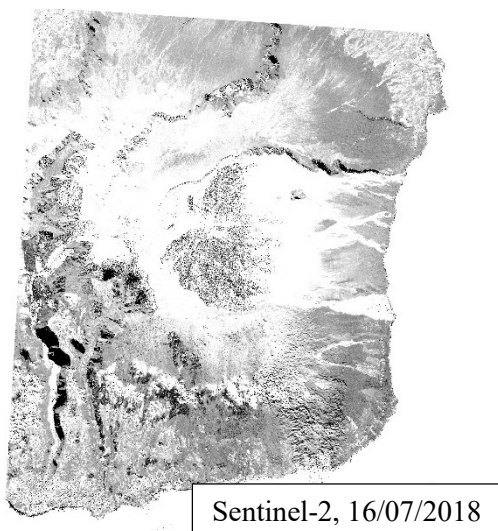
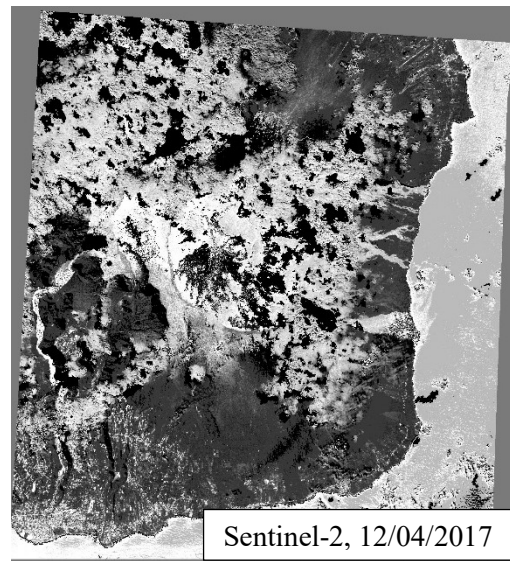
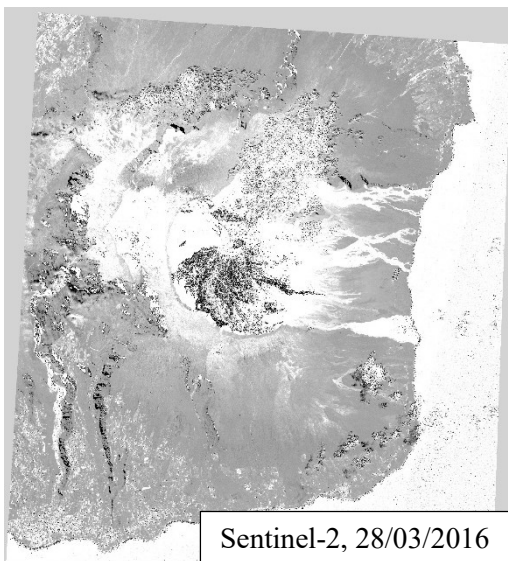
En analysant de manière minutieuse ces résultats, nous pouvons observer dans les zones de végétations quelques nuances de blancs/blancs grisés, qui peuvent déjà nous laisser penser à la présence de types de végétations différentes au cours des saisons, notamment au mois de décembre.

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

2.1.3. Indice de forme sur une année civile

L'indice de forme a été calculé afin de mettre en évidence les contours de zones des sols nus. Cet indicateur peut toutefois nous permettre de distinguer, si, au cours d'éruptions volcaniques, des zones de végétations brûlent plus facilement que d'autres. Nous pouvons appeler cette technique de la caractérisation des sols.

$$\text{Indice de forme} = \frac{2 * R - G - B}{G - B}$$



Compte-rendu

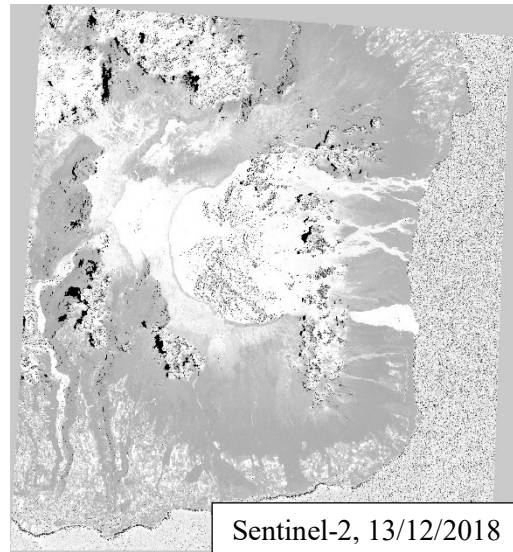


Figure 14 Indice de forme sur les images Sentinel-2.

2.1.4. Indice de couleur sur une année civile

L'indice de couleur, complémentaire d'un point de vue visuel du NDVI, il nous permet de mettre en évidence les zones de sols nus, des zones végétalisées. Il est important de noter que pour les sols nus, nous pouvons obtenir n types de réflectances.

$$\text{Indice de couleur} = \frac{R - V}{R + V}$$



Compte-rendu

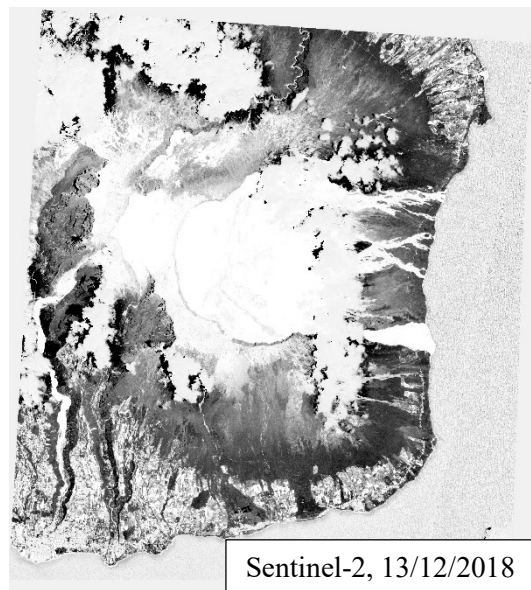
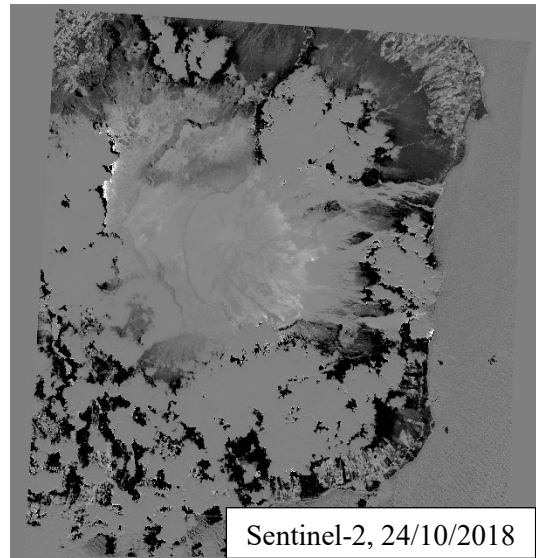


Figure 15 Indice de couleurs sur les images Sentinel-2.

2.2. Évolution de la végétation au cours de l'année

Maintenant que nous avons su distinguer, délimiter, et identifier la zone de végétation qui nous intéresse, nous allons pouvoir effectuer des classifications, en se focalisant sur l'expansion de la mousse dans la zone du Grand Brûlé. La stratégie a été la suivante :

- Composition colorée en PIR afin de distinguer plus facilement les types de végétations sur notre zone d'étude.
- Édition d'un masque qui nous servira pour l'ensemble des images à traiter. Cela est rendue possible puisque les produits sont un même système de référence, qui a pour EPSG : 37240 (UTM SUD).
- Réalisation de ROI pour chaque classe définie.
- Estimation de la séparabilité des classes.
- Calcul d'une classification.
- Extraction de la matrice de confusion.
- Analyse du résultat.

Les classes définies afin de réaliser nos classifications sont les suivantes :

- VH (végétation haute) / Green
- VB (végétation basse) / Sea Green
- SOL_NU / Maroon
- NUAGE / White
- EAU / Blue
- OMBRE_NUAGE (au cas où des ombres déportées recouvrent la végétation de façon excessive) / Magenta

2.2.1. Édition des ROI

L'ensemble des ROI de chacune des classes a été réalisé après une photo-interprétation dans la composition colorée PIR, couplée à l'aide du visible en cas de doute.

La figure suivante est l'exemple de ROI pour chaque classe, sur l'image Sentinel-2 datant du 16 Juillet 2018 :

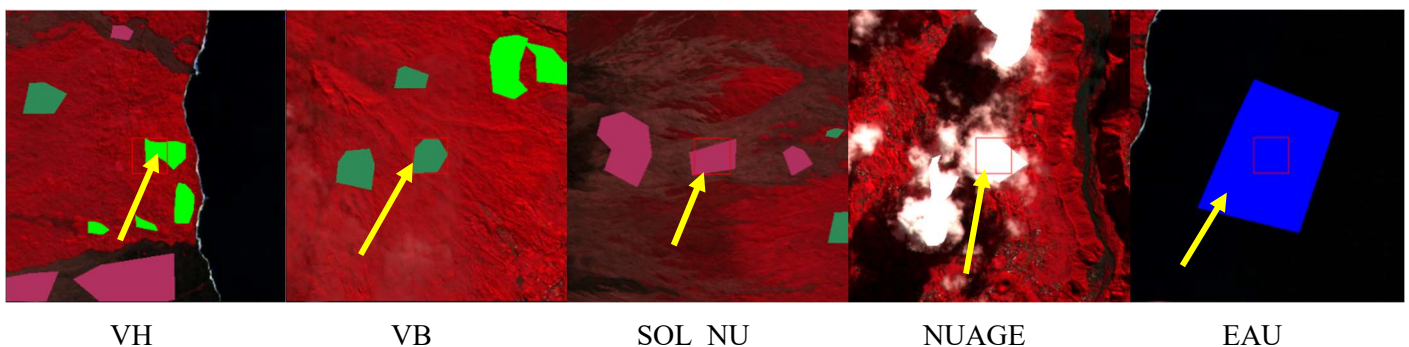
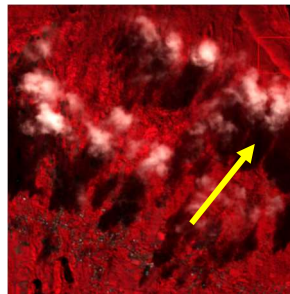


Figure 16 Différents ROI sur nos classes qui nous serviront de vérités terrains.

Compte-rendu

Comme nous l'avons signifié précédemment, nous avons créé une classe OMBRE_NUAGE lorsque ce phénomène atmosphérique encombrée de façon significative nos zones de végétation, afin de ne pas fausser nos résultats.



OMBRE_NUAGE

Figure 17 Exemple d'ombre de nuage sur une zone végétalisée.

2.2.2. Résultats obtenus

Pour l'ensemble des classifications, nous avons utilisé l'algorithme SVM (Support Vector Machine), qui est un classifieur discriminant défini formellement par un hyperplan séparateur. En d'autres termes, étant donné les données d'apprentissage étiquetées (apprentissage supervisé), l'algorithme génère un hyperplan optimal qui catégorise les nouveaux exemples. Dans un espace de deux dimensions, cet hyperplan est une ligne divisant un plan en deux parties, dans chacune des classes. La figure suivante explique sous forme de graphique le principe de l'hyperplan du SVM :

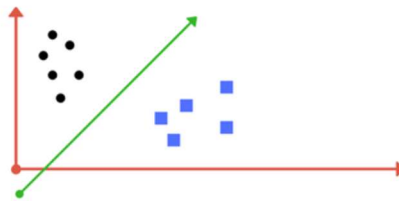
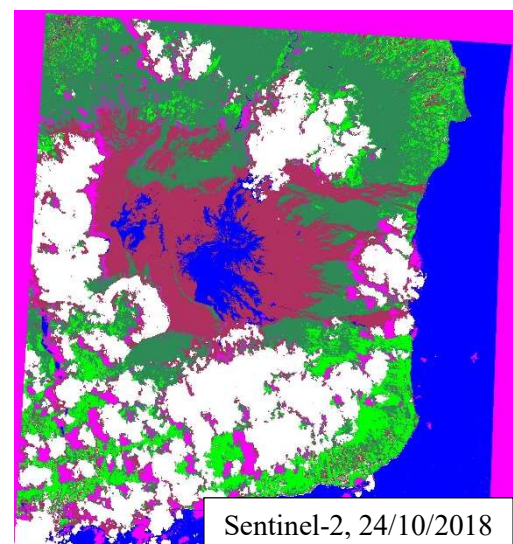
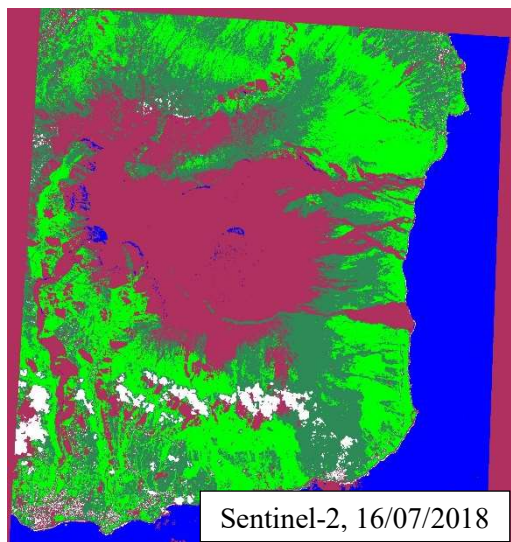
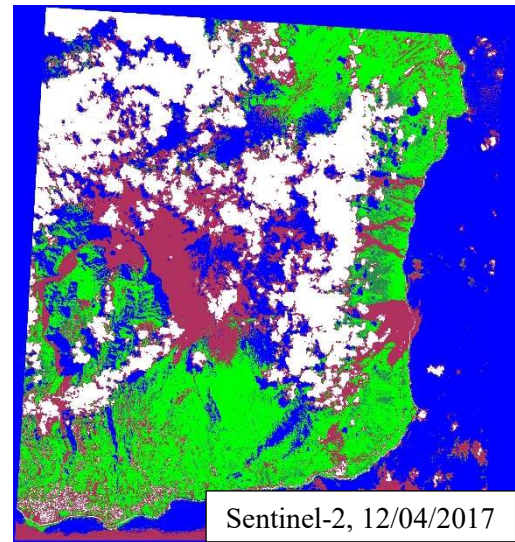
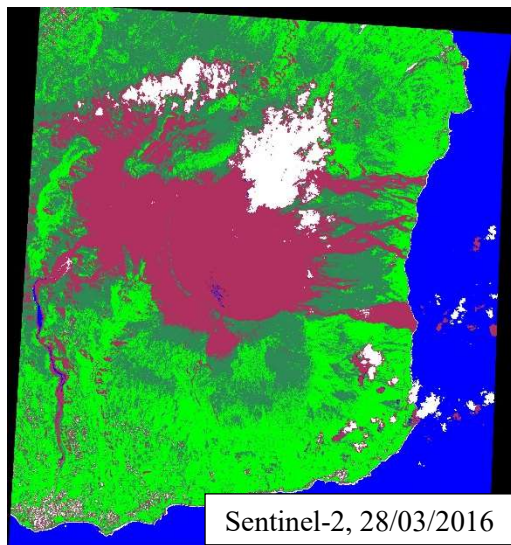


Figure 18 Exemple d'hyperplan du SVM, sur 2 classes.

Compte-rendu



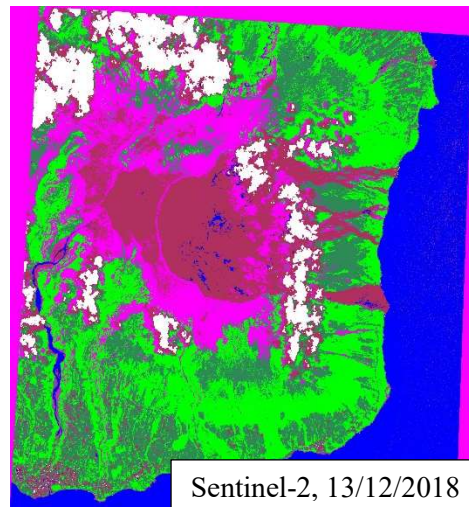


Figure 19 Classifications des images Sentinel-2.

2.2.3. Analyse et critique

Au fur et à mesure que nous avançons dans notre chaîne de traitement, nous avons, une fois les ROI dessinées, sorti les coefficients nous montrant la séparabilité de nos classes. Tout cela est observable sur la figure suivante, qui est la séparabilité des classes pour l'image Sentinel-2 datant du 16 Juillet 2018 :

```
Pair Separation (least to most);

VH [Green] 13221 points and VB [Sea Green] 17434 points - 1.90619914
SOL_NU [Maroon] 38417 points and EAU [Blue] 60453 points - 1.97480336
SOL_NU [Maroon] 38417 points and NUAGE [White] 19368 points - 1.99934653
VB [Sea Green] 17434 points and SOL_NU [Maroon] 38417 points - 1.99995542
VB [Sea Green] 17434 points and EAU [Blue] 60453 points - 1.99999965
VH [Green] 13221 points and EAU [Blue] 60453 points - 1.99999997
VH [Green] 13221 points and SOL_NU [Maroon] 38417 points - 1.99999998
VB [Sea Green] 17434 points and NUAGE [White] 19368 points - 2.00000000
NUAGE [White] 19368 points and EAU [Blue] 60453 points - 2.00000000
VH [Green] 13221 points and NUAGE [White] 19368 points - 2.00000000
```

Figure 20 Séparabilité des classes une fois les ROI dessinées sur l'image Sentinel-2 du 16/07/2018.

Compte-rendu

En analysant ce fichier, nous pouvons dire que les coefficients Kappa, ici en bout de ligne, sont tout à fait convenables puisque que nous sommes proches de 2, qui signifient une séparabilité parfaite de nos classes. Cependant, nous observons un coefficient plus faible entre la VH et la VB. Cela peut s'expliquer par le fait que la végétation n'était pas forcément au maximum de sa croissance à cette date d'une part, et d'autre part, nous devons noter que la mousse que nous observons, peut se propager sur la végétation haute.

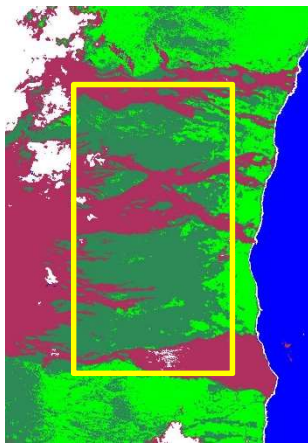
Une fois la classification terminée, nous avons pu sortir les matrices de confusions, qui expriment en « chiffres », la performance de notre algorithme sur notre zone d'étude. La figure ci-dessous est un exemple de de matrice, démontrant une très bonne performance de notre classification, au vue de la précision de nos données notamment, et l'indicateur Kappa ici, qui est presque à 100%.

Overall Accuracy = (90293/92666) 97.4392%
Kappa Coefficient = 0.9658

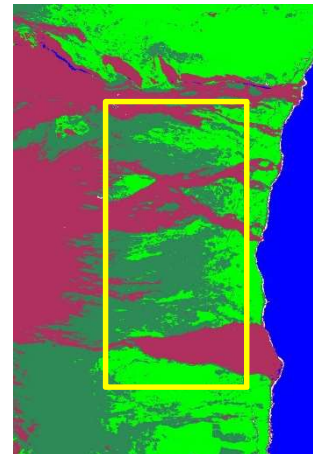
Class	Ground Truth (Pixels)				
	VH	VB	SOL_NU	NUAGE	EAU
Unclassified	0	0	0	0	0
VH	8670	1167	37	0	3
VB	1011	6066	12	0	0
SOL_NU	25	21	24888	28	8
NUAGE	0	0	0	18131	0
EAU	53	6	2	0	32538
Total	9759	7260	24939	18159	32549

Figure 21 Exemple d'une matrice de confusion suite à une SVM, sur l'image Sentinel-2, datant du 16/07/2018.

L'ensemble de ces classifications devait essayer de nous montrer l'évolution, d'un point de vue surfacique, de la mousse au cours des saisons, dans la zone du Grand Brûlé. Nous pouvons affirmer que l'expansion du lichen se fait de façon lente. En effet, nous ne pouvons pas observer de grandes différences entre la végétation haute et la végétation basse. De plus, la présence de nuage, camouflant notre zone d'étude, est un handicap dans l'appréciation de l'étendue de la végétation sur la zone. Cependant, nous pouvons constater, la forte croissance de la végétation haute de l'hiver à l'été. En effet, sur l'image datant du 28/03/2016, nous remarquons des zones de végétations hautes qui ne sont pas présentes sur l'image du 16/07/2018. La nature reprend le dessus sur la mousse.



Sentinel-2, 28/03/2016



Sentinel-2, 16/07/2018

2.2.4. Estimation de la surface recouverte de mousse

Dans l'optique de pouvoir estimer de la manière la plus précise la surface de végétation mousseuse sur la zone du Grand Brûlé, nous avons décidé de traiter une image Pléiades, d'une résolution spatiale de 3m, datant du 01 Juillet 2018, dont voici son aperçu.



Figure 22 Image Pléiades de résolution spatiale 3m, du 01/07/2018.

Comme pour les images Sentinel-2, nous avons effectué une classification supervisée sur Le Piton De La Fournaise :

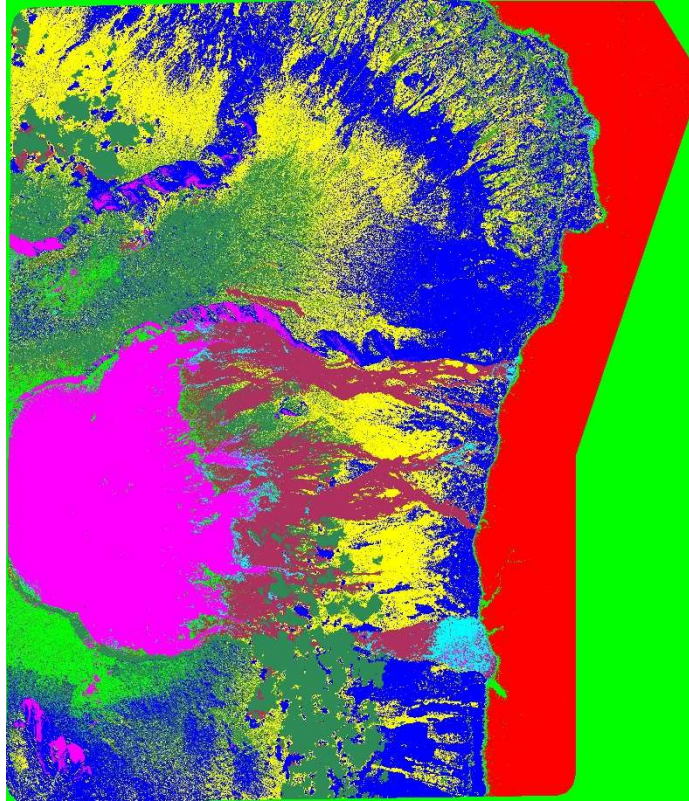


Figure 23 Classification supervisée de l'image Pléiades.

Grâce à cette classification fine, nous l'avons exporté sous la forme d'un fichier Shapefile utilisable sous un logiciel SIG. Après sélection de la végétation basse dans la zone du Grand Brûlé, nous avons estimé à 5 757ha, la superficie recouverte par le lichen sur notre zone d'étude.

2.3. Comportement spectral IR de la mousse

Pour étudier l'évolution de la couche de végétation sur la zone du Grand Brûlé, nous avons choisi de sélectionner une « Region Of Interest » (ROI) unique pour toutes les images à toutes les dates pour comparer leurs réflectances et la répartition des pixels.

On a choisi de ne s'intéresser qu'à la Bande 8 de Sentinel, c'est-à-dire la bande du Proche Infra-Rouge car c'est elle qui nous montre le mieux la vitalité de la végétation, et donc de la mousse.

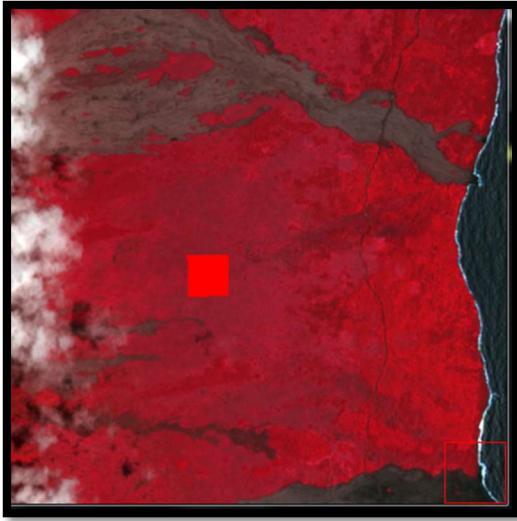


Figure 25 ROI sur une composition PIR
(Sentinel B08) avant incendie.

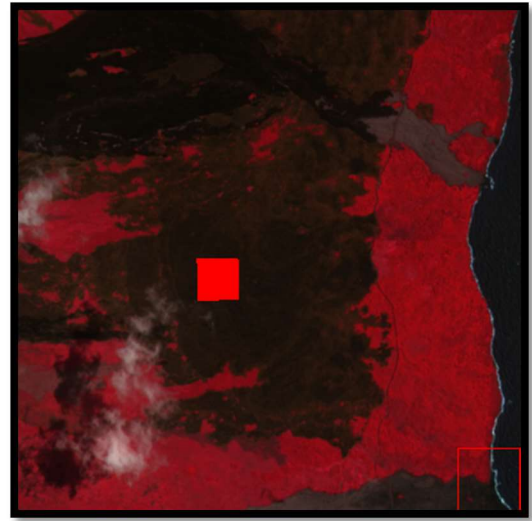


Figure 24 ROI sur une composition PIR
(Sentinel B08) après incendie.

Parmi l'échantillon d'images, nous avons dégagé trois types de courbes et donc trois interprétations distinctes pour ces différentes périodes :

Les graphiques suivants sont bornés de 0 à 255 puisque nous avons observé le comportement de la végétation dans le canal du PIR, en niveaux de gris.

2.3.1. Forte activité chlorophyllienne

Cf. page suivante.

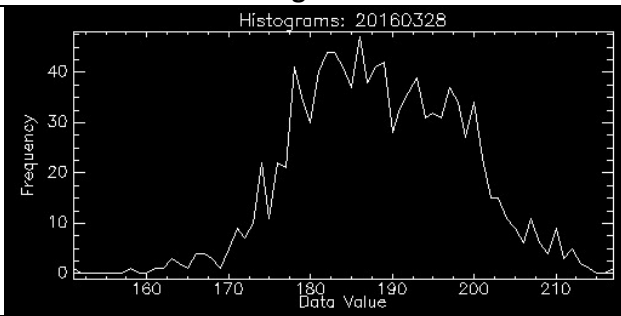
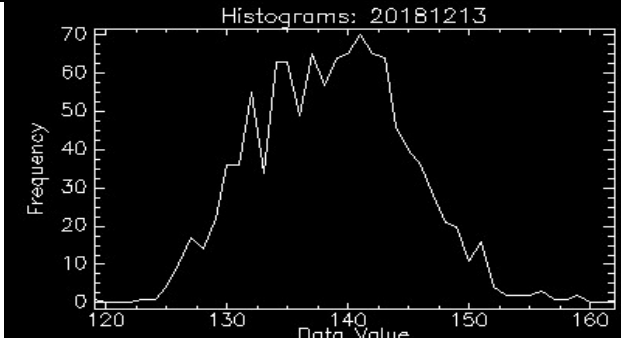
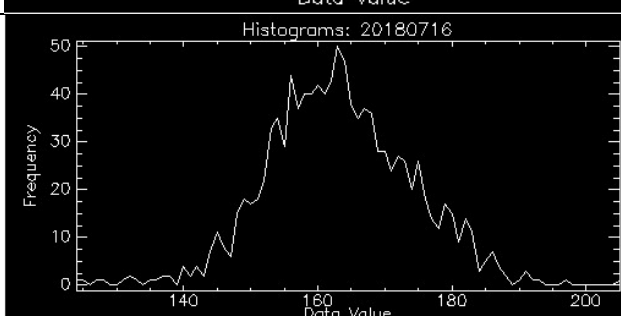
Histogrammes	Moyenne observée	Écart-type observé
	188.4982	9.8380
	138.7070	6.2362
	163.2143	10.6124

Figure 26 Signature spectrale de la mousse lors d'une forte activité chlorophyllienne.

Nous observons sur ces différents histogrammes une forme de gaussienne. Les moyennes divergent car cela est dû à la saison. Il y a moins d'activité chlorophyllienne en hiver qu'en été, c'est pour cela que les valeurs sont plus faibles pour l'histogramme de l'image du 13/12/2018.

2.3.2. Activité chlorophyllienne perturbée

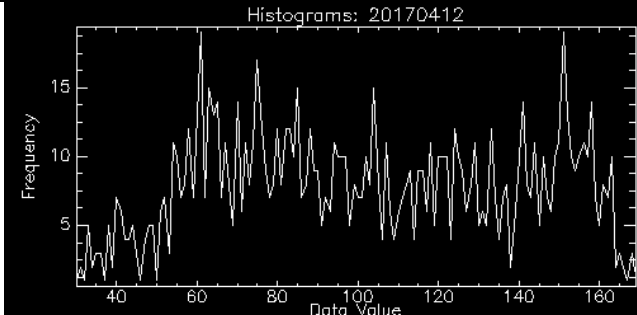
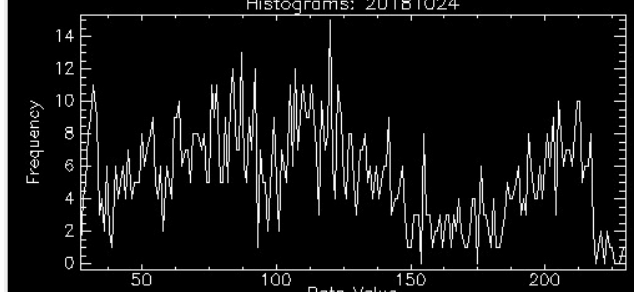
Histogrammes	Moyenne observée	Écart-type observé
	102.1676	36.4521
	117.0961	55.1163

Figure 27 Signature spectrale de la mousse lors d'une activité chlorophyllienne perturbée (coulée de lave).

Ces histogrammes sont beaucoup plus bruités que les précédents. En effet, on observe tout d'abord que l'écart-type explose. L'activité chlorophyllienne sur cette végétation est donc beaucoup plus perturbée. On peut expliquer cela par le fait que des éruptions des volcans se déroulaient à ce moment-là (Avril 2017 et Octobre 2017). Les éruptions volcaniques ont pour conséquences de créer des mouvements sismiques, ainsi que de la chaleur au niveau des sols. Cela peut expliquer le stress de la végétation et donc, les perturbations résultantes.

Incendie des végétaux

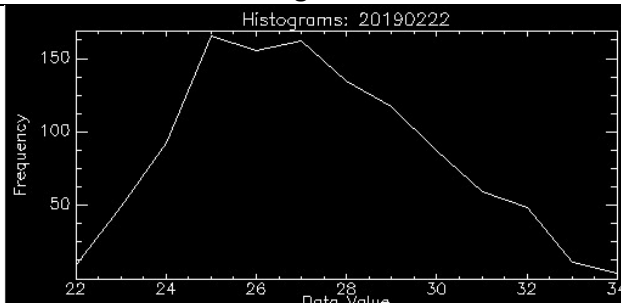
Histogrammes	Moyenne observée	Écart-type observé
	27.175	2.4766

Figure 28 Signature spectrale de la mousse lors d'un incendie.

La dernière catégorie est spécifique à notre projet. Nous avons la confirmation à travers ce dernier histogramme des conséquences de l'incendie. On remarque que les valeurs sont extrêmement faibles, ce qui représente sur ce canal une activité chlorophyllienne quasi nulle. La végétation ayant brûlée, cela semble tout à fait logique.

3. Gestion, prévention et analyse d'un incendie forestier

Après ces différentes analyses, on va s'intéresser à notre problématique qui est de qualifier l'incendie qui a eu lieu fin Janvier. Pour ce faire, nous avons tout d'abord regardé les données disponibles, pour ensuite appliquées nos techniques de télédétection sur ces données. Enfin, nous pourrions comparer nos résultats avec une autre étude qui a déjà été réalisée (Imagerie RADAR).

3.1. Données de références

L'incendie ayant eu lieu très récemment, nous avons eu peu de données à traiter exploitables. L'incendie s'étant déroulé fin Janvier, les premières images satellites disponibles ne sont apparues que début Février. Les nuages et les dépressions étant très nombreux à la Réunion, il est donc difficile d'obtenir une image dite « parfaite ». Néanmoins, nous avons réussi à avoir la mission Sentinel 2A du 21 Février 2019. Toutes nos analyses se baseront donc sur cette vue optique.

En parallèle, nous avons trouvé dans la bibliographie récente (cf. Partie 1) des documents faisant référence et qui analysent l'incendie de fin Janvier. Notamment le travail de Thibault CATRY, qui montre précisément grâce à des images RADARS quelles zones ont été impactées par l'incendie et combien d'hectares ont été touchés. Nous souhaitons compléter cette étude avec cette fois-ci des données optiques.

3.2. Étude des données Sentinel 2 du 21 Février 2019

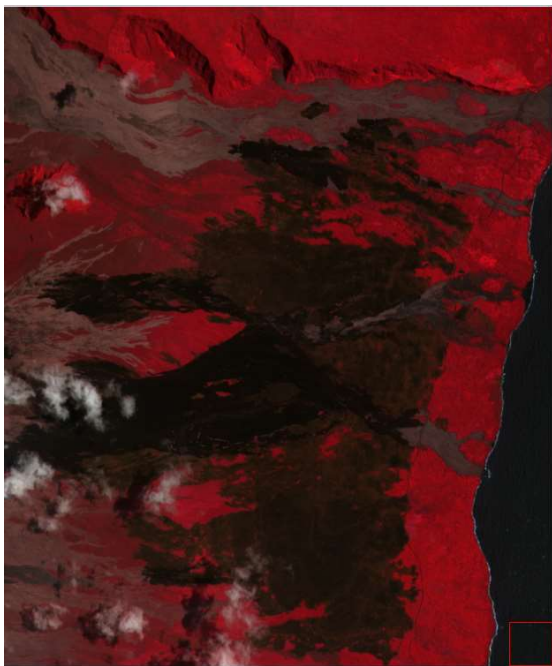


Figure 30 Composition PIR de l'image Sentinel-2 du 21/02/2019.



Figure 29 Composition vraies couleurs de l'image Sentinel-2 du 21/02/2019.

Compte-rendu

Sur ces premières images, on peut distinguer clairement où a eu lieu l'incendie. Les pompiers ont ainsi réussi à circonscrire le feu pour qu'il n'atteigne pas la route en contre-bas de la zone concernée.

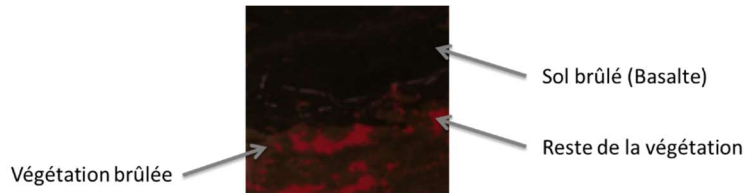


Figure 31 Analyse de la composition du sol en PIR le 19/02/2019.

L'image PIR nous renseigne également sur des parcelles de végétation qui ont été épargnées par les flammes. Quant au sol brûlé, on remarque que celui-ci a pris une couleur noire (PIR et vraie couleur). On peut l'expliquer car les sols basaltiques recouvrent cette zone d'anciennes coulées de laves, et donc aucune végétation n'a pu y repousser. La différence entre le sol brûlé et la végétation brûlée est notable car la végétation calcinée a bénéficié d'un sol fertile et qui a pu se développer plusieurs années sans aucunes coulées. Quant au reste de la végétation épargnée par les flammes, on peut supposer que les pompiers ont réussi à circonscrire certaines zones, ou bien ce sont des arbres assez hauts (végétation haute) qui ont été épargnés et qui ne brûle pas aussi vite que de la végétation basse.

3.3. Calcul de classification Sentinel-2 du 21 Février 2019

Après ces analyses visuelles, nous avons souhaité rentrer plus dans les détails de la zone. Pour ce faire, nous avons calculé les indices de NDVI et de couleur pour analyser plus finement les affirmations précédentes.

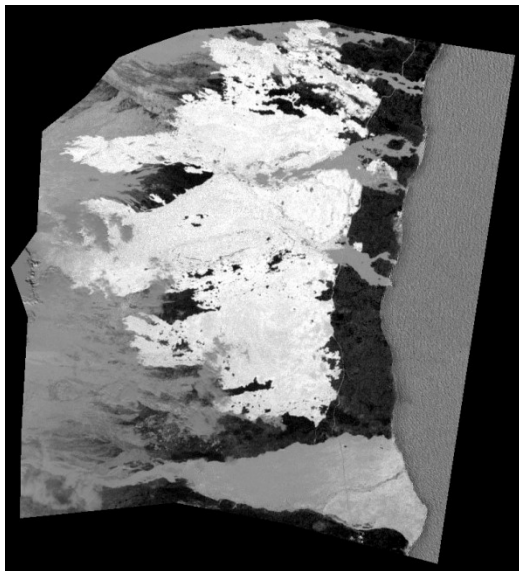


Figure 32 Indice du couleur, le 19/02/2019.

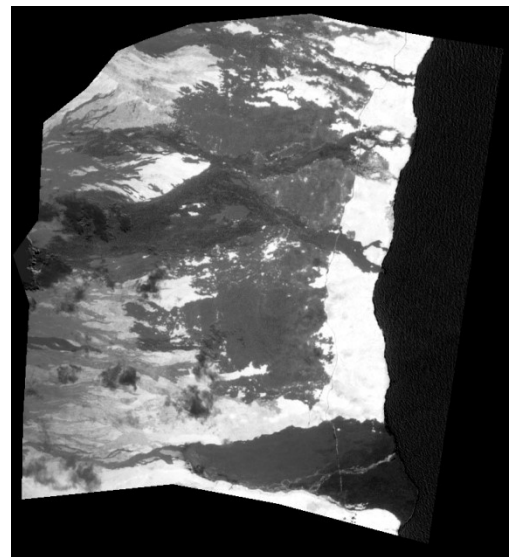


Figure 33 Indice de NDVI, le 19/02/2019.

En observant l'indicateur de couleur, on voit bien la différence entre le sol nu et la végétation. Les parties blanches représentent le sol nu créé à la suite de l'incendie. L'indice de couleur dans cette partie est important car l'incendie a permis de découvrir les sols, et donc de générer un sol nu « brute ». On peut comparer ce sol nu avec les anciennes coulées de laves qui ont une couleur grise (ou blanc moins prononcé). On peut expliquer cela car le sol nu dans ces zones à une très légère couche de matières organiques qui permet au sol d'avoir une couche de surface.

Quant au NDVI, il ne nous apporte pas grand-chose si on prend la zone dans sa globalité. Mais si on l'analyse plus finement, de nouvelles affirmations peuvent émerger.

Pour ce faire, on a tracé un transect dans une zone mêlant la végétation brûlée, la végétation épargnée et le sol nu brûlé.

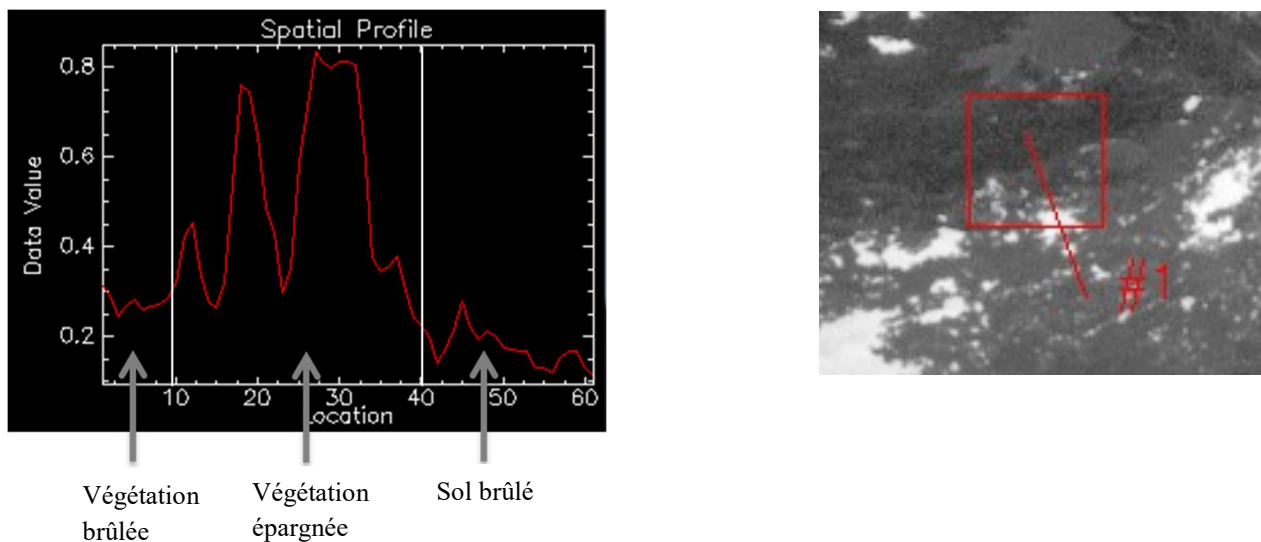


Figure 34 Analyse du NDVI suivant un segment de découpe.

En analysant cette courbe, on remarque des valeurs NDVI différentes selon les types de sols. Pour les sols où la végétation est calcinée, on observe une valeur moyenne de 0.3, alors que le sol brûlé a une moyenne de 0.15. Ce contraste s'explique également par la présence de matières organiques sur la zone de végétation brûlée. La végétation épargnée quant à elle a des valeurs fortes de NDVI.

3.4. Comparatif d'une analyse Radar avec l'Optique

Après ces analyses d'indices, nous avons souhaité réaliser une classification supervisée en SVM sur cette zone pour délimiter les zones touchées et épargnées par les flammes.

Pour ce faire, nous avons fait un apprentissage avec les classes suivantes :

- Zone Brûlée
- Sol Brûlé
- Lave (correspondant aux restes des coulées)
- Végétation Haute
- Végétation Basse
- Eau
- Nuage



Figure 35 Exemple de ROI pour la classification supervisée.

Après la classification, nous obtenons le résultat suivant :

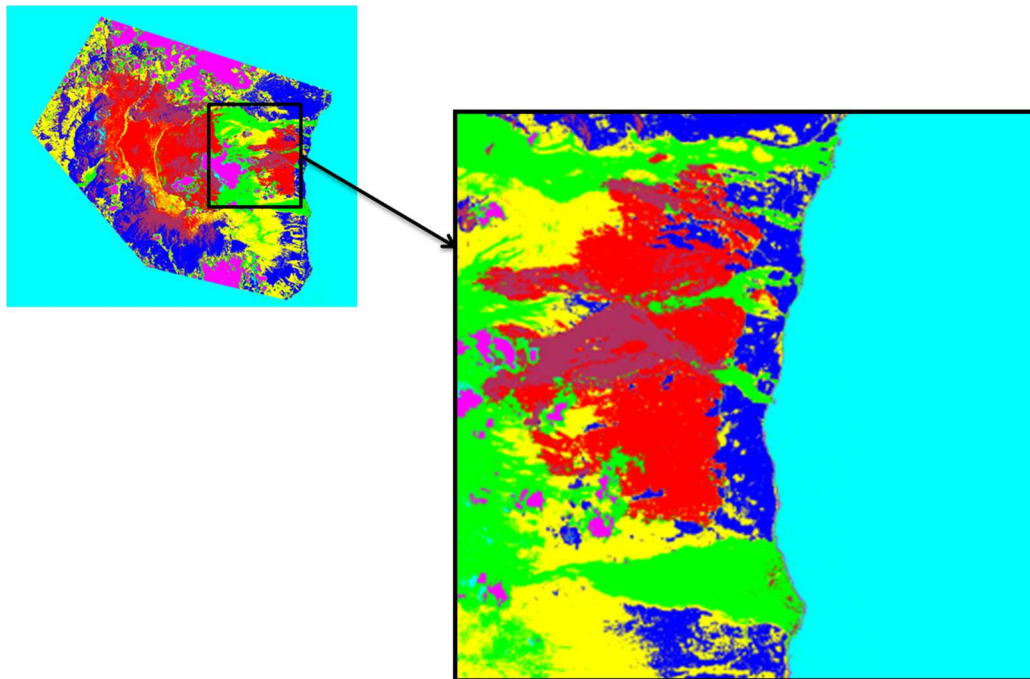


Figure 36 Classification supervisée du 19/02/2019.

3.4.1. Analyse et résultat

```
Confusion Matrix: D:\2019\Classif4SVM\class
Overall Accuracy = (78544/79182) 99.1943%
Kappa Coefficient = 0.9903
```

Class	Ground Truth (Pixels)					
	Vegetation Ba	Mer	Nuage	Vegetation Ha	Lave	Zone Brulée
Unclassified	0	0	0	0	0	0
Vegetation Ba	11377	0	0	90	5	0
Mer	0	11894	0	0	1	0
Nuage	0	0	11430	0	0	0
Vegetation Ha	190	0	0	13375	0	0
Lave	40	34	0	0	14436	0
Zone Brulée	0	0	0	0	0	186
Total	11607	11928	11430	13465	14628	186

Figure 37 Matrice de confusion en sortie de la classification supervisée du 19/02/2019.

En analysant la matrice de confusion en sortie de la classification, on observe qu'elle s'est très bien déroulée, avec notamment un Kappa à 0.99.

A partir de cette étude, nous souhaitons savoir la superficie de la zone incendiée (sur le même principe que Pléiades). Après l'avoir calculé sur QGIS, nous obtenons une superficie de 1514,6468 ha, prenant en compte le sol brûlé et végétation calcinée.

On peut donc voir que notre analyse avec notre image optique s'approche de la valeur trouvée avec l'imagerie optique, annoncée en début de rapport.

Conclusion

Au cours de ce projet, nous avons manipulé tout un ensemble de données optiques, allant du Sentinel-2 au Pléiades, afin de pouvoir mieux comprendre, et analyser le comportement de l'incendie forestier qui s'est déclaré dans la zone du Grand Brûlé, au Piton De La Fournaise. Dans un premier temps, nous avons effectué une phase de bibliographie pour obtenir des informations sur le lichen, qui est la source de la propagation du feu. Une fois ses spécificités comprises, et suite à un entretien avec Nicolas VILLENEUVE, nous avons pu observer l'évolution de ce végétal au cours des 2 dernières années, au fil des saisons. Nous pouvons dire que c'est ce type de végétation qui reprend possession du sol après une coulée de lave, c'est pourquoi nous avons pu retrouver de la végétation haute sur nos dernières images, sur une zone auparavant envahie de lichen.

Le deuxième objectif de ce projet aura été de cartographier à l'aide des dernières images optiques disponibles la zone dévastée par les flammes. Grâce à l'image Sentinel-2 du 21 Février 2019, nous avons identifié une zone, qui a été comparée à une étude RADAR réalisée par le Centre de Recherche en télédétection de Montpellier. Nous pouvons en conclure que notre estimation issue d'un traitement optique était cohérente avec l'analyse RADAR réalisée précédemment.

Le principal inconvénient de notre zone d'étude aura été la présence régulière de nuages, qui nous a empêchés d'appliquer notre stratégie d'étude au Piton De La Fournaise. C'est pourquoi nous sommes conscient que l'apport de données RADARs pour cette problématique peut être d'un grand intérêt. Seulement, le domaine étant déjà maîtrisé sur ce site, nous avons privilégié d'utiliser les capteurs optiques. D'autre part, l'analyse d'un végétal qui pour nous est inconnu, aurait méritée des observations sur le terrain, dans le but de valider nos analyses, surtout dans les endroits à l'écart du Grand Brûlé.

Nous pouvons terminer sur le fait que nous avons pu répondre aux demandes de Nicolas VILLENEUVE qui étaient de pouvoir identifier le comportement spectral du lichen, afin de cartographier sa zone de « floraison » et d'aider les pompiers réunionnais à pouvoir prévoir les zones susceptibles de prendre feu lors de la déclaration d'un incendie, surtout si des habitations sont proches.