

Rapport Méthodologique Final

Date modification : 20/03/2018

Page : 1/
38

Date	Version	Auteur	Commentaires
01/09/2017	0.1	Arnaud Jaen	Draft du rapport méthodologique
09/09/2017	0.2	Sylvain Capo	Draft du rapport méthodologique
20/03/2018	0.3	Sylvain Capo	Rapport final

Chaine de traitement Détection de surfaces brûlées

Rapport Méthodologique



Table des matières

1	INTRODUCTION ET OBJECTIFS.....	5
2	LES CHOIX ALGORITHMIQUES DE LA CHAINE DE TRAITEMENT	6
2.1	CONCEPT GENERAL DE LA CHAINE DE TRAITEMENT OPTIQUE	8
2.2	CORRECTION RADIOMETRIQUE ET CORRECTION DES EFFETS ATMOSPHERIQUES.....	9
2.3	METHODE SVM.....	10
2.4	FILTRAGE MMU.....	11
2.5	INDICE DE DETECTION DU CLASSIFIEUR SVM.....	12
3	CHAINE OPTIQUE LANDSAT 8	13
3.1	CARACTERISTIQUES SPECTRALES DU CAPTEUR OLI LANDSAT-8.....	14
3.1.1	Méthode 1.....	17
3.1.2	Méthode 2.....	18
3.1.3	Fusion des 2 Classifications Landsat-8 :	19
4	CHAINE OPTIQUE SENTINEL 2	20
4.1	CARACTERISTIQUES SPECTRALES DU CAPTEUR MSI SENTINEL-2	21
4.1.1	Méthode 1.....	24
4.1.2	Méthode 2.....	25
4.1.3	Fusion des 2 Classifications Sentinel-2 :	26
5	EXPORT DES PRODUITS DES CHAINE OPTIQUES.....	27
6	CHAINE RADAR SENTINEL-1	28
6.1	CARACTERISTIQUES GENERALES DU SIGNAL RADAR	28
6.2	CARACTERISTIQUES DE SENTINEL-1, EN BANDE C	30
6.2.1	Stripmap Mode	31
6.2.2	Interferometric Wide Swath Mode	31
6.2.3	Extra Wide Swath Mode	31
6.2.4	Wave Mode.....	31
6.3	ARCHITECTURE DE LA CHAINE RADAR SENTINEL-1 DE DETECTION DE CHANGEMENT	32
7	EXPORT DES PRODUITS DE LA CHAINE RADAR SENTINEL-1	34
8	SUGGESTIONS D'AMELIORATION OU DE FUTURS DEVELOPPEMENTS	35
8.1	SEUILLAGE DE LA COUVERTURE NUAGEUSE	35
8.2	ETABLISSEMENT D'UN INDICE DE CONFIANCE DES DETECTIONS DE SURFACES BRULEES.....	36
9	CITATION DES DONNEES SOURCES:.....	37
10	BIBLIOGRAPHIE:.....	38

Liste des figures

Figure 1. Schéma simplifié des process de la chaine de traitement optique Landsat-8 et Sentinel-2 de détection des surfaces brûlées.	8
Figure 2. Principe général de méthodologie de Machine Learning par apprentissage pour affectation des règles de classification et d'appartenance des objets à une classe recherchée.....	10
Figure 3. Schéma simplifié des process de la chaine de traitement optique Landsat-8 de détection des surfaces brûlées.	13
Figure 4. Schéma simplifié des process de la chaine de traitement optique Sentinel-2 de détection des surfaces brûlées.	20
Figure 5. Bandes spectrales de Sentinel-2.....	23
Figure 6. Illustration des effets de la correction du Speckle, à gauche avant correction, à droite après correction du speckle. Cette réduction du bruit général de l'image tend à générer une image plus nette et contrastée.	28
Figure 7. Différentes fréquences et longueurs d'onde du spectre Radar (@ IEEE).....	30
Figure 8. Illustration des différents modes de Sentinel-1 et de leurs emprises spatiales.....	30
Figure 9. Description des variations de pénétration du signal sur les cibles naturelles en fonction de la bande spectrale Radar.	32
Figure 10. Schéma simplifié du process de la chaine de traitement Radar Sentinel-1.	33

Liste des tableaux

Tableau 1:Description des bandes spectrales du capteur OLI.....	15
Tableau 2:Description des bandes spectrales du capteur TIRS.	15
Tableau 3:Logique de fusion des classifieurs LANDSAT 8.....	19
Tableau 4 : Description des bandes spectrales du capteur MSI.	22
Tableau 5 :Logique de fusion des classifieurs SENTINEL2.	26
Tableau 6: Exemple de table attributaire pour la chaine Sentinel 2	27

Le présent rapport détaille les différentes étapes du processus de traitement des images optiques Landsat-8, Sentinel-2 ainsi que les données Radar Sentinel-1B dans la chaîne de traitement livrée dans le cadre du projet TPZF/CIPAC/CEIL de détection des surfaces brûlées. Cette version est une version améliorée de la version précédente et comporte l'amélioration de la chaîne optique Landsat-8, l'ajout de la chaîne optique Sentinel-2 ainsi que l'ajout de la chaîne Radar Sentinel-1.

La mise à jour de la génération de chaque couche de détection provenant des méthodes SVM ainsi que leur fusion, pour chaque source optique a été intégrée dans les processus de la chaîne de traitement.

L'offre globale, séquentielle en trois phases, comportait une première phase préliminaire qui a fait l'objet de la livraison de la première version de la chaîne optique Landsat-8 dont l'objectif premier est de démontrer le potentiel et d'établir les fondements de la chaîne de traitement optique de détection des surfaces brûlées. La seconde phase, la phase intermédiaire, comporte l'intégration des sources optiques Sentinel-2 et des données Radar Sentinel-1 avec la livraison de l'ensemble des codes sources et routines non compilées.

La phase finale permet le déploiement définitif de la solution avec une mise en ligne de la chaîne validée et opérationnelle chez le client avec une actualisation des documents de référence. Plusieurs améliorations ont été apportées selon les recommandations et demande du client : ainsi la chaîne produit trois couches vectorielles pour chacun des deux capteurs optiques, une couche pour chaque méthode d'identification des surfaces brûlées ainsi que la couche fusionnée des deux méthodes.

Cette version correspond à la chaîne complète destinée à traiter l'ensemble des sources d'imagerie optiques gratuites Landsat-8 et Sentinel-2 ainsi que les données Radar Sentinel-1, gratuites également. La phase de R&D, qui s'est attachée à démontrer ou infirmer la pertinence de ce capteur Sentinel-1 ainsi que ses limitations sur une analyse de changement à caractère thématique pour la détection des surfaces brûlées sur le territoire de la Nouvelle-Calédonie, n'a pas pu établir de façon explicite l'intérêt de la source Sentinel-1 sur ce territoire. Les codes sources de la chaîne ainsi que les routines des traitements sont livrés non compilés lors de la phase intermédiaire et resteront modifiables, dans des limites raisonnables, jusqu'à la livraison finale correspondant à la validation de la chaîne V2 intégrant les différentes sources satellite.

Un superbuild a été élaboré par Telespazio France afin de faciliter l'installation de la chaîne sur le système.

La chaîne de traitement est une chaîne optique/Radar dont l'objet est de récupérer les données images du territoire de Nouvelle Calédonie selon les requêtes temporelles de l'utilisateur : Les chaînes traitent donc les données disponibles entre deux dates d'analyse considérées comme pertinente par l'utilisateur.

1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS

Les besoins exprimés par l'ŒIL ont été synthétisés afin de construire une solution algorithmique opérationnelle à partir de données optiques à 30m de résolution spatiale dans un premier temps, basée sur l'exploitation de la donnée source gratuite Landsat-8 distribuée par l'USGS.

L'objectif contractuel étant de fournir une solution algorithmique traitant les sources optiques Landsat-8 (30m), Sentinel-2 (10 à 60m) ainsi que les sources Radar Sentinel-1 (env 20m) si disponibles sur le territoire ainsi que d'autres sources Radar commerciales si cette source Radar démontre sa pertinence dans la détection des surfaces brûlées Calédoniennes.

Différentes méthodologies ont été testées lors de phases de R&D afin d'identifier des méthodes ou critères pertinents sur la détection des surfaces brûlées d'une superficie supérieure à 1,5 hectare. Le parti pris du développement de la solution initiale était basé sur un choix favorisant la surdétection à la sous détection de ces mêmes surfaces au vu du critère d'exclusion des zones de moins de 1,5 hectare pour la source Landsat-8 et de 1 ha pour la source Sentinel-2.

Les retours d'expertise nous ont conduits à modifier cette approche et à revoir l'architecture de la chaîne de traitement optique en intégrant l'approche première d'arbre décisionnel dans le classifieur Support Vector Machine. Cette intégration s'est opérée par l'ajout d'indices en entrée du classifieur, indices et combinaisons de bandes spectrales dérivées des premiers indices de la méthode d'arbre décisionnel ainsi que du travail bibliographique effectué, afin de réduire les surdétection et ainsi optimiser les fausses détections avérées sur des zones telles que les nuages et les ombres portées par ces nuages.

Une dernière étape de croisement avec le MOS de Nouvelle Calédonie est effectuée afin d'exclure les classes d'occupation du sol incompatibles avec des incendies (surfaces en eau libre, certaines surfaces de cuirasses ou encore les surfaces de bâti et d'infrastructure).

Cette version finale de la chaîne de traitement des images optiques est donc conçue pour traiter l'ensemble de la base de données optiques LANDSAT-8 et Sentinel-2A par la sélection d'une plage temporelle renseignée par l'utilisateur sur l'ensemble des dalles couvrant la Nouvelle Calédonie ; soit 8 dalles Landsat-8 (acquises tous les 16 jours), ainsi que l'ensemble des dalles Sentinel-2, soit 16 dalles optiques supplémentaires (acquises tous les 5 à 10 jours avec la constellation 2A et 2B Sentinel).

Les résultats exportés en sortie de chaîne de traitement sont des couches vectorielles renseignant sur les zones détectées comme étant des surfaces brûlées.

2 LES CHOIX ALGORITHMIQUES DE LA CHAÎNE DE TRAITEMENT

Les choix algorithmiques de la chaîne de traitement de détection des surfaces brûlées sont le produit du croisement d'une analyse bibliographique, tant sur le potentiel de la donnée satellite optique que Radar, avec l'expérience et l'expertise des équipes de traitement d'image.

Différents algorithmes publiés, ou non, ont ainsi été testés sur les données image du territoire de la Nouvelle Calédonie. Une des premières limitations est la disponibilité d'algorithmes régionaux ou d'indices spectraux qui ont montré des performances relatives sur différents sites d'application. En effet la variété des types de couverts forestiers, leur densité et leur localisation géographique sur des sites d'application à travers le monde rendent complexe l'établissement d'une formulation universelle de détection des surfaces brûlées.

D'un point de vue optique, la bibliographie indique une réponse spectrale des surfaces brûlées plus significative dans les longueurs d'ondes rouge à proche infrarouge voire moyen infra-rouge en raison de la présence de cendres et de résidus de calcination après un incendie. La végétation affectée lorsqu'elle est toujours présente perd alors de sa vigueur (indice de végétation NDVI, SAVI ou encore EVI) ainsi que son taux d'humidité naturelle (NDWI et NDHI, respectivement Normalized Difference water Index et Normalized Difference Humidity Index). Ces éléments sont particulièrement manifestes dans le cas de feux sévères ayant impacté la structure forestière ainsi que la totalité des sous-bois. Ainsi apparaissent également des variations de quantification de la sévérité des feux selon l'intensité de l'incendie mais aussi selon la nature de forêt considérée (feuillus, résineux, savanes ou forêts tropicales ou boréales).

Les modifications de texture induites par un incendie (combustion des feuilles et des branches) sont également susceptibles de modifier le signal de télédétection. Sur le territoire de Nouvelle Calédonie l'occurrence de couvert nuageux rend l'exploitation d'images satellite optique peu optimale, principalement en raison des faibles revisites des satellites optiques à haute voire très haute résolution, contrairement aux satellites moyenne résolution de type MODIS qui présentent une revisite journalière avec cependant une résolution spatiale dégradée.

Les contraintes de surface à surveiller ainsi que la taille des objets d'incendie ou de surface brûlées considérées (MMU minimum mapping unit de 1 à 1,5ha) ont identifié les sources Landsat-8 et Sentinel-2 comme étant les sources optiques les plus pertinentes. D'une part en raison de leur gratuité, mais également en raison de leur résolution spatiale et spectrale. Ces deux capteurs possèdent effectivement des bandes spectrales dans le visible, dans le proche infra-rouge mais aussi dans le moyen infra-rouge. Landsat-8 possède en outre un capteur infra-rouge thermique. Ces deux sources satellite, utilisées en constellation permettent une revisite du territoire tous les 16 et 5 jours, respectivement pour Landsat et Sentinel, offrant un potentiel de 95 acquisitions annuelles soit une revisite environ tous les 4 jours avec les 3 capteurs opérationnels. Afin de s'affranchir d'un couvert nuageux important le choix de l'utilisation de sources Radar permet théoriquement une complémentarité d'observation compensant les faiblesses des chacune des sources (couverture nuageuse pour S2 et sensibilité à l'humidité des sols pour S1) *Verhegghen et al., 2016*.

Ainsi des analyses de sensibilité des différentes longueurs d'onde Radar et de la rétrodiffusion des Synthetic Aperture Radar SAR a été mise en évidence par *Tanase et al., 2010b* sur des environnements forestiers Méditerranéens de pins principalement. L'utilisation de signal Radar en bande C, celle du capteur Sentinel-1, y montre de bonne corrélation entre la cohérence co-polarisée (HH ou VV) avec l'indice de sévérité des feux (CBI composite Burn Index) à partir d'une approche de détection de changement.

Le SAR permet ainsi de mettre en évidence la destruction de feuilles et de branches par le feu sur ce type de forêt méditerranéenne bien établie et dense (440 arbres en moyenne par hectare avec 50% d'entre eux d'âge compris entre 35 et 55 ans). Cependant cette corrélation s'avère moins évidente pour d'autres types d'environnements forestiers tels que les savanes, les forêts tropicales ainsi que les forêts boréales ainsi que pour des secteurs

forestiers de petite taille. Ces méthodes s'avèrent efficaces dans le cas de feux importants et ravageurs tandis que leur pertinence est moins facile à mettre en évidence pour des feux restreints et peu destructifs.

Le territoire de Nouvelle Calédonie est soumis à de nombreux départs de feu, une centaine par an, dévastant chaque année entre 20 000 et 50 000 hectares, soit environ 3% de la superficie de l'archipel (*Dumas et al., 2013*) affectant des forêts sempervirentes humides et denses d'altitude basse ou moyenne et sur calcaire, de forêts sèches sclérophytes et de forêts marécageuses. La forêt sèche représente un enjeu considérable avec de très nombreuses espèces endémiques, parsemées sur la côte Ouest sur 106 sites de 1 à 400 hectares représentant une superficie totale de 50 km² environ.

Une des problématique majeure du territoire de Nouvelle Calédonie dans ce contexte est la végétation arbustive sujette aux feux les plus courants ainsi que la forte présence de cuirasses du socle rocheux ayant de grandes similitudes spectrales avec les surfaces brûlées (forte réponse spectrale dans le rouge et infrarouge du spectre lumineux) induisant de faux positifs dans les détections automatisées de surfaces brûlées. Un compromis, établi à partir de tests sur différents indices radiométriques issus de la bibliographie et de combinaisons inédites, a ainsi été proposé en focalisant sur les bandes d'intérêt (Visible, infrarouge et infrarouge thermique uniquement pour Landsat) afin de couvrir une large gamme de type de feux (amplitude, sévérité, nature de la végétation affectée) pour que la base de données d'apprentissage soit la plus hétérogène et « complète » possible en typologie de surfaces brûlées.

Cette approche était destinée à produire un modèle de prédiction de détection des surfaces brûlées le plus généraliste possible afin de couvrir les différentes natures forestières (plus ou moins dense, plus ou moins humides) ainsi que des amplitudes et sévérités de feux variées. Ces choix d'indices et de bandes spectrales utilisées sont décrits techniquement plus en détails dans les sections suivantes 3.1.1 et 3.1.2 pour Landsat et 4.1.1 et 4.1.2 pour Sentinel-2.

2.1 Concept général de la chaine de traitement optique

Le concept général de la méthodologie utilisée pour Landsat 8 et Sentinel 2 est illustré en Figure 1. Elle repose sur une phase d'apprentissage supervisée où le classifieur construit un modèle à partir de données d'entrée traitées et validées. Dans la phase de prédiction, le modèle ainsi généré lors de l'apprentissage est appliqué à de nouvelles données pour prédire la probabilité d'appartenance aux classes identifiées.

Les données sont préalablement prétraitées de façon à convertir les comptes numériques de l'image en luminance et d'en extraire les effets perturbateurs atmosphériques afin d'aboutir à une mesure physique de la réflectance au niveau de la surface visée.

La méthode utilisée est celle du DOS (Dark Object Subtraction).

L'apprentissage a été réalisé selon deux classes (problème binaire) avec l'identification des zones brûlées (classe « surface brûlée ») dans les images et de tout ce qui ne s'apparente pas à un dégât de feux (classe « autres ou surface non brûlée »). Le nombre total d'échantillons collectés est d'environ 6000 pixels pour Landsat 8 et de 20000 pixels pour Sentinel 2.

Deux combinaisons différentes ont été utilisées pour former les données d'entrées qui sont ingérées par le classifieur SVM (Support Vector Machine). Chacune de ces combinaisons est entraînée par l'intermédiaire des données d'apprentissage et font l'objet de deux modèles différents générés par le classifieur.

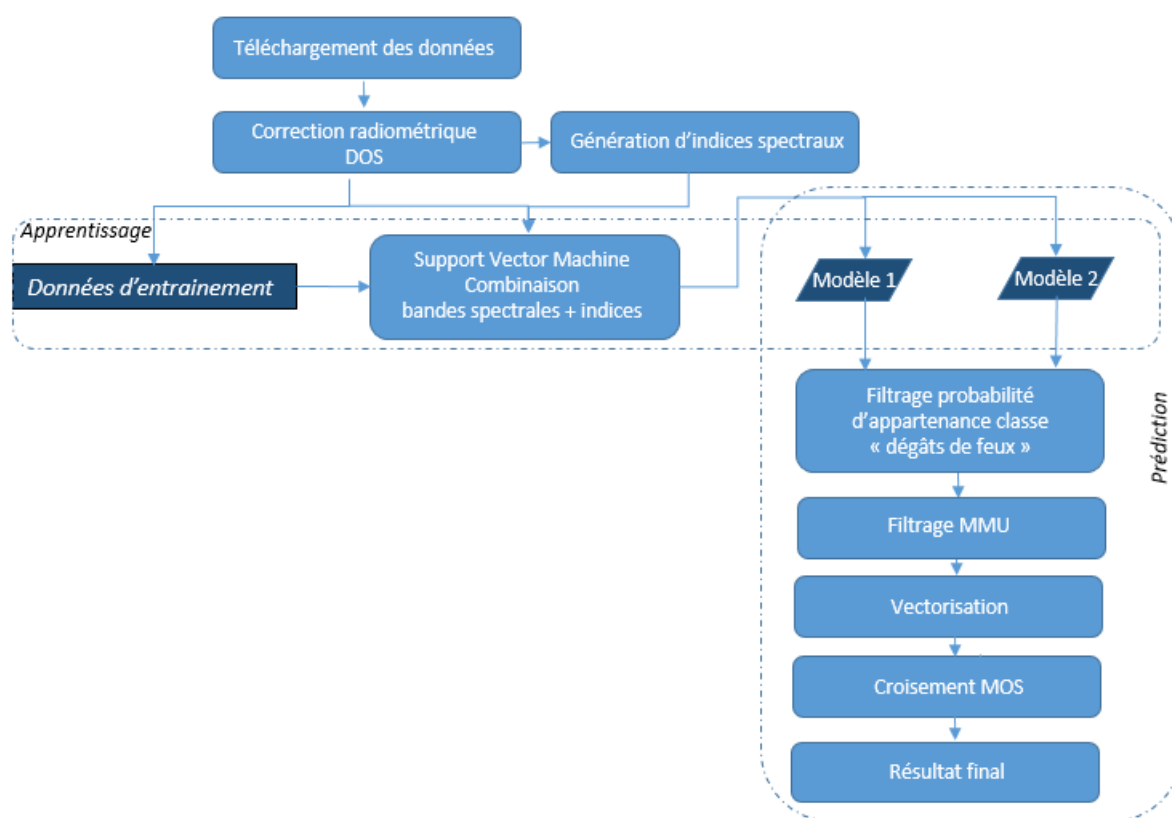


Figure 1. Schéma simplifié des processus de la chaîne de traitement optique Landsat-8 et Sentinel-2 de détection des surfaces brûlées.

2.2 Correction Radiométrique et correction des effets atmosphériques

Afin de garantir une inter comparaison temporelle des images et des produits de la chaîne de traitement la première version de la chaîne optique effectuait une étape de normalisation radiométrique qui était appliquée à l'ensemble des images Top of Atmosphere (TOA) chargées depuis le site de l'USGS.

Cette étape de normalisation radiométrique a été remplacée par une brique de correction atmosphérique, étape fondamentale et incontournable afin de produire des critères temporellement exploitables et robustes. Cette étape de correction atmosphérique est basée sur la méthode du Dark Pixel ou Dark Object Subtraction, DOS, qui a été préférée à d'autres méthodes de correction atmosphérique. Ce choix s'est résolument basé sur la volonté de proposer les mêmes briques de traitement sur les deux chaînes optiques afin de garantir une inter comparaison des résultats provenant des différents capteurs.

En effet, une option de traitement des effets atmosphériques à partir de Sen2Cor, distribué par l'ESA, a été envisagée mais cette méthode disposait de propriétés intellectuelles et de droits ne permettant pas de l'implémenter dans la chaîne de traitement et techniquement ne pouvait être transposée au capteur Landsat-8. Nous avons donc développé et implémenté les deux versions Landsat-8 et Sentinel-2 des codes de correction des effets atmosphériques à partir de la méthode DOS.

Une fois cette étape de correction radiométrique et de correction des effets atmosphériques appliquée aux données brutes, la chaîne de traitement optique s'attache à identifier les surfaces brûlées à partir de l'imagerie optique (L-8 et S-2) par deux classifieurs distincts qui ont été appliquées en parallèle ; ces méthodologies complémentaires tendant à renforcer la confiance de détection des surfaces brûlées.

- **Modèle 1** = classification supervisée du type SVM à 2 classes (Feu/non Feu)
- **Modèle 2** = classification supervisée du type SVM à 4 classes (Feu/ non feu/ nuages / ombres).

Chacun de ces classifieurs produit une couche d'interprétation des surfaces brûlées et sont exportées individuellement mais aussi fusionnées.

2.3 Méthode SVM

La méthodologie SVM est une méthode de Machine Learning. Elle est calibrée à partir d'une base d'échantillons d'entraînement de plusieurs milliers de pixels, répartis sur plusieurs dalles raster et sur plusieurs dates.

Ces échantillons ont été sélectionnés à partir des données de vérité terrain de surface brûlées fournies par l'CEIL et par la Direction de la sécurité civile et des risques naturels (données Excel synoptique des feux 2015 et 2016, des couches vectorielles par levé aéroporté du SDIS, couches WWF, etc.).

Ces données d'apprentissage permettent au modèle SVM de définir une probabilité de concordance des critères d'identification de surface brûlées (établies d'après les échantillons d'apprentissage) sur l'ensemble des pixels de l'image.

Ce modèle SVM est donc défini et établi à partir de l'ensemble des données d'apprentissage qui alimentent le classifieur SVM.

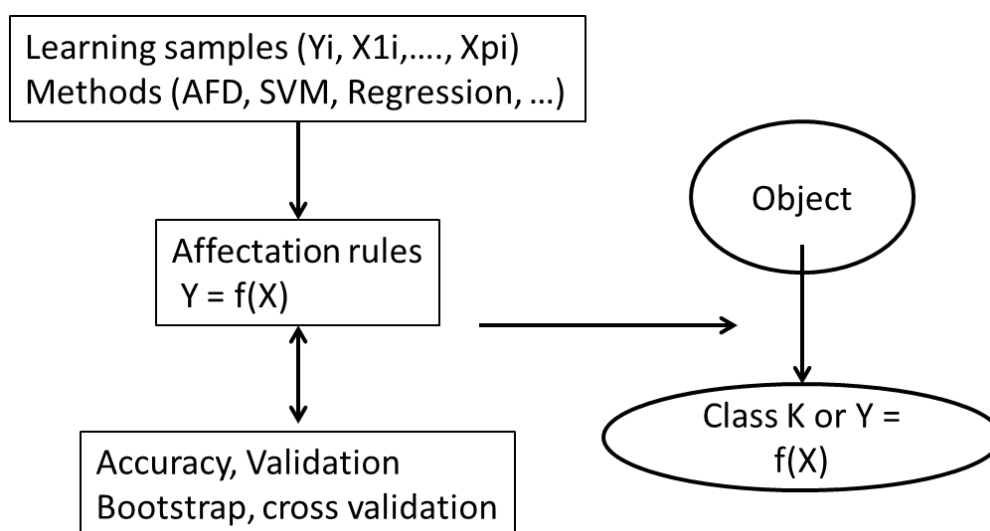


Figure 2. Principe général de méthodologie de Machine Learning par apprentissage pour affectation des règles de classification et d'appartenance des objets à une classe recherchée.

Cette probabilité de concordance des critères d'identification de la classe renseignée par les échantillons d'apprentissage, par exemple la classe de surface brûlée est décrite par la suite comme l'indice de détection.

Pour une classification supervisée à deux classes cet indice de détection, compris entre 0 et 1 (1 correspondant à 100% de probabilité que le pixel soit conforme au pixel d'apprentissage), est ensuite filtré selon la MMU (Minimum Mapping Unit) afin d'éliminer une partie des surdétections ainsi qu'une partie du bruit sur des zones d'emprise inférieures au critère spatial minimal.

Cet indice n'est plus valide dans le cas d'une classification supervisée à 4 ou plus de classes. En effet l'ajout de classes dans le second classifieur SVM permet de renforcer la confiance de la probabilité d'appartenance à la classe feu en injectant dans l'apprentissage les secteurs ou de nombreux faux positifs avaient été identifiés, tels que les ombres de nuages par exemple, mais en contrepartie, la distance de la classe affectée au pixel à la classe d'appartenance de Surface brûlée ne permet plus une interprétation directe comme dans un cas à 2 classes (Surface brûlée, surface non brûlée).

2.4 Filtrage MMU

La contrainte de détection minimale renseignée par l'ŒIL indiquait une MMU de 1,5 hectare. L'application de ce filtre permet d'« éliminer » une grande partie du bruit de détection correspondant à des identifications de surfaces brûlées sur quelques pixels isolés.

Cette étape favorise la conservation de surfaces brûlées contiguës en conservant les pixels voisins et limitrophes et en « nettoyant » le bruit associé aux pixels totalement isolés. Ce filtre dépend de la taille renseignée par la MMU (Minimum Map Unit) mais aussi de la résolution spatiale du pixel natif (par exemple 30m pour Landsat-8 et 10m pour Sentinel-2).

Le résultat est donc une exclusion des surface brûlées inférieures à la taille minimale de la MMU ; soit ici 1,5 ha pour Landsat-8 et 10m pour Sentinel-2.

Résolution spatiale bande	Nb. de pixels MMU 1,5ha	Nb. de pixels MMU 1 ha
10m	~150 pixels	~100 pixels
20m	~37,5 pixels	~25 pixels
30m	~16,67 pixels	~11,11 pixels
60m	~4 pixels	~2,77 pixels

Les filtrages sont des opérations destinées à améliorer la lisibilité des images et/ou d'en extraire certaines informations. Le principe des filtrages est de modifier la valeur numérique de chaque pixel en fonction des valeurs des pixels voisins. Par exemple, en remplaçant la valeur de chaque pixel par la moyenne de lui-même et de ses voisins (8 voisins pour une fenêtre de 3x3), on effectue un « lissage » de l'image ; les détails les plus fins disparaissent et l'image apparaît plus floue. Cette opération est obtenue en calculant pour un pixel la somme des produits des valeurs des pixels du voisinage multipliés par les coefficients donnés dans une table, une matrice. La même opération est ensuite effectuée pour le pixel suivant définissant ainsi ce procédé comme 'filtrage par fenêtre mobile ». Différents types de filtres spatiaux et taille de filtres (3x3, 5x5, 7x7, 9x9 etc...) peuvent être appliqués afin de rehausser ou de réduire les contrastes, lisser ou encore réduire le bruit ambiant de l'image.

Par exemple un filtre Passe bas (simple moyenne arithmétique) enlève une partie de l'information de l'image dans les hautes fréquences mais ne génère aucune modification des basses fréquences. Ce filtre passe bas a pour effet d'adoucir l'image, réduit les détails et les contrastes.

Le filtre Passe haut effectue une amélioration locale de contraste qui correspond à l'ajout de l'écart à la moyenne à la valeur des pixels. Ce filtre améliore les informations à petites échelles (composante Haute fréquence) tout en maintenant l'information à grande échelle (basses fréquences).

2.5 Indice de détection du classifieur SVM

Dans le cas de classifieur SVM à 2 classes (Oui/non caractérisant les classes Surface brûlée/Surface non brûlée), l'indice de détection peut être apparenté à un indice de confiance ou à la probabilité d'appartenance à la classe recherchée : 1 étant la classe recherchée (ou 100% de probabilité d'appartenir à la classe) et 0 étant la classe à exclure (avec 0% de probabilité d'appartenir à la classe recherchée et 100% de probabilité d'appartenir à l'autre classe). Cet indice caractérise la distance normalisée (entre 0 et 1) du calcul SVM à la classe renseignée dans la phase d'apprentissage. Cette distance est apparentée à une probabilité uniquement dans le cas de classifieur à 2 classes et peut dans ce cas être directement interprétée comme un indice de confiance.

Dans les autres cas, cas de classifieurs supervisés à 3, 4 ou plus de classes, cette distance ne peut être interprétée comme une probabilité d'appartenance à la classe recherchée (celle renseignée par les échantillons d'apprentissage) et ne permet donc pas d'établir d'indice de confiance.

Afin de disposer d'un indice de confiance des détections de surfaces brûlées identifiées par des classifieurs supervisés pour un développement ultérieur et une amélioration de cette chaîne de traitement optique, une solution ultérieure serait donc :

- Soit de n'utiliser que des classifieurs à 2 classes en utilisant pour chacun d'eux des indices et entrées différentes
- Soit de multiplier le nombre de classifieurs et d'établir un indicateur du nombre de classifieurs ayant identifié la classe recherchée sur le nombre total de classifieurs utilisés, quelque soient le nombre de classe de chacun de ces classifieurs.

Ces éléments sont repris dans le chapitre 8. Suggestions d'amélioration ou de futurs développements.

3 CHAÎNE OPTIQUE LANDSAT 8

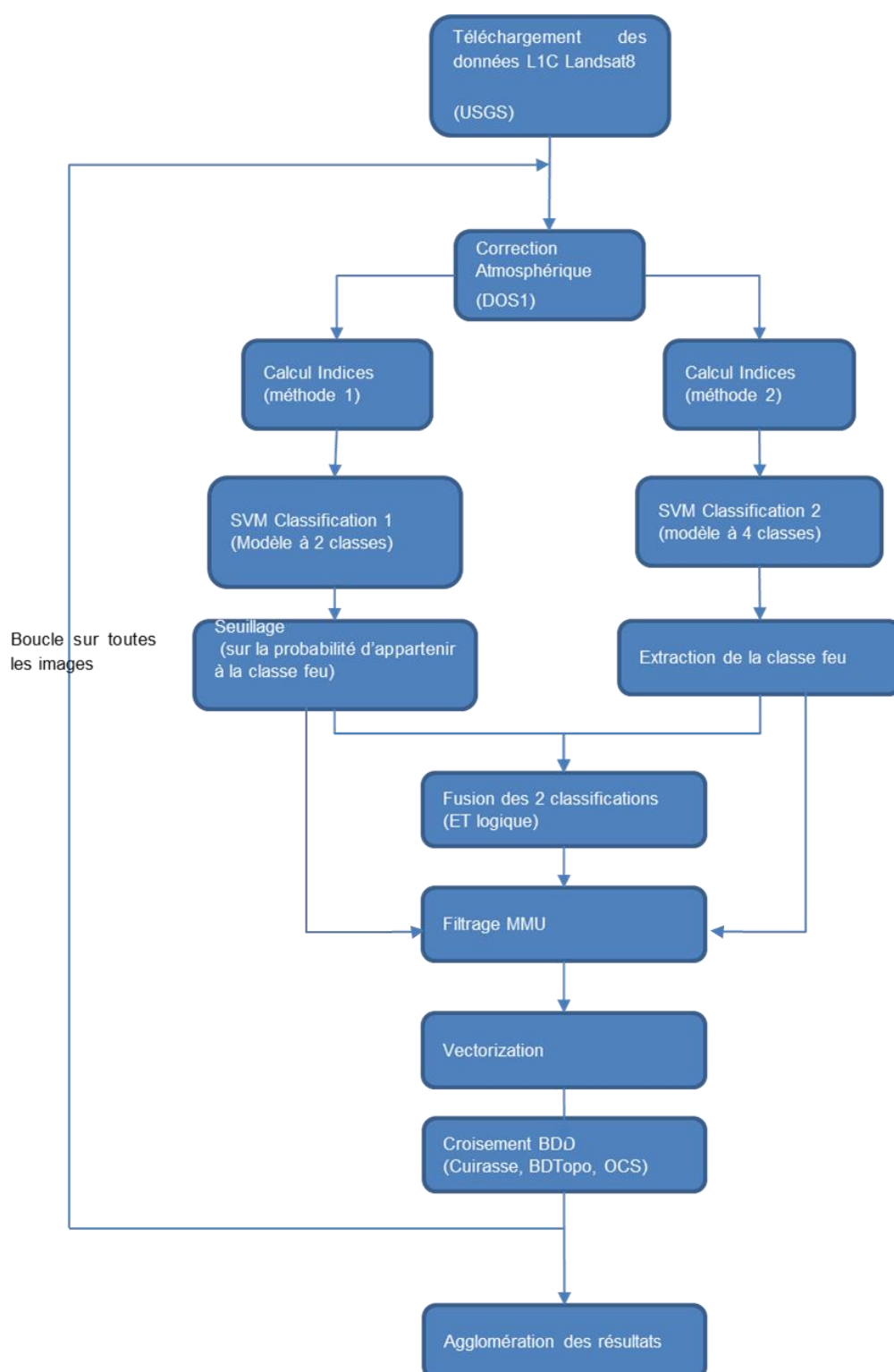


Figure 3. Schéma simplifié des process de la chaîne de traitement optique Landsat-8 de détection des surfaces brûlées.

3.1 Caractéristiques spectrales du capteur OLI Landsat-8

La mission Landsat est un programme américain de télédétection spatiale (NASA et USGS). Il a été le premier programme civil d'observation de la Terre par satellite. Débuté en 1972 avec le lancement du premier LANDSAT, il se poursuit actuellement avec LANDSAT-8. Ce programme a permis d'engranger des millions de données formant une librairie exceptionnelle des conditions sur Terre depuis presque 40 ans. Depuis Janvier 2009, l'entièreté des images d'archive LANDSAT est accessible gratuitement via internet (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

LANDSAT-8 est la mission de nouvelle génération qui devrait assurer la continuité de fourniture de données de type LANDSAT bien au-delà de la fin des missions actuelles. Le satellite LANDSAT-8 a été lancé en 2013 et est équipé d'un capteur multispectral appelé Operational Land Imager (OLI) et d'un capteur infrarouge thermique (TIRS).

Le lancement de LANDSAT-9 est prévu en 2020 et assurera la continuité de cette mission. Ci-après les caractéristiques techniques de la mission LANDSAT-8.

Altitude :	705 km
inclinaison :	98.2°
orbite :	sun-synchronous polar
période de révolution :	98.9 minutes
capacité de revisite :	16 jours
fauchée :	185 km

Satellites : LANDSAT 8 (11/02/2013 - opérationnel)

Rapport Méthodologique Final

Date modification : 20/03/2018

 Page : 15
/38

Bande	Bande spectrale	Résolution	Domaine
1	0,435 - 0,451 μm	30 m x 30 m	Coastal/Aérosol
2	0,452 - 0,512	30 m x 30 m	Blue
3	0,533 - 0,590 μm	30 m x 30 m	Green
4	0,636 - 0,673 μm	30 m x 30 m	Red
5	0,851 - 0,879 μm	30 m x 30 m	Near-Infrared
6	1,566 - 1,651 μm	30 m x 30 m	SWIR-1
7	2,107 - 2,294 μm	30 m x 30 m	SWIR-2
PAN	0,503 - 0,676 μm	15 m x 15 m	Panchromatic
Cirrus	1,363 - 1,384 μm	30m x 30 m	

Tableau 1:Description des bandes spectrales du capteur OLI.

Bande	Bande spectrale	Résolution	
10	10,60 -11,19 μm	100 m x100 m	TIRS-1
11	11,50 -12,51 μm	100 m x100 m	TIRS-2

Tableau 2:Description des bandes spectrales du capteur TIRS.

Rapport Méthodologique Final

Date modification : 20/03/2018

Page : 16
/38

Pour la suite du document les bandes Landsat-8 OLI utilisées sont notées telle que :

- Bande 1 B1 ou C = bleu coastal proche ultra-violet UV
- Bande 2 B2 ou B = bleu (492 nm)
- Bande 3 B3 ou G = vert (560 nm)
- Bande 4 B4 ou R = rouge (660 nm)
- Bande 5 B5 ou N = proche infrarouge NIR (865nm)
- Bande 6 B6 ou S1 = moyen infrarouge1 (1600 nm)
- Bande 7 B7 ou S2 = moyen infrarouge 2 (2100 nm)
- Bande 8 B8 = panchromatique
- Bande 9 B9 = bande moyen infrarouge Cirrus (1370 nm)
- Bande 10 B10 ou T1 = Infra-rouge Thermique 1 (10 100 nm)
- Bande 11 B11 ou T2 = Infra-rouge Thermique 2 (12 000 nm)

3.1.1 Méthode 1

Cette méthode correspond au classifieur SVM à deux classes :

- Surface brûlée
- Surface non brûlée

Calcul indices 1:

- $I1 = (G - (B + G + R) / 3) / (G + (B + G + R) / 3)$
- $I2 = (N - R) / (N + R)$
- $I3 = (S2 - G) / (S2 + G)$
- $I4 = ((S2 + S1) / 2 - G) / ((S2 + S2) / 2 + G)$ WARNING!!!!
- $I5 = (N - S2) / (N + S2)$
- $I6 = (N - np.sqrt(S2 * T1 / 1000)) / (N + np.sqrt(S2 * T1 / 1000))$
- $I7 = (np.sqrt(S1 * T1) - np.sqrt(S2 * T1)) / (np.sqrt(S1 * T2) + np.sqrt(S2 * T2))$
- $I8 = ((S1 + S2) / 2 - (T1 + T2) / 2000) / ((S1 + S2) / 2 + (T1 + T2) / 2000)$

Les différents indices ont été établis à partir de nombreux tests de sensibilités avec une réponse de signal différenciant les zones a priori brûlées des surfaces environnantes. Chacun des indices est ensuite exploité dans la classification comme une bande spectrale propre.

La bibliographie ainsi que les premiers résultats d'analyse ont montré une importante contribution des bandes moyen infra-rouge et infrarouge thermiques pour caractériser des surfaces brûlées récentes. Les bandes visibles G, B R permettent également de produire des indices radiométriques caractéristiques de la couverture végétale (type NDVI Normalized Difference Vegetation Index) ou de l'humidité relative de la cible (du type NDHI Normalized difference Humidity Index ou NDWI Normalized Difference Water Index), pouvant représenter des indicateurs pertinents de la caractérisation d'une surface brûlée.

SVM classification 1 :

Cette classification à deux classes a pour objectif de classer chacun des pixels de l'image selon son appartenance aux classes surface brûlée ou surface non brûlées. En raison de la performance des classifieurs, une distance à chaque classe est attribuée, plus on sera proche de 1 et plus le pixel sera classé avec certitude dans la classe surface brûlée. Cet indice peut représenter un indice de confiance du classifieur.

3.1.2 Méthode 2

Cette méthode correspond au classifieur SVM à quatre classes.

- Feu
- Non feu
- Nuage
- Ombre

Calcul indices 2:

- $I1 = (B5-B7)/(B5+B7)$
- $I2 = B5$
- $I3 = B6$
- $I4 = B7$

La seconde méthode est également un classifieur Support Vector Machine à 4 indices en entrée. L'indice I1 est un indice radiométrique entre le moyen infra rouge et le proche infra-rouge alors que les 3 autres indices (I2 à I4) sont les bandes spectrales « proche infrarouge » (B5) et « moyen infrarouge » (B6 et B7).

En effet la bibliographie montre une meilleure sensibilité de la réponse des surfaces brûlées aux longueurs d'onde dans l'infrarouge, du proche IR au Moyen IR. Ces bandes permettent également de discriminer les zones d'ombre de zones très sombres pouvant caractériser des surfaces brûlées.

SVM classification 2 :

Cette classification à 4 classes permet de raffiner la détection de surface brûlée en rajoutant des classes pour lesquelles de nombreuses fausses détections ont été observées sur les résultats de la première classification (à deux classes seulement). Ainsi chaque pixel est classé dans une des 4 classes existantes, surface brûlée/ surface non brûlée / nuage ou ombre.

Ce classifieur à 4 classes ne propose plus d'indice caractérisant la distance à la classe « surface brûlée ». Cependant la discrimination des classes nuages et ombre permet d'éliminer des fausses détections du premier classifieur optique. Pour ce faire, une fusion des deux classifieurs est opérée et est proposée en complément de l'export de chaque résultat des classifieurs (SVM Classification 1 et SVM classification 2).

3.1.3 Fusion des 2 Classifications Landsat-8 :

Afin d'optimiser les classifications des deux classifieurs SVM, une opération logique est appliquée sur les résultats de ces deux classifieurs avec la relation ET logique, schématisée ci-après :

SVM Classification 1	SVM Classification 2	Résultat
Surface brûlée	Surface brûlée	Surface brûlée
Non feu	Surface brûlée	Non feu
Surface brûlée	Non feu / ombre ou nuage	Non feu
Non feu	Non feu / ombre ou nuage	Non feu

Tableau 3: Logique de fusion des classifieurs LANDSAT 8.

4 CHAÎNE OPTIQUE SENTINEL 2

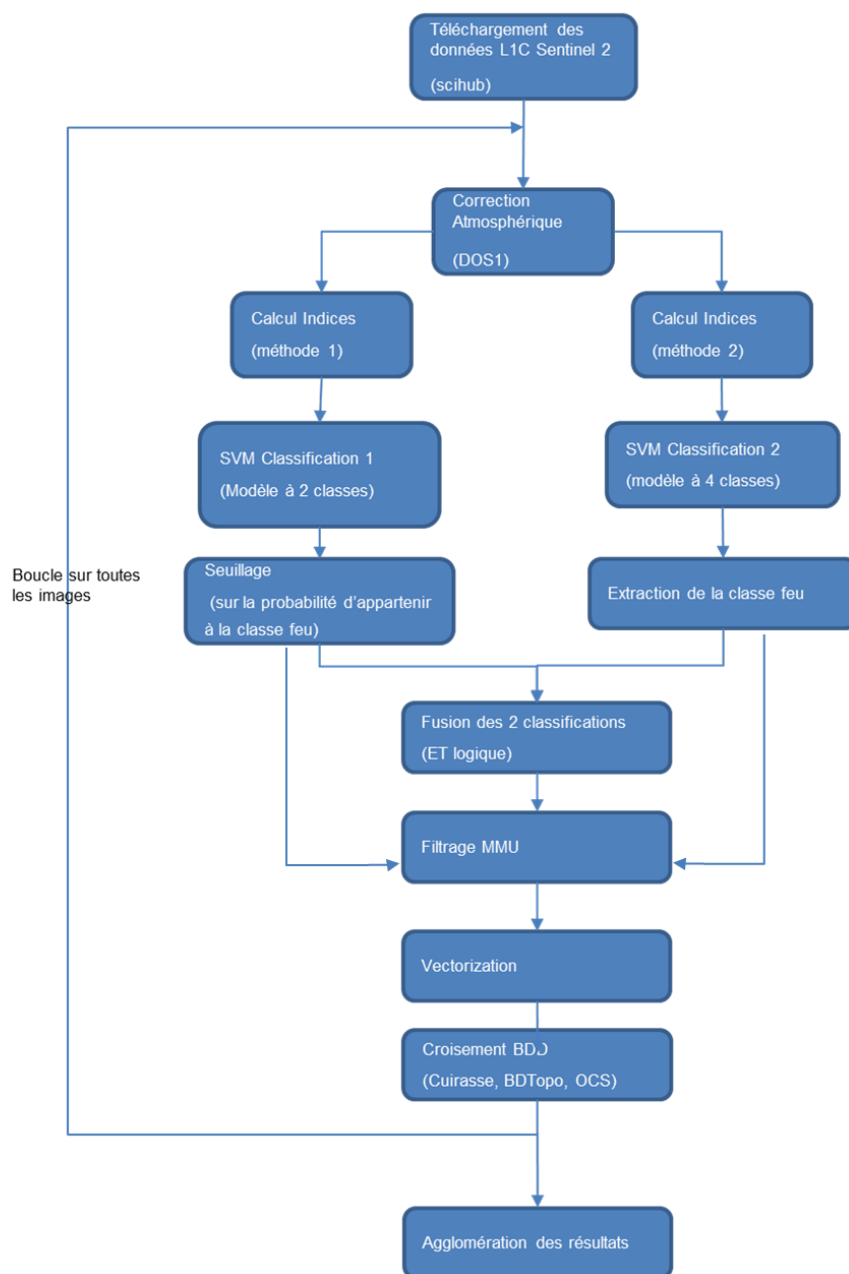


Figure 4. Schéma simplifié des process de la chaîne de traitement optique Sentinel-2 de détection des surfaces brûlées.

Le principe des traitements radiométriques reste identique à celui appliqué dans le cadre de la chaîne Landsat 8 sauf les indices. En effet, le capteur MSI de Sentinel 2 ne dispose pas de bandes Infrarouge Thermique il a donc fallu modifier les indices utilisés dans cette chaîne de traitement

4.1 Caractéristiques spectrales du capteur MSI Sentinel-2

Le satellite Sentinel-2A a été lancé le 23 Juin 2015 et est équipé d'un capteur multispectral appelé Multispectral Imager (MSI) couvrant 13 bandes spectrales dans le visible et l'infrarouge.

Altitude :	786	km
inclinaison :	98,5°	
orbite :	sun-synchronous	polar
période de révolution :	100	minutes
capacité de revisite :	10	jours
fauchée :	290 km	

Satellites : Sentinel-2A (23/06/2015 - opérationnel)
Sentinel-2B (07/03/2017 - opérationnel)

Rapport Méthodologique Final

Date modification : 20/03/2018

Page : 22
/38

Résolution	Band Number	S2A		S2B	
		Central WL (nm)	BW (nm)	Central WL (nm)	BW (nm)
10m*10m	2	496.6	98	492.1	98
	3	560.0	45	559	46
	4	664.5	38	665	39
	8	835.1	145	833	133
20m*20m	5	703.9	19	703.8	20
	6	740.2	18	739.1	18
	7	782.5	28	779.7	28
	8a	864.8	33	864	32
	11	1613.7	143	1610.4	141
	12	2202.4	242	2185.7	238
60m*60m	1	443.9	27	442.3	45
	9	945.0	26	943.2	27
	10	1373.5	75	1376.9	76

Tableau 4 : Description des bandes spectrales du capteur MSI.

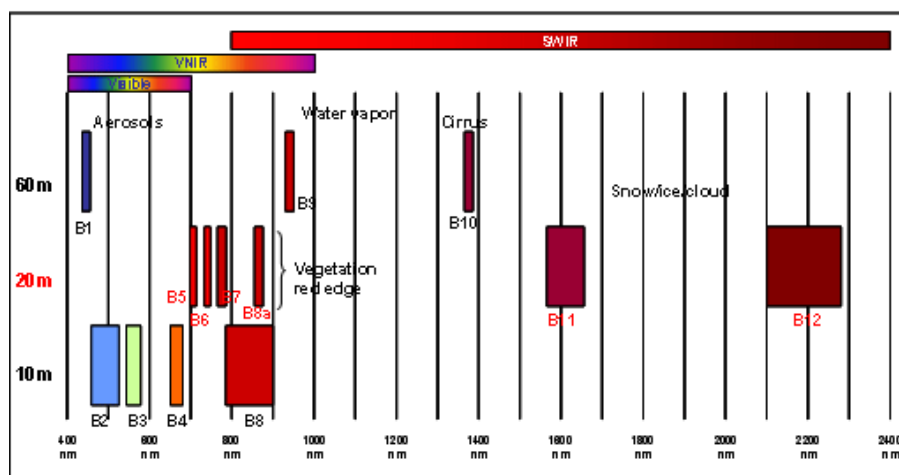


Figure 5. Bandes spectrales de Sentinel-2.

Pour la suite du document les bandes Sentinel-2 MSI utilisées sont notées telle que :

- Bande 1 B1 ou C = bleu coastal (443nm)
- Bande 2 B2 ou B = bleu (493nm)
- Bande 3 B3 ou G = vert (560nm)
- Bande 4 B4 ou R = rouge (665nm)
- Bande 5 B5 ou N1 = Red Edge 1 (705nm)
- Bande 6 B6 ou N2 = Red Edge 2 (740nm)
- Bande 7 B7 ou N3 = Red Edge 3 (782nm)
- Bande 8 B8 = Proche Infrarouge 1 (835 nm)
- Bande 8A B8A = Proche Infrarouge 2 (865 nm)
- Bande 10 B10 ou Cirrus = Moyen Infra-rouge spécifique Cirrus (1370 nm)
- Bande 11 B11 ou S1 = moyen infra-rouge1 (1610 nm)
- Bande 12 B12 ou S2 = moyen infra-rouge2 (2200 nm)

Les bandes 1 & 2 sont des bandes bleues, la bande 1 est plus proche de l'ultra-violet et est appelée Coastal

La bande 3 est une bande verte

La bande 4 est une bande rouge

Les bandes 5, 6 et 7 correspondent aux longueurs d'onde du Red Edge, à la frontière entre le rouge et le proche infra-rouge,

La bande 8 est une bande large dans le proche infra-rouge (NIR) à 10m de résolution spatiale

La bande 8A est une bande étroite dans le proche infra-rouge (NIR) à 20m de résolution spatiale,

Les bandes 10, 11 et 12 sont des bandes dans le moyen infra-rouge (SWIR), La 10 est une bande étroite pour les Cirrus à 60m de résolution spatiale tandis que les bandes 11 et 12 sont des bandes plus larges à 20m de résolution spatiale.

4.1.1 Méthode 1

Cette méthode correspond au classifieur SVM à deux classes :

- Surface brûlée
- Surface non brûlée

Les différents indices ont été établis à partir de nombreux tests de sensibilités avec une réponse de signal différenciant les zones a priori brûlées des surfaces environnantes. Chacun des indices est ensuite exploité dans la classification comme une bande spectrale propre. La bibliographie ainsi que les premiers résultats d'analyse ont montré une importante contribution des bandes moyen infra-rouge et infrarouge thermiques pour caractériser des surfaces brûlées récentes. Les bandes visibles G, B R permettent également de produire des indices radiométriques caractéristiques de la couverture végétale (type NDVI Normalized Difference Vegetation Index) ou de l'humidité relative de la cible (du type NDHI Normalized difference Humidity Index ou NDWI Normalized Difference Water Index), pouvant représenter des indicateurs pertinents de la caractérisation d'une surface brûlée.

Calcul indices 1:

- $I1 = (B12 - B8) / (B8 + B12)$
- $I2 = (B8 - B4) / (B8 + B4)$
- $I3 = (B12 - B3) / (B3 + B12)$
- $I4 = (B3 - (B2 + B3 + B4) / 3) / (B3 + (B2 + B3 + B4) / 3)$
- $I5 = ((B12 + B11) / 2 - B3) / (B3 + (B12 + B11) / 2)$
- $I6 = ((B11 + B12) / 2 - (B2 + B3 + B4 + B5 + B6 + B7 + B8 + B8A) / 8) / ((B2 + B3 + B4 + B5 + B6 + B7 + B8 + B8A) / 8 + (B11 + B12) / 2)$

4.1.2 Méthode 2

Cette méthode correspond au classifieur SVM à quatre classes.

- Feu
- Non feu
- Nuage
- Ombre

Calcul indices 2:

- $I1=(B8A-B12)/(B8A+B12)$
- $I2=(B8A-B11)/(B8A+B11)$
- $I3=B5$
- $I4=B6$
- $I5=B7$
- $I6=B8A$
- $I7=B11$

La seconde méthode est également un classifieur Support Vector Machine à 7 indices en entrée. Les indices I1 et I2 sont des indices radiométriques entre le moyen infra rouge et le proche infra-rouge alors que les 5 autres indices (I3 à I7) sont les bandes spectrales « red edge » (B5, B6 et B7), « proche infrarouge » (B8A) et « moyen infrarouge » (B11).

En effet la bibliographie montre une meilleure sensibilité de la réponse des surfaces brûlées aux longueurs d'onde dans l'infrarouge, du proche IR au Moyen IR. Ces bandes permettent également de discriminer les zones d'ombre de zones très sombres pouvant caractériser des surfaces brûlées.

SVM classification 2 :

Comme pour la source Landsat, cette classification à 4 classes permet de raffiner la détection de surface brûlée en rajoutant des classes pour lesquelles de nombreuses fausses détections ont été observées sur les résultats de la première classification (à deux classes seulement). Ainsi chaque pixel est classé dans une des 4 classes existantes, surface brûlée/ surface non brûlée / nuage ou ombre. Ce classifieur à 4 classes ne propose plus d'indice caractérisant la distance à la classe « surface brûlée ». Cependant la discrimination des classes nuages et ombre permet d'éliminer des fausses détections du premier classifieur optique. Pour ce faire, une fusion des deux classifieurs est opérée en complément de l'export de chacune des couches résultant des classifieurs.

4.1.3 Fusion des 2 Classifications Sentinel-2 :

Afin d'optimiser les classifications des deux classifieurs, une opération logique est appliquée sur les résultats de ces deux classifieurs avec la relation ET logique, schématisée ci-après :

SVM Classification 1	SVM Classification 2	Résultat
Surface brûlée	Surface brûlée	Surface brûlée
Non feu	Surface brûlée	Non feu
Surface brûlée	Non feu / ombre ou nuage	Non feu
Non feu	Non feu / ombre ou nuage	Non feu

Tableau 5 :Logique de fusion des classifieurs SENTINEL2.

5 EXPORT DES PRODUITS DES CHAÎNE OPTIQUES

Les fichiers vecteurs en sortie de chaîne optique (Landsat 8 ou Sentinel 2) possèdent les attributs suivants :

- **Date** : Date de l'image ayant servi à la détection de la zone brûlée
- **Nom** : Nom de l'image ayant servi à la détection de la zone brûlée
- **Province** : Province (Nord ou Sud) à laquelle appartient la détection
- **Commune** : Commune dans laquelle se trouve la détection
- **Surface** : Surface (en ha) de la détection
- **X** : coordonnée X du centroïde de la détection
- **Y** : coordonnée Y du centroïde de la détection
- **Cuirasse** : indique le type de cuirasse (Lythologie) si la détection superpose un objet du masque de cuirasse
- **Cuira_area** : pourcentage de recouvrement de la détection avec des éléments du masque de cuirasse
- **Bdtopo** : indique le type d'objet de la BDTopo si la détection superpose un objet du masque bdtopo
- **Bdtop_area** : pourcentage de recouvrement de la détection avec des éléments du masque bdtopo
- **Ocs** : occupation du sol majoritaire de la détection.
- **Ocs_area** : pourcentage de recouvrement de la détection avec des éléments du masque d'occupation du sol. Dans le cas de l'utilisation du masque d'occupation du sol par défaut, cet attribut aura la valeur 100 % (ou 99% dû à des arrondis lors des calculs des surfaces d'intersection) car toutes données du MOS ont été conservées et qu'elles recouvrent entièrement toute la Nouvelle-Calédonie.
- **Prop** : propriétaire de la donnée. Cet attribut a toujours la valeur CÉIL.

	date	nom	province	commune	surface	x	y	cuirasse	cuira_area	bdtopo	bdtop_area	OCS	OCS_area	prop
62	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	KOUMAC	3.4426141268...	222981	409335					Savane	99	OEIL
63	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	POUEBO	3.4429902842...	269595	408940					Végétation arbustive...	100	OEIL
64	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	KOUMAC	1.7212375283...	216959	405951					Savane	100	OEIL
65	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	KOUMAC	5.2037433966...	217304	405773					Savane	100	OEIL
66	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	KOUMAC	6.1644183512...	217060	405451					Savane	100	OEIL
67	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	HIENGHENE	3.4428833548...	276534	401556					Végétation arbustive...	100	OEIL
68	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	HIENGHENE	1.2009945948...	278393	399357					Végétation arbustive...	100	OEIL
69	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	HIENGHENE	3.3227082147...	280964	396254					Végétation arbustive...	100	OEIL
70	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	HIENGHENE	1.1609433688...	279002	396052					Savane	100	OEIL
71	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	HIENGHENE	1.5212282993...	278345	395069					Savane	100	OEIL
72	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	HIENGHENE	1.2410011209...	278191	394941					Végétation arbustive...	100	OEIL
73	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	KAALA GOMEN	3.2825056967...	250672	394548					Savane	100	OEIL
74	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	HIENGHENE	1.8414778335...	275782	394508					Savane	100	OEIL
75	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	HIENGHENE	1.2409955215...	276058	394380					Savane	99	OEIL
76	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	HIENGHENE	1.2409778560...	268311	393204					Savane	100	OEIL
77	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	HIENGHENE	16.933332830...	267912	393187					Savane	100	OEIL
78	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	HIENGHENE	1.0408367308...	286925	393178					Savane	100	OEIL
79	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	HIENGHENE	4.1232490168...	268606	393118					Végétation arbustive...	99	OEIL
80	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	KAALA GOMEN	3.2823348356...	234632	392263			BORDMAR	99	Savane	99	OEIL
81	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	KAALA GOMEN	22.375635786...	231686	391484					Savane	99	OEIL
82	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	KAALA GOMEN	1.0807555294...	232549	390961					Maquis ligno-herbacé	99	OEIL
83	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	HIENGHENE	2.9622619407...	258997	391030					Savane	100	OEIL
84	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	HIENGHENE	2.0416109206...	281468	390561					Savane	99	OEIL
85	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	HIENGHENE	2.4819622292...	284034	390556					Savane	100	OEIL
86	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	HIENGHENE	1.1208852435...	284472	390320					Végétation arbustive...	99	OEIL
87	2016-10-14	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MP...	Province Nord	KAALA GOMEN	1.0007247858...	243073	389970					Savane	100	OEIL

Tableau 6: Exemple de table attributaire pour la chaîne Sentinel 2

6 CHAÎNE RADAR SENTINEL-1

6.1 Caractéristiques générales du signal Radar

La question du bruit en détection Radar est d'une importance capitale car c'est la présence du bruit qui vient limiter les possibilités de détection du signal utile.

Le Speckle est causé par des perturbations constructives et destructrices aléatoires qui donnent du bruit en forme de « sel et poivre » ou chatoiement dans toute l'image. Des filtres Speckle peuvent être appliqués aux données pour réduire la quantité de speckle au prix de fonctionnalités floues ou de résolution réduite.

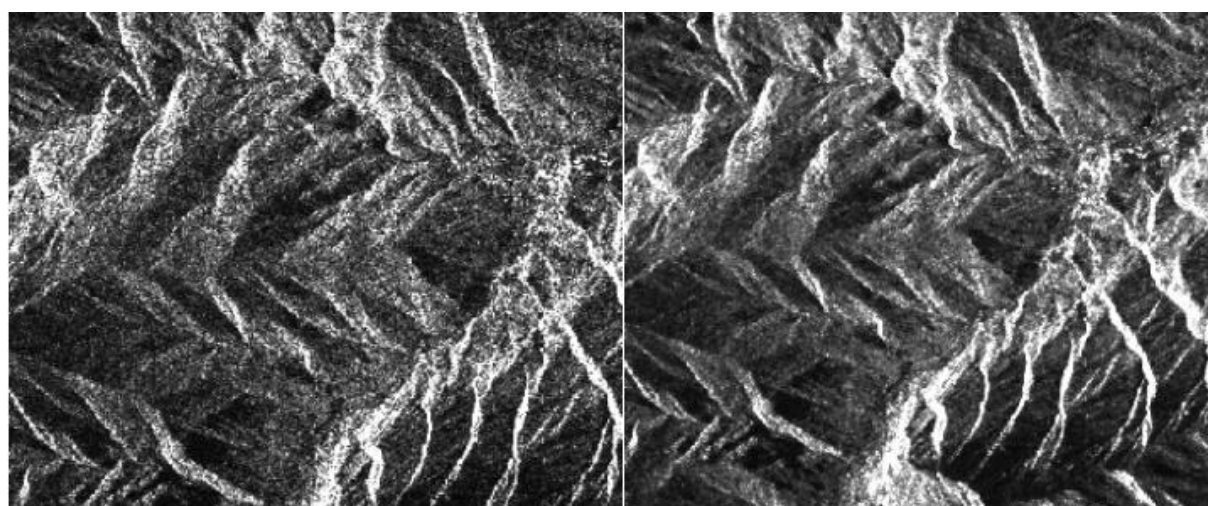


Figure 6. Illustration des effets de la correction du Speckle, à gauche avant correction, à droite après correction du speckle. Cette réduction du bruit général de l'image tend à générer une image plus nette et contrastée.

On caractérise le bruit par sa température équivalente de bruit (exprimée en Kelvin) et est applicable à l'ensemble des bruits uniformément répartis en fréquence sur le signal. Cela correspond donc à l'ensemble des bruits d'une chaîne de réception Radar.

Une fois le signal bruité du capteur Radar en bande C du capteur Sentinel-1 corrigé de la température de bruit (thermal noise ou contribution totale des sources de bruits sur la chaîne de réception) nous disposons d'un signal utile brut. Ce signal est alors calibré radiométriquement.

La calibration radiométrique est le processus permettant d'obtenir le coefficient de rétrodiffusion, car c'est celui-ci qui nous renseigne sur la dynamique de l'image radar. Il est proportionnel au rapport entre la puissance reçue et la puissance émise au niveau de l'antenne. Il est obtenu à partir de l'équation radar, et il est donné soit en valeur naturelle (sans unité), soit exprimé sur une base logarithmique (en dB).

Une étape suivante consiste à appliquer un filtrage de Lee (voir section filtres optiques).

Le filtre de Lee utilise une approche des moindres carrés pour estimer la puissance du signal réel de la cellule centrale dans la fenêtre du filtre à partir de la valeur mesurée dans cette cellule, la moyenne locale, la luminosité de toutes les cellules dans la fenêtre et un facteur de gain calculé à partir de la variance locale et l'écart type de bruit estimé.

Rapport Méthodologique Final

Date modification : 20/03/2018

Page : 29
/38

Le filtre prend une distribution Gaussienne (loi normale) pour les valeurs de bruit et calcule l'écart type du bruit local pour chaque fenêtre de filtre. Le calcul du filtre Lee produit une valeur de sortie proche de moyenne locale pour les zones uniformes et une valeur proche de la valeur d'entrée originale pour les régions à fort contraste. La plupart du lissage se produit dans les zones plus uniformes, tout en conservant les zones plus marquées. Le filtre Lee n'a pas de paramètres ajustables par l'utilisateur à l'exception de la taille de la fenêtre du filtre.

Enfin, la dernière étape de prétraitement des images Radar consiste en une correction de terrain (Terrain correction).

Cette correction de terrain va géocoder l'image en corrigeant les distorsions géométriques Radar à l'aide d'un modèle d'élévation numérique (DEM) et en produisant un produit projeté. Le DEM Utilisé est le SRTM de la NASA par défaut.

6.2 Caractéristiques de Sentinel-1, en bande C

SENTINEL-1 porte un seul instrument radar à ouverture synthétique à bande C fonctionnant à une fréquence centrale de 5,405 GHz, longueur d'onde de l'ordre de 5 cm. Il comprend une antenne active en phase phonique active qui offre une exploration rapide en élévation et azimut, une capacité de stockage de données de 1 410 Gb et 520 Mbit / s de capacité de liaison descendante X-band.

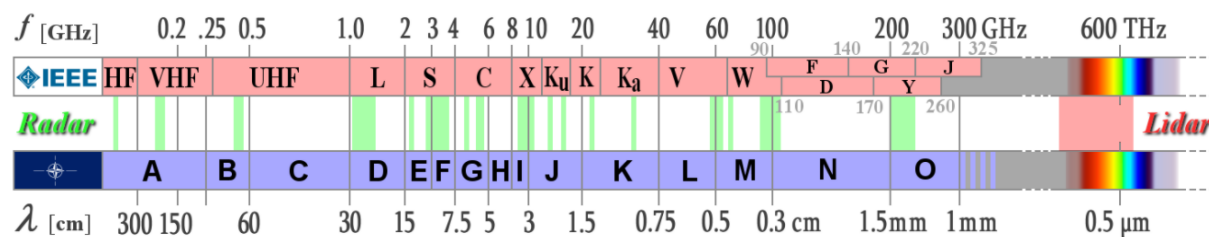


Figure 7. Différentes fréquences et longueurs d'onde du spectre Radar (@ IEEE).

L'instrument C-SAR supporte le fonctionnement en double polarisation (HH + HV, VV + VH) implémenté par une chaîne d'émission (commutable à H ou V) et deux chaînes de réception parallèles pour polarisation H et V. Les données à double polarisation sont utiles pour la classification de la couverture terrestre et les applications de la glace de mer.

SENTINEL-1 opère en différents modes d'acquisition :

- Stripmap (SM)
- Interferometric Wide swath (IW)
- Extra-Wide swath (EW)
- Wave mode (WV).

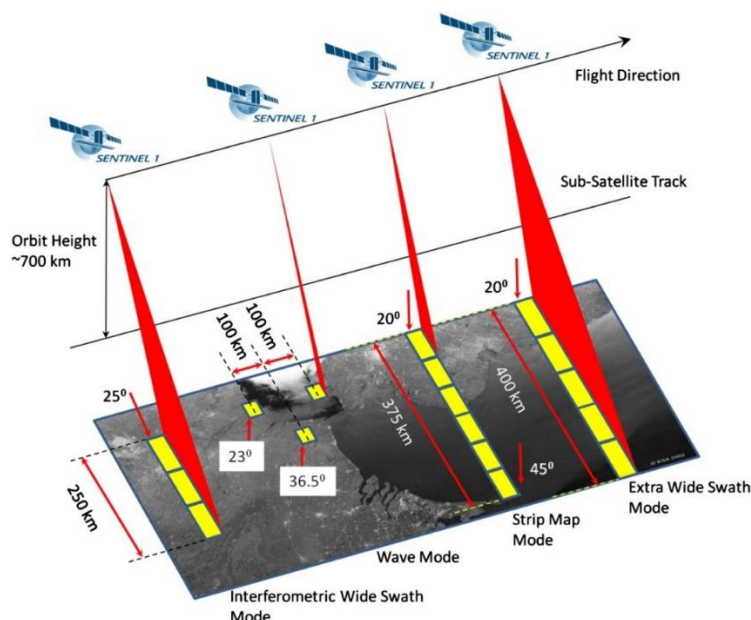


Figure 8. Illustration des différents modes de Sentinel-1 et de leurs emprises spatiales.

6.2.1 Stripmap Mode

Le mode [Stripmap](#) découle de la continuité des missions ERS et Envisat. Stripmap fournit une couverture spatiale à la résolution de 5 m par 5 m sur une fauchée étroite de 80 km. L'une des six bandes d'imagerie peut être sélectionnée en modifiant l'angle d'incidence du faisceau et la largeur du faisceau d'élévation

6.2.2 Interferometric Wide Swath Mode

Le mode [Interferometric Wide swath](#) (IW) permet de combiner une grande largeur (250 km) avec une résolution géométrique modérée (5 m sur 20 m). Le mode IW reproduit trois sous-bandes utilisant l'observation du terrain avec Progressive Scans SAR (TOPSAR). Avec la technique TOPSAR, en plus de la direction du faisceau dans la gamme comme dans SCANSAR, le faisceau est également piloté électroniquement de l'arrière vers l'avant dans la direction de l'azimut pour chaque éclatement, en évitant le scalloping et en résultant dans une image de meilleure qualité. L'interférométrie est assurée par un chevauchement suffisant du spectre Doppler (dans le domaine de l'azimut) et du spectre des nombres d'ondes (dans le domaine de l'élévation). La technique TOPSAR garantit une qualité d'image homogène tout au long de la bande. Le mode IW est le mode d'acquisition par défaut sur le terrain. C'est le mode qui a été privilégié dans le cadre de la détection de changements du suivi des surfaces brûlées sur le territoire de Nouvelle Calédonie.

6.2.3 Extra Wide Swath Mode

Le mode d'imagerie [Extra Wide swath](#), extra large, est destiné aux services opérationnels de zone maritime, de glace et de zone polaire, où une large couverture et des temps de retour courts sont exigés. Il fonctionne de manière similaire au mode IW utilisant une technique TOPSAR mobilisant cinq sous-bandes au lieu de trois, ce qui donne une résolution inférieure (20 m par 40 m), et peut également être utilisé pour l'interférométrie comme pour le mode IW.

6.2.4 Wave Mode

Le mode d'imagerie Wave Mode SENTINEL-1, en conjonction avec les modèles globaux de vagues océaniques, peut aider à déterminer la direction, la longueur d'onde et les hauteurs des vagues sur les océans ouverts. Les acquisitions en mode vague se composent d'images à bandelettes de 20 km par 20 km, acquises alternativement sur deux angles d'incidence différents. Les images d'ondes sont acquises tous les 100 km, avec des images sur le même angle d'incidence séparées par 200 km.

La bande C du capteur S-1 est centrée à la fréquence de 5,405 GHz, de manière générale les fréquences des Radar d'observation ont des fréquences comme suit :

- **Bande L** entre 1 et 2 GHz,
- **Bande C** entre 4 et 8 GHz,
- **Bande X** entre 8 et 12 GHz.

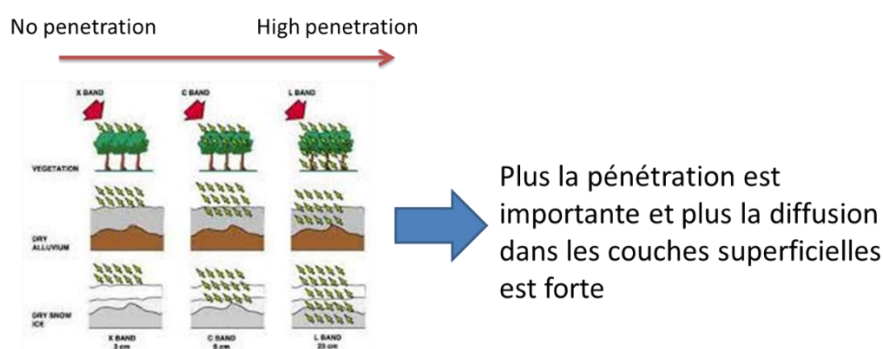


Figure 9. Description des variations de pénétration du signal sur les cibles naturelles en fonction de la bande spectrale Radar.

6.3 Architecture de la chaine Radar Sentinel-1 de détection de changement

Afin de s'affranchir des droits et limitations de propriétés dans l'exploitation de la chaine de traitement Radar, les outils de traitement intégrés dans les codes et routines proviennent de l'outil SNAP, libre de droit, pour toutes les étapes de prétraitements de la donnée Radar Sentinel-1. Ceci permet et garantit également une homogénéité et une traçabilité des méthodes et résultats pour la valorisation des résultats dans le cadre de communications ou publication spécialisées et/ou grand public. Ainsi les étapes de prétraitements géométriques comme radiométriques sont appliqués sur l'ensemble des sources Sentinel-1 au format GRD depuis le Scihub de l'ESA.

Le pré-processing comporte différentes étapes permettant l'exploitation thématique des sources Radar. Ces étapes sont les suivantes :

1. Application du filtre du Speckle
2. Suppression du bruit thermique
3. Calibration radiométrique
4. Filtrage de Lee
5. Correction Géométrique (terrain)

Une fois ces étapes effectuées, les produits sont exploitables pour une application temporelle et la détection de changement.

Les images sont alors triées par dates croissantes et comparées deux à deux, par paires d'images pour chaque dalle du territoire. Des étapes de lissage et de filtrage moyen permettent ensuite de réduire le bruit important sur ces sources de données.

Une étape de morphologie mathématique de fermeture est ensuite appliquée afin de ne pas isoler de trop nombreuses petites zones qui seraient incluses dans une plus grande zone de détection mais dont le seuillage aurait été en limite de sélection initiale. Tout comme pour les chaines Optiques, une étape de MMU (Minimum Mapping Unit) est alors appliquée afin d'extraire les sélections de changements détectés sur des surfaces inférieures à 1,5ha.

Enfin une dernière étape de vectorisation des résultats raster est appliquée afin de générer la troisième couche vectorielle correspondant à la sortie de la chaine Radar.

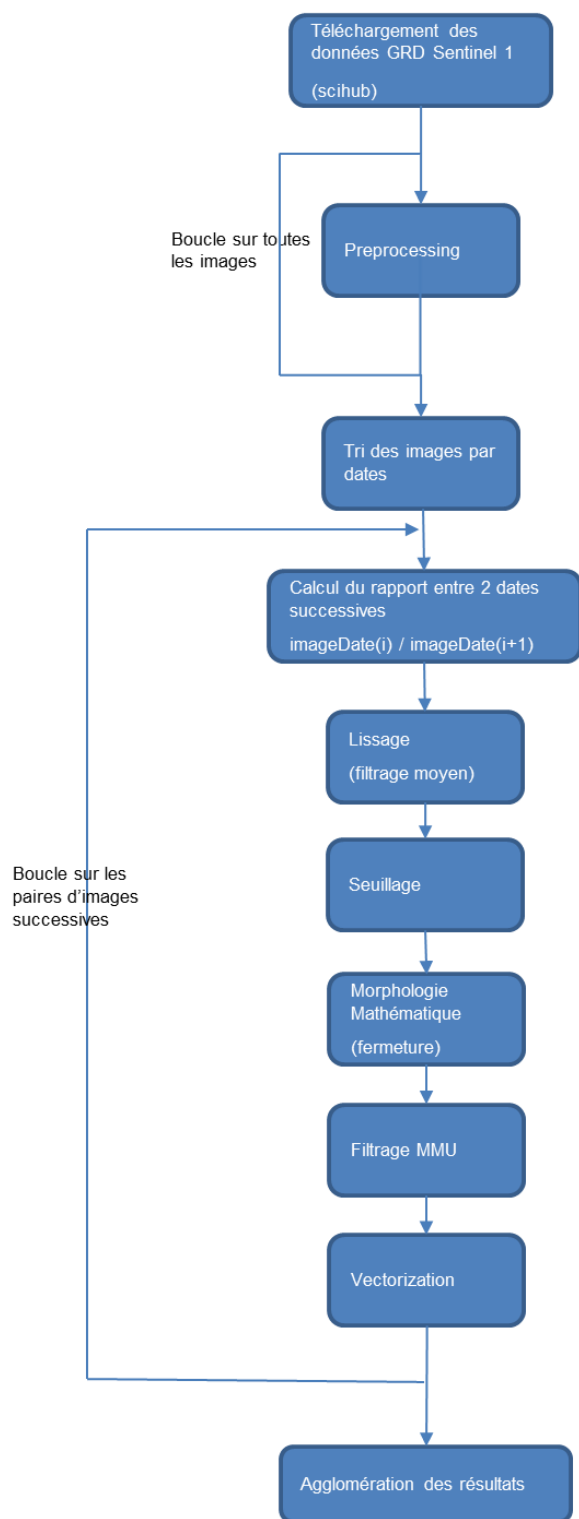


Figure 10. Schéma simplifié du process de la chaine de traitement Radar Sentinel-1.

7 EXPORT DES PRODUITS DE LA CHAÎNE RADAR SENTINEL-1

Les fichiers vecteurs en sortie de chaîne radar (Sentinel 1) possèdent les attributs suivants :

- **Date1 :** Date de la 1^{ère} image ayant servi à la détection de changement
- **Date2 :** Date de la 2^{ème} image ayant servi à la détection de changement
- **Province :** Province (Nord ou Sud) à laquelle appartient la détection
- **Commune :** Commune dans laquelle se trouve la détection
- **Surface :** Surface (en ha) de la détection
- **X :** Coordonnée X du centroïde de la détection
- **Y :** Coordonnée Y du centroïde de la détection
- **Prop :** Propriétaire de la donnée. Cet attribut a toujours la valeur CÉIL.

Les croisements avec les données Cuirasses, BDTopo et OCS ne sont pas réalisés car cela n'a pas été jugé pertinent dans le cas de détection de changement.

8 SUGGESTIONS D'AMÉLIORATION OU DE FUTURS DÉVELOPPEMENTS

Cette dernière partie se propose de présenter des pistes d'améliorations pour une exploitation des chaînes de traitement au vu des retours d'expérience et de l'expertise apportée à son évaluation, sur les problèmes identifiés de taux de nébulosité ainsi que sur la création d'un indice de confiance affecté à la détection optique de surface brûlée opérée par les classificateurs optiques de la chaîne de traitement.

8.1 Seuillage de la couverture nuageuse

L'efficacité des sources optiques étant limitée par la présence de nuages, un seuillage du taux de couverture nuageuse est nécessaire à la sélection des images à télécharger pour le traitement thématique de la chaîne pour identifier des surfaces brûlées. Plus ce seuil de nébulosité sera élevé et plus les images prises en compte par la chaîne de traitement seront confrontées à des zones aveugles (NaN) ainsi qu'aux ombres portées par les nuages qui peuvent générer des faux positifs en raison d'une ambiguïté dans les modèles d'apprentissage des surfaces brûlées entre les ombres de nuages et la classe de surface brûlée.

Une autre contrainte de seuillage du taux de couverture nuageuse est identifiée sur la répartition géographique des nuages sur le territoire de Nouvelle Calédonie et sur chaque dalle des sources satellite (Landsat-8 comme Sentinel-2). En effet, le taux de la couverture nuageuse renseignée dans les fichiers de métadonnées des sources optiques tient compte uniquement d'un pourcentage de pixels appartenant à la classe nuage. Or, cette classe n'est pas géolocalisée et un fort taux ne signifie pas pour autant une couverture nuageuse des régions d'intérêt. Par exemple, sur un territoire terrestre et marin, il n'est pas possible avec seul ce taux de couverture nuageuse de savoir si les nuages sont localisés sur la partie marine des dalles optiques ou sur les parties terrestres. Il s'agit donc de définir un taux de couverture raisonnable pour ne pas surcharger les analyses et le traitement de la chaîne avec des images dont seule une très faible partie de la superficie totale est d'intérêt.

Un taux optimal entre **60 et 70%** semble s'identifier comme étant le meilleur compromis afin de bénéficier des données potentielles sur le territoire continental ainsi que de ne pas exclure des images pour lesquelles le couvert nuageux est principalement localisé sur le milieu marin. En effet, la géographie et la forme du Territoire de Nouvelle Calédonie implique une large prédominance de couverture marine sur les dalles Landsat-8, moindre pour certaines dalles Sentinel-2 (6 sur 18 dalles) comme le montre les figures 3 et 4 du manuel d'utilisation.

Une solution, impliquant le téléchargement de toutes les images disponibles dans un premier temps, serait d'effectuer un pré-traitement antérieur au traitement thématique « surfaces brûlées » destiné à croiser une couche de masque de nuage avec une couche Terre-Mer afin de quantifier objectivement le taux de couverture nuageuse et de nébulosité effective de la partie terrestre des images disponibles et donc pleinement exploitable pour l'application « surface brûlée ».

Cette étape représenterait cependant le développement d'une chaîne de pré-traitement spécifique de nébulosité qui effectuerait un premier tri de l'archive, dont les résultats viendraient alimenter la chaîne de traitement de détection des surfaces brûlées livrée ici.

8.2 Etablissement d'un indice de confiance des détections de surfaces brûlées

Comme indiqué dans les chapitres SVM, les classifieurs mis en place dans la chaîne de traitement automatique évaluent une distance à la classe recherchée. Dans le cas d'une classification binaire, deux classes uniquement surface brûlée/surface brûlée, cette distance peut être interprétée comme un indice de confiance ou un pourcentage d'appartenance à la classe recherchée. Cette interprétation n'est plus envisageable dans le cas de classification à plus de deux classes (cas du second classifieur optique, tant pour Landsat-8 que Sentinel). Le croisement de ces deux classifieurs ne permet donc pas d'établir un indice de confiance de la détection, ni pour le second classifieur, ni pour la fusion des résultats des deux classifieurs développés dans le cadre de cet outil.

Afin de disposer d'un indice de confiance attribué à la qualité supposée d'une détection il s'avère indispensable d'implémenter d'autres classifieurs. En effet, un poids relatif (homogène ou pondéré selon les critères à définir) pour le résultat de chacun des classifieurs déployés permettrait ainsi d'affecter un indice global de confiance des détections de surface brûlées. Le nombre de classifieur pressenti est un nombre impair, avec un nombre minimal de 3 classifieurs qui permettrait pour chaque image traitée de pouvoir affecter un indice de confiance à la détection réalisée.

Cet indice de confiance pourrait être par exemple simplement un indicateur du rapport de la somme de classifieurs ayant détecté l'objet comme étant une surface brûlée sur la somme totale des classifieurs. Cet indicateur calculé renseignant ainsi sur un indice de confiance compris entre 0 et 1 ;

- 0 étant aucun des classifieurs n'a détecté l'objet comme la classe d'appartenance et
- 1 correspondant à la totalité des classifieurs ayant identifié l'objet comme appartenant à la classe surface brûlée.

D'autres options permettraient également d'affecter un poids relatif à chaque classifieur selon ses performances avérées (par exemple les classifieurs privilégiant l'apport des bandes infrarouges thermiques au détriment des bandes visibles) en pondérant leur poids respectif dans le calcul de l'indicateur de qualité résultant ou l'indice de confiance.

9 CITATION DES DONNEES SOURCES:

La publication ou la diffusion des données produites par la chaîne de traitement peut nécessiter une citation de référence à la donnée source et une mention devra être faite comme suit pour la publication, l'exploitation ou la diffusion des **données brutes** :

- **Pour Landsat-8:** *USGS Products, Data available from the U.S. Geological Survey*
- **Pour Sentinel-2 :** *Copernicus Sentinel data [year] for Sentinel data*
- **Pour les données modifiées (sorties de la chaîne) :** *Contains modified Copernicus Sentinel data [year]*

Une fois les données traitées et si le traitement ne permet pas de revenir à l'image source, aucune mention n'est nécessaire. S'agissant des sorties de la chaîne, toutes les données traitées (produits vecteurs comme produits rasters intermédiaires) ne permettent aucunement de remonter à la donnée source et la mention de [*l'USGS Products, Data available from the U.S. Geological Survey*](#) ne serait qu'une citation de courtoisie. Dans ce cas il sera cependant nécessaire de préciser que seuls les produits bruts et non les produits traités sont des produits USGS.

10 BIBLIOGRAPHIE:

Dumas, P., Toussaint M., Herrenschmidt, J-B., Conte A., Mangeas M., 2013. Le risque de feux de brousse sur la grande Terre de Nouvelle Calédonie : l'homme responsable, mais pas coupable. *Revue Géographique de l'Est*. vol. 53 / 1-2 | 2013 : Gestion du risque et sécurité civile.

Tanase, M.A., Santoro, M., Wegmueller, U., de la Riva, J., Pérez-Cabello, F., 2010a. Properties of X-, C- and L-band repeat-pass interferometric SAR coherence in Mediterranean pine forests affected by fires. *Remote Sensing of Environment* 114 (2010) 2182–2194

Tanase, M.A., Santoro, M., de la Riva, J., Pérez-Cabello, F., Le Toan, T., 2010b. Sensitivity of X-, C-, L-band SAR backscatter to burn severity in Mediterranean Pine Forests. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, VOL. 48, NO. 10, OCTOBER 2010, pp 3663-3675

Verhegghen, A, Eva, H., Ceccherini, G., Achard, F., Gond, V., Gourlet-Fleury, S., Cerutti, P.O., 2016. The Potential of Sentinel Satellites for Burnt Area Mapping and Monitoring in the Congo Basin Forests. *Remote Sens.* 2016, 8, 986; doi:10.3390/rs8120986