



Correction des images VEN μ S (CNES) par la méthode Cosine pour le suivi de l'enneigement et de la couverture nuageuse : application dans la vallée du Khumbu (Everest, Népal)

Zoé Bessin

► To cite this version:

Zoé Bessin. Correction des images VEN μ S (CNES) par la méthode Cosine pour le suivi de l'enneigement et de la couverture nuageuse : application dans la vallée du Khumbu (Everest, Népal). Sciences de l'ingénieur [physics]. 2020. dumas-03253872

HAL Id: dumas-03253872

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03253872>

Submitted on 8 Jun 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Zoé BESSIN

Correction des images VEN μ S (CNES) par la méthode Cosine pour le suivi de
l'enneigement et de la couverture nuageuse : Application dans la vallée du
Khumbu (Everest, Népal).

Soutenu le 14 octobre 2020

JURY

Monsieur José CALI	Président du jury
Monsieur Jean-Pierre DEDIEU	Maître de stage
Monsieur Yves ARNAUD	Maître de stage
Monsieur Jérôme VERDUN	Enseignant référent

Remerciements

Avant tout, je souhaiterais remercier l'ensemble des personnes m'ayant permis de réaliser et de mener à bien ce travail de fin d'études malgré la situation engendrée par l'épidémie de la Covid-19, ainsi que les relecteurs de ce mémoire.

Je tiens particulièrement à remercier Jean-Pierre DEDIEU, mon encadrant au sein de ce travail de fin d'études, à la fois pour son accueil au sein du laboratoire, sa confiance, ses conseils et les connaissances qu'il m'a transmises. Sa rigueur et son implication pendant toute la durée du stage, y compris en période de confinement m'ont été d'un grand soutien.

J'adresse également mes remerciements à Hans SEGURA, d'abord pour m'avoir intégrée dans le laboratoire, pour sa curiosité et son aide lors de mes différents tests mais aussi pour tous ces repas partagés et les discussions scientifiques ou culinaires qui les accompagnaient.

Je remercie Sly WONGCHUIG-CORREA, pour ses conseils ; Michel ESTEVES, Yves ARNAUD et Patrick WAGNON pour leurs connaissances à la fois techniques et théoriques en glaciologie et en météorologie ; Lucas DAVAZE pour sa contribution et son appui dans l'adaptation de son programme, Simon Gascoin du CNES-Cesbio pour la fourniture du MNT HMA de notre zone, ainsi que Olivier HAGOLLE et Gérard DEDIEU (CNES) pour avoir su répondre à mes interrogations sur les images VENμS. Mes remerciements vont aussi à Baker PERRY (Appalachian State University) et National Geographic pour l'accès à leurs données et leur aide dans l'analyse de celles-ci.

De manière plus générale, un grand merci à l'ensemble des permanents et non-permanents du laboratoire pour m'avoir accompagnée et accueillie.

Enfin, mes remerciements vont à mes parents et mes frères ainsi qu'à mon conjoint Clément PIERRE pour leur soutien inconditionnel.

Liste des abréviations

CLM : **C**loud **M**ask

CNRS : **C**entre **N**ational de la **R**echerche **S**cientifique

CNES : **C**entre **N**ational d'Études **S**patiales

DEM (fr : *MNT*) : **D**igital **E**levation **M**odel

FRE : **F**lat- **R**Eflectance

GIEC : **G**roupe **I**ntergouvernemental sur l'Évolution du **C**limat

IGE : **I**nstitut des **G**éosciences de l'**E**nvironnement

IRD : **I**nstitut de **R**echerche pour le **D**éveloppement

MNT (en : *DEM*) : **M**odèle **N**umérique de **T**errain

NDVI : **N**ormalized **D**ifference **V**egetation **I**ndex

NDSI : **N**ormalized **D**ifference **S**now **I**ndex

NSIDC : **N**ational **S**now and **I**ce **D**ata **C**enter

OSUG : **O**bservatoire des **S**ciences de l'**U**nivers de **G**renoble

SCA : **S**now **C**over **A**rea

SNO : **S**ervice **N**ational d'**O**bservation

SRE : **S**urface-**R**Eflectance

SWIR : **S**hort-**W**ave **I**nfra-**R**ed

SW : **S**hort-**W**ave

TFE : **T**ravail de **F**in d'Études

UGA : **U**niversité **G**renoble **A**lpes

UTM : **U**niversal **T**ransverse **M**ercator

WGS : **W**orld **G**eodetic **S**ystem

Glossaire

(termes en anglais entre parenthèses)

Albédo (*albedo*) : Aussi appelé coefficient de réflexion diffuse. Mesure de la réflectivité d'un objet ou d'une surface ; à savoir le rapport entre la quantité de rayonnement réfléchi par un corps et la quantité d'énergie qui le frappe (« Remote Sensing Glossary - AWF-Wiki », s. d.).

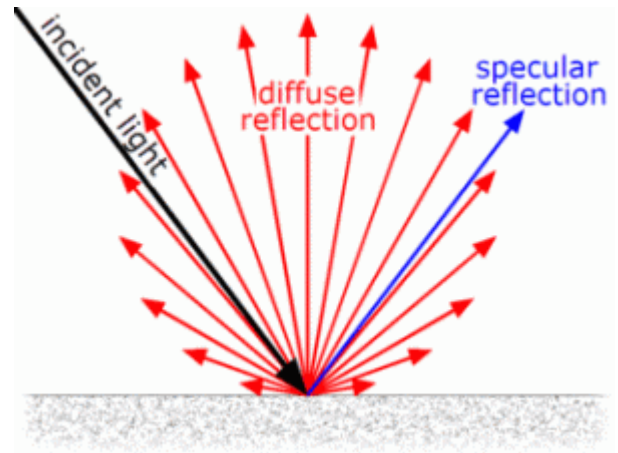
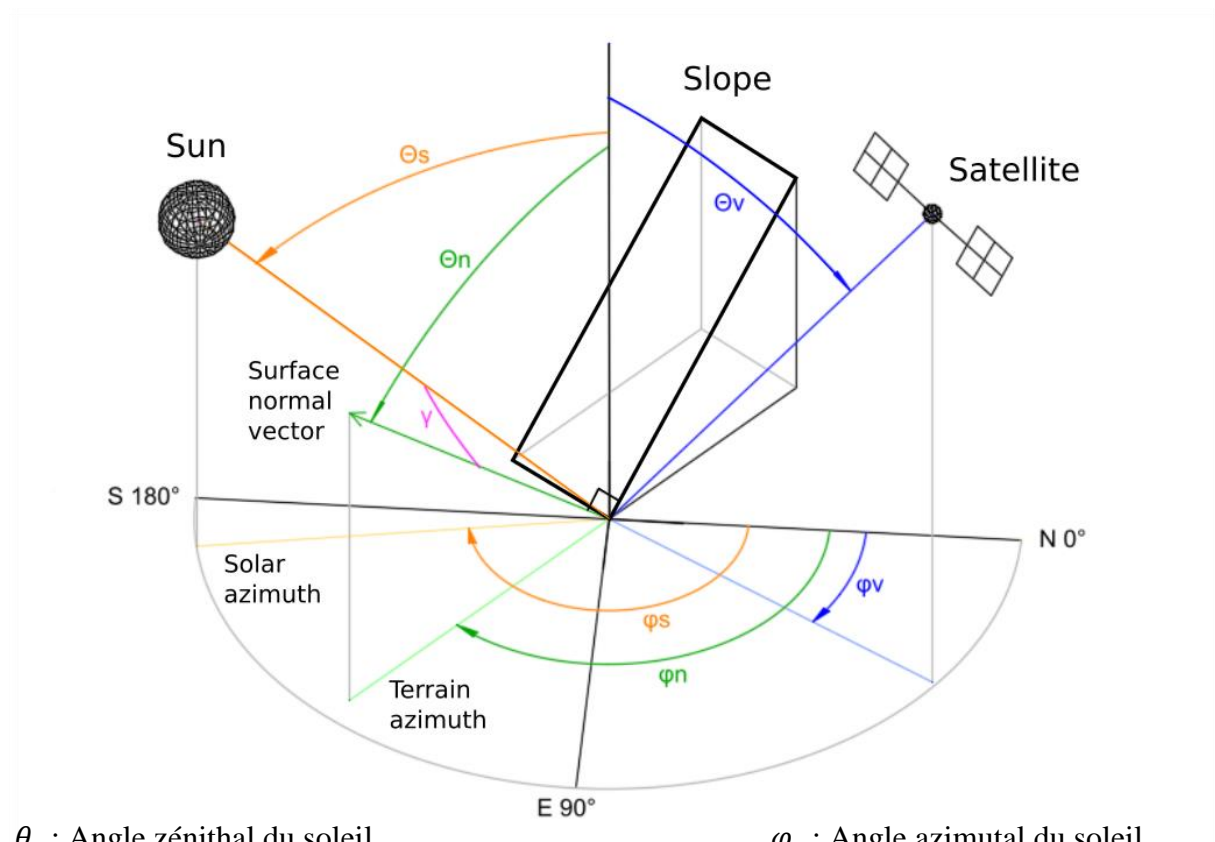


Figure 1: Description des différentes réflexions. Source : Hagolle, s. d.

L'éclairement total réfléchi par une surface dans toutes les directions est inférieur à l'éclairement solaire entrant, ce qui signifie que l'albédo est inférieur à un (Figure 1, p. 4). Pour une surface lambertienne, la réflectance est égale à un dans toutes les directions et l'albédo est égal à la réflectance (Hagolle, s. d.).

Figure 2 : Géométrie de la prise de vue du satellite.



θ_s : Angle zénithal du soleil
 θ_n : Pente du terrain
 θ_v : Angle zénithal du satellite
 γ : Angle d'illumination

φ_s : Angle azimutal du soleil
 φ_n : Exposition du terrain
 φ_v : Angle azimutal du satellite

Azimet solaire (solar azimuth) : il s'agit ici de l'azimet géographique. Il correspond à l'angle dans le plan horizontal compris entre le nord géographique et la direction du soleil (Figure 2, p. 4).

Capteur (sensor) : Instrument qui enregistre une image de télédétection [en mode numérique] [...] comme le [ferait] un appareil photographique [en mode analogique] (« Glossaire des termes de télédétection | Ressources naturelles Canada », s. d.).

Contraste (contrast) : Variation maximale entre la valeur minimale des niveaux de gris et la valeur maximale d'un fichier image.

$$C = \frac{Max(I_{i,j}) - min(I_{i,j})}{Max(I_{i,j}) + min(I_{i,j})}$$

où C correspond à la valeur du contraste de l'image et $I_{i,j}$ l'intensité lumineuse du pixel de coordonnées (i, j)

Erreur de commission (error of commission) : La classe n'est pas attribuée au bon pixel.

Erreur d'omission (error of omission) : Le pixel n'est pas dans la bonne classe.

Exactitude (accuracy) : Étroitesse de l'accord entre une valeur mesurée et une valeur vraie d'un mesurande. (JCGM, 2012)

Exposition (terrain aspect) : Il s'agit ici de l'azimet du terrain. En d'autres termes, l'exposition est l'angle entre le nord géographique et la normale à la pente étudiée. Cet angle est compris entre 0° et 360° (exclu). On considère que le nord est à 0° , l'est à 90° , le sud à 180° et l'ouest à 270° (Figure 2, p. 4).

Faux négatif – FN (False negative - FN) : Pixels classés dans la classe non A, mais qui appartiennent en réalité à la classe A.

Faux positif – FP (False positive – FP) : Pixels classés dans la classe A, mais qui appartiennent en réalité à la classe non A.

Héliosynchrone (sun synchronous) : On appelle satellite héliosynchrone un satellite dont l'orbite a une vitesse angulaire de précession égale à la vitesse angulaire de la Terre autour du Soleil. [...] Un tel satellite passe en un point de coordonnées géographiques données, et dans un sens donné (ascendant ou descendant) toujours à la même heure solaire locale. (Llibouty, 1992)

Luminance (radiance) : Mesure radiométrique du rayonnement reçu ou émis par unité de surface. Puissance émise par unité de surface de la source et par unité d'angle solide d'émission dans une direction donnée.

MNT (DEM) : Carte numérique du relief, constituée d'un semis de points de coordonnées tridimensionnelles connues, et éventuellement d'une loi d'interpolation (Polidori, 1997).

NDSI – Normalized Difference Snow Index (NDSI) (Dozier, 1989): Il s'agit d'un ratio entre les bandes du vert visible et du moyen infrarouge appelée SWIR (short-wave infrared). La neige est très absorbante dans les longueurs d'onde du moyen infrarouge et réfléchit beaucoup dans le vert visible. A contrario, les nuages ont généralement une réflectance forte dans ces deux parties du spectre de la lumière. Ainsi ce ratio normalisé permet de séparer efficacement la neige des nuages. Ce ratio s'exprime par :

$$NDSI = \frac{R_{green} - R_{swir}}{R_{green} + R_{swir}}$$

où R_{green} correspond à la réflectance dans la bande verte visible et R_{swir} à la réflectance dans la bande du moyen-infrarouge.

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Rouse Jr. et al., 1974) : Il s'agit d'un ratio entre les bandes du rouge visible et du proche infrarouge appelée NIR (near infrared). La végétation a une forte réflectance dans le proche infrarouge et a tendance à absorber les longueurs d'onde du rouge visible. Le NDVI est un ratio normalisé permettant de mettre en évidence la végétation par rapport à d'autres types de couverts du sol. Ce ratio s'exprime par :

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{red}}{R_{NIR} + R_{red}}$$

où R_{NIR} correspond à la réflectance dans la bande du proche-infrarouge et R_{red} à la réflectance dans la bande du rouge visible.

Pente (slope) : angle compris entre le plan horizontal et la surface du terrain. Sa valeur est comprise entre 0° et 90° (Figure 2, p. 4).

Précision / Fidélité (precision) : Étroitesse de l'accord entre les indications ou les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet ou d'objets similaires dans des conditions spécifiées. La fidélité est en général exprimée numériquement par des caractéristiques telles que l'écart-type, la variance ou le coefficient de variation dans les conditions spécifiées. Le terme «fidélité de mesure» est quelquefois utilisé improprement pour désigner l'exactitude de mesure. (JCGM, 2012)

Rayonnement (radiation) : Le rayonnement désigne le processus d'émission ou de propagation d'énergie et de quantité de mouvement impliquant une onde ou une particule. (« Rayonnement — Wikipédia », s. d.)

Réflectance (reflectance) : la réflectance bidirectionnelle est définie par :

$$\rho(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v) = \frac{\pi \times L(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v)}{E_s \times \cos(\theta_s)}$$

où L est la luminance, E_s est l'éclairement solaire, θ_s est l'angle zénithal solaire, ϕ_s est l'azimut solaire, θ_v est l'angle zénithal de visée, et ϕ_v est l'azimut de visée.

Le flux reçu sur une surface dépend de son orientation par rapport à la source lumineuse. Si la surface est perpendiculaire aux rayons lumineux, le flux est maximum, alors que si elle est parallèle, il devient nul. Ceci explique la présence du $\cos(\theta_s)$. Le facteur de normalisation π fait en sorte que la réflectance soit égale à 1 si la surface réfléchit vers le ciel la totalité de l'éclairement incident. La réflectance est une caractéristique de la surface, elle ne dépend que de la surface et des angles d'éclairement et d'observation. (Hagolle, s. d.)

Pour une surface non lambertienne, si la réflexion se fait dans une direction spéculaire (Figure 1, p. 4), la réflectance n'est pas constante dans l'hémisphère. Elle pourra ainsi dépasser la valeur un dans un cône spéculaire, contrairement à l'albédo, toujours entre 0 et 1. (Hagolle, s. d.)

Résolution radiométrique (radiometric resolution) : Sensibilité (plage maximale de valeurs ou largeur de bande) du capteur pour détecter différentes intensités de rayonnement électromagnétique dans des bandes spectrales uniques. Le contraste d'une image raster dépend de la résolution radiométrique (« Remote Sensing Glossary - AWF-Wiki », s. d.).

Résolution spatiale (spatial resolution) : La résolution spatiale est le facteur qui détermine la richesse de détail que l'on peut voir sur une image. Comparons la résolution à la mise au point d'un appareil photo. Si la mise au point n'est pas faite, l'image sera floue et on ne verra pas les petits objets; on dit que la résolution est mauvaise. Si la mise au point est parfaite, l'image sera nette et la résolution bonne. (« Glossaire des termes de télédétection | Ressources naturelles Canada », s. d.).

Il est cependant important de faire la distinction entre l'espacement des pixels et la résolution spatiale. Si un capteur a une résolution spatiale de 20 mètres et qu'il est possible de charger à l'écran une image provenant de ce capteur avec la pleine résolution, chaque pixel à l'écran représentera une superficie correspondant à 20 m sur 20 m au sol. Dans ce cas, la résolution et l'espacement des pixels sont identiques. Par contre, il est possible d'afficher la même image

avec un espacement des pixels qui soit différent de la résolution. (« Résolution spatiale, espacement des pixels et échelle | Ressources naturelles Canada », s. d.)

Résolution spectrale (*spectral resolution*) : Nombre et largeur de bande des longueurs d'onde des bandes spectrales uniques enregistrées par un capteur (« Remote Sensing Glossary - AWF-Wiki », s. d.).

Résolution temporelle (*temporal resolution*) : Fréquence temporelle ou temps de réexamen du même emplacement sur la surface terrestre du capteur (« Remote Sensing Glossary - AWF-Wiki », s. d.).

Télédétection (*remote sensing*) : La télédétection est l'action d'obtenir [à distance] des images ou tout autre type de données de la surface de la Terre. Les étapes de la télédétection sont : la mesure à partir d'un point éloigné de la surface, le traitement et l'analyse des données (« Glossaire des termes de télédétection | Ressources naturelles Canada », s. d.).

Vrai négatif – VN (*True negative - TN*) : Pixel classé dans la classe non A, et qui appartient bien à la classe non A dans la réalité.

Vrai positif - VP (*True positive - TP*) : Pixel classé dans la classe A, et qui appartient bien à la classe A dans la réalité.

Zénith solaire (*solar zenith*) : angle compris entre la verticale (nadir) et la direction du soleil, dans le plan vertical passant par le soleil (Figure 2, p. 4).

Table des matières

Remerciements	2
Liste des abréviations	3
Glossaire.....	4
Table des matières	9
Introduction	11
I Cadre du Travail de Fin d'Etudes (TFE).....	13
I.1 SATELLITE VENμS ET OBJECTIFS DE CETTE MISSION.....	13
I.2 CONTEXTE DU PROJET D'ETUDE.....	13
I.3 ETAT DE L'ART.....	14
I.3.1 CORRECTION DES EFFETS DE PENTE SUR LES IMAGES ACQUISES PAR TELEDETECTION OPTIQUE	14
I.3.2 CHAINE DE TRAITEMENT MAJA DU CNES	15
I.3.3 QU'EST-CE QUE LA CORRECTION COSINE ?	16
I.3.4 DISTINCTION NUAGES, NEIGE ET VEGETATION	17
I.3.5 IMPACT DE LA RESOLUTION DU CAPTEUR ET DU MNT SUR LES RESULTATS SCIENTIFIQUES	18
I.4 OBJECTIFS DU TFE.....	19
I.4.1 GLACIOLOGIE.....	19
I.4.2 HYDROLOGIE	19
I.4.3 CLIMATOLOGIE	20
II Données utilisées.....	21
II.1 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE DU PROJET.....	21
II.2 DONNEES SATELLITES.....	22
II.3 DONNEES TOPOGRAPHIQUES	22
II.4 DONNEES <i>IN SITU</i>	23
III Traitement des données satellites VENμS : protocole	23
III.1 AVANT-PROPOS	23
III.2 PREMIER TRAITEMENT : CORRECTION D'ECLAIREMENT ET AMELIORATION DU MASQUE DES NUAGES 24	
III.2.1 PROTOCOLE DE CORRECTION D'ECLAIREMENT DES IMAGES SATELLITES	24
III.2.1.1 Création de l'emprise utile.....	24
III.2.1.2 Import des métadonnées	25
III.2.1.3 Création des cartes de pentes et d'exposition	26
III.2.1.4 Prétraitement nécessaire	26
III.2.1.5 Application de la correction Cosine.....	27
III.2.2 PROTOCOLE DE CREATION DU MASQUE DES NUAGES	28
III.2.2.1 Masque des nuages du CNES	28
III.2.2.2 Impossibilité de calculer le NDSI.....	29
III.2.2.3 Combinaison CLM - NDVI	29
III.2.2.4 Combinaison CLM - Énergie.....	30
III.2.2.5 Combinaison NDVI - Énergie	32
III.2.2.6 Création d'un masque des nuages.....	32
III.3 POST-TRAITEMENT : CORRECTION DU MASQUE DES NUAGES.....	33
III.4 SECOND TRAITEMENT : APPLICATION DU MASQUE DES NUAGES.....	33

III.4.1	APPLICATION DU MASQUE CLOUDCOV AMELIORE SUR LES IMAGES DE REFLECTANCE TOPCOS	33
III.4.2	PROTOCOLE DE CREATION DES CARTES SCA.....	34
III.4.3	INTEGRATION DU MASQUE CLOUDCOV AMELIORE DANS LES CARTES SCA.....	34
IV	Résultats obtenus et discussion	36
IV.1	GLACIOLOGIE	36
IV.1.1	COMPARAISON ET VALIDATION	36
IV.1.1.1	Analyse de la dynamique des images corrigées	36
IV.1.1.2	Étude par différence de rasters.....	37
IV.1.1.3	Comparaison des réflectances des produits SRE, FRE et TopCos avec les données météorologiques du terrain	39
IV.1.1.3.1	Évolution temporelle	39
IV.1.1.3.2	Comparaison statistique avec le terrain	41
IV.1.1.3.3	Analyse de la répartition des valeurs de réflectance selon le produit de réflectance	44
IV.2	HYDROLOGIE.....	46
IV.3	CLIMATOLOGIE.....	48
IV.3.1	ANALYSE STATISTIQUE DU MASQUE DES NUAGES « CLOUDCOV » CREE PAR NOTRE PROCESSUS 48	
IV.3.2	ANALYSE DE L'ENNUAGEMENT ET DE L'ENNEIGEMENT A L'ECHELLE DES BASSINS VERSANTS DE DINGBOCHE ET PHERICHE	50
IV.3.3	ANALYSE DE L'ENNUAGEMENT DANS LA REGION DE L'EVEREST	52
IV.4	DISCUSSION	54
IV.4.1	PRODUIT TOPCOS.....	54
IV.4.2	CARTES DE NEIGE « SCA » (SNOW COVER AREA)	54
IV.4.3	CARTES D'ENNUAGEMENT BINAIRES	55
	Conclusions	56
	Bibliographie	59
	Table des annexes.....	63
	Annexe 1 Récapitulatif des bandes spectrales disponibles sur le satellite VENμS.	64
	Annexe 2 Stations météorologiques utilisées et descriptif des mesures disponibles	65
	Annexe 3 Description des capteurs principaux et de leurs méthodes de calculs	66
	Annexe 4 Protocole complet de la création des trois produits : TopCos, CloudCov et SCA ..	67
	Annexe 5 Protocole de création de la carte des pentes et de la carte des expositions.....	68
	Annexe 6 Récapitulatif des différents bits composant le masque CLM (CNES)	69
	Annexe 7 Avantages et désavantages des combinaisons entre masques CLM, NDVI et Énergie	70
	Annexe 8 Méthodologie de correction manuelle des masques des nuages sous PCI Geomatica 2016	71
	Annexe 9 Méthodologie de correction manuelle des masques des nuages sous QGIS 3.4 avec l'application ThRasE.....	73
	Annexe 10 Bilan sur la création d'un masque des ombres topographiques	74
	Liste des figures	76
	Liste des tableaux	77

Introduction

La région Himalayenne regroupe de nombreux hauts sommets dont le toit du monde, l'Everest, qui culmine à 8848 m d'altitude. Contrairement à ce que l'on pourrait imaginer, en dehors de la période de la mousson, les précipitations annuelles dans cette zone sont assez faibles (en moyenne 607 mm (+/- 90 mm) de précipitations par an à la station de Pheriche dont 56 % pendant la mousson) (Eeckman et al., 2017). L'eau disponible, notamment pour l'agriculture dans les vallées, dépend donc en partie de la fonte des glaciers.

Le bilan radiatif de la Terre est également lié à la neige et la glace. L'albédo, fort des surfaces enneigées, agit comme un miroir qui renvoie une partie du rayonnement solaire reçu à la surface de la planète. La glace et la neige contribuent à limiter le réchauffement climatique et leur fonte accentue la montée du niveau des mers (IPCC, 2019a, 2019b).

Pour quantifier les disponibilités en eau, il est courant de réaliser des cartes de neige sur une période temporelle. La télédétection spatiale permet d'étudier des secteurs reculés et difficiles d'accès comme l'Himalaya ainsi que ses bassins versants et présente donc un grand intérêt pour cartographier les états de surface neige/glacier (Mimeau, 2018; Mimeau et al., 2019).

Les cartes de neige produites entrent dans les paramétrages de modèles de fonte du manteau neigeux. Des travaux scientifiques ont montré que l'apport de la télédétection spatiale a permis d'améliorer le modèle HDSM avec deux paramétrages différents pour les périodes hors mousson et pendant la mousson (Bouchard et al., 2019). La télédétection optique est un bon outil pour étudier des massifs montagneux mais il comporte des inconvénients tels que sa sensibilité à la couverture nuageuse et aux fortes pentes. Surmonter ces obstacles constitue donc deux étapes importantes dans le traitement d'images satellites.

De nombreux types de corrections des effets dus à la pente existent avec des degrés de complexité divers. La correction la plus simple et dont le résultat est satisfaisant et suffisant pour une grande partie des travaux réalisés sur des images satellites est nommée « correction cosinus ». Dans le cadre de sa thèse (2019), Lucas DAVAZE a mis au point un programme Python permettant de réaliser cette correction sur des images provenant de différents capteurs de télédétection dont Sentinel 2, Landsat 8 et ASTER.

En 2017, le Centre National d'Études Spatiales (CNES) en partenariat avec l'Agence Spatiale Israélienne (ISA), a lancé le satellite VEN μ S (Vegetation and ENvironment monitoring on a new Micro-Satellite) qui observe actuellement 159 sites dans le monde entier.

Le but de ce stage est de réaliser une cartographie du couvert neigeux et d'analyser la nébulosité dans la région du Khumbu, un glacier voisin de l'Everest, au Népal à partir des images satellites de VEN μ S. Trois livrables sont attendus : les images avec correction d'éclairement, les cartes de la couverture neigeuse et les cartes de l'enneigement. Cependant, le satellite VEN μ S étant récent, il n'existe pas d'algorithme de correction cosinus préconçu pour ce capteur.

Tout d'abord, nous ferons un résumé de l'état de l'art en la matière. Dans un second temps, nous expliquerons comment nous avons adapté l'algorithme de L. Davaze pour le capteur VEN μ S. Ensuite, nous détaillerons les protocoles de réalisation des trois produits créés à partir des images VEN μ S. Enfin, nous analyserons les résultats obtenus et tenterons de les commenter en tenant compte du contexte climatologique et spatial du site du Khumbu.

I Cadre du Travail de Fin d'Etudes (TFE)

Nous détaillerons ici la mission du satellite VENμS, le contexte du projet de recherche et, enfin, nous ferons un état de l'art concernant les notions abordées lors de ce travail de fin d'études.

I.1 Satellite VENμS et objectifs de cette mission

Le satellite VENμS (Vegetation and ENvironment monitoring on a new Micro-Satellite) est l'aboutissement d'une collaboration entre le Centre National d'Études Spatiales (CNES) et l'Agence Spatiale Israélienne. Son fonctionnement suit deux étapes. Dans un premier temps, il est destiné à fournir des données scientifiques pour des applications concernant la surveillance, l'analyse et la modélisation de la surface terrestre face aux facteurs environnementaux. Dans un second temps, VENμS changera d'orbite et sera utilisé pour des applications stratégiques israéliennes (« CNES | Le site du Centre national d'études spatiales », s. d., « Muscate - Atelier de distribution », s. d., « Réflectance de surface Venus – THEIA-LAND », s. d., « Venμs – Séries Temporelles », s. d.).

VENμS permet d'obtenir des données avec une résolution temporelle et une résolution spatiale très fines puisqu'il survole un même site tous les deux jours et possède une résolution de 5 m ainsi qu'une taille pixel-sol de 5 m par 5 m. Son orbite quasi-polaire et héliosynchrone offre des images avec un éclairage relativement similaire pour chaque date. Les douze bandes spectrales disponibles, situées entre 420 nm et 910 nm, permettent principalement l'étude de la végétation mais sont exploitées pour d'autres applications (Annexe 1, p. 64).

I.2 Contexte du projet d'étude

Le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat a sélectionné l'étude des glaciers dans le temps comme un indicateur de la variabilité climatique (IPCC, 2019a). Le Service National d'Observation GLACIOCLIM (« Service d'Observation GLACIOCLIM - Les GLACIers, un Observatoire du CLIMat », s. d.) assure le suivi de neuf sites répartis dans les Alpes, les Andes et l'Antarctique et, depuis 2007, plusieurs glaciers du Népal et dans les Pyrénées ont été ajoutés à la liste pour prendre place dans le réseau mondial d'observation des glaciers (WGI). Des applications de suivi de glaciers existaient depuis plusieurs années dans les sites autour de l'Everest, c'est pourquoi ils ont été ajoutés à cette base de données.

L'objectif est de suivre l'évolution de glaciers, situés dans des contextes climatiques différents, sur une échelle temporelle longue et de créer une base de données, standardisée, des

mesures glaciologiques, hydrologiques et météorologiques. Finalement, cela permettra de comprendre davantage le comportement des glaciers afin de réaliser des projections futures sur leur bilan de masse.

Enfin, une collaboration entre l'IRD et des scientifiques au Népal, l'équipe HIMALICE dirigée par Dibas Shrestha (Tribhuvan University, Katmandou), permet une collecte et une analyse des données glaciologiques.

I.3 Etat de l'art

Nous aborderons de manière concise les travaux déjà réalisés dont les résultats contribuent au cheminement de ce travail de recherche.

I.3.1 Correction des effets de pente sur les images acquises par télédétection optique

De nombreuses corrections d'éclairement ont été créées et continuent d'être créées. La correction des effets de pentes s'est révélée nécessaire pour étudier des phénomènes terrestres et notamment la végétation. En effet, sans correction, les pentes à l'ombre avec un certain type de végétation et les pentes exposées au soleil avec la même végétation ne seraient pas classifiées dans les mêmes clusters. Cela est dû à une importante irrégularité des réflectances entre zones d'ombre et zones surexposées. Le meilleur moyen de remédier à un effet du relief, c'est encore de bien connaître la topographie. Les scientifiques ont donc intégré l'utilisation de MNT pour corriger ces effets.

Plusieurs comparaisons de l'efficacité de chaque méthode ont été réalisées par des chercheurs (Meyer et al., 1993; Riaño et al., 2003; Richter et al., 2009; Sola et al., 2016). De manière générale on distingue deux types de corrections : celles basées sur des ratios entre bandes spectrales et celles qui ont recours à un modèle topographique.

Le premier type entraîne une perte de résolution spectrale, le second nécessite que le MNT ait la même résolution que l'image satellite (Riaño et al., 2003).

L'utilisation d'une représentation numérique du relief permet de déterminer l'illumination ($\cos(IL)$) de chaque pente en utilisant la formule suivante :

$$\cos(IL) = \cos(\theta_s) \times \cos(\theta_n) + \sin(\theta_s) \times \sin(\theta_n) \times \cos(\varphi_s - \varphi_n) \quad (1)$$

Elle tient compte de la pente (θ_n), de l'exposition (φ_n), de l'angle zénithal du soleil (θ_s) et de son angle azimutal (φ_s).

La réflectance normalisée à plat est ensuite calculée en considérant la surface lambertienne ou non-lambertienne. On considère une surface lambertienne quand elle réfléchit de manière constante dans toutes les directions, c'est-à-dire que la luminance est indépendante de la direction d'observation, à l'inverse du cas non-lambertien.

La correction la plus simple est appelée « Cosine ». Elle utilise la formule du cosinus de l'illumination (Civco, 1989; Teillet et al., 1982). Cette méthode est simple d'application parce qu'elle est indépendante de la longueur d'onde. Cependant, elle ne prend pas en compte les effets de réflexion diffuse et a tendance à sur-corriger les zones de faible illumination.

La méthode nommée « Gamma » est plus récente. Elle reprend l'angle d'illumination mais intègre la prise en compte de la réflexion diffuse, relativement présente dans un relief escarpé. Sa mise en œuvre nécessite davantage d'éléments que la méthode Cosine, puisqu'elle requiert un modèle atmosphérique et un MNT. Des cartes de neige ont déjà été réalisées en utilisant la correction Gamma, sur des images du satellite MODIS disposant d'une bande dans le moyen infrarouge (SWIR) (Sirguey et al., 2009).

Cette correction est appliquée par le CNES dans leur algorithme intitulé « MAJA » (Hagolle et al., 2017), afin de produire les images Flat-REflectance (FRE) corrigées des effets atmosphériques et topographiques.

I.3.2 Chaîne de traitement MAJA du CNES

Le CNES a recours à l'algorithme MAJA (MACCS-ATCOR Joint Algorithm) afin de traiter les images satellites de différents capteurs (Formosat-2, Landsat, Sentinel 2, VENμS) et de mettre à disposition des utilisateurs divers produits (Hagolle et al., 2017; « MAJA | LOGICIELS CNES », s. d.). Le module MAJA est appliqué aux données issues du satellite VENμS afin de réaliser : des masques (ombres, nuages, no data, saturation des pixels, etc), une correction des effets d'atmosphère ainsi qu'une correction d'éclairement nommée « gamma » qui tient compte des rayonnements diffus dans l'environnement du pixel étudié. Le processus se décompose en deux étapes, d'abord la détection des ombres et nuages, puis la correction de l'atmosphère.

Le produit Surface REflectance (SRE) de VENμS est corrigé des effets d'atmosphère. Le produit Flat REflectance (FRE) dispose en plus d'une correction d'éclairement « gamma » (Dozier et al., 1981; Sirguey et al., 2009; Sirguey, 2009). Elle fait notamment intervenir la détermination d'horizons pour détecter les zones à l'ombre qui recevraient une lumière diffuse, ce que ne fait pas la correction Cosine.

I.3.3 Qu'est-ce que la correction Cosine ?

Lorsqu'une image satellite est acquise, son histogramme est impacté par les effets de pente et d'exposition. Dans un contexte montagneux, une face nord d'un sommet ne sera pas ou peu éclairée directement par le soleil. La correction cosine s'appuie sur ces prédicats pour corriger la valeur de réflectance d'une image et réduire les écarts de valeurs entre zones d'ombres et zones ensoleillées (Davaze et al., 2018 ; Meyer et al., 1993 ; Riaño et al., 2003 ; Sirguey et

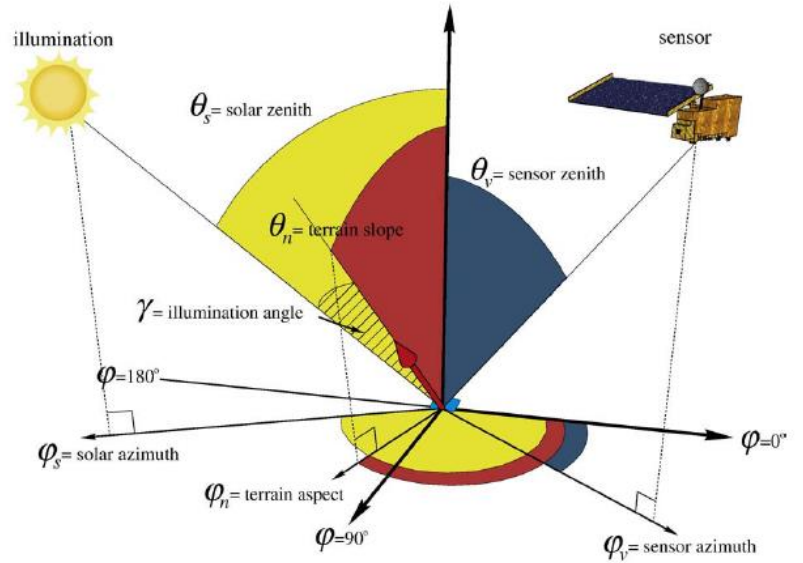


Figure 3 : Relative geometry of the sun, the sensor, and the target.

Source : Sirguey et al., 2019.

al., 2009). Il s'agit d'une méthode qui suppose une réflexion lambertienne et fait abstraction des effets de l'atmosphère, notamment l'éclairement reçu par la diffusion de l'environnement. En d'autres termes, la correction Cosine ne modélise que la partie directe de l'éclairement. Cette méthode utilise l'azimut et l'angle zénithal du soleil afin de corriger les effets de pente et d'éclairement de l'image. L'angle d'illumination (Figure 3, p. 16) est calculé grâce à la formule (1), p. 14. On applique la correction (2), p. 16 avec R_{hor} la réflectance du pixel si la surface était horizontale et R , la réflectance du pixel de l'image satellite en entrée.

$$R_{hor} = \begin{cases} \frac{R \times \cos(\theta_s)}{\cos(IL)}, & \cos(IL) > 0.2 \\ \text{No Data Value}, & \cos(IL) \leq 0.2 \end{cases} \quad (2)$$

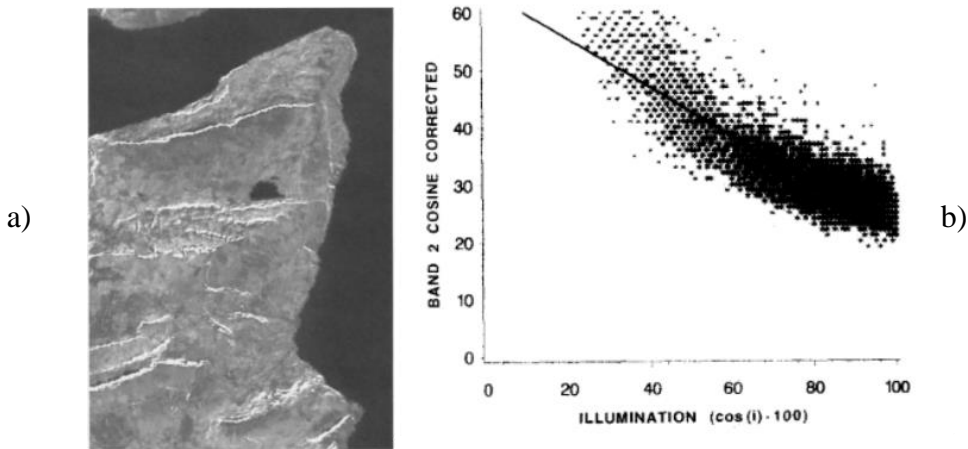


Figure 4 : a) Artefact in self shadow b) Linear regression of illumination versus band 2 cosine-corrected in forest according to ground reference data, Meyer et al. 1993.

En analysant le comportement de la correction Cosine, il ressort que les angles de faible illumination sont sur-corrigés. Plus l'angle d'illumination est faible, plus la sur-correction est forte. Dans la réalité, ces zones reçoivent un rayonnement diffus qui les rend moins sombres.

Des artefacts se créent lorsque les pixels se situent dans l'ombre propre d'un élément du relief. Ces artefacts sont dus à la saturation des valeurs numériques (en : digital numbers) (Figure 4.a, p. 16). Il convient donc d'utiliser un seuil, déterminé à 0.2 (Meyer et al., 1993). En dessous de ce seuil, la corrélation entre les données de réflectance du terrain et la réflectance corrigée des images satellites, est trop faible (Figure 4.b, p. 16).

I.3.4 Distinction nuages, neige et végétation

On peut commencer par se demander pourquoi chercher à différencier les nuages des autres types de couvertures. Afin d'obtenir une bonne cartographie du couvert neigeux en montagne, il est essentiel d'avoir un masque des nuages fiable. Cette fiabilité est difficile à obtenir puisque neige et nuages ont des signatures spectrales très similaires. Ces deux couvertures sont plus froides que d'autres couverts dans l'infrarouge thermique et plus brillantes dans le spectre du visible (Stillinger et al., 2019).

Une bonne identification des nuages permet de cartographier les zones enneigées et l'albédo des surfaces avec plus de précision. Ainsi, on peut mieux caractériser l'étendue spatiale des glaciers, le grain de la neige ou bien encore quantifier la fonte des neiges et son apport en eau pour la saison (Painter et al., 2018).

Une méthode consiste à utiliser plusieurs images avec la même prise de vue et des dates différentes. On analyse la corrélation entre l'image à classer et une image de référence n'ayant pas ou peu de nuages. Cela fonctionne bien pour une analyse de la végétation dans des secteurs non enneigés. En revanche, en haute montagne notamment, la neige peut aussi faire varier la corrélation selon qu'il ait neigé récemment ou non.

Les gouttelettes et les cristaux contenus dans les nuages font qu'ils sont généralement plus brillants que la neige (Warren, 2019; Wiscombe et Warren, 1980). Mais des zones enneigées à haute altitude peuvent aussi réfléchir beaucoup les rayonnements solaires et ainsi être assimilées à des nuages dans les bandes Cirrus de certains capteurs.

La méthode couramment utilisée pour séparer neige et nuages de manière satisfaisante est le NDSI (Dozier, 1989). Il s'agit d'un ratio normalisé entre les bandes moyen infrarouge (SWIR) et verte visible qui s'exprime par :

$$NDSI = \frac{R_{green} - R_{swir}}{R_{green} + R_{swir}} \quad (3)$$

où R_{green} représente la réflectance dans la bande verte visible et R_{swir} la réflectance dans la bande du moyen-infrarouge.

Une étude comparative des masques des nuages de Landsat 8 et de MODIS a montré que la classification d'un pixel « mixte » c'est-à-dire contenant une fraction de neige, était plus complexe que pour un pixel homogène (Stillinger et al., 2019). La résolution des images utilisées joue donc un rôle non négligeable dans la qualité du résultat obtenu. Plusieurs améliorations sont envisagées et notamment l'utilisation de paramètres texturaux.

Le recours à la texture permet de compléter les propriétés spectrales de la neige et des nuages. Cette approche repose sur le concept de statistique sur des matrices. Deux éléments de la matrice Haralick sont intéressants pour l'identification des nuages et de la neige : l'entropie et l'énergie (Haralick, 1979; Haralick et al., 1973).

L'entropie est assimilée au degré de désordre présent dans l'image. Elle est faible pour des éléments qui sont semblables et forte quand il y a de grandes disparités. En notant $p_d(i, j)$ le (i, j) -ième élément de la matrice de cooccurrence des niveaux de gris (GLCM) normalisée, l'entropie s'exprime par :

$$Entropie = - \sum_i \sum_j p_d(i, j) \ln p_d(i, j) \quad (4)$$

L'énergie est obtenue à partir du Second Moment Angulaire (SMA) à l'aide des relations suivantes :

$$SMA = \sum_i \sum_j p_d^2(i, j) \quad (5)$$

$$Energie = \sqrt{SMA} \quad (6)$$

Le Second Moment Angulaire permet de caractériser l'uniformité des niveaux de gris localement. Quand des pixels seront très similaires, le SMA aura une forte valeur.

Les nuages ont généralement une énergie élevée, comme la neige car ce sont des couvertures uniformes. Cela permet de les différencier des moraines et autres couverts végétaux ou rocheux. En revanche, l'entropie des nuages sera plutôt faible.

I.3.5 Impact de la résolution du capteur et du MNT sur les résultats scientifiques

Dans sa cartographie de la vitesse d'écoulement de surface des glaciers, R. Millan a pu montrer l'importance d'avoir des données satellites avec une haute résolution. Grâce à une analyse statistique et à une comparaison des cartes de vitesse obtenues avec des capteurs de

différentes résolutions, cette étude met en évidence le gain de finesse temporelle et spatiale avec des images à haute résolution (Millan et al., 2019).

L'utilisation d'un MNT avec une résolution inadaptée engendre la production de bruit lors du calcul des cartes des pentes et des expositions (Dozier, 1989). Une étude sur les indices topographiques ainsi

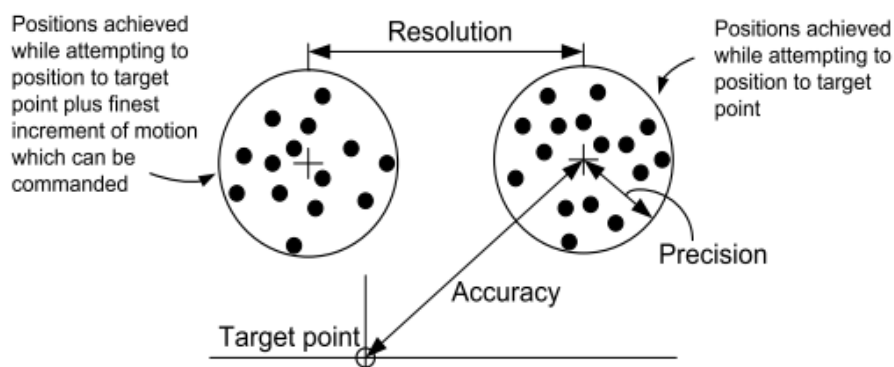


Figure 5 : Definition of the resolution, the precision and the accuracy, source : Slocum, 1992.

que la cartographie de bassins versants et du réseau hydrographique a montré que deux paramètres du MNT sont à considérer : son exactitude et sa résolution (Figure 5, p. 19).

Deux produits ayant la même résolution mais une exactitude différente n'offrent pas la même qualité dans le résultat attendu. Plus la résolution et l'exactitude sont élevées, plus le résultat sera fidèle à la réalité terrain (Vaze et al., 2010).

I.4 Objectifs du TFE

I.4.1 Glaciologie

Dans l'étendue de la zone étudiée, plusieurs stations météorologiques sont implantées et en fonctionnement : Changri Nup, Pyramide et South Col. Elles fournissent des mesures d'albédo que nous souhaitons comparer à la réflectance propre obtenue dans les images satellites VENUS corrigées des effets de pente.

Afin de réaliser cette analyse, nous étudierons la moyenne des réflectances des pixels contenus dans des fenêtres de 3 pixels par 3 pixels, centrée sur les trois stations que nous étudions. Nous tenterons ainsi de montrer l'utilité d'employer la télédétection optique pour l'étude des glaciers et des couvertures neigeuses et nuageuses.

I.4.2 Hydrologie

Dans le but de contribuer à des travaux dans le domaine de l'hydrologie, des cartes représentant la couverture neigeuse (Snow Cover Area) périodiquement seront réalisées. Elles représenteront les surfaces enneigées et les surfaces sans neige.

Dans un contexte de changement climatique et de demande en eau croissante, en particulier en lien avec le développement du tourisme, comprendre l'origine de l'eau dans la

région de l'Himalaya constitue un enjeu clé pour l'évaluation de la situation actuelle et future de la disponibilité des ressources en eau et la gestion des utilisations futures.

Deux des principaux problèmes de l'hydrologie de ces bassins versants glaciaires de haute altitude sont :

- les représentations limitées des processus cryosphériques contrôlant l'évolution des glaciers et de la couverture de neige ;
- la difficulté d'estimer les contributions des différents processus (pluie, fonte de la neige et des glaciers) au débit des rivières.

Le modèle glacio-hydrologique DHSVM-GDM (Distributed Hydrological Soil Vegetation Model, Glacier Dynamic Model) (Naz et al., 2014) est un modèle à base physique et distribué. Il est utilisé à l'IGE sur le bassin de Pheriche pour estimer les différentes contributions (Mimeau, 2018; Mimeau et al., 2019).

Afin d'évaluer la qualité des simulations du modèle, des images satellites sont étudiées pour l'analyse du couvert neigeux. Pendant la thèse de Louise Mimeau (Mimeau, 2018), des données MODIS ont été utilisées. L'objectif est, à partir des cartes produites avec les images VENμS, de réaliser une nouvelle évaluation du modèle, en comparant les cartes de couvert neigeux obtenues à partir de VENμS avec celles calculées par le modèle. Ainsi il sera possible d'améliorer les incertitudes sur les résultats du modèle hydrologique.

I.4.3 Climatologie

A l'issue de la chaîne de traitement développée au cours de ce stage, des cartes binaires de la couverture nuageuse dans la région népalaise de l'Himalaya seront produites. Elles auront pour principal objectif d'appuyer notre analyse des précipitations et de la nébulosité dans cette zone et notamment de montrer que les précipitations sont davantage présentes au sud de la région étudiée qu'au nord

II Données utilisées

II.1 Contexte géographique du projet

Une description des données disponibles pour ce TFE est présentée dans ce chapitre.

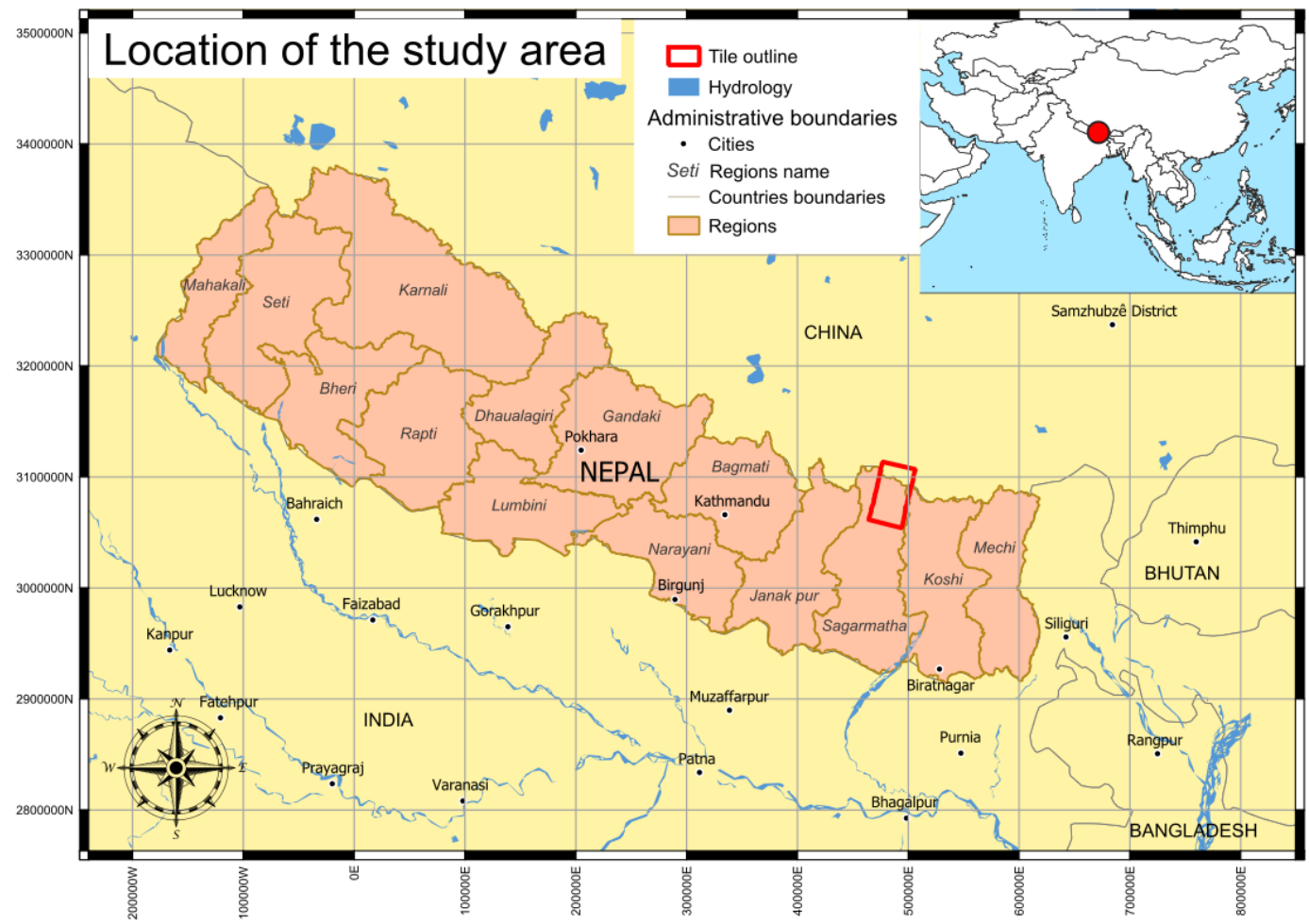


Figure 6 : Localisation globale de l'étude.

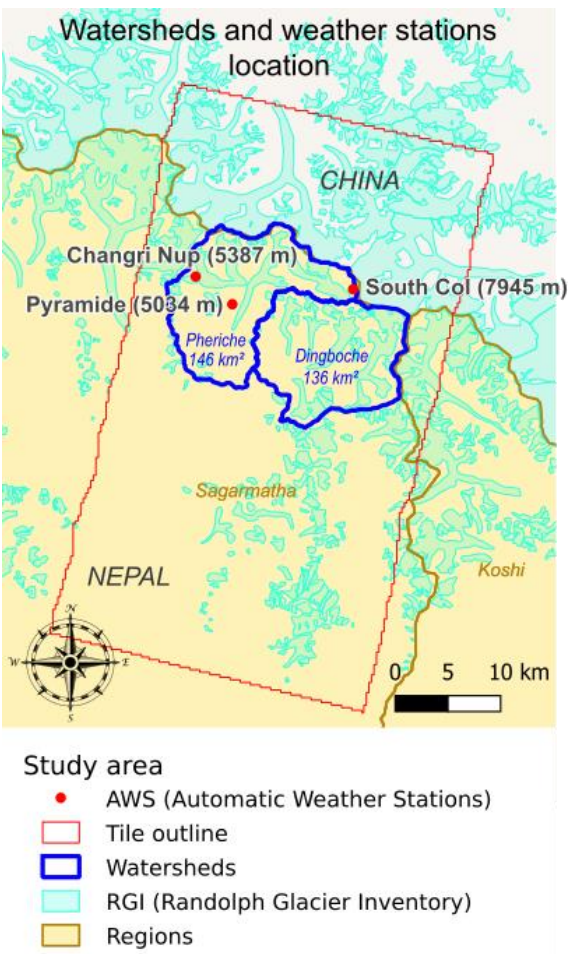


Figure 7 : Localisation des bassins versants étudiés.

Nous étudions le secteur du glacier du Khumbu, situé au nord-est du Népal dans la région de Sagarmatha et en partie sur le Tibet, à proximité de l'Everest. Le site est au cœur de la chaîne de montagne himalayenne. La tuile couvre la zone représentée par un cadre rouge dans la Figure 6 (p. 21), soit environ 1630 km². Cette région du monde est suivie par des stations météorologiques depuis les années 1970. Pour les différentes applications de ce TFE, nous analysons les résultats issus de la station de Pyramide, de la station sur le glacier du Changri Nup et d'une dernière au niveau du Col Sud de l'Everest.

Nous réaliserons également une étude à l'échelle de deux bassins versants (Figure 7, p. 21) : Dingboche (136 km²) et Pheriche (146 km²) afin de déterminer des statistiques d'enneigement et d'enneigement.

II.2 Données satellites

Le satellite VENμS dispose d'une résolution temporelle théorique de 2 jours. Cependant, un certain nombre de dates manquent dans la base de données pour plusieurs raisons. Chaque mois, le satellite est confié aux équipes israéliennes qui, pendant quelques jours, réalisent des tests techniques. De plus, certaines dates sont trop nuageuses et éliminées automatiquement par l'algorithme MAJA sans être mises à disposition du public. Enfin, quelques pannes du capteur, notamment en automne 2018 ont empêché les acquisitions. Sur la durée du stage, 238 images VENμS ont pu être traitées (Tableau 1, p. 22).

Nom	Lancement	Résolution temporelle	Résolution spatiale	Gestion	Nombre d'images
VENμS	août 2017	2 jours	5 m	CNES, ASI	238

Tableau 1 : Récapitulatif des données VENμS.

Les produits créés sont réalisés à partir des images Surface Reflectance (SRE) du CNES, seulement corrigées des effets atmosphériques.

II.3 Données topographiques

- MNT de résolution 8 m : Afin de réaliser la correction d'éclairement, nous disposons du MNT High Mountain Asia d'une résolution de 8 m (Shean, 2017). Il est conçu à partir de plusieurs capteurs optiques satellites à très haute résolution. Parmi ces différents satellites, on peut citer les World-View 1 et 2 (Shean, 2016).
- MNT SRTM 90 m : Afin d'initier une comparaison entre des images corrigées par la méthode cosine avec un MNT à 8 m et des images corrigées avec la même méthode mais un MNT plus large, le modèle SRTM à 90 m a été utilisé. Ce MNT est produit par la NASA (février 2000) par interférométrie radar (Navette Endeavour).

- Emprises des bassins versants : Pour l'application hydrologique, nous nous intéressons à deux bassins versants en particulier : Pheriche et Dingboche (144 km² et 146 km²) car ils possèdent des mesures de débit (Figure 7, p. 21).

II.4 Données *in situ*

- Stations météorologiques de Pyramide, Changri Nup et South Col

De nombreux capteurs sont présents aux trois stations suivantes (Figure 8, p. 23). Un résumé des différentes mesures réalisées par ces stations est disponible en Annexe 2, p. 65.

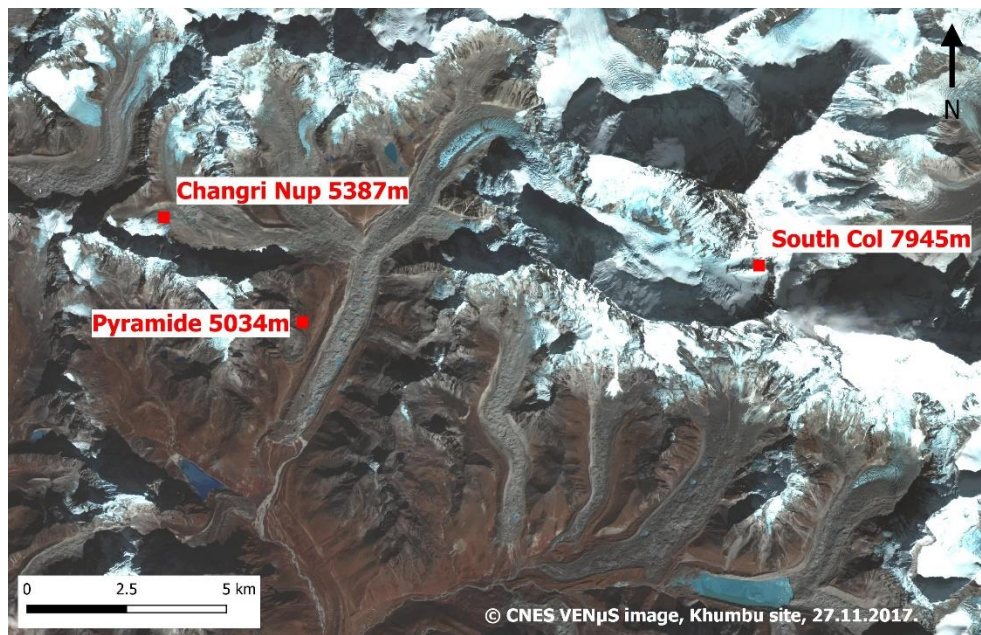


Figure 8 : Localisation des trois stations *in situ*.

Parmi elles, nous aurons recours aux mesures de rayonnement dans les courtes longueurs d'ondes (SW) pour déterminer l'albédo, aux mesures de hauteur de neige, de précipitations ainsi que de température. La description des capteurs et de leur méthode de calcul est disponible en Annexe 3, p. 66. Les données des stations Changri Nup et Pyramide ont été fournies par P. WAGNON et M. ESTEVES (IGE/CNRS-IRD-INP – Université-Grenoble Alpes, France). Les mesures de la station South Col ont été fournies par National Geographic (B. PERRY, Appalachian State University, USA).

III Traitement des données satellites VENμS : protocole

III.1 Avant-propos

L'ensemble des algorithmes de traitement ont été élaborés sur Python 2.0 ou 3.0 à partir des travaux réalisés par L. Davaze (Davaze et al., 2020). Pour la gestion de rasters géo-référencés, nous avons utilisé la librairie GDAL (« GDAL — GDAL documentation », s. d.).

L'obtention des trois produits finaux - image de réflectance avec correction d'éclairement, cartes d'enneuagement et cartes de la couverture neigeuse - se réalise au travers de deux traitements successifs, entre lesquels intervient un post-traitement manuel (Annexe 4, p. 67). Cette division des processus se justifie par un premier algorithme automatisé qui améliore le masque des nuages du CNES tout en créant une première version des images de réflectance corrigées, puis par une correction manuelle des masques des nuages (post-traitement) et enfin un retraitement de toutes les dates satellites en appliquant ce masque des nuages corrigé. Finalement, cela permet d'initier une comparaison entre les masques des nuages issus d'une démarche totalement automatisée et ceux créés après la vérification et l'intervention humaine.

Seules les bandes n°11 (NIR) et n°7 (Red) de VENμS, seront corrigées des effets de pente. La bande NIR est la bande spectrale la moins impactée par les effets de l'atmosphère et par la saturation. En effet, les agences spatiales augmentent souvent le gain des histogrammes de luminances, afin de donner le meilleur visuel aux utilisateurs pour les zones les plus étudiées telles que les villes, plaines agricoles ou ensembles forestiers. Ces ajustements d'histogrammes ne s'adaptent pas aux zones enneigées ou aux glaciers. Par conséquent, la saturation y est plus forte et impacte la dynamique des données. Or la bande NIR a une bande passante large et est donc moins touchée par la saturation que les bandes du visible qui sont semblables à des pics (bande passante étroite). La bande n°7 (rouge visible) est corrigée afin de calculer un ratio normalisé (NDVI).

III.2 Premier traitement : correction d'éclairement et amélioration du masque des nuages

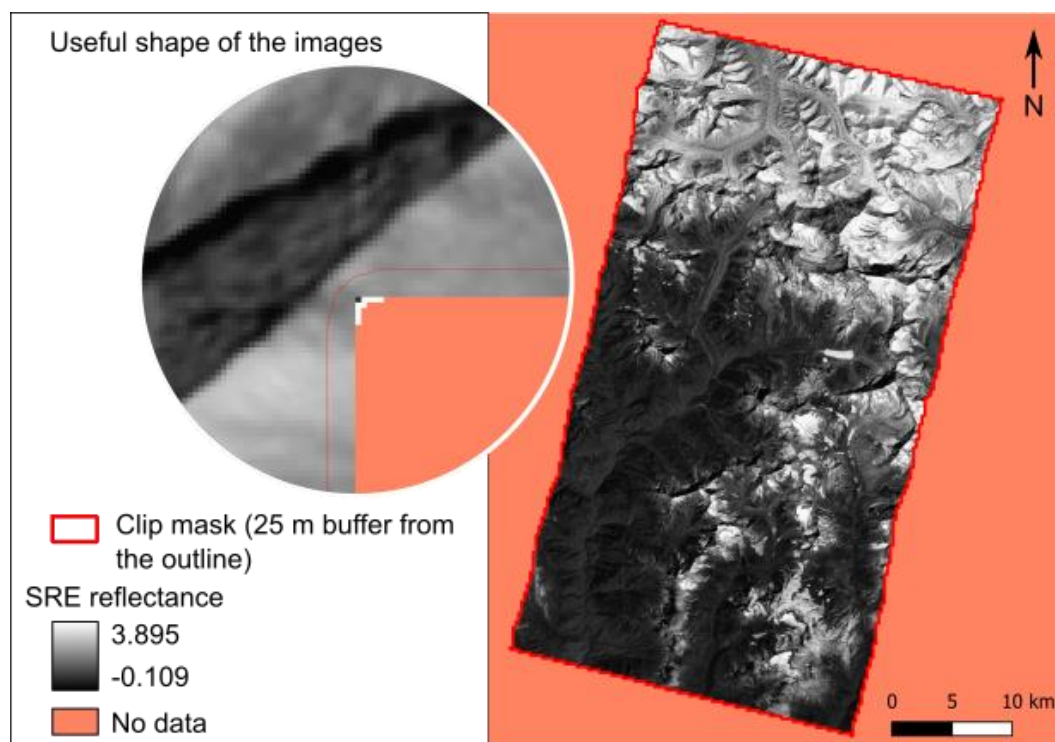
III.2.1 Protocole de correction d'éclairement des images satellites

III.2.1.1 Création de l'emprise utile

Nous recueillons les informations de projection du modèle numérique de terrain (MNT) High Mountain Asia (HMA) qui sera utilisé ainsi que de l'image à corriger.

Chacune des images présente une zone de données qui constitue la « tuile » et une zone de « no data » autour de la tuile dont la valeur est -10 000. Pour réaliser nos calculs seulement sur l'emprise utile de l'image, on débute par la création d'une couche vecteur au format shp qui servira de masque de découpe pour tous les rasters du traitement. Pour cela, nous utilisons l'image « Surface REflectance » (SRE) de la bande à corriger et nous lui ajoutons une bande de transparence (alpha). Cette bande alpha contient deux valeurs, une dans la zone des no data

et une dans la zone des données utiles. En vectorisant la bande alpha de ce raster on obtient un fichier de forme avec deux éléments dont l'un correspond au contour de l'image et le second



Source : VENμS SRE 27.03.2018, CNES.

Figure 9 : Définition de la zone utile de chaque image.

au contour de la tuile qui nous intéresse. Nous sauvegardons donc ce dernier pour obtenir un masque de découpe correspondant au contour de notre tuile (Figure 9, p. 25).

III.2.1.2 Import des métadonnées

Chaque image VENμS téléchargée contient un fichier xml contenant l'ensemble des métadonnées. Parmi elles, il y a notamment :

- les renseignements sur le producteur de la donnée ;
- les valeurs en degrés de l'angle zénithal et de l'angle azimut du soleil ;
- les valeurs des angles de prise de vue du satellite ;
- l'heure et le lieu d'acquisition ;
- la liste des bandes disponibles ;
- les coordonnées des angles et du centre de l'image.

Afin de réaliser la correction d'éclairement, nous récupérons les angles solaires (zénith et azimut) lors de la prise de vue de chaque image. Ces informations serviront dans la suite du processus.

III.2.1.3 Création des cartes de pentes et d'exposition

En entrée, nous disposons d'un MNT à 8 m, interpolé à 5 m par la méthode bicubique (S. Gascoin, CESBIO-CNES) pour être consistant avec la résolution spatiale des images VENμS. Le modèle numérique de terrain est coupé à la taille de la tuile puis il intervient pour la création des cartes des pentes et d'exposition.

Afin d'éviter les effets de bord, il serait préférable de réaliser les cartes citées ci-dessus sur l'ensemble du MNT puis de les couper à la taille de la tuile. Cependant, la librairie GDAL (« GDAL — GDAL documentation », s. d.) fait intervenir une interpolation dès que l'on découpe un fichier raster avec un fichier de forme. Cette interpolation est mal gérée sur des fichiers rasters contenant des mesures d'angles comme c'est le cas avec l'exposition notamment. En effet, l'algorithme réalisera une interpolation en moyennant par exemple deux pixels contenant les valeurs 1° et 359° , ce qui donnera finalement une exposition de 180° . Le pixel, au lieu d'être exposé plein nord, se retrouve exposé plein sud. Nous créons donc les cartes de pentes et d'exposition sur le MNT découpé préalablement, ce qui évite la gestion de l'interpolation (Annexe 5, p. 68).

III.2.1.4 Prétraitement nécessaire

Bien qu'il soit fréquent de confondre réflectance et albédo, alors que l'albédo est compris entre 0 et 1, la réflectance, elle, peut être supérieure à 1 (Hagolle, s. d.). En théorie, les produits SRE fournis par le CNES contiennent des valeurs entre 0 et 1000. Une division par 1000 est nécessaire pour obtenir la valeur de réflectance. En pratique, ils comprennent des valeurs négatives dues au bruit et peuvent contenir des valeurs supérieures à 1000 pour de multiples raisons dont les suivantes :

- la réflexion spéculaire (effet de miroir de certaines surfaces) ;
- les effets de pentes en zone montagneuse.

La réflexion spéculaire s'explique par des surfaces se comportant comme des miroirs comme par exemple des velux sur des toits ou des panneaux solaires. La zone de notre étude étant peu construite, cette raison ne sera pas retenue pour expliquer des valeurs supérieures à 1. Les effets de pentes en montagne sont ceux qu'on veut justement corriger par l'intermédiaire de cet algorithme.

L'application de la correction Cosine n'est possible que pour des valeurs de réflectances positives. Un premier traitement consiste à remettre à zéro toutes les valeurs négatives de l'image Surface REflectance (SRE) utilisée en entrée.

III.2.1.5 Application de la correction Cosine

La correction des effets de pente est réalisée à partir de cinq éléments :

- une bande corrigée des effets de l'atmosphère (produit SRE du CNES) ;
- la carte des pentes ;
- la carte des expositions ;
- l'angle zénithal du soleil ;
- l'angle azimutal du soleil.

Nous décrivons la correction de la bande n°11 du proche infra-rouge mais le même processus est réalisé sur la bande n°7 du rouge visible (Figure 10, p. 27). Dans le but de faciliter l'analyse des résultats et la correction d'éventuelles erreurs, nous appliquons la formule de correction (Equation (2), p. 16), par étapes.

Etape 1 : Création du raster contenant la valeur du numérateur, c'est-à-dire le cosinus de l'angle zénithal solaire ($\cos Z_s$).

Etape 2 : Création du raster de l'illumination via la formule du cosinus de l'illumination (Equation (1), p. 14). Elle fait intervenir les pentes et les expositions ainsi que les angles solaires (zénith et azimut) prélevés dans les métadonnées de chaque image VENμS.

Etape 3 : Création du raster contenant les valeurs d'illumination supérieures au seuil de 0.2, à l'aide de GDAL.

Les valeurs inférieures à ce seuil sont mises en No Data car nous ne pourrions pas les corriger avec cette méthode.

Etape 4 : Création du raster corrigé des effets de pentes en combinant les rasters produits aux étapes 1 et 4 avec le SRE dont les valeurs négatives ont été remises à zéro.

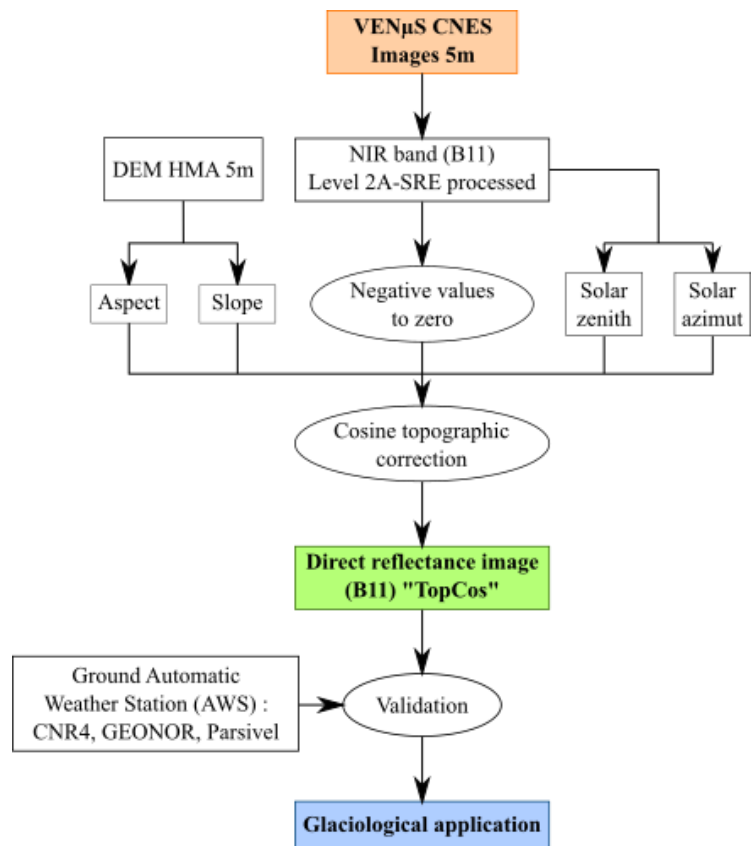


Figure 10 : Processus de création du produit TopCos HMA et sa validation.

III.2.2 Protocole de création du masque des nuages

III.2.2.1 Masque des nuages du CNES

Le CNES met à disposition un produit « CLM_XS », que nous appellerons « CLM », codés sur 8 bits (Annexe 6, p. 69) qui distingue différents types de nuages. Il provient du traitement des images avec la chaîne MAJA du CNES.

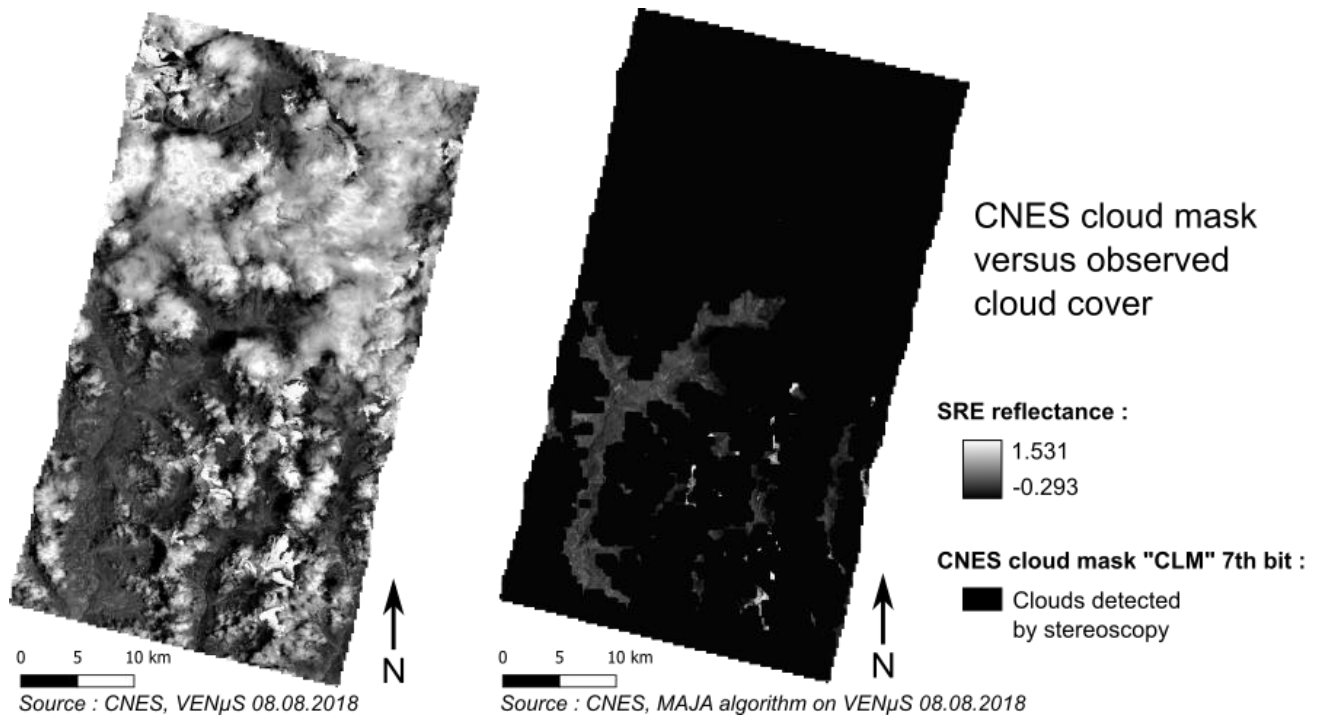


Figure 11 : Comparaison du masque des nuages CLM (CNES) aux nuages observés.

Le masque CLM du CNES est réalisé à partir de plusieurs méthodes de seuillages. Le seuillage multi-temporel consiste à réaliser un calcul de corrélation entre des images dont les dates sont proches. Si la corrélation est très faible, on suppose qu'un nuage est présent sur l'image la plus récente.

Dans le raster CLM, nous extrayons le bit n°7 afin d'obtenir un masque des nuages hauts seulement (Figure 11, p. 28). Cependant, la résolution du MNT utilisé pour créer le masque CLM est de 90 m tandis que nous disposons d'un MNT d'une résolution de 8 m interpolée à 5 m. Ce masque reste donc grossier par rapport à la résolution spatiale des images VENμS que nous étudions. Si nous l'utilisions intact dans nos traitements, cela conduirait à une importante perte de données.

Nous avons donc choisi de réaliser notre propre masque des nuages et ainsi tenter de récupérer davantage d'informations dans chaque image VENμS.

III.2.2.2 Impossibilité de calculer le NDSI

Afin de différencier les zones enneigées des zones nuageuses, la méthode la plus réputée est l'utilisation du NDSI (Normalized-Difference Snow Index). Son efficacité a été démontrée par le passé (Dozier, 1989) (cf. I.3.4).

Un seuil est défini pour permettre de séparer le couvert neigeux présent dans l'image. Les pixels dont la valeur est supérieure à ce seuil sont assimilés à de la neige et les pixels inférieurs à ce seuil sont caractérisés comme « couvert non-neigeux ».

L'identification des nuages et leur différenciation des couvertures neigeuses représentent une des difficultés dans la correction des images VENμS et pour la réalisation de cartes de neige. Alors que la majorité des satellites étudiant des zones montagneuses et des glaciers sont dotés d'une bande dans le moyen infrarouge (SWIR), le satellite VENμS n'en dispose pas. Cela se justifie par le fait que la plupart des applications découlant des images VENμS concernent la végétation.

Nous avons donc analysé plusieurs méthodes pouvant permettre de séparer nuages et neige le plus correctement possible, et compenser ainsi ce handicap.

III.2.2.3 Combinaison CLM - NDVI

➤ Raisonnement

Afin d'obtenir un masque des nuages plus exact, nous nous appuyons sur le masque CLM fourni par le CNES et nous le combinons avec l'utilisation du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Cet indice permet, à partir d'une bande spectrale du proche infrarouge (NIR) et d'une bande spectrale rouge, de différencier les zones de végétation ou de sol nu du reste des couverts d'une image. Le NDVI s'exprime par :

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{red}}{R_{NIR} + R_{red}} \quad (7)$$

où R_{NIR} correspond à la réflectance dans la bande du proche-infrarouge et R_{red} à la réflectance dans la bande du rouge visible.

Comme pour le NDSI, un seuil est défini afin de séparer les deux types de couverture.

A partir d'une analyse empirique sur des prises de vue satellites acquises à des dates différentes, nous avons déterminé un intervalle de valeurs pour extraire les nuages et un second intervalle pour extraire la neige (Tableau 2, p. 30).

NDVI	Seuil bas	Seuil haut
Nuages	-0.06	0.05
Neige	-0.16	-0.02

Tableau 2 : Définition des seuils de détection de la neige et des nuages avec le NDVI.

On constate que les deux fenêtres de valeurs se chevauchent entre -0.02 et 0.05. Cette plage de valeurs représente la limite de cette méthode. Les nuages et la neige ayant des réflectances assez similaires dans le proche infrarouge, il est difficile de les différencier correctement.

Pour améliorer le masque des nuages du CNES, nous le combinons au NDVI. Un pixel situé à la fois, dans le masque de nuages du CNES et dans l'intervalle des valeurs correspondant aux nuages dans le raster NDVI, sera considéré comme un pixel nuageux.

➤ Avantages et inconvénients de la combinaison CLM – NDVI

En combinant le masque des nuages du CNES avec le NDVI calculé sur les bandes rouge et NIR corrigées de l'éclairement, on obtient un premier résultat assez satisfaisant. La neige est plutôt bien délimitée, les nuages aussi. Il y a cependant des débris dans les moraines qui se retrouvent intégrés dans le masque. De plus, les nuages ne sont pas toujours détectés dans leur intégralité.

III.2.2.4 Combinaison CLM - Énergie

➤ Raisonnement

Le CNES met en libre disposition une librairie Orfeotoolbox (« Welcome to Orfeo ToolBox! — Orfeo ToolBox 7.1.0 documentation », s. d.) permettant de manipuler des images raster. Cette librairie est accessible depuis QGIS mais également sous Python en ligne de commande. Nous avons préféré automatiser nos calculs en utilisant Python.

La fonction « HaralickTextureExtraction » (« HaralickTextureExtraction — Orfeo ToolBox 7.1.0 documentation », s. d.) permet de créer un raster composé de huit canaux. Parmi eux on peut citer l'énergie, l'entropie, la corrélation, le moment de différence inverse, l'inertie et la corrélation Haralick.

Il est courant d'utiliser l'entropie pour détecter les nuages par classification. Dans notre cas, nous cherchions à différencier la neige et les nuages des moraines qui sont parfois incluses par le seuil du NDVI. Les moraines sont caractérisées par une rugosité due aux débris du glacier. Ainsi, la matrice Energie qui permet une évaluation de l'uniformité est un bon outil pour réaliser

une différenciation entre des surfaces relativement uniformes comme la neige ou les nuages, et des surfaces très hétérogènes comme les moraines.

En observant les rasters Énergie obtenus, on constate que les nuages et la neige sont principalement contenus dans les plages de valeurs supérieures à 0.8. C'est donc le seuil que nous retenons pour la création de notre masque des nuages.

➤ Avantages et inconvénients de la combinaison CLM – Énergie

Lorsque l'on utilise à la fois le masque du CNES et le raster Énergie, on remarque que neige et nuages sont moins bien séparés (Figure 12, p. 31). En revanche, les nuages sont davantage pris dans leur intégralité et les débris des moraines sont moins présents dans le masque.

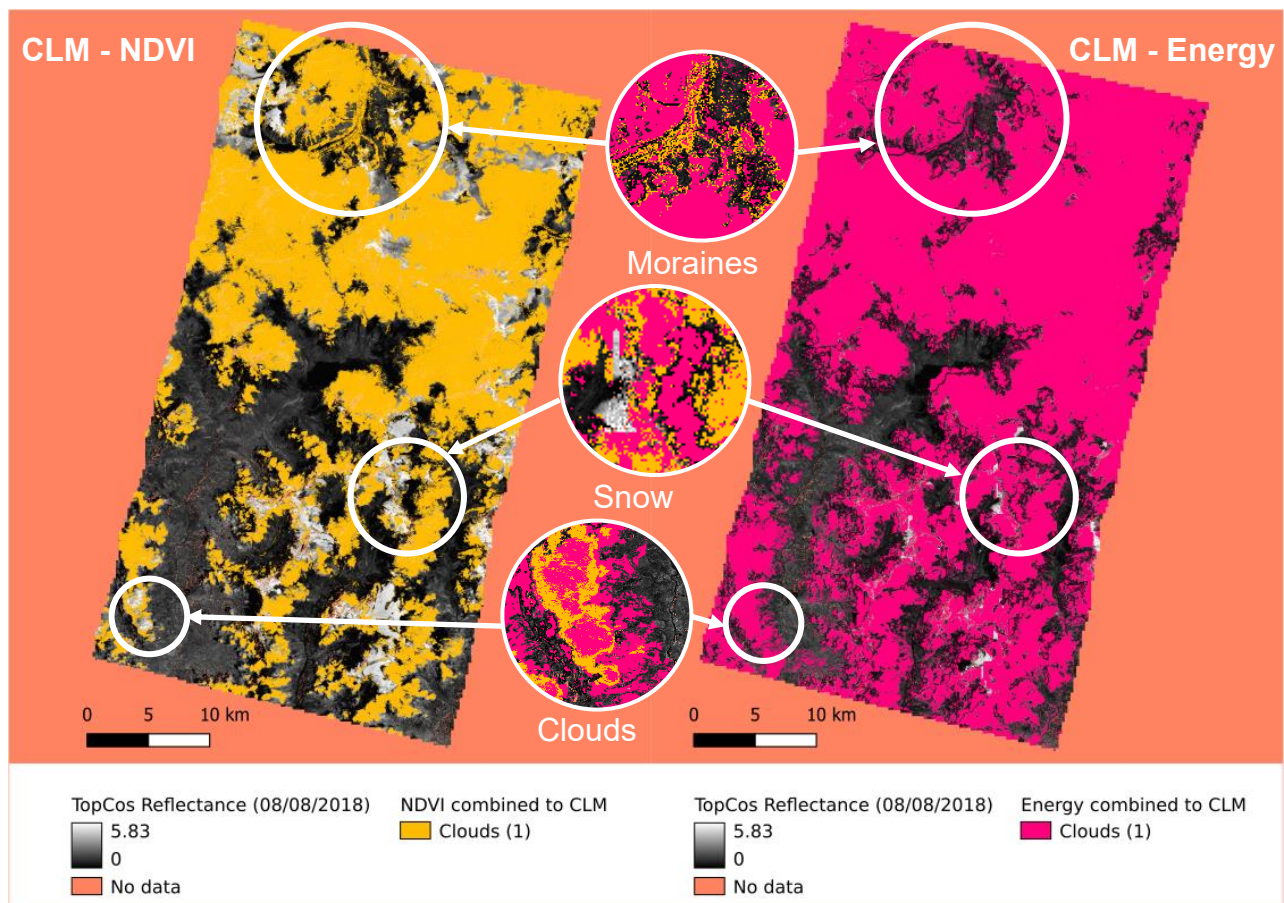


Figure 12 : Comparaison des combinaisons CLM (CNES) - NDVI et CLM (CNES) - Énergie.

III.2.2.5 Combinaison NDVI - Énergie

➤ Raisonnement

En combinant Le NDVI et l'Énergie (Figure 13, p. 32), le résultat devrait normalement inclure peu de moraines, tout en différenciant bien neige et nuages (Annexe 7, p. 70).

➤ Pourquoi utiliser le masque du CNES en plus ?

Lorsque l'on utilise seulement le NDVI et l'énergie, il est possible que des zones enneigées sans nuage soient confondues avec de l'enneigement. Bien que le masque des nuages du CNES ne soit pas très précis, il apporte une contrainte en plus.

En combinant le masque du CNES avec le NDVI et l'énergie, seuls les pixels compris dans le masque du CNES seront traités. Ainsi, si l'algorithme MAJA du CNES n'a pas détecté un nuage au-dessus d'une zone couverte de neige, alors il ne pourra en aucun cas être considéré comme nuageux.

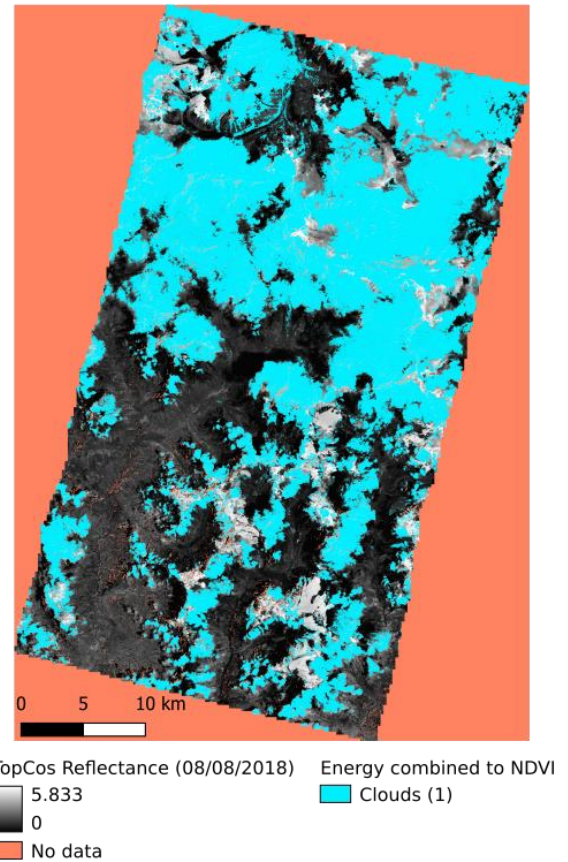


Figure 13 : Combinaison du NDVI avec l'Énergie.

III.2.2.6 Création d'un masque des nuages

➤ Raisonnement

Finalement, c'est en combinant le masque des nuages du CNES, le seuillage du NDVI et le seuillage de la matrice Énergie que l'on obtient un résultat satisfaisant. Le processus de création du masque CloudCov est décrit dans la Figure 14, p. 32.

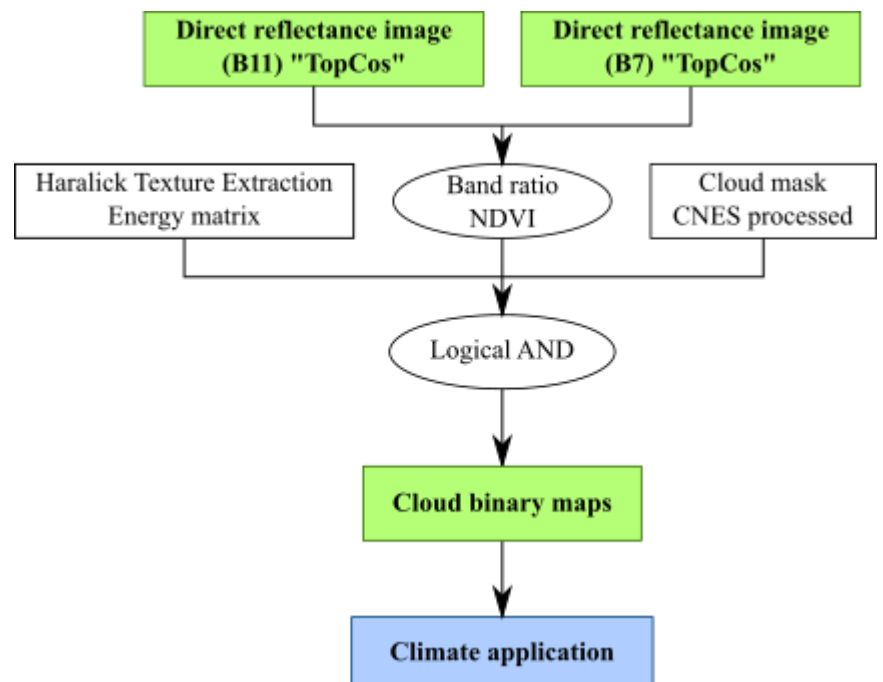


Figure 14 : Processus de création du masque des nuages CloudCov.

➤ Avantages et inconvénients de la combinaison CLM – NDVI – Énergie

Cette dernière combinaison offre le meilleur compromis avec une bonne distinction neige-nuages, sans intégrer trop de moraines.

Cependant, certains nuages ne seront pas totalement inclus dans le masque (influence de la matrice Énergie) et l'ombre des nuages n'est pas traitée dans cet algorithme.

III.3 Post-traitement : correction du masque des nuages

La qualité du masque des nuages reste moyenne car elle repose sur des paramètres texturaux et spectraux mais nous ne disposons pas du NDSI.

Ce masque est employé dans la création des cartes de neige (SCA). Par conséquent, la confusion de la neige avec les nuages dégrade le produit SCA.

Pour améliorer nos produits nous avons donc visualisé individuellement les masques des nuages de chaque image traitée et nous les avons manuellement rectifiés à l'aide de l'outil « édition de raster » sous le logiciel licencié Geomatica de PCI (Annexe 8, p. 71). Cette opération est aussi possible sous QGIS avec l'outil ThRasE (Annexe 9, p. 73).

III.4 Second Traitement : Application du masque des nuages

Le deuxième traitement correspond au premier avec quelques modifications concernant la création des images de réflectance corrigées des effets de pente et la production des cartes de neige. Cette étape consiste à appliquer le masque des nuages CloudCov, corrigé manuellement, à ces deux produits, en attribuant une valeur distincte aux nuages (Annexe 4, p. 67).

III.4.1 Application du masque CloudCov amélioré sur les images de réflectance TopCos

Les produits TopCos issus du premier traitement ne contiennent pas de masque des nuages. La réflectance des pixels nuageux est corrigée comme s'il s'agissait d'un pixel au sol, ce qui rend aberrante leur valeur. Afin de livrer une image de réflectance la plus correcte possible, le masque des nuages CloudCov amélioré manuellement est appliqué au produit TopCos.

Pour attribuer une nouvelle valeur aux nuages (128) dans le TopCos, la formule suivante est appliquée sous GDAL : $TopCos\ sans\ nuages = [A \times (B < 1)] + [B \times (B > 0) \times 128]$.

Avec A : TopCos du traitement n°1 sans occultation des nuages, B : CloudCov corrigé manuellement. Les inégalités du type $(X > y)$ renvoient une matrice de 0 (pour les pixels $\leq y$)

et de 1 (pour les pixels $> y$). La **première partie** permet de conserver les valeurs du TopCos où il n'y a pas de nuages. La **seconde** permet d'attribuer la valeur de 128 aux pixels nuageux.

III.4.2 Protocole de création des cartes SCA

La réalisation des cartes de neige appelées « cartes SCA », fait intervenir à nouveau le **NDVI** mais avec un intervalle de valeurs adapté pour la neige (Figure 15, p. 34).

Après une évaluation empirique, nous avons retenu un intervalle entre -0.16 et -0.02.

Un test sur **l'énergie** est combiné à ce ratio de bandes. Si l'énergie est supérieure à 0.8, cela signifie qu'il y a une certaine uniformité qui peut être assimilée à de la neige.

Enfin, nous utilisons le masque **CloudCov** afin d'identifier et de stocker, dans une valeur définie, les nuages dans la carte SCA.

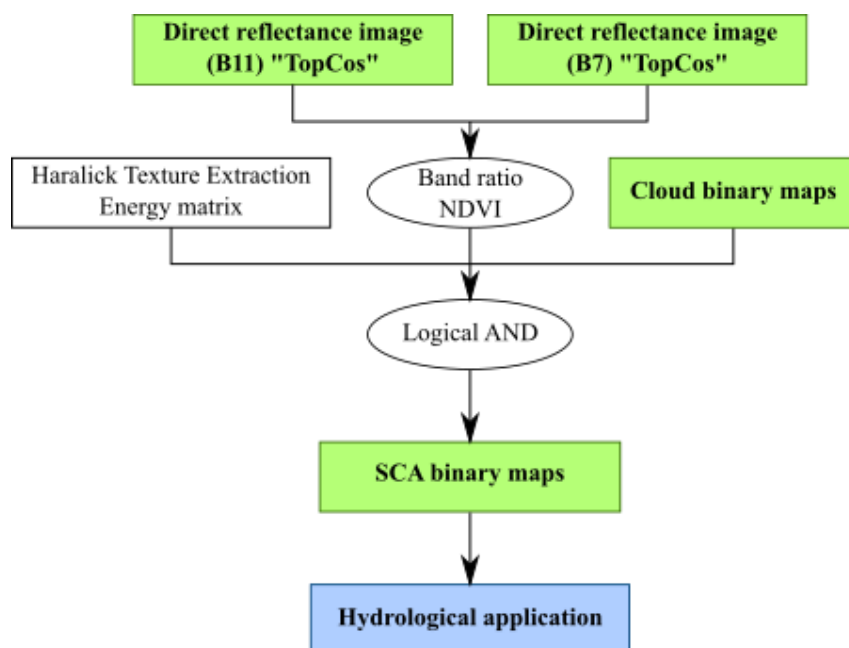


Figure 15 : Processus de création des cartes de neige (SCA).

III.4.3 Intégration du masque CloudCov amélioré dans les cartes SCA

Les cartes de neige obtenues après le traitement initial ne tiennent pas compte des nuages. Ainsi, des pixels nuageux sont parfois incorporés dans la classe « neige ». La réalisation d'études statistiques sur l'ennuagement et l'enneigement nécessite des cartes SCA différenciant la neige, les nuages, les autres couverts et les no data.

Pour remédier à cela, le masque CloudCov est appliqué aux cartes SCA en combinant les trois conditions suivantes :

- un NDVI compris entre -0.16 et -0.02 ;
- une énergie supérieure à 0.8 ;
- CloudCov égal à 0 (c'est-à-dire pas de nuage).

Lorsque ces trois conditions sont réunies, alors le pixel aura la valeur 1 (neige), autrement il aura la valeur 0 (autres couverts). La valeur No Data est fixée à 20 000 et regroupe les nuages, les No Data issus de l'illumination trop faible et ceux du contour de la tuile.

Ce raster « SCA » est ensuite enregistré en 8 bits et la valeur No Data devient 255. Pour séparer les nuages des No Data et leur attribuer une valeur (128), un calcul entre rasters via la formule suivante est effectué.

Soit A le raster SCA avec :

- 0 : autres couverts
- 1 : neige
- 255 : No Data (Contour, nuages, $\text{Cos(IL)} < 0.2$)

Soit B le raster CloudCov avec :

- 0 : pixel non nuageux
- 255 : pixel nuageux
- Pas de No Data défini

$$\text{Raster SCA} = A \times (B < 255) + (B > 0) \times 128$$

On obtient ainsi une carte SCA avec les classes suivantes :

- 0 : autres couverts
- 1 : neige
- 128 : nuages
- 255 : No Data (Contour, $\text{Cos(IL)} < 0.2$)

Un exemple est présenté ci-dessous (Figure 16, p. 35).

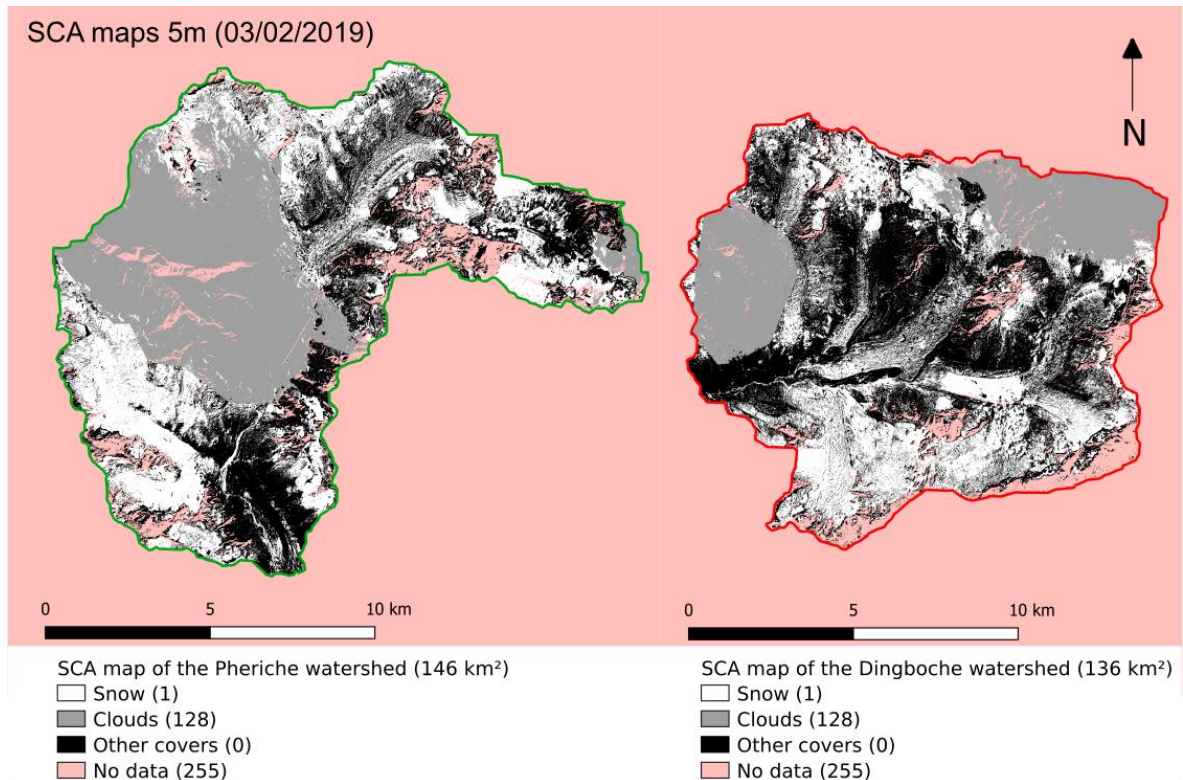


Figure 16 : Exemple des cartes SCA pour les bassins versants de Pheriche et Dingboche.

IV Résultats obtenus et discussion

IV.1 Glaciologie

IV.1.1 Comparaison et validation

IV.1.1.1 Analyse de la dynamique des images corrigées

La correction des effets des pentes a pour objectif de remettre la réflectance d'un pixel dans une pente à celle d'un pixel qui serait « à plat ». On obtient ainsi un écart plus faible entre les zones éclairées et les zones non éclairées dans l'image, ce qui diminue le contraste de l'image corrigée.

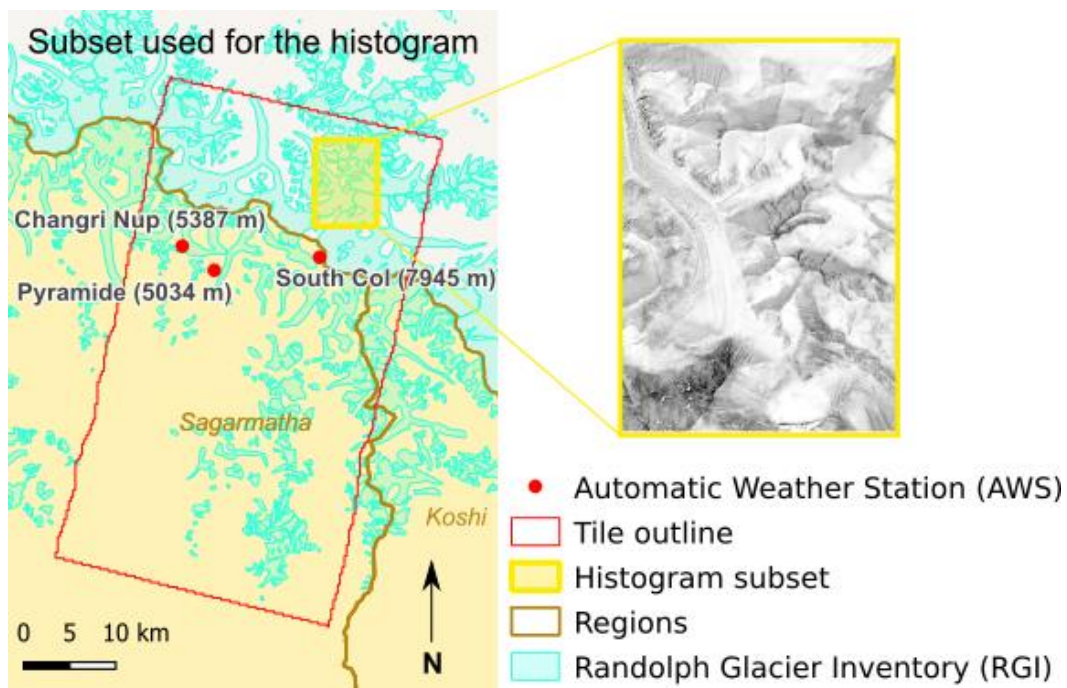


Figure 17 : Localisation de l'emprise utilisée pour l'étude de la dynamique de l'image.

La Figure 18 (p. 36) représente les occurrences des réflectance sur les produits SRE, FRE et TopCos étalés entre 0 et 1. Seule une zone de couvert homogène (Figure 17, p. 36), ici de la neige, a été utilisée pour réaliser l'histogramme qui suit.

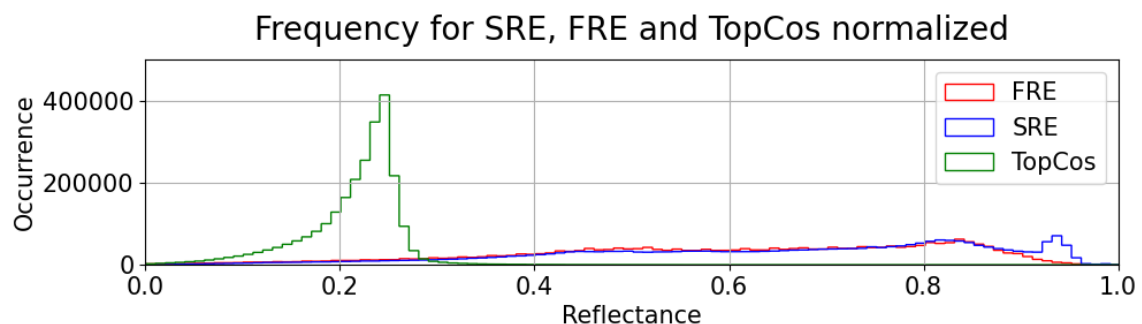


Figure 18 : Histogramme de la fréquence d'occurrence des réflectances pour les produits SRE, FRE et TopCos HMA normalisés entre 0 et 1.

Plus les valeurs sont regroupées vers les réflectances faibles, moins l'image est contrastée.

La Figure 18 (p. 36), montre qu'en normalisant entre 0 et 1 les valeurs des trois produits de réflectances SRE, FRE et TopCos, les valeurs du produit TopCos sont concentrées dans les basses réflectances. Cela reflète le faible contraste présent dans ce produit et traduit la diminution de l'écart entre zone illuminée et zone à l'ombre.

L'utilisation d'un MNT à 5 m permet une meilleure connaissance du relief et donc plus de nuances dans les réflectances. Sur la Figure 19.a (p. 37) on observe une plus grande amplitude des valeurs des réflectances sur le produit TopCos que sur les deux produits du CNES.

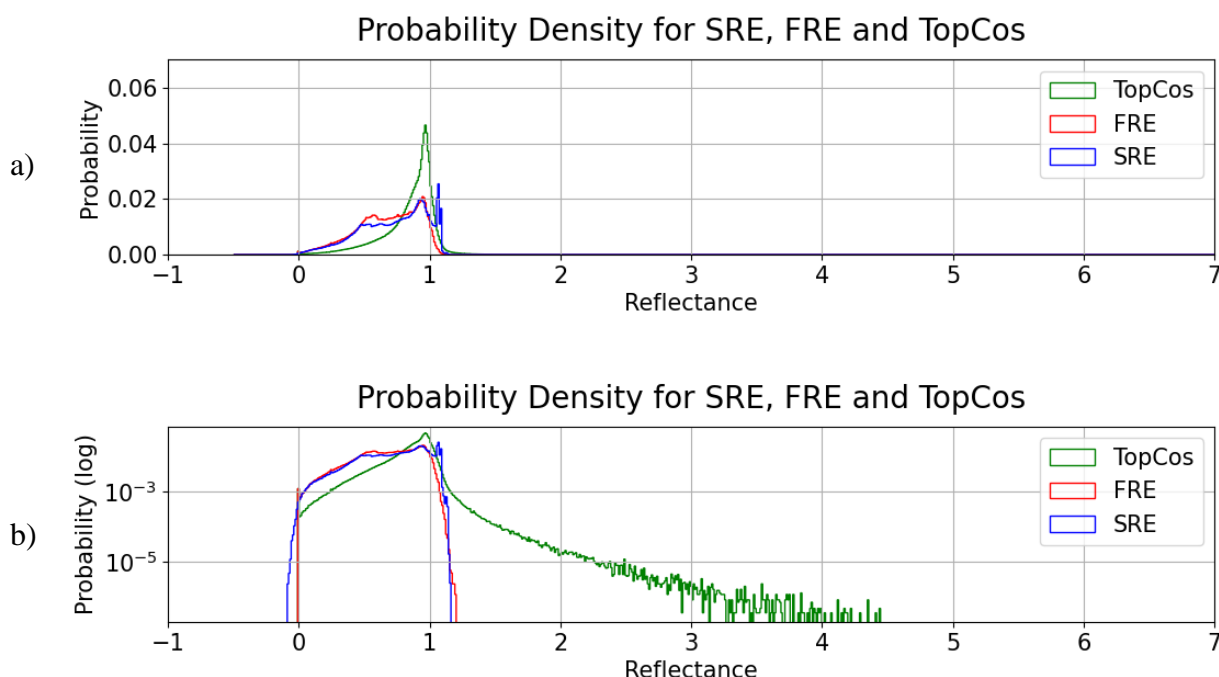


Figure 19 : Densité de probabilité des réflectances pour les produits SRE, FRE et TopCos HMA. a) échelle linéaire, b) échelle logarithmique.

La Figure 19.b (p. 37), permet également de visualiser l'effet de sur-correction de la méthode Cosine dans le produit TopCos. En effet, à contrario, les produits SRE et FRE semblent avoir un front, un seuil qui permet d'empêcher les valeurs de réflectance qu'ils contiennent d'être trop fortes.

IV.1.1.2 Étude par différence de rasters

Pour comprendre l'influence d'un MNT haute résolution dans la correction d'éclairement, la différence entre images de réflectance est observée.

La différence entre le produit sans correction d'éclairement (SRE) et le produit corrigé par le CNES (FRE) (Figure 20.a, p. 39) montre que les surfaces avec des pentes fortes

(sommets) et exposées au soleil sont corrigée et voient leur valeur de réflectance diminuer. A l'inverse, les zones plates et moins exposées au soleil voient leur réflectance augmenter dans le FRE.

Lorsqu'on compare le SRE avec notre produit corrigé TopCos, on remarque d'abord l'action du MNT fin. En effet, il y a beaucoup plus de détails, notamment des vallées secondaires qui sont plus visibles dans la Figure 20.b (p. 39) car leur réflectance est corrigée dans le TopCos. On constate aussi que la correction cosinus impacte davantage la réflectance que la correction du CNES, dérivée de la méthode « gamma », dans les sommets exposés aux rayons solaires.

En comparant les deux produits corrigés par deux méthodes différentes, on observe que, par rapport au FRE, le TopCos diminue plus les valeurs de fortes réflectances dans les secteurs exposés au soleil (Figure 20.c, p. 39). Et dans les vallées, le phénomène inverse est observé, les réflectances sont plus augmentées par la correction cosinus que par la correction gamma.

Ces figures permettent de montrer que les produits corrigés suivent la même tendance, ils réduisent les fortes réflectances et augmentent les faibles.

Dans le but de déterminer si les différences observées entre le produit FRE et le TopCos HMA sont dues à l'utilisation d'un MNT fin (résolution de 5 m) ou bien au choix de la méthode de correction (gamma pour le FRE et cosinus pour le TopCos HMA) ; nous avons comparé un quatrième produit, le TopCos SRTM, réalisé avec la correction cosinus mais en utilisant le MNT SRTM à 90 m (Figure 20.d et Figure 20.e, p. 39). Il en ressort que la différence SRE – TopCos SRTM est très similaire à la différence SRE – FRE. On observe des zones assez homogènes, avec une variation locale de la réflectance assez faible. C'est l'effet du MNT SRTM avec une résolution initiale beaucoup plus grande que les images VENμS (90 m contre 5 m).

Avoir eu recours à un MNT d'une résolution initiale de 8 m plus proche de la résolution des images VENμS (5 m), nous permet d'avoir une description du relief plus fine et donc une variation de la réflectance plus forte dans un même voisinage. Cette conséquence est bénéfique pour pouvoir détecter plus facilement de la neige et réaliser des cartes de neige par la suite.

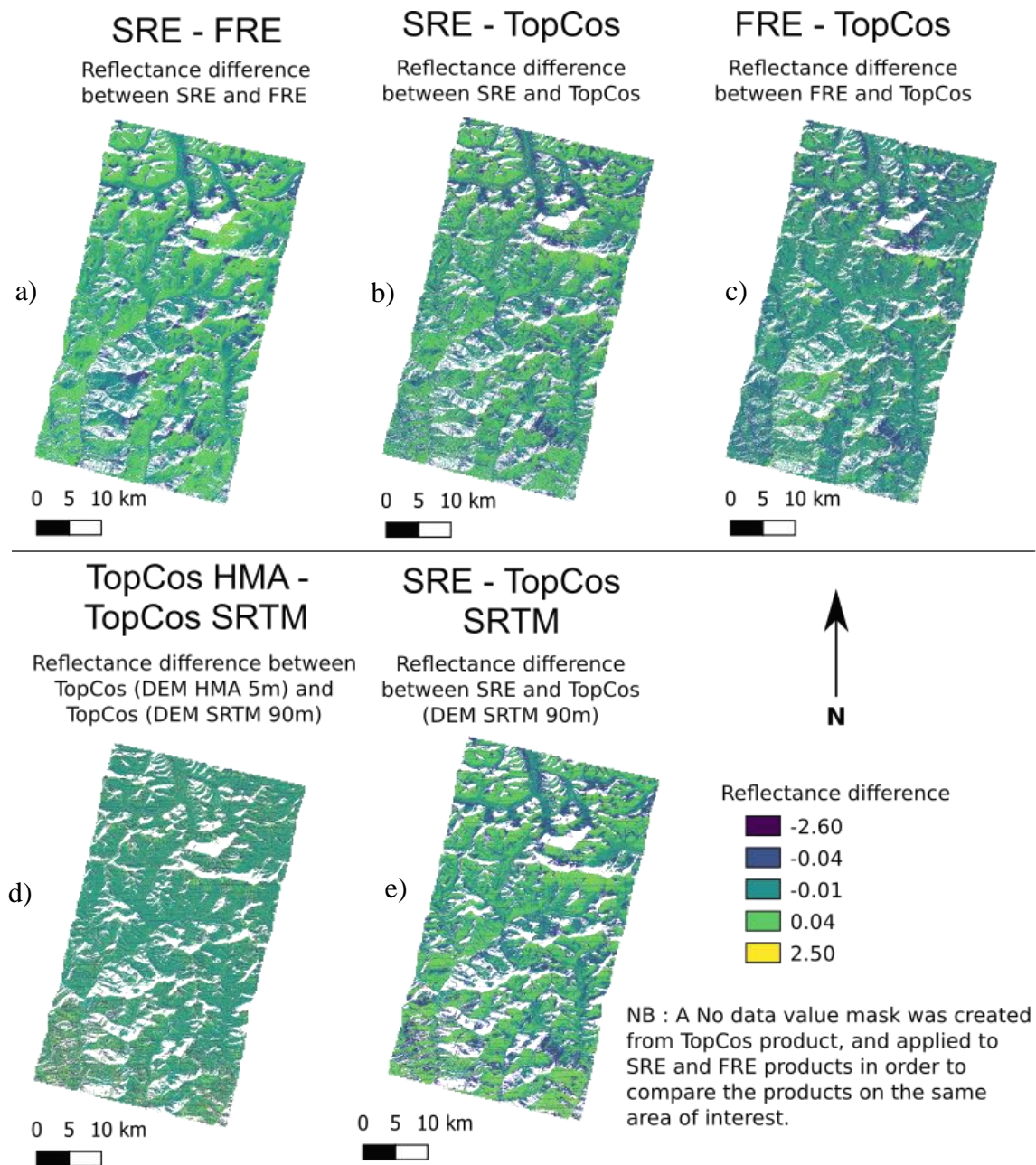


Figure 20 : Différences entre les produits de réflectance SRE, FRE, TopCos HMA et TopCos SRTM.

IV.1.1.3 Comparaison des réflectances des produits SRE, FRE et TopCos avec les données météorologiques du terrain

IV.1.1.3.1 Évolution temporelle

Pour évaluer la qualité du produit de réflectance TopCos, l'évolution de la réflectance des quatre produits satellites est comparée à l'évolution de l'albédo in situ. Deux stations météorologiques enneigées régulièrement et situées dans une zone homogène ont été retenues :

Changri Nup (5387 m) et le Col Sud (7945 m). La station de Pyramide (5034 m) a été écartée car elle n'est pas suffisamment souvent enneigée.

Col Sud :

La Figure 21 (p. 40) représente l'évolution de la réflectance et de l'albédo au Col Sud. Tout d'abord, on constate que les images de réflectances (SRE, FRE, TopCos HMA et TopCos SRTM) suivent la même tendance que les mesures d'albédo *in situ* : la réflectance est plus forte quand l'albédo augmente après une chute de neige, puis elle est plus faible lorsque la neige fond et que l'albédo diminue. Lorsque l'albédo est faible, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de neige au sol, la réflectance du produit TopCos HMA est très proche des valeurs d'albédo *in situ*. En revanche, pour les périodes où le sol est couvert de neige, la réflectance du produit TopCos HMA est souvent plus élevée que l'albédo *in situ*. Les deux produits de réflectance du CNES (SRE et FRE) ont une réflectance toujours plus faible que les produits TopCos.

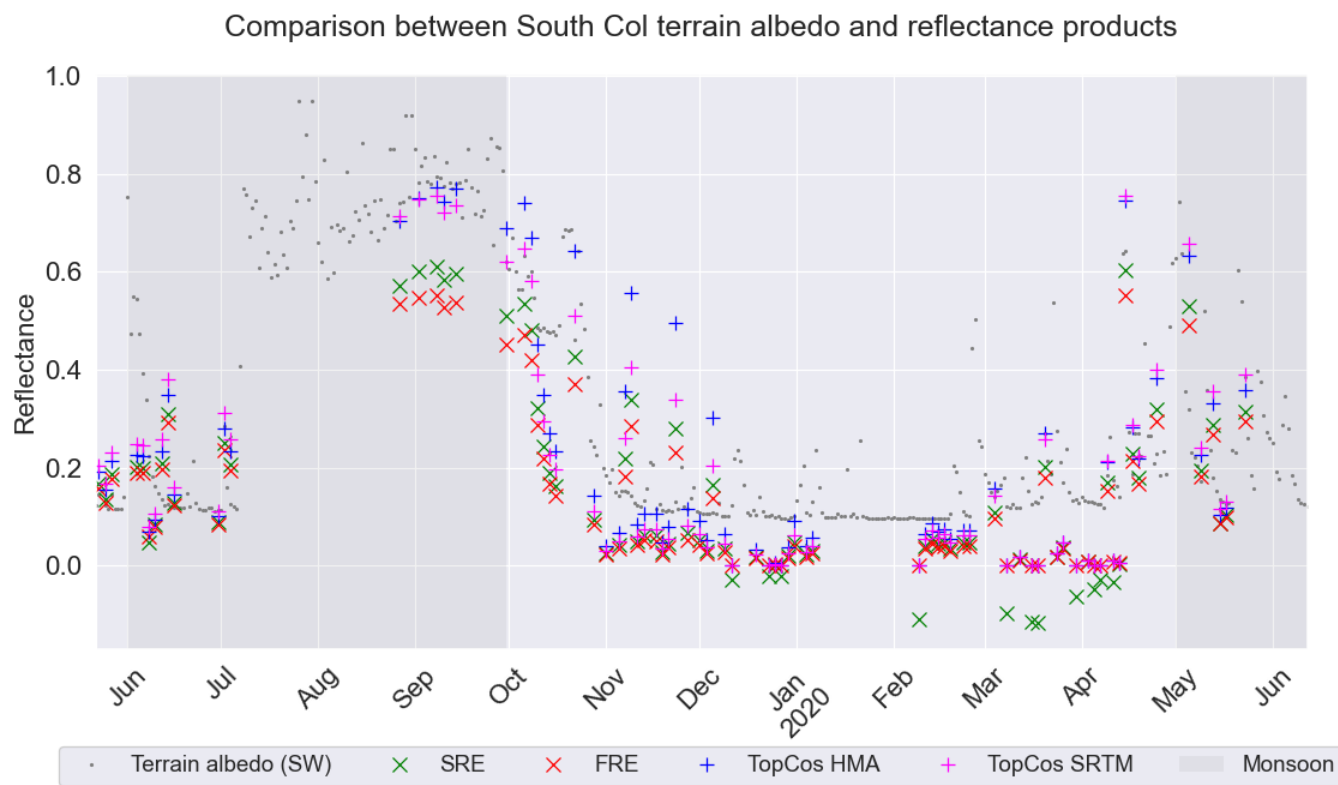


Figure 21 : Comparaison de l'albédo *in situ* aux images de réflectance à la station de South Col.

Changri Nup :

La Figure 22 (p. 41), représente l'évolution de la réflectance et de l'albédo à la station Changri Nup. Dans un premier temps, on remarque que les images de réflectances, comme pour la station du Col Sud, suivent la même tendance que l'albédo *in situ*. Quand l'albédo est faible, la réflectance des produits SRE et FRE du CNES sont très proches des valeurs d'albédo *in situ*.

En revanche, pour les périodes où le sol est couvert de neige, la réflectance comprise dans les quatre produits est plus forte que l'albédo in situ. Les deux produits TopCos sur-corrigent davantage les fortes réflectances que les produits du CNES et le produit TopCos HMA est celui qui sur-corrige le plus.

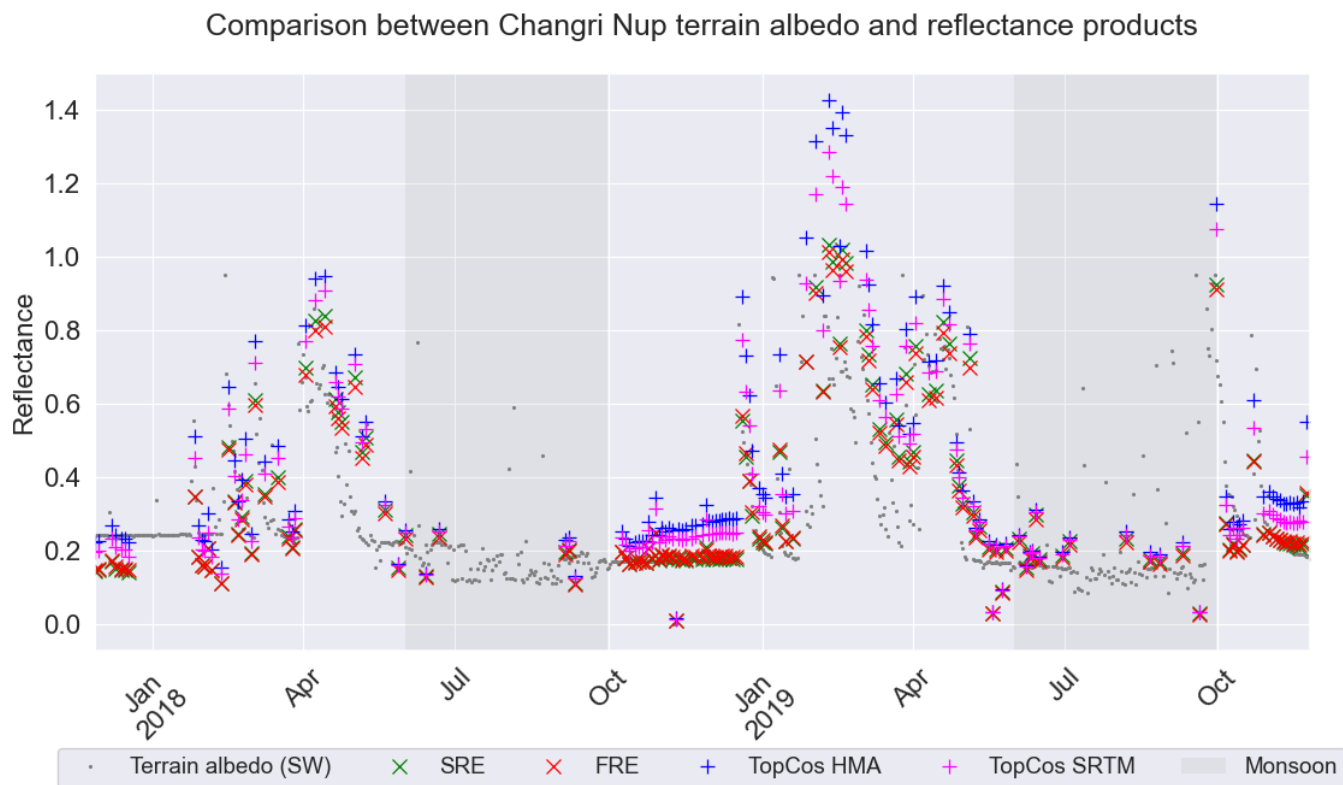


Figure 22 : Comparaison de l'albédo in situ aux images de réflectance à la station de Changri Nup.

IV.1.1.3.2 Comparaison statistique avec le terrain

Afin d'approfondir l'analyse des quatre produits de réflectance, une comparaison statistique est réalisée avec l'albédo in situ de chaque station météorologique. Nous nous intéressons principalement à trois métriques : l'erreur moyenne quadratique (EMQ), le biais et l'écart type (STD : Standard deviation). Elles permettent de quantifier la ressemblance et la dissemblance entre différentes séries de données.

Le biais représente l'écart constant moyen entre deux séries tandis que l'écart-type traduit la dispersion de la série étudiée par rapport à la série de référence. L'EMQ dépend à la fois du biais et de la dispersion : $EMQ^2 = Biais^2 + STD^2$ (8)

Col Sud :

Le produit SRE du CNES (Figure 23.a, p. 42) est relativement proche des mesures de terrain. L'écart moyen et la dispersion sont relativement faibles, ce qui est traduit par l'EMQ faible également.

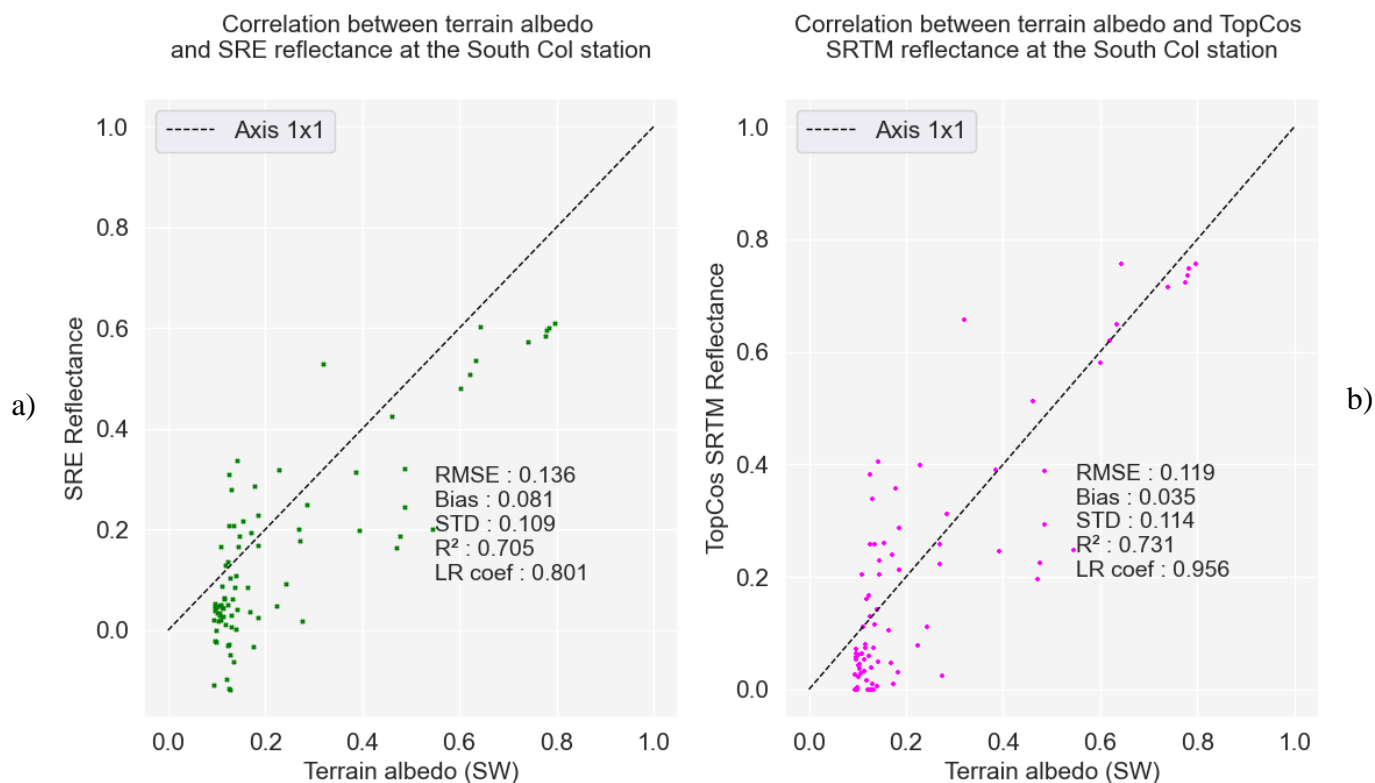


Figure 23 : Comparaison des produits SRE (a) et TopCos SRTM (b) à l'albédo *in situ* de la station de South Col.

Le produit de réflectance TopCos SRTM (Figure 23.b, p. 42) présente un EMQ plus faible que le SRE. En revanche la contribution de la dispersion à l'EMQ est de 95 % et celle du biais n'est que de 30 %.

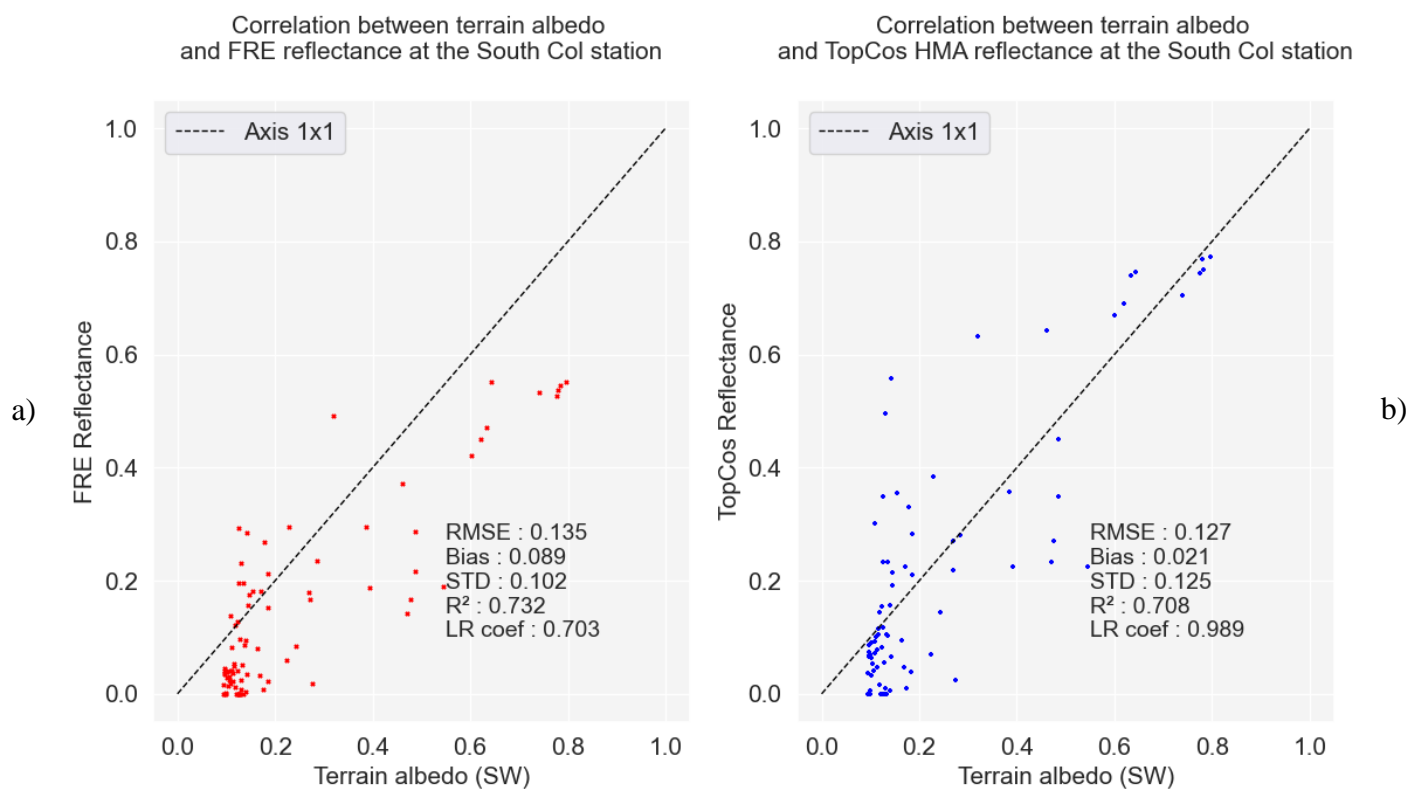


Figure 24 : Comparaison des produits FRE (a) et TopCos HMA (b) à l'albédo *in situ* de la station de South Col.

Les métriques décrivant le produit FRE (CNES) (Figure 24.a, p. 42) sont très proches de celles du produit SRE. Le biais et la dispersion contribuent de manière assez équivalente à l'EMQ (respectivement 66 % et 75 %).

Enfin, le produit TopCos HMA (Figure 24.b, p. 42) montre une EMQ plus faible que les produits du CNES. Le biais est très faible, c'est donc la dispersion qui contribue principalement à l'EMQ pour 98 % (contre seulement 17 % pour le biais).

Changri Nup :

Concernant la station située au niveau du glacier Changri Nup, la Figure 25.a (p. 43) montre encore une fois que le produit non corrigé du CNES (SRE) ressemble aux données terrain. C'est un bon produit de départ avec des métriques relativement faibles. La Figure 25.b (p. 43) présente la comparaison avec le TopCos SRTM. L'ensemble des métriques le décrivant sont plus fortes que pour le SRE. Le biais contribue à l'EMQ pour 57 % tandis que la dispersion y contribue pour 82 %.

Le produit corrigé du CNES (FRE) (Figure 26.a, p. 44) présente les meilleures métriques avec un biais qui contribue à 30 % à l'EMQ et une dispersion pour 96 %. La dernière figure (Figure 26.b, p. 44) révèle que le produit TopCos HMA a un écart constant d'environ 0.14 avec les données d'albédo in situ. Le biais contribue donc pour 63 % à l'EMQ. La dispersion a une contribution légèrement plus forte (78 %).

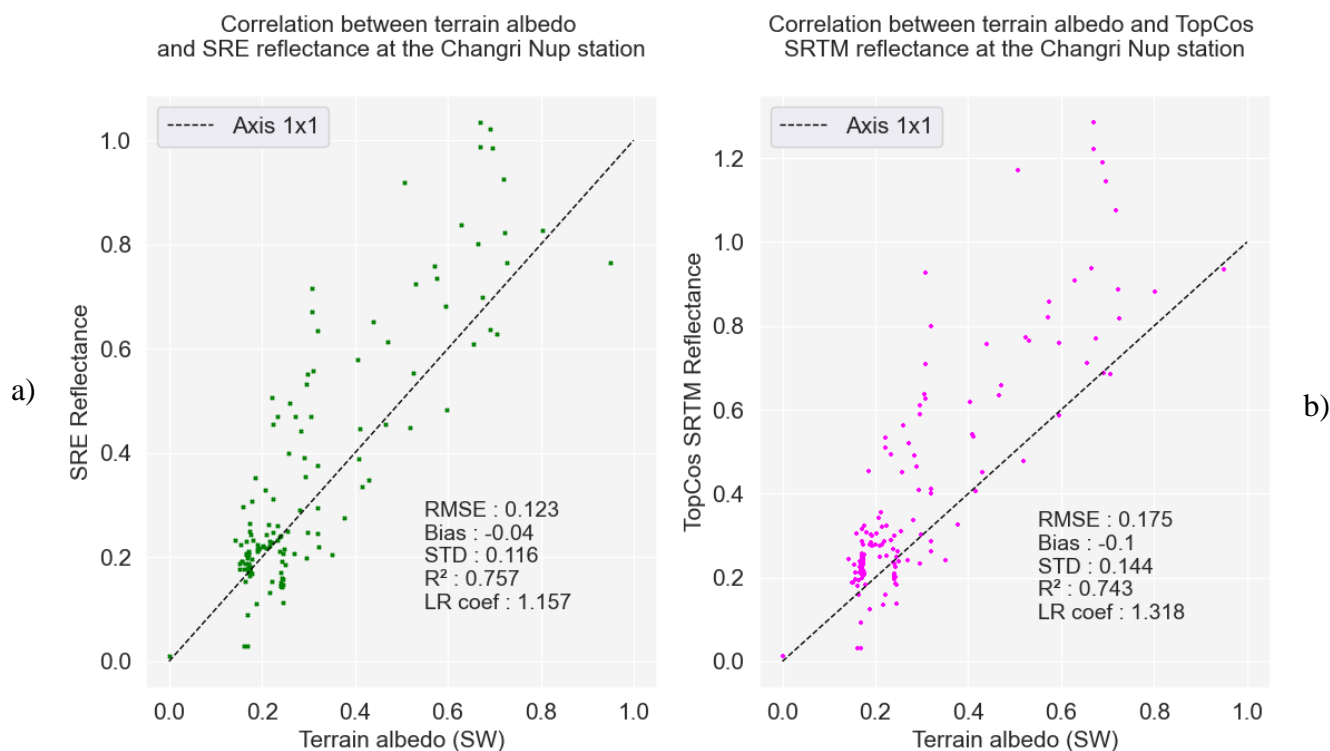


Figure 25 : Comparaison des produits SRE (a) et TopCos SRTM (b) à l'albédo in situ de la station du Changri Nup.

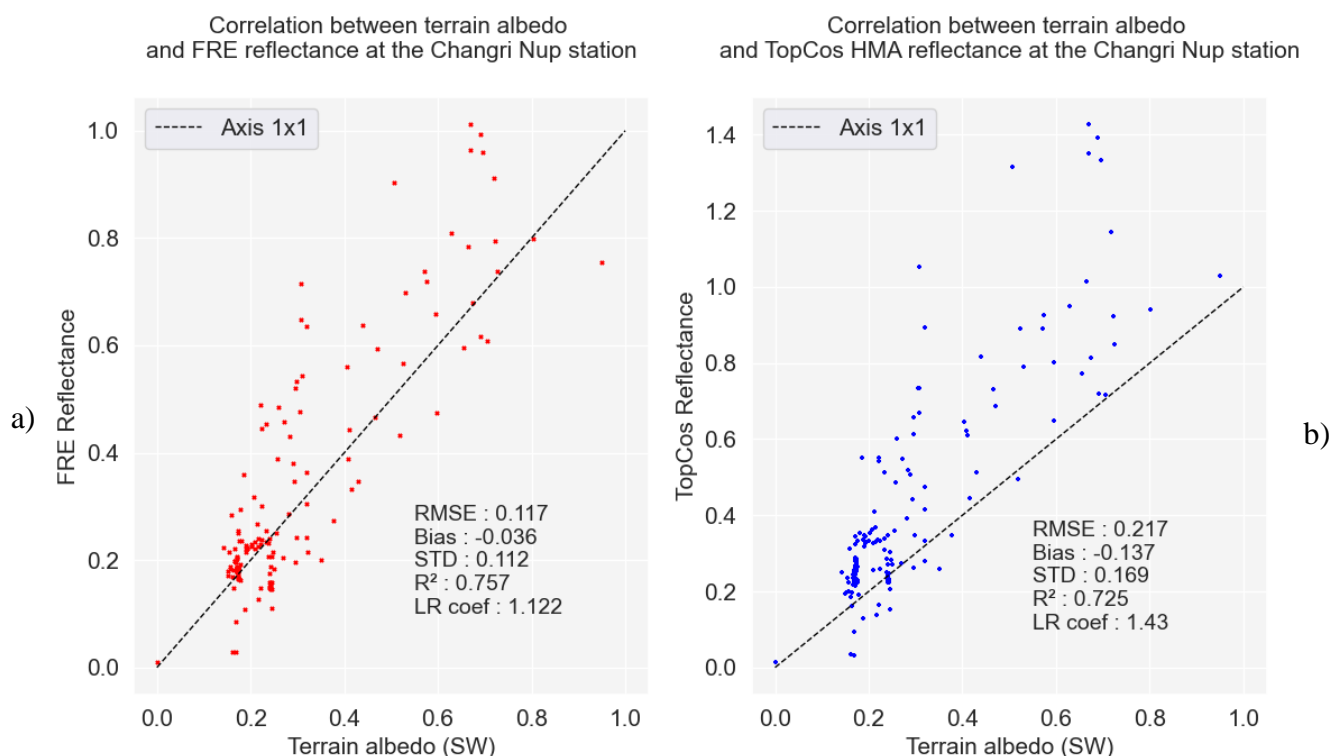


Figure 26 : Comparaison des produits FRE (a) et TopCos HMA (b) à l'albédo in situ de la station du Changri Nup.

La correction Cosine sur-corrige les fortes réflectances. Cet effet a tendance à augmenter le coefficient directeur de la régression linéaire et à diminuer la ressemblance entre les séries et le terrain. La sur-correction étant proportionnelle à la réflectance, elle est responsable du biais introduit dans les données issues des images satellites. La dispersion quant à elle, peut s'expliquer par deux raisons. D'abord, nous cherchons à comparer des variables différentes : l'albédo et la réflectance. Ici, les produits TopCos ne tiennent pas compte du rayonnement diffus. Cela impacte leur ressemblance à l'albédo in situ. Ensuite, la comparaison est faite entre une fenêtre de 15 m x 15 m dans laquelle la réflectance est moyennée, et une zone d'observation autour du capteur de rayonnement in situ. Si la station est dans une zone où le sol est non uniforme, les données satellites et terrain seront moins corrélées.

IV.1.1.3.3 Analyse de la répartition des valeurs de réflectance selon le produit de réflectance

En représentant les valeurs de réflectance par classes, il est possible de comparer la répartition des réflectances dans ces différentes classes, selon le produit. Ainsi, le comportement de la correction peut être analysé.

La Figure 27 (p. 45) représente la répartition des réflectances pour la station de South Col. Pour les réflectances inférieures à 0.6, les quatre produits de réflectances sont très similaires. En revanche, lorsque la réflectance est supérieure à 0.6, on distingue très bien les

produits TopCos des produits du CNES. Le produit FRE n'a aucune valeur supérieure à 0.6 au niveau de la station de South Col. Le produit SRE présente seulement trois valeurs dans cette classe. A contrario, les produits TopCos HMA et TopCos SRTM montrent davantage de valeurs supérieures à 0.6. La seule différence dans la création de ces deux produits est la résolution initiale du MNT (90 m pour TopCos SRTM et 8 m pour le TopCos HMA). En revanche, le TopCos SRTM et le FRE ont été créés avec le même MNT mais une correction différente.

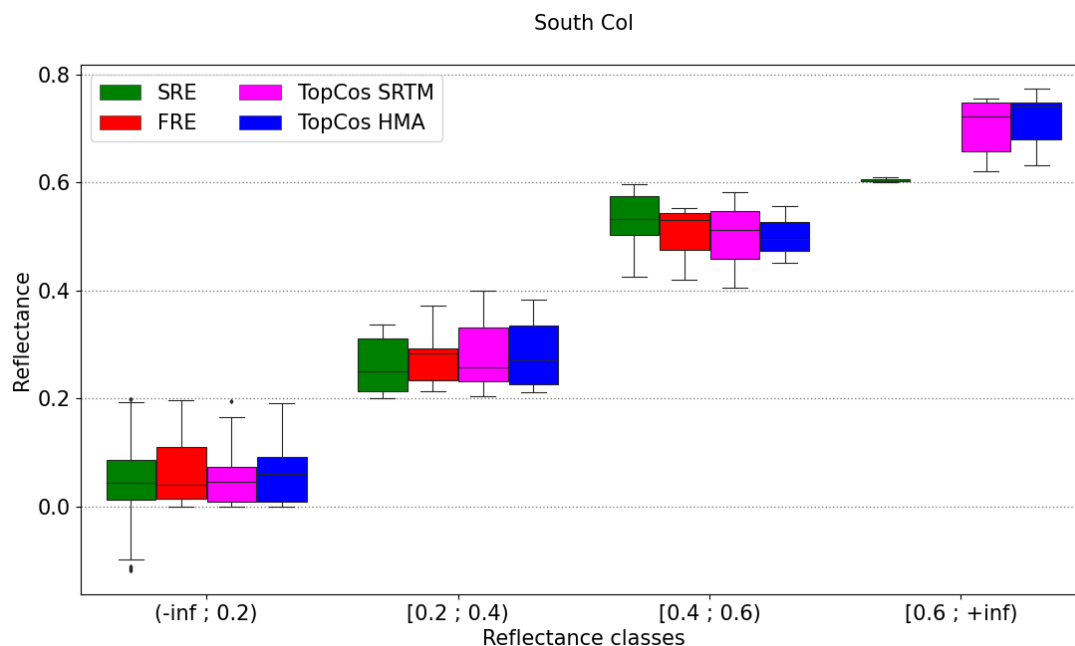


Figure 27 : Répartition des réflectances par type de produit à la station de South Col.

Par conséquent, cette représentation met bien en évidence la sur-correction liée à la méthode Cosine. Les valeurs de fortes réflectances dans le produit initial SRE sont corrigées avec la correction Cosine et voient leurs valeurs amplifiées dans les produits TopCos.

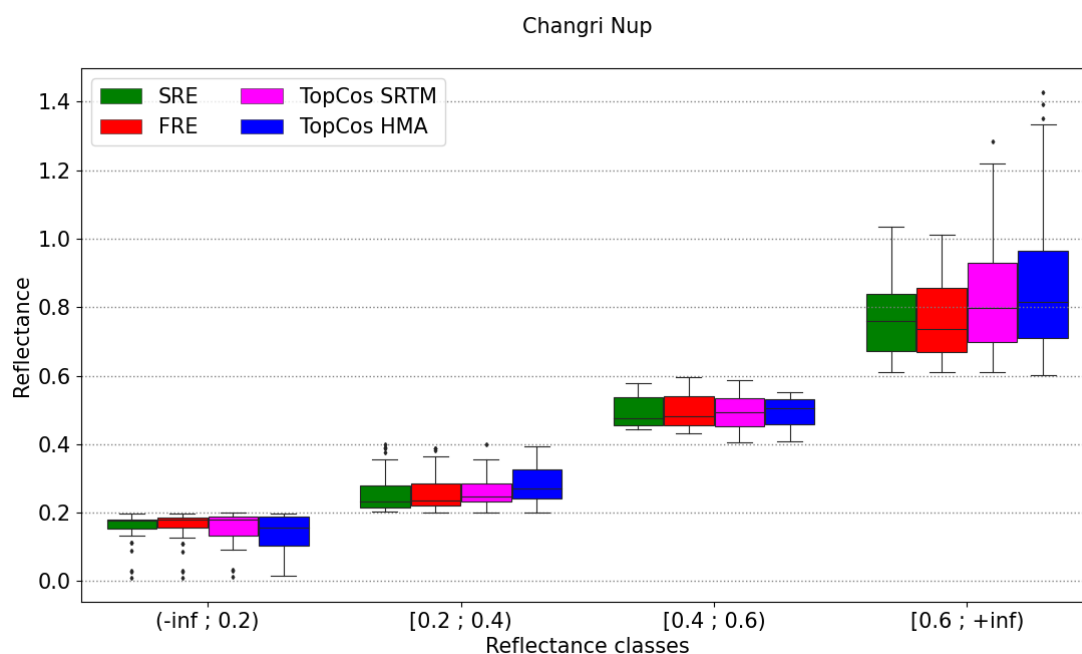


Figure 28 : Répartition des réflectances par type de produit à la station du Changri Nup.

Les résultats présentés dans la Figure 28 (p. 45) concernent la station du Changri Nup. Ils coïncident avec ce que nous observons à la station de South Col (Figure 27, p. 45). Les quatre produits de réflectance ont une répartition des valeurs de réflectance très proche lorsqu'elle n'excède pas 0.6. Au-dessus de ce seuil, les produits TopCos se démarquent par leur nombre élevé d'individus dans la classe supérieure à 0.6.

IV.2 Hydrologie

Lien précipitations-hauteur de neige :

La Figure 29 (p. 46) permet de comparer les précipitations (mm) à la station de Pyramide avec la hauteur de neige (m) à la station du Changri Nup. En 2018, on remarque que pendant la mousson les précipitations sont fréquentes mais la hauteur de neige semble peu varier. Cela indiquerait que les précipitations sont plutôt liquides à cette saison. En revanche, fin 2018 et début 2019, pendant l'hiver, on constate qu'après un pic de précipitation, la hauteur de neige augmente, avant de diminuer progressivement. Cette diminution est due à la fonte de la neige. Pendant la pré-mousson 2019 (de mars à mai) on observe à nouveau ce phénomène de pic de précipitation puis augmentation de la hauteur de neige, avant de chuter à la fin du mois de mai.

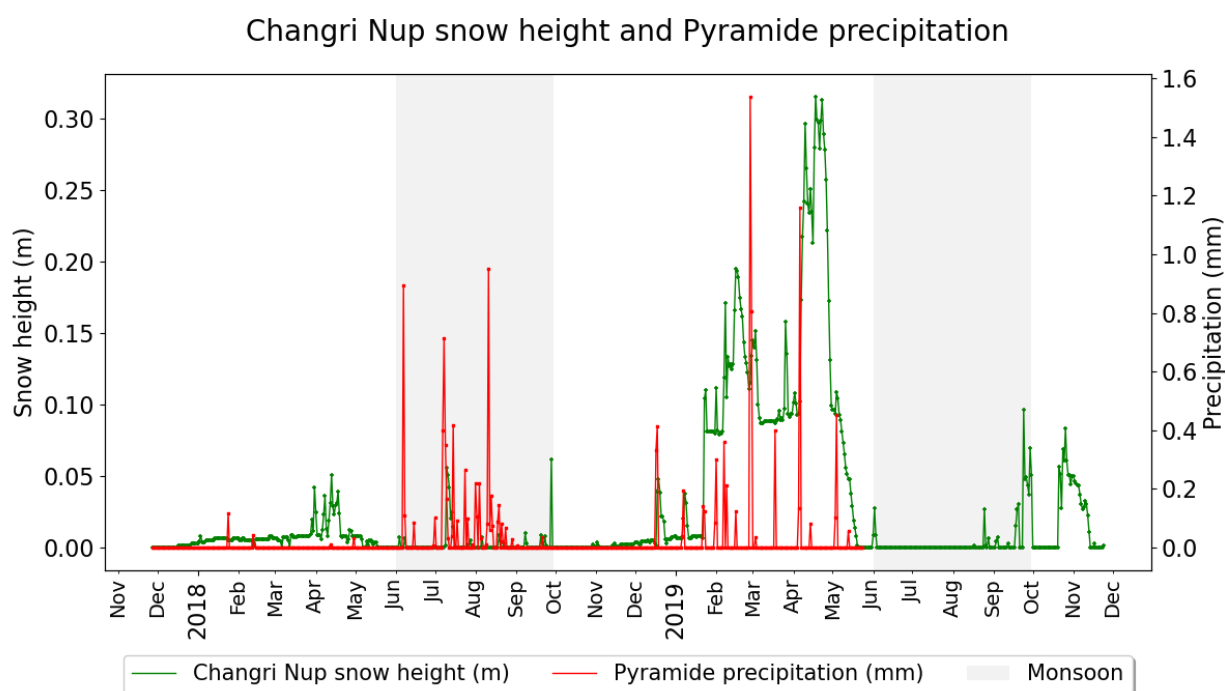


Figure 29 : Évolution temporelle des précipitations à la Pyramide et comparaison avec la hauteur de neige au Changri Nup.

La Figure 30 (p. 47) permet de comparer le pourcentage du bassin versant de Pheriche couvert de neige, à la hauteur de neige au Changri Nup et aux précipitations de la Pyramide. On constate que la courbe du pourcentage de neige (en bleu) et la courbe de la hauteur de neige

au Changri Nup (en vert) suivent des tendances similaires, surtout avant la mousson (zones grisées). C'est un argument en faveur de la qualité du produit SCA permettant de réaliser ces statistiques d'enneigement.

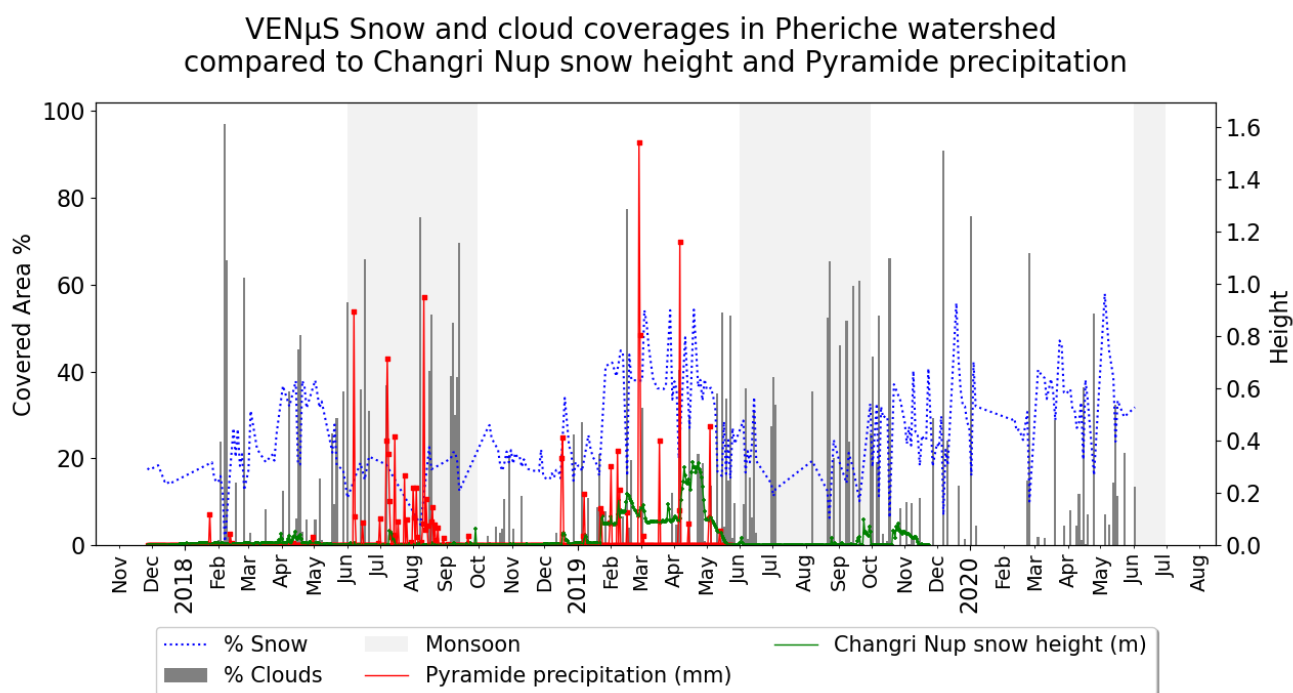


Figure 30 : Évolution des couvertures neigeuses et nuageuses et comparaison aux précipitations et à la hauteur de neige dans le bassin de Pheriche.

Ensuite, si on s'attarde sur la courbe des précipitations à la station de la Pyramide (en rouge) et au pourcentage d'enneigement du bassin versant (histogramme gris foncé), on remarque qu'une couverture nuageuse importante ne signifie pas pour autant de fortes précipitations. Bien entendu, les précipitations sont mesurées seulement à la station de la Pyramide. D'autres points de mesures permettraient d'affiner ces propos.

Finalement, ce que ces éléments permettent de déduire, c'est que ce bassin versant est plus souvent enneigé à la mousson mais que cela n'engendre pas forcément de fortes précipitations. De plus, ces précipitations apportent quelques centimètres de neige en hiver, faisant ainsi augmenter la hauteur de neige et le surface couverte de neige dans le bassin. On remarque aussi qu'à la mousson, l'accumulation de précipitations liquides fait fondre la neige et donc diminuer la surface enneigée du bassin.

IV.3 Climatologie

IV.3.1 Analyse statistique du masque des nuages « CloudCov » créé par notre processus

La Figure 31 (p. 48) montre visuellement l'amélioration obtenue lorsque nous utilisons le traitement réalisé pendant le stage pour créer le produit CloudCov.

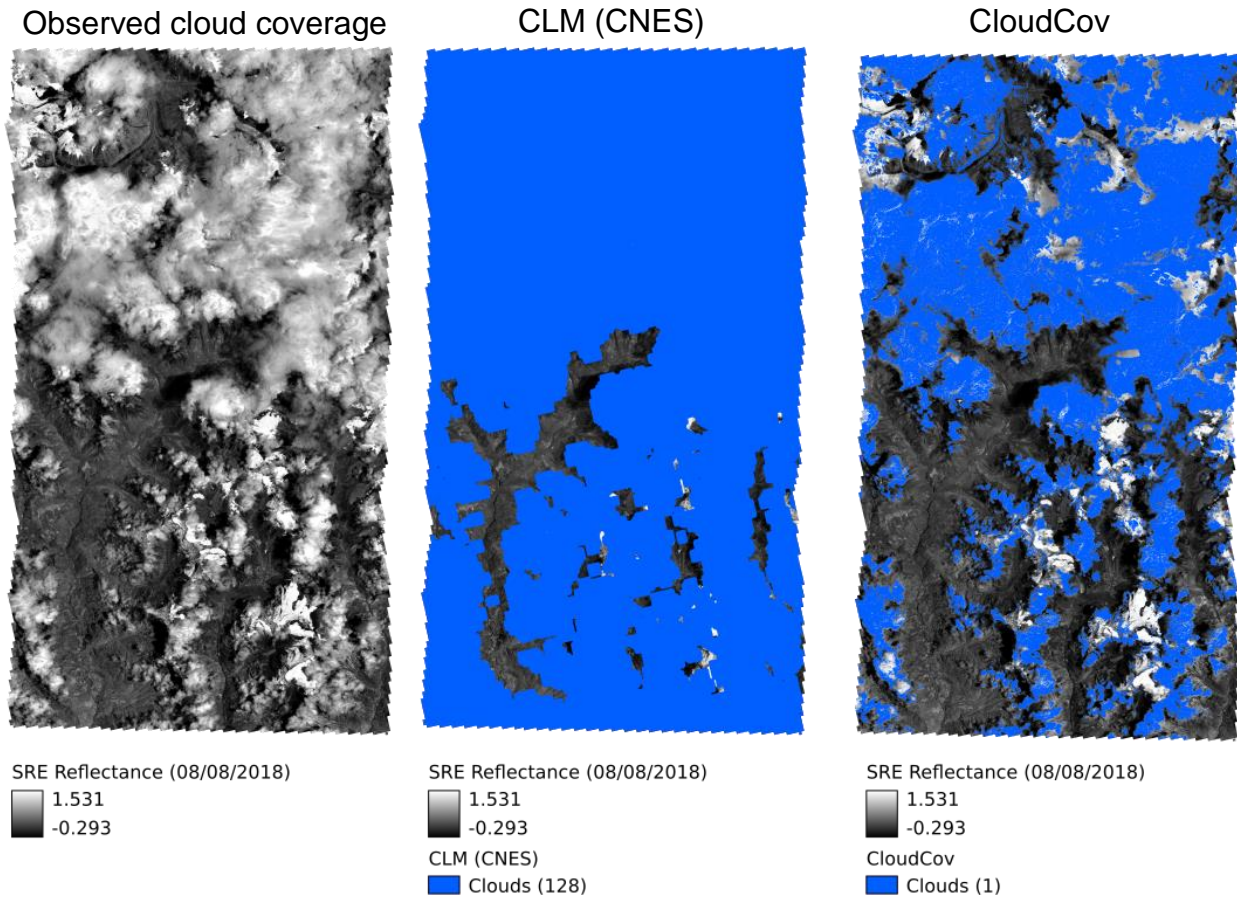


Figure 31 : Comparaison du masque des nuages CLM (CNES) et du masque CloudCov issu de l'algorithme développé, par rapport à la couverture nuageuse observée.

Lorsque l'on réalise les matrices de confusion moyennées, pour les 238 dates VENμS disponibles, sur les masques des nuages du CNES (CLM) et sur les masques issus de l'algorithme (CloudCov) (Figure 32, p. 49), on constate que notre algorithme mis en place améliore considérablement la qualité du résultat.

Le masque CloudCov présente 84 % de vrais négatifs contre 69 % pour le masque CLM (CNES). Le nombre de vrais positifs est très proche pour les masques CLM et CloudCov avec respectivement 12 % et 11 %. Enfin, le masque CloudCov inclut beaucoup moins de faux positifs (4.5 % contre 19 % dans le CLM). Au total, le masque CloudCov présente 95 % de pixels bien classés contre seulement 81 % dans le masque CLM.

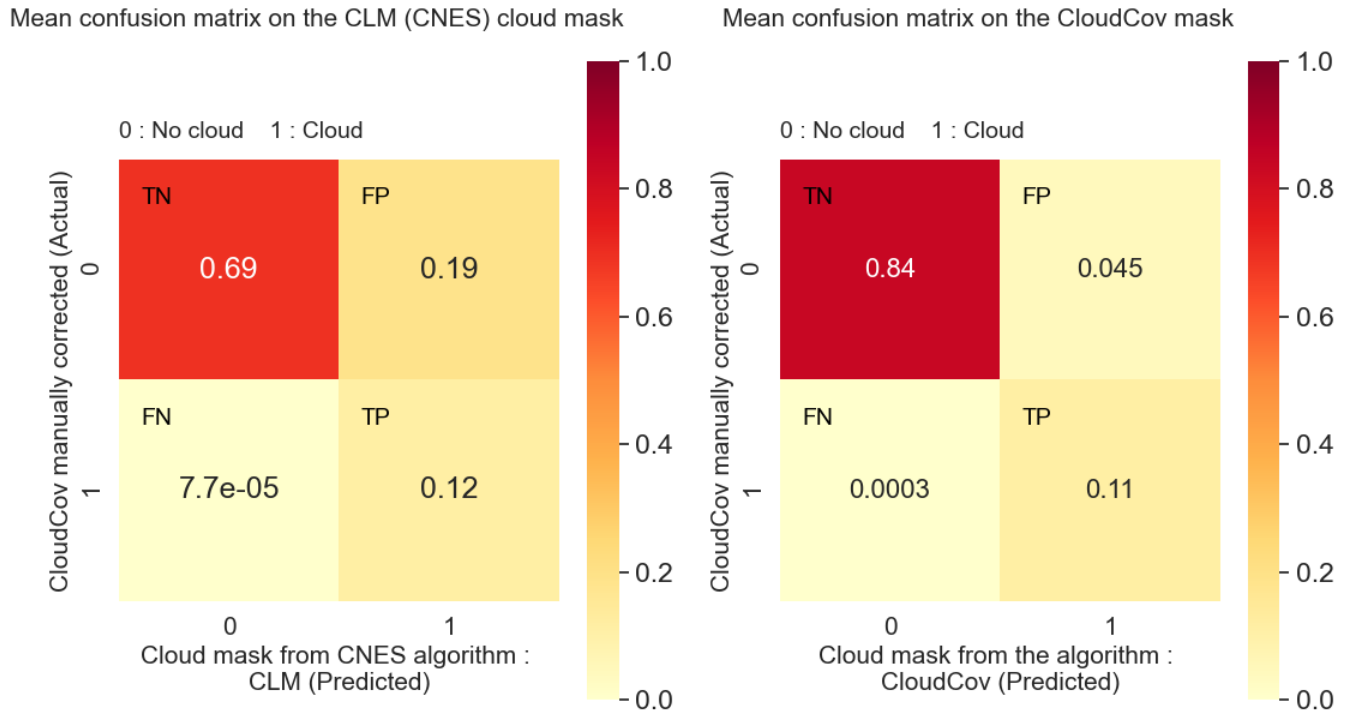


Figure 32 : Matrices de confusion du masque CLM (CNES) et du masque CloudCov.

Le rappel, la précision et l'exactitude sont élevés ce qui témoigne encore une fois de la qualité du masque CloudCov créé (Tableau 3, p. 49).

	Recall	Accuracy	Precision	Kappa
	$\frac{TP}{TP + FN}$	$\frac{TP + TN}{Total}$	$\frac{TP}{TP + FP}$	$\frac{T_C T_{BC} - \sum_k T_{Ck} T_{Pk}}{T_C^2 - \sum_k T_{Ck} T_{Pk}}$
CLM	99.9%	80.9%	37.6%	45.6%
CLOUDCOV	99.7%	95.5%	72.1%	81.2%

$$\sum_k T_{Ck} T_{Pk} = (TN + FP) \times (TN + FN) + (FN + TP) \times (TP + FP)$$

T_{Ck} : Nombre de pixels classés dans la classe k

T_{Pk} : Nombre de pixels de l'échantillon test k

TN : True Negative

TP : True Positive

FN : False Negative

FP : False positive

Tableau 3 : Évaluation qualitative et quantitative des masques CLM (CNES) et CloudCov.

Le coefficient Kappa (Cohen, 1960) est un coefficient de concordance. Il permet de mesurer la concordance observée (diagonales de la matrice de confusion) moins la concordance aléatoire (produit des lignes et colonnes). Ce coefficient prend en compte l'erreur d'omission et l'erreur de commission (Rosenfield et Fitzpatrick-Lins, 1986). Le coefficient Kappa étant élevé, ici, le produit issu de l'algorithme réalisé concorde bien avec l'échantillon de contrôle.

IV.3.2 Analyse de l'ennuagement et de l'enneigement à l'échelle des bassins versants de Dingboche et Pheriche

La réalisation de cartes de la couverture neigeuse, spécifiant également les zones nuageuses, permet de comparer la dynamique des deux bassins versants.

La Figure 33 (p. 50) représente le pourcentage de la superficie de chaque bassin couvert par de la neige ou des nuages. En comparant ainsi les deux bassins, nous constatons qu'ils suivent des tendances similaires et cohérentes avec les saisons. En hiver, d'octobre à février, peu de nuages, une couverture neigeuse assez régulière qui augmente en février. Pendant la pré-mousson, de mars à mai, une couverture neigeuse qui diminue progressivement et des nuages plus présents. Enfin, pendant la mousson, de juin à septembre, peu de neige détectée, en raison de la couverture nuageuse plus importante et au manque d'images VENμS disponibles dans cette période (II.2).

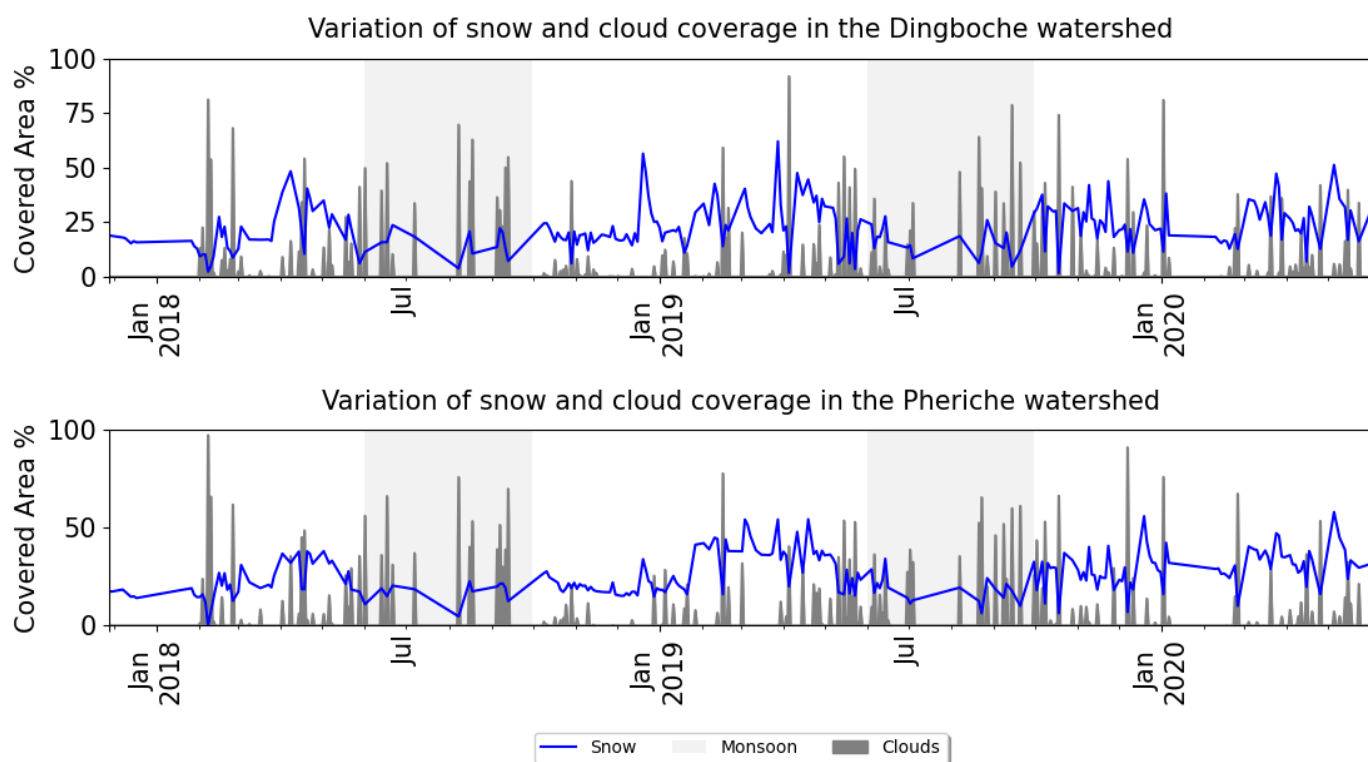


Figure 33 : Couvertures neigeuses et nuageuses des bassins versants de Dingboche et Pheriche.

Lorsque nous observons ce même graphique avec une interpolation linéaire entre chaque donnée VENμS disponible, nous obtenons la Figure 34 (p. 51). Il est alors encore plus facile de distinguer la mousson (zones grisées), avec une importante couverture nuageuse, de l'hiver où la couverture neigeuse est supérieure à la couverture nuageuse. Il est important de noter que

cela ne montre pas qu'il y a moins de neige pendant la mousson. Nous ne pouvons simplement pas détecter la neige sous les nuages avec les outils de la télédétection optique.

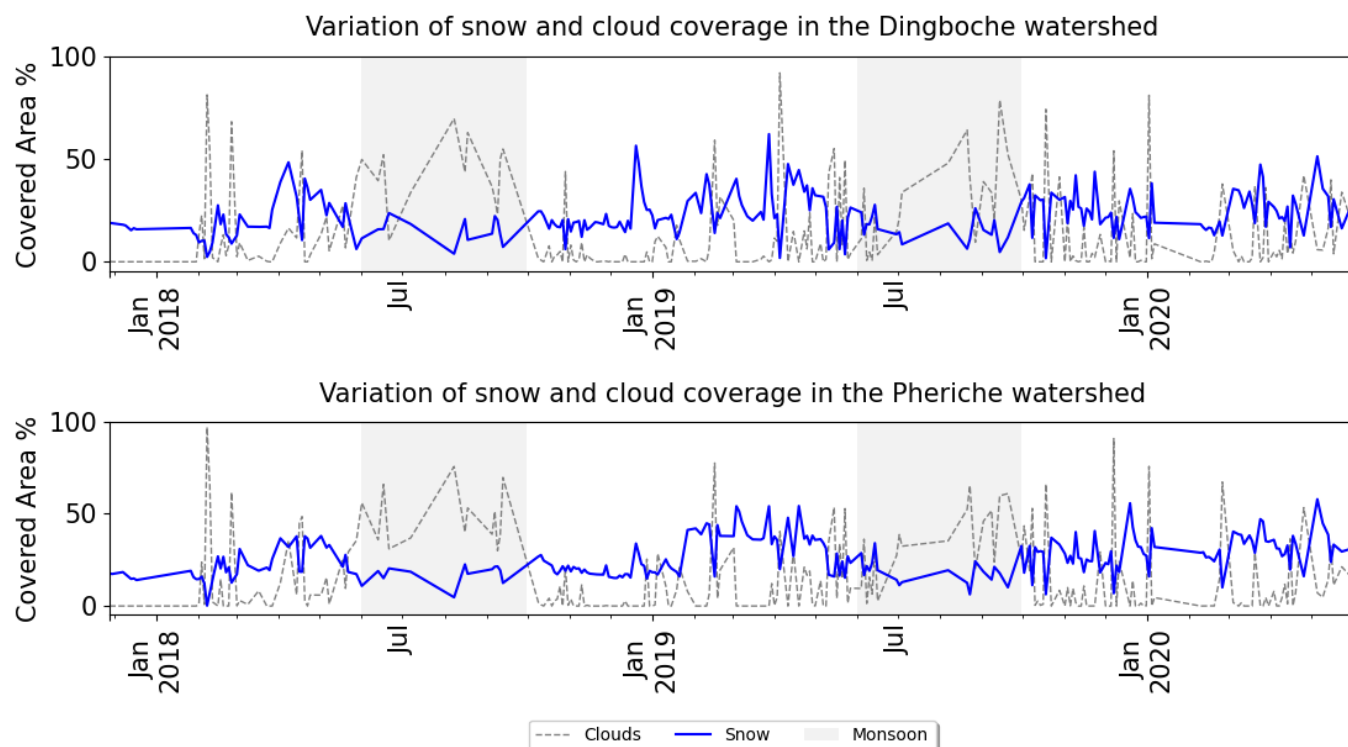


Figure 34 : Couvertures neigeuses et nuageuses des bassins versants de Dingboche et Pheriche interpolées.

Enfin, la Figure 35 (p. 51) présente l'évolution de la couverture neigeuse des bassins versants de Dingboche et Pheriche. Les deux bassins suivent la même tendance. Cela peut être surprenant car le bassin de Dingboche contient un versant de l'Everest contrairement au bassin de Pheriche. On aurait alors tendance à penser que ce bassin présente davantage de neige au cours des saisons étudiées.

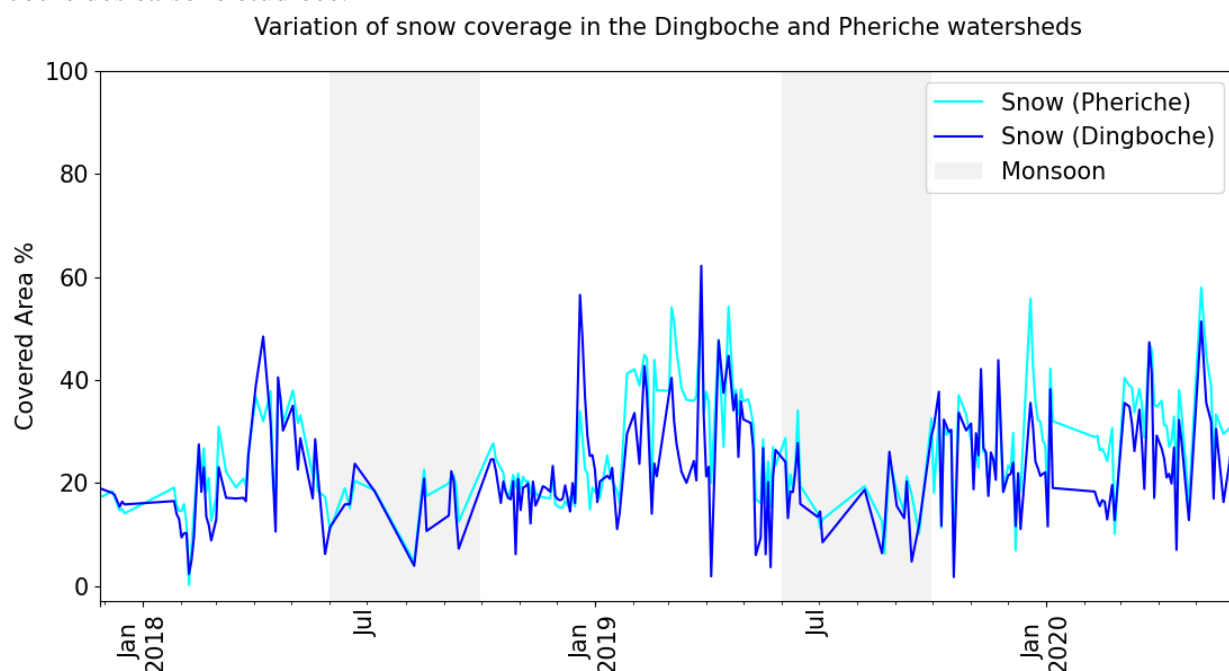


Figure 35 : Évolution de la couverture neigeuse des bassins de Dingboche et Pheriche.

IV.3.3 Analyse de l'enneuagement dans la région de l'Everest

La Figure 36 (p. 52) est une synthèse des travaux réalisés sur les nuages.

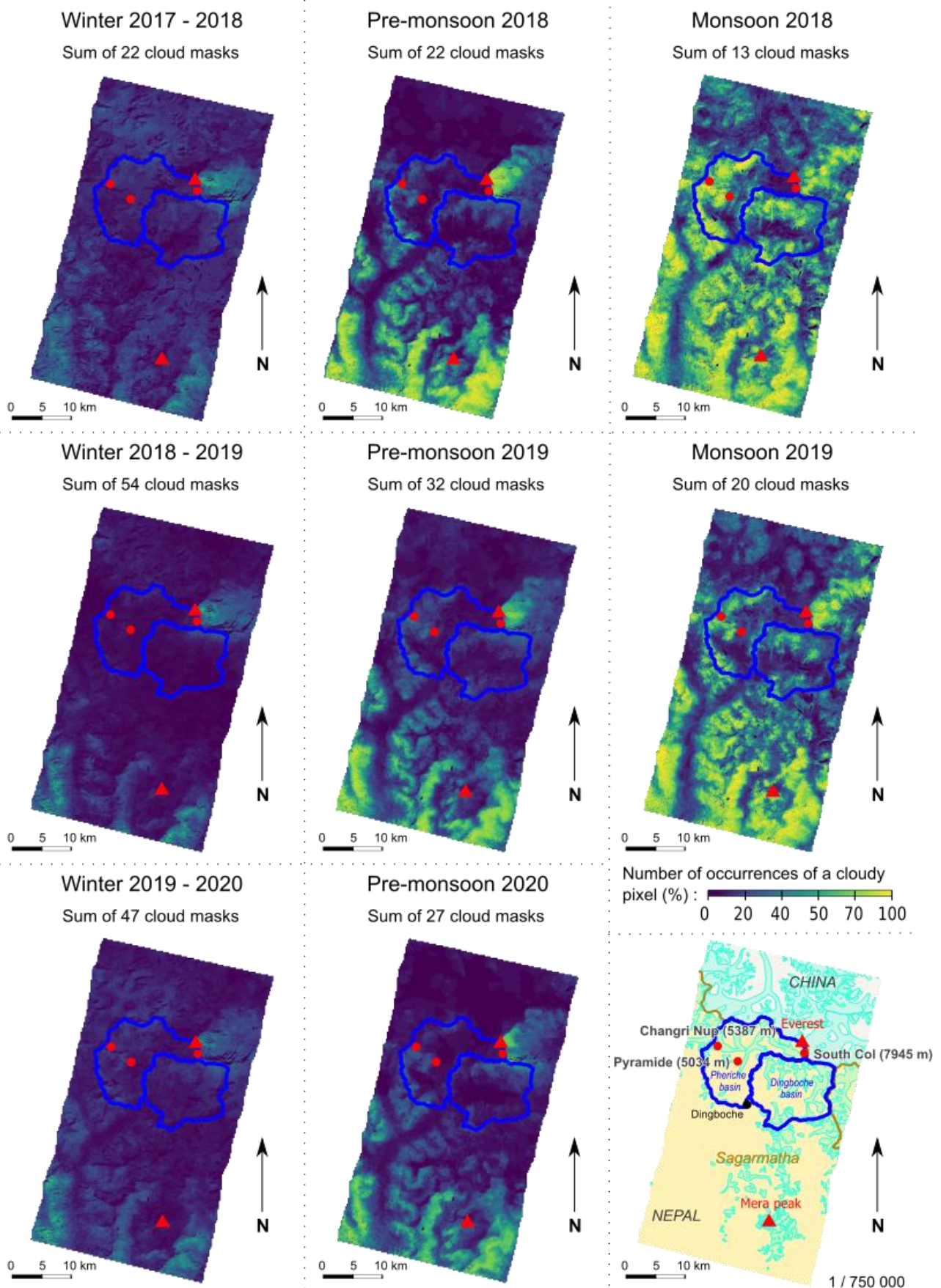


Figure 36 : Évolution saisonnière de la couverture nuageuse.

On peut ainsi distinguer l'évolution de l'enneigement au cours des différentes saisons. L'hiver correspond aux mois d'octobre à février, la pré-mousson s'étend de mars à mai et la mousson de juin à septembre.

Pour chaque hiver représenté, on remarque un effet orographique au niveau de l'Everest. Des vents venant de l'ouest (en : westerlies) viennent déplacer la neige de l'Everest formant ainsi un panache de neige toujours au-dessus du glacier Kangshung, situé à l'est de l'Everest. Ce phénomène suit un gradient ouest/est et projette la neige dans l'atmosphère ce qui forme des nuages.

Pendant la pré-mousson, nous observons les prémices de la mousson avec des nuages qui remontent depuis le sud vers le nord, dans les vallées. Le panache de neige à l'est de l'Everest s'accroît.

Enfin, à la mousson, les nuages s'accumulent dans les vallées. Ils suivent un gradient sud/nord et sont caractéristiques de la mousson.

A l'aide de la Figure 37 (p. 53), nous pouvons voir que les nuages arrivant par le sud (Figure 36, p. 52) lors de la pré-mousson et de la mousson sont à une altitude inférieure à 5000 m.

La qualité et la confiance que l'on peut donner à ces cartes saisonnières dépend du nombre d'images VENμS disponibles pendant les différentes saisons. Plus leur nombre est important, plus la carte est fidèle à ce qui se déroule sur place.

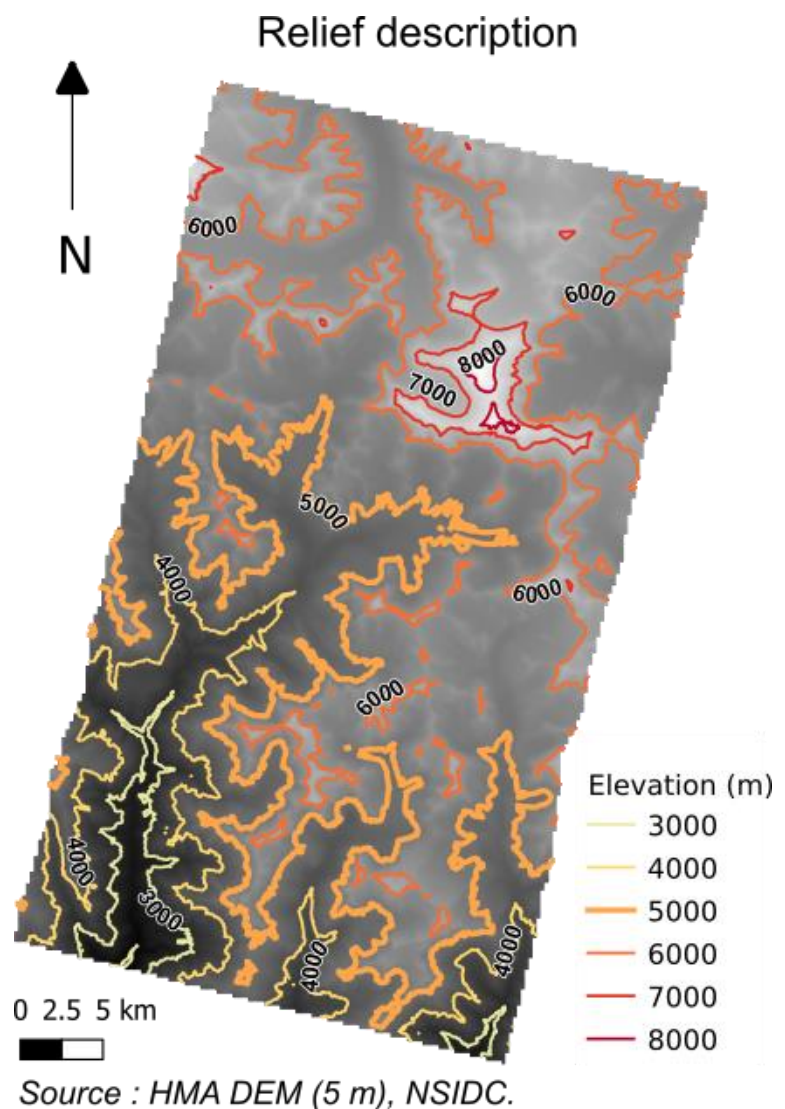


Figure 37 : Altimétrie de la zone d'étude.

IV.4 Discussion

IV.4.1 Produit TopCos

L'étude du produit TopCos HMA révèle qu'utiliser un MNT haute résolution permet une meilleure description du relief avec une variation élevée de la réflectance dans un même voisinage. Réaliser la correction des images VENμS SRE du CNES avec la méthode Gamma et le MNT HMA à 5 m pourrait considérablement améliorer notre connaissance de ce territoire. Cependant, la correction Gamma est complexe à mettre sous forme d'algorithme car elle fait appel au rayonnement diffus dans l'espace. Ainsi, de nombreuses variables sont nécessaires à sa mise en œuvre. La méthode Cosine est une bonne alternative permettant de profiter des améliorations dues à l'utilisation du MNT à 5 m tout en ayant recours à seulement quatre éléments : pente, exposition, azimuth solaire et zénith solaire.

La comparaison avec le produit FRE du CNES révèle que pour des stations régulièrement enneigées, les produits FRE et TopCos HMA sont proches statistiquement et suivent relativement bien la tendance de l'albédo mesuré *in situ* (IV.1.1.3.2). On constate en revanche l'effet de sur-correction des hautes réflectances dû à la méthode Cosine (IV.1.1.3.3). L'apport en précision dans la description du territoire est appréciable pour la réalisation des cartes de neige.

IV.4.2 Cartes de neige « SCA » (Snow Cover Area)

Les cartes de neige possèdent quatre classes : neige, nuages, no data et autres couverts. Une cinquième classe pourrait être créée pour contenir l'eau (lac, rivière), car les lacs sont actuellement classés dans la classe neige quand ils sont gelés et recouverts de neige. Cependant, l'apport de la neige couvrant les lacs dans l'hydrologie locale est différent de l'apport de la neige en altitude sur les glaciers.

Les travaux de la littérature scientifique utilisent principalement les cartes SCA issues du satellite MODIS et de la chaîne MODImLAB (Masson et al., 2018) réalisées avec une résolution de 250 m. Proposer un produit à la résolution de 5 m permet une meilleure connaissance de l'apport en eau que peuvent donner les glaciers aux vallées au sud de l'Everest.

Les cartes de neige ont pour but d'entrer dans un modèle hydrologique qui, habituellement, prend en compte des cartes simulées à la résolution de 250 m, tandis que les cartes réalisées avec les images VENμS ont une résolution de 5 m. Par conséquent, l'impact de cette mauvaise classification des lacs devrait rester moindre.

IV.4.3 Cartes d'ennuagement binaires

L'observation de l'ennuagement de la région permet de distinguer les nuages de la mousson et les nuages de haute altitude pendant la saison hivernale qui apportent de la neige sur les glaciers.

Les cartes d'occurrence réalisées à partir des cartes d'ennuagement binaires, révèlent un effet orographique dû à l'Everest et sa face exposée au nord-ouest. Les vents forts d'ouest viennent souffler la neige vers l'est, formant alors un panache qui reste au-dessus du glacier de Kangshung (Tibet). Cela contribue probablement à son alimentation en neige.

Le produit CloudCov est également intéressant pour visualiser, annuellement, l'évolution de la mousson et sa progression du sud au nord dans les vallées.

Conclusions

Dans des régions difficilement accessibles comme l'Himalaya, le recours à la télédétection optique afin de connaître davantage les processus est une excellente alternative. A défaut de pouvoir réaliser des mesures météorologiques facilement dans cette chaîne de montagnes, être en mesure d'observer, depuis l'espace, les phénomènes qui se déroulent dans ces régions de très haute altitude, nous apporte de précieuses informations.

Cependant, les capteurs optiques ont l'inconvénient de ne pas pénétrer les nuages, du fait des longueurs d'onde utilisées. Il paraît alors indispensable de pouvoir tirer profit de stations météorologiques in situ. De plus, un traitement de correction d'éclairement est nécessaire avant d'exploiter les images VEN μ S. En effet, sans cette correction, il est difficile de distinguer deux mêmes couverts exposés respectivement à l'ombre et au soleil. Pour réaliser cette correction, la méthode Cosine (Civco, 1989; Teillet et al., 1982) est une alternative relativement efficace. D'abord parce que sa mise en œuvre reste simple et rapide. Ensuite parce qu'elle permet d'obtenir des résultats proches de ce qui est observé au sol.

La méthode Cosine est souvent utilisée pour sa simplicité. En revanche, elle présente certaines limites. Tout d'abord, elle introduit des valeurs no data puisqu'on ne peut pas corriger les pixels pour lesquels le cosinus de l'angle d'illumination est inférieur à 0.2. Ensuite, parce qu'elle sur-corrige les fortes réflectances et donc impacte fortement les versants enneigés exposés au soleil. Cette sur-correction semble plus élevée pour des pentes fortes. La méthode Gamma utilisée par le CNES pour produire les images FRE a l'avantage de prendre en compte le rayonnement diffus, réduisant ainsi les éventuelles sur-corrections.

Le choix d'un modèle numérique du terrain d'une résolution proche de la résolution des images étudiées est important. Bien que les comparaisons des classes de réflectances des quatre produits (IV.1.1.3.3) ne montrent pas l'apport d'un MNT de haute résolution (TopCos HMA et TopCos SRTM sont relativement similaires), l'analyse des soustractions entre les différents produits met en évidence son impact. Les produits FRE (CNES) et TopCos SRTM, réalisés avec un MNT à 90 m, ont des réflectances homogènes (la variation est faible dans un même voisinage), bien qu'ils n'aient pas été corrigés avec la même méthode (gamma pour le FRE et Cosine pour le TopCos SRTM). Ce n'est donc pas la méthode de correction qui impacte cet aspect des images. Le TopCos HMA, corrigé grâce au MNT à 8 m, montre une variation de la réflectance, dans un même voisinage, très forte et une description plus fine du territoire. Ce gain de finesse permet de mieux détecter la neige et donc de réaliser des cartes de neige plus fiables

mais aussi de distinguer plus facilement les nuages, grâce à l'indice de végétation, calculé sur les bandes rouge et proche infrarouge corrigées par la méthode Cosine, avec le MNT à 8 m. Il faut tout de même noter qu'en ayant recours à un MNT aussi fin, des artefacts se créent, notamment dans les moraines, à cause des débris des glaciers. Ces artefacts sont autant de no data qui s'ajoutent dans le produit final. L'application d'un algorithme d'érosion-dilatation est une amélioration possible du produit TopCos HMA, afin de diminuer le nombre de pixels no data isolés dans l'image.

La réalisation du produit TopCos HMA permet ensuite de créer un NDVI, utile pour la détection des nuages et de la neige.

Les masques des nuages réalisés grâce à l'algorithme développé pendant ce stage offrent plus d'informations que les masques des nuages du CNES. En faisant appel à des paramètres texturaux et radiométriques, nous parvenons à affiner le masque du CNES pour récupérer de l'information au sol, notamment les vallées, et la neige. La précision et l'exactitude du résultat montrent la qualité de notre méthodologie. Il faut cependant garder en tête que notre algorithme ne masque pas les ombres des nuages, contrairement à l'algorithme MAJA utilisé par le CNES.

De plus, le procédé que nous avons développé s'attache surtout à détecter les nuages, il est donc rare que lors de la correction manuelle, nous ayons à détecter nous même un nuage. Bien souvent, nous devons seulement exclure certaines zones des nuages. Cela influence la matrice de confusion et explique le faible pourcentage de faux négatifs. Initier une comparaison entre le masque CloudCov et les masques de nuages issus d'autres capteurs pourrait être intéressant. A noter cependant qu'une comparaison temporelle est délicate puisque les nuages sont des éléments mobiles dans l'espace et que les acquisitions satellites n'ont pas lieu au même instant.

Enfin, les cartes de neige créées sont composées de quatre classes (neige, nuages, autres couverts et no data). Une cinquième pourrait être introduite pour classer l'eau, notamment les lacs présents dans les bassins versants. En effet, la contribution de la neige sur ces lacs gelés est différente de celle de la neige sur les glaciers. Néanmoins, ces cartes sont destinées à un modèle qui, habituellement, prend en entrée des données à la résolution de 250 m pour simuler des cartes de neige. Il semble évident que l'impact de la mauvaise classification de ces lacs, dans des cartes à la résolution de 5 m, sera moindre dans le test de ce modèle hydrologique.

En parallèle, une étude de l'utilisation de la classification supervisée ou non supervisée, pour cartographier la neige à partir des images VENμS et Sentinel-2, a été réalisée par Mohamed Wassim Baba récemment (Baba et al., 2020).

Un travail sur la réalisation d'un masque des ombres projetées du relief a été initié. Son développement pourrait permettre de définir la qualité des cartes SCA produites en tenant compte de l'erreur de classement pour la neige dans les zones initialement à l'ombre. Plus de détails sur ce travail sont donnés en Annexe 10 (p. 74).

Pour conclure, utiliser un MNT haute résolution combiné à une méthode de correction de type « Gamma » tenant compte du rayonnement diffus semble être la meilleure alternative pour obtenir des images de réflectance comparables à l'albédo in situ. Cette combinaison aurait pour avantage de tirer profit de la fine description du relief apportée par le MNT tout en évitant d'introduire des no data et en limitant une sur-correction des zones enneigées exposées aux rayonnements solaires. Ainsi, les masques des nuages et les cartes de neige n'en seraient qu'améliorées, puisqu'ils ne présenteraient plus de no data et que la limitation de la sur-correction éviterait la confusion neige-nuage.

Du point de vue professionnel, ce travail de recherche m'aura permis d'améliorer considérablement mes compétences en programmation (Python), tout en me confirmant que j'apprécie la démarche de recherche scientifique. Pour mon avenir, cela me donnera l'occasion de mettre au profit de mon employeur, à la fois mes connaissances en programmation et ma curiosité, pour améliorer les processus de traitement des données mis en place.

Bibliographie

- Baba, M.W., Gascoin, S., Hagolle, O., Bourgeois, E., Desjardins, C., Dedieu, G., 2020. Evaluation of Methods for Mapping the Snow Cover Area at High Spatio-Temporal Resolution with VEN μ S.
- Bouchard, B., Eeckman, J., Dedieu, J.-P., Delclaux, F., Chevallier, P., Gascoin, S., Arnaud, Y., 2019. On the Interest of Optical Remote Sensing for Seasonal Snowmelt Parameterization, Applied to the Everest Region (Nepal). *Remote Sens.* 11, 2598.
- Civco, D.L., 1989. Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 55, 1303-1309.
- CNES | Le site du Centre national d'études spatiales [WWW Document], s. d. URL <https://cnes.fr/fr/> (consulté le 6.9.20).
- Cohen, J., 1960. A coefficient of agreement for nominal scales XX, 37-46.
- Davaze, L., Rabatel, A., Arnaud, Y., Sirguey, P., Six, D., Letreguilly, A., Dumont, M., 2018. Monitoring glacier albedo as a proxy to derive summer and annual surface mass balances from optical remote-sensing data. *Cryosphere* 12, 271-286.
- Davaze, L., Rabatel, A., Dufour, A., Arnaud, Y., Hugonnet, R., 2020. Region-wide annual glacier surface mass balance for the European Alps from 2000 to 2016.
- Dozier, J., 1989. Spectral signature of alpine snow cover from the landsat thematic mapper. *Remote Sens. Environ.* 28, 9-22.
- Dozier, J., Bruno, J., Downey, P., 1981. A faster solution to the horizon problem. *Comput. Geosci.* 7, 145-151.
- Eeckman, J., Chevallier, P., Boone, A., Neppel, L., De Rouw, A., Delclaux, F., Koirala, D., 2017. Providing a non-deterministic representation of spatial variability of precipitation in the Everest region. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1-21.
- GDAL — GDAL documentation [WWW Document], s. d. URL <https://gdal.org/> (consulté le 6.9.20).
- Glossaire des termes de télédétection | Ressources naturelles Canada [WWW Document], s. d. URL <https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-publications/imagerie-satellitaire-photos-aer/imagerie-satellitaire-produits/ressources-educatives/glossaire-des-termes-de-teledetection/9484> (consulté le 6.3.20).
- Hagolle, O., s. d. Les réflectances peuvent-elles être supérieures à un ? – Séries Temporelles [WWW Document]. URL <https://labo.obs-mip.fr/multitemp/comment-ca-marche-les-reflectances-peuvent-elles-etre-superieures-a-un/> (consulté le 6.22.20a).
- Hagolle, O., s. d. Les grandeurs radiométriques : éclairement, luminance, réflectance – Séries Temporelles [WWW Document]. URL <https://labo.obs-mip.fr/multitemp/les-grandeurs-radiometriques-eclairement-luminance-reflectance/> (consulté le 6.22.20b).
- Hagolle, O., Huc, M., Desjardins, C., Auer, S., Richter, R., 2017. MAJA ATBD Algorithm

Theoretical Basis Document, Development.

Haralick, R.M., 1979. Statistical and structural approaches to texture. *Proc. IEEE* 67, 786-804.

Haralick, R.M., Shanmugam, K., Dinstein, I., 1973. Textural Features for Image Classification. *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. SMC-3*, 610-621.

HaralickTextureExtraction — Orfeo ToolBox 7.1.0 documentation [WWW Document], s. d. URL https://www.orfeo-toolbox.org/CookBook/Applications/app_HaralickTextureExtraction.html (consulté le 6.9.20).

IPCC, 2019a. Special Report: The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Intergov. Panel Clim. Chang.

IPCC, 2019b. Special Report: Global Warming of 1.5 C, Intergovernmental Panel on Climate Change.

JCGM, 2012. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM).

Lliboutry, L., 1992. Sciences géométriques et télédétection, Masson. ed. Paris, France.

MAJA | LOGICIELS CNES [WWW Document], s. d. URL <https://logiciels.cnes.fr/fr/content/maja> (consulté le 8.13.20).

Masson, T., Dumont, M., Mura, M.D., Sirguey, P., Gascoin, S., Dedieu, J.P., Chanussot, J., 2018. An assessment of existing methodologies to Retrieve Snow Cover Fraction from MODIS Data. *Remote Sens.* 10, 0-20.

Meyer, P., Itten, K.I., Kellenberger, T., Sandmeier, S., Sandmeier, R., 1993. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 48, 17-28.

Millan, R., Mouginot, J., Rabatel, A., Jeong, S., Cusicanqui, D., Derkacheva, A., Chekki, M., 2019. Mapping surface flow velocity of glaciers at regional scale using a multiple sensors approach. *Remote Sens.* 11, 1-21.

Mimeau, L., 2018. Quantification des contributions aux écoulements dans un bassin englacé par modélisation glacio-hydrologique : Application à un sous-bassin de la Dudh Koshi (Népal , Himalaya). Université Joseph Fourier de Grenoble.

Mimeau, L., Esteves, M., Zin, I., Jacobi, H.W., Brun, F., Wagnon, P., Koirala, D., Arnaud, Y., 2019. Quantification of different flow components in a high-altitude glacierized catchment (Dudh Koshi, Himalaya): Some cryospheric-related issues. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 23, 3969-3996.

Muscate - Atelier de distribution [WWW Document], s. d. URL <https://theia.cnes.fr/atdistrib/rocket/#/home> (consulté le 6.9.20).

Naz, B.S., Frans, C.D., Clarke, G.K.C., Burns, P., Lettenmaier, D.P., 2014. Modeling the effect of glacier recession on streamflow response using a coupled glacio-hydrological model.

- Painter, T.H., Skiles, S.M.K., Deems, J.S., Brandt, W.T., Dozier, J., 2018. Variation in Rising Limb of Colorado River Snowmelt Runoff Hydrograph Controlled by Dust Radiative Forcing in Snow. *Geophys. Res. Lett.* 45, 797-808.
- Polidori, L., 1997. *Cartographie Radar*. Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, Pays-Bas.
- Rayonnement — Wikipédia [WWW Document], s. d. URL <https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement> (consulté le 6.22.20).
- Réflectance de surface Venus — THEIA-LAND [WWW Document], s. d. URL <https://www.theia-land.fr/product/venus-2/> (consulté le 6.9.20).
- Remote Sensing Glossary - AWF-Wiki [WWW Document], s. d. URL http://wiki.awf.forst.uni-goettingen.de/wiki/index.php/Remote_Sensing_Glossary (consulté le 6.3.20).
- Résolution spatiale, espacement des pixels et échelle | Ressources naturelles Canada [WWW Document], s. d. URL <https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-publications/imagerie-satellitaire-photos-aer/tutoriels-sur-la-teledetection/plates-formes-capteurs/resolution-spatiale-espacement-des-pixels-et-echelle/9408> (consulté le 7.2.20).
- Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., Aguado, I., 2003. Assessment of different topographic corrections in landsat-TM data for mapping vegetation types (2003). *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41, 1056-1061.
- Richter, R., Kellenberger, T., Kaufmann, H., 2009. Comparison of topographic correction methods. *Remote Sens.* 1, 184-196.
- Rosenfield, G.H., Fitzpatrick-Lins, K., 1986. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 52, 223-227.
- Rouse Jr., J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1974. Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. In: NASA SP-351, 3rd ERTS-1 Symposium.
- Service d'Observation GLACIOCLIM - Les GLACIers, un Observatoire du CLIMat [WWW Document], s. d. URL <https://glacioclim.osug.fr/> (consulté le 6.9.20).
- Shahtahmassebi, A., Yang, N., Wang, K., Moore, N., Shen, Z., 2013. Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing. *Chinese Geogr. Sci.* 23, 403-420.
- Shean, D., 2017. High Mountain Asia 8-meter DEM Mosaics Derived from Optical Imagery, Version 1. 2002-2016. Boulder, Color. USA. NASA Natl. Snow Ice Data Cent. Distrib. Act. Arch. Center.
- Shean, D.E., 2016. Quantifying ice-shelf basal melt and ice-stream dynamics using high-resolution DEM and GPS time series. ProQuest Diss. Theses 180.
- Sirguey et al., 2009. Subpixel monitoring of the seasonal snow cover with MODIS at 250 m spatial resolution in the Southern Alps of New Zealand: Methodology and accuracy

- assessment. *Remote Sens. Environ.* 113, 160-181.
- Sirguey, P., 2009. Simple correction of multiple reflection effects in rugged terrain. *Int. J. Remote Sens.* 30, 1075-1081.
- Sola, I., González-Audícana, M., Álvarez-Mozos, J., 2016. Multi-criteria evaluation of topographic correction methods. *Remote Sens. Environ.* 184, 247-262.
- Stillinger, T., Roberts, D.A., Collar, N.M., Dozier, J., 2019. Cloud Masking for Landsat 8 and MODIS Terra Over Snow-Covered Terrain: Error Analysis and Spectral Similarity Between Snow and Cloud. *Water Resour. Res.* 55, 6169-6184.
- Teillet, P.M., Guindon, B., Goodenough, D.G., 1982. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Can. J. Remote Sens.* 8, 84-106.
- Vaze, J., Teng, J., Spencer, G., 2010. Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environ. Model. Softw.* 25, 1086-1098.
- Vénus – Séries Temporelles [WWW Document], s. d. URL <https://labo.obs-mip.fr/multitemp/venus/> (consulté le 6.9.20).
- Warren, S.G., 2019. Optical properties of ice and snow. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 377.
- Welcome to Orfeo ToolBox! — Orfeo ToolBox 7.1.0 documentation [WWW Document], s. d. URL <https://www.orfeo-toolbox.org/CookBook/> (consulté le 6.9.20).
- Wiscombe, W.J., Warren, S.G., 1980. A model for the spectral albedo of snow. I: pure snow. *J. Atmos. Sci.*

Table des annexes

Annexe 1 Récapitulatif des bandes spectrales disponibles sur le satellite VENμS.....	64
Annexe 2 Stations météorologiques utilisées et descriptif des mesures disponibles.....	65
Annexe 3 Description des capteurs principaux et de leurs méthodes de calculs.....	66
Annexe 4 Protocole complet de la création des trois produits : TopCos, CloudCov et SCA.....	67
Annexe 5 Protocole de création de la carte des pentes et de la carte des expositions	68
Annexe 6 Récapitulatif des différents bits composant le masque CLM (CNES).....	69
Annexe 7 Avantages et désavantages des combinaisons entre masques CLM, NDVI et Énergie	70
Annexe 8 Méthodologie de correction manuelle des masques des nuages sous PCI Geomatica 2016.	71
Annexe 9 Méthodologie de correction manuelle des masques des nuages sous QGIS 3.4 avec l'application ThRasE	73
Annexe 10 Bilan sur la création d'un masque des ombres topographiques	74

Annexe 1

Récapitulatif des bandes spectrales disponibles sur le satellite VEN μ S.

Le satellite VEN μ S possède 12 bandes spectrales allant jusqu'au proche infrarouge. En revanche il ne dispose pas de bande spectrale dans le moyen infrarouge (SWIR).

VENμS Band	Centre λ (nm)	Sentinel-2 Band	Centre λ (nm)	Landsat-8 Band	Centre λ (nm)
1	423.9				
2	446.9	1	443	1	443
3	491.9	2	490	2	482
4	555.0	3	560	3	561
				8	590
5	619.7				
6	619.5				
7	666.2	4	665	4	655
8	702.0	5	705		
9	741.1	6	740		
10	782.2	7	783		
		8	842		
11	861.1	8a	865	5	865
12	908.7				
		9	945		
		10	1375	9	1373
		11	1610	6	1609
		12	2190	7	2201

Annexe 2

Stations météorologiques utilisées et descriptif des mesures disponibles

Site	Pays	Coordonnées UTM 45 (m)	Latitude Longitude	Altitude (m)	Période	Swin	Swout	Lwin	Lwout	T air	Humidité relative	Précipitations	Albédo	Autres données
Changri Nup	Népal	478147.947 E 3095297.282 N	27°58'57.441'' 86°46'40.034''	5387	30.11.2014 - 25.11.2019	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	Température des débris, Flux à l'interface glace/débris, ablation/accumulation, Vitesse et direction du vent, hauteur de neige
Pyramide	Népal	481618 E 3092672 N	27°57'32.314'' 86°48'47.217''	5034	27.11.2017 - ?	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	GEONOR, Parsivel
South Col	Népal	493066.464 E 3094091.597 N	27°58'18.840'' 86°55'46.200''	7945	22.05.2019 - ?	✓	✓			✓			✓	

Les données *in situ* ont été traitées sous Excel et Python (bibliothèque Pandas). Les mesures d'albédo de la station de South Col ont été fournies par National Geographic.

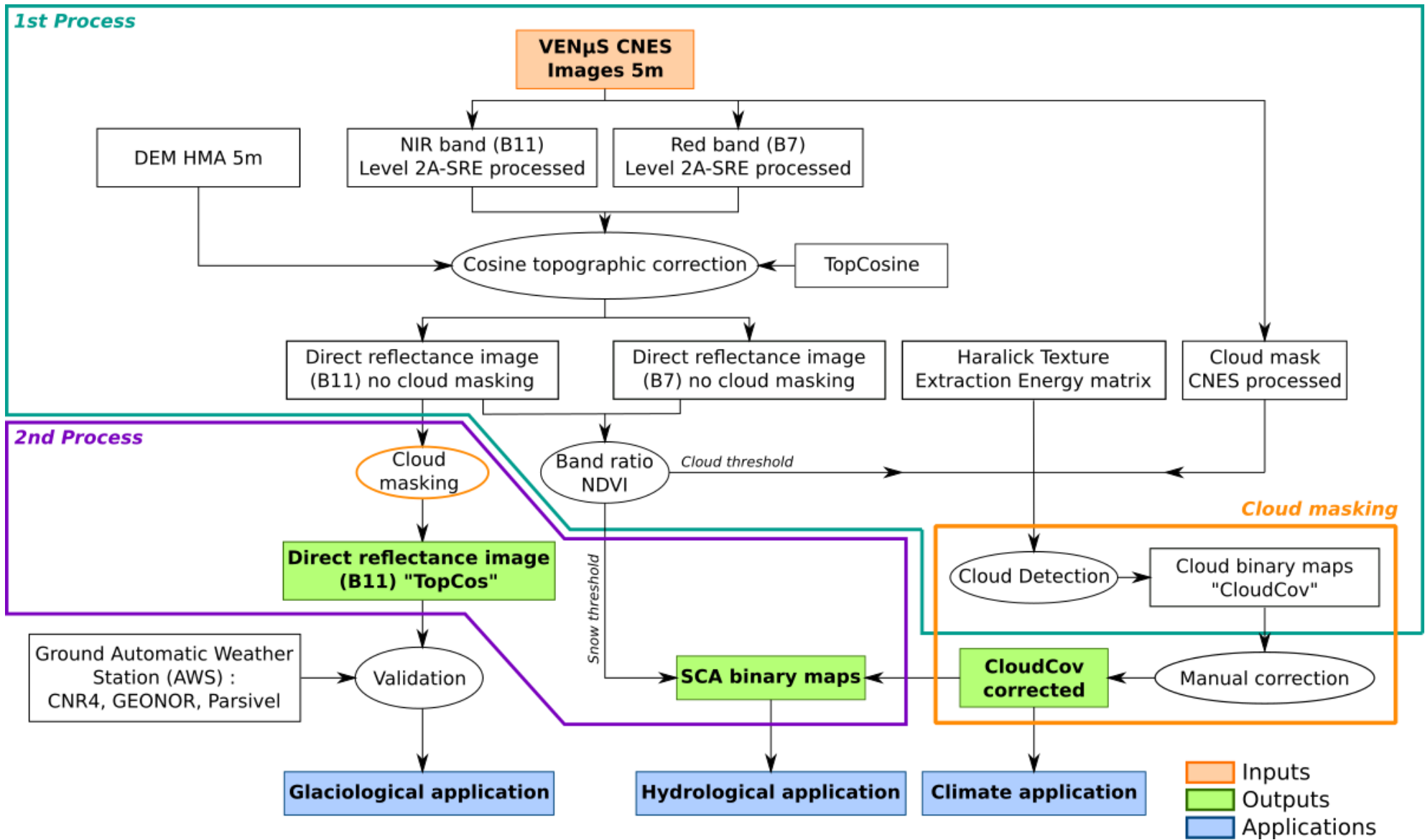
Annexe 3

Description des capteurs principaux et de leurs méthodes de calculs

Description des capteurs	
Précipitations : Capteur GEONOR	<ul style="list-style-type: none"> ➤ si $T > 2^{\circ}\text{C}$ on considère que les précipitations sont à 100 % de la pluie ➤ si $T < 0^{\circ}\text{C}$ on considère que les précipitations sont à 100 % de la neige ➤ si $0^{\circ}\text{C} < T < 2^{\circ}\text{C}$ on réalise un prorata entre pluie et neige en fonction de différents facteurs tel que le vent
Mesures d'albédo : Capteur CNR4	<ul style="list-style-type: none"> ➤ instrument doté de deux cellules qui mesurent le rayonnement solaire incident et réfléchi en W/m^2 en courte et en longue longueur d'onde. ➤ Seuls les rayonnements dans les courtes longueurs d'ondes sont utilisés (SW) ➤ Si $\text{SW}_{\text{in}} < 7 \text{ W/m}^2 \Rightarrow \text{SW}_{\text{in}} = 0$ ➤ Si $\text{SW}_{\text{out}} < 6 \text{ W/m}^2 \Rightarrow \text{SW}_{\text{out}} = 0$ ➤ $\text{Albédo} = \text{SW}_{\text{out}}/\text{SW}_{\text{in}}$ ➤ Si $\text{albédo} > 0.95$, SW_{in} est recalculé : $\text{SW}_{\text{in}} = \text{SW}_{\text{out}}/0.95$
Hauteur de neige : Capteur SR50 - Surface	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Hauteur filtrée : $H < 0.49 \text{ m}$ ou $H > 0.90 \text{ m} \Rightarrow$ données retirées.

Annexe 4

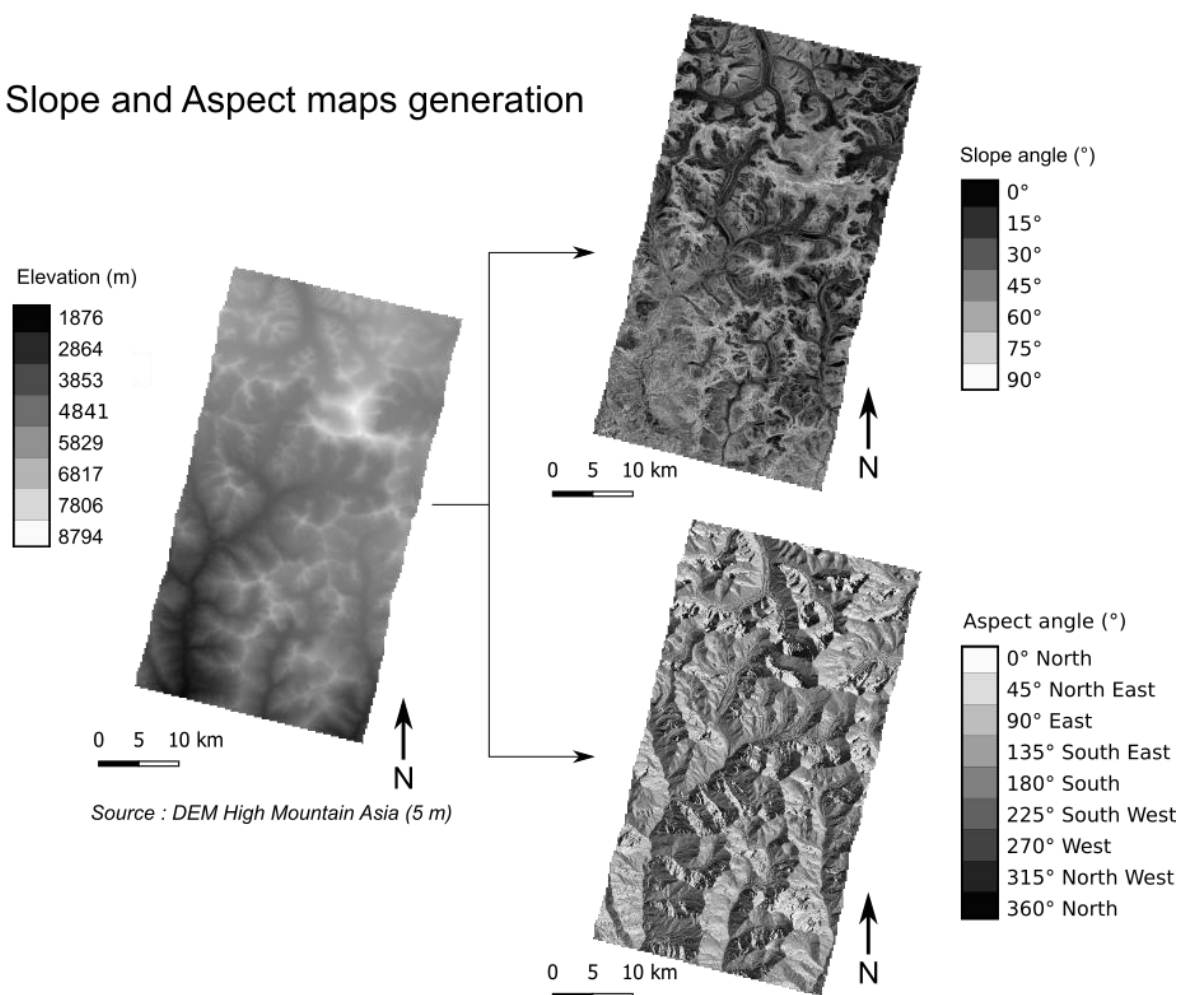
Protocole complet de la création des trois produits : TopCos, CloudCov et SCA



Annexe 5

Protocole de création de la carte des pentes et de la carte des expositions

Slope and Aspect maps generation



Annexe 6
Récapitulatif des différents bits composant le masque CLM
(CNES)

N° bit	Valeur	Description
Bit 0	1	Tous les nuages sauf les plus minces et toutes les ombres
Bit 1	2	Tous les nuages sauf les plus minces
Bit 2	4	Ombres projetées par un nuage détecté
Bit 3	8	Ombres projetées par un nuage en dehors de l'image
Bit 4	16	Nuages détectés par un seuillage mono-temporel
Bit 5	32	Nuages détectés par un seuillage multi-temporel
Bit 6	64	Nuages les plus minces
Bit 7	128	Nuages hauts détectés par stéréoscopie

Annexe 7

Avantages et désavantages des combinaisons entre masques CLM, NDVI et Énergie


	CLM et NDVI	CLM et Énergie	NDVI et Énergie
Moraines	Inclut les moraines	Inclut peu de moraines	Inclut peu de moraines
Neige	Nuages confondus avec la neige	Inclut les surfaces enneigées	Différencie bien neige/nuages sauf pour les hautes réflectances
Nuages	meilleur contour des nuages que CLM seul	meilleur contour des nuages que CLM seul	meilleur contour des nuages que CLM seul

Annexe 8

Méthodologie de correction manuelle des masques des nuages sous PCI Geomatica 2016

Le logiciel Geomatica 2016 propose des outils permettant de modifier des valeurs dans un fichier raster.

1) Création d'une composition colorée NIR-Rouge-Vert :

- Ouvrir les 3 bandes que l'on veut assembler
- Cliquer sur Launch the Add Layer Wizard 
- Sélectionner RGB (Figure 38, p. 71) puis associer la

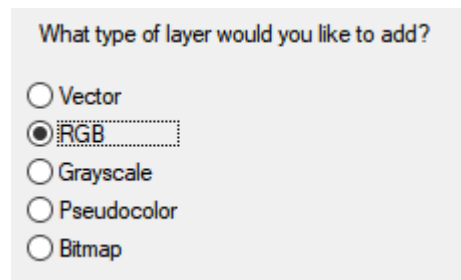



Figure 38 : Choix de la composition.

bande NIR au canal Rouge, la bande Rouge au canal Vert et la bande Verte au canal Bleu. Cette composition mais en avant la glace par rapport à la neige, ainsi que la végétation.

- Finish


2) Modification de la couleur d'affichage du raster à corriger :

- Ouvrir le fichier raster à modifier
- Clic droit sur le nom du fichier puis cliquer sur Representation Editor 
- Modifier la couleur en cliquant sur le rectangle noir puis valider (Figure 39, p. 71)

Style	Values	Description	Pixel Count
 1	1		8689532

Figure 39 : Modification de la couleur.

3) Édition du fichier raster :

- En sélectionnant le raster qu'on souhaite modifier, cliquer sur Raster Editing
- Dans la fenêtre, écrire dans la case Pixel Value la valeur que l'on souhaite attribuer aux pixels à l'intérieur des polygones que l'on créera, puis valider (Figure 40, p. 71)
- Cliquer sur New Shape  et sélectionner polygone

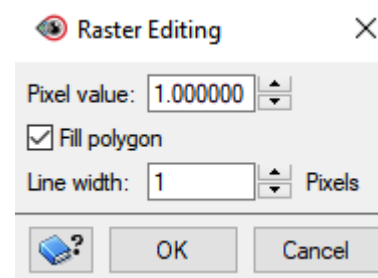


Figure 40 : Edition du raster.

- Tracer des polygones sur le fichier raster à modifier. Les valeurs à 10 (par exemple) comprises dans le polygone tracé, prendront la valeur 1. Pour fermer le polygone, double cliquer.

Annexe 9

Méthodologie de correction manuelle des masques des nuages sous QGIS 3.4 avec l'application ThRasE

Le logiciel QGIS permet également de réaliser la même modification que Geomatica mais le temps de traitement est beaucoup plus long.

- Activer le plugin ThRasE
- Ouvrir dans la fenêtre QGIS le fichier raster à modifier
- Ouvrir un assemblage des 3 bandes NIR-Rouge-Vert de la même date

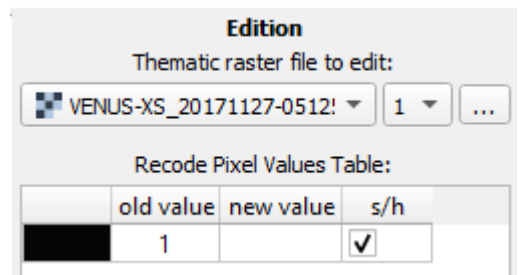


Figure 41 : Onglet Edition de ThRasE.

- Ouvrir ThRasE en cliquant sur
- Dans l'onglet Édition, choisir le raster à modifier (Figure 41, p. 73)
- Dans la case New Value, entrer la valeur par laquelle on souhaite remplacer les 1.

- Cliquer sur 0 active layer pour afficher une couche puis sur edition (Figure 42, p. 73). Choisir polygone puis tracer les zones pour lesquelles on souhaite modifier la valeur du pixel.
- Sauvegarder

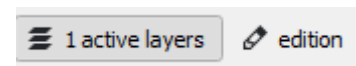


Figure 42 : Active layer.

Annexe 10

Bilan sur la création d'un masque des ombres topographiques

Gestion des ombres topographiques

1. Distinction et masquage des ombres

Le satellite VENμS n'a pas une trace orbitale qui lui permet de réaliser des prises de vue à la verticale au-dessus du site étudié. De plus, les images ne sont pas prises quand le soleil est au zénith. Ainsi, des ombres apparaissent pour chaque nouvelle acquisition satellite.

Il est important de comprendre que les ombres dégradent les informations que l'on peut normalement obtenir dans une image et influencent notamment la radiométrie. Par exemple, alors qu'on considère généralement un pixel enneigé quand sa réflectance est supérieure à 0.6, un pixel enneigé à l'ombre pourra avoir une réflectance inférieure. Il est donc nécessaire de déterminer où se situent ces zones d'ombres.

Il existe plusieurs méthodes pour détecter les nuages et inverser leur impact sur l'image comme l'a montré (Shahtahmassebi et al., 2013). L'action de corriger les effets des ombres sur la radiométrie d'une image est aussi appelée « de-shadowing » en anglais.

2. Définitions

On distingue deux types d'ombres topographiques :

- ombre propre d'un objet ;
- ombre projetée d'un objet.

L'ombre propre d'un objet correspond à la partie de l'objet qui ne reçoit pas directement l'éclairement des rayons solaires. L'ombre projetée au sol est l'ombre de l'objet dans la direction des rayons du soleil. L'ombre propre reçoit les rayonnements réfléchis par les objets qui l'entourent. Elle est donc plus brillante que l'ombre projetée.

A ces deux types d'ombres s'ajoutent celles des nuages lorsqu'il y en a.

3. Détection des ombres

Plusieurs méthodes de détection des ombres existent : seuillage, modélisation, modèle de couleur invariant, relief ombré.

Le seuillage repose sur les valeurs spectrales et des ratios de bandes. La valeur seuil est déterminée à partir de l'histogramme mais cette méthode ne permet pas de différencier efficacement les ombres des objets sombres. Pour certains travaux de recherches, un seuillage a été utilisé afin de distinguer la neige d'autres matériaux dans les ombres (Dozier, 1989).

La méthode de la modélisation fait appel à la géométrie de la scène et de l'objet observé, aux informations du capteur et à la direction de la source lumineuse. Cette technique est davantage employée en zone urbaine. Un MNT peut également être utilisé, combiné aux angles solaires (zénith et azimut) afin de simuler l'illumination de la scène. Plusieurs outils sont disponibles dans les logiciels de traitement des images numériques. Parmi eux, on peut citer ILLUMCAST de PCI Geomatica 2016 ou `r.sunmask.datetime` de GRASS 7.4.2 sous QGIS 3.4.

Le modèle de couleur invariant renvoie à l'utilisation d'espaces colorimétriques dans le but de segmenter les zones à l'ombre.

Enfin, la technique du relief ombré utilise un MNT avec les angles solaires et permet de déterminer quelles zones ne sont pas directement éclairées par le soleil. Cette méthode ne permet pas d'identifier les zones d'ombres projetées mais seulement les ombres propres.

4. Correction des ombres

Les ombres topographiques sont d'autant plus présentes que le relief est montagneux et le soleil bas. Les corrections les plus utilisées pour l'étude de régions au relief escarpé sont le ratio de bandes et l'indice de végétation (Riaño et al., 2003). On peut cependant perdre la résolution spectrale en choisissant un ratio de bandes.

5. Carte des ombres réalisées avec PCI GEOMATICA

Avec le logiciel PCI GEOMATICA 2016, il est possible de calculer la carte des ombres topographiques grâce à la fonction ILLUMCAST. Cet outil prend en entrée un MNT, le zénith solaire ainsi que l'azimut solaire. Cependant, des artefacts se créent lors du processus de cet algorithme. Leur origine n'a pas été détectée mais l'interpolation utilisée sur le MNT pourrait avoir un impact. Des travaux plus poussés seraient nécessaires.

Liste des figures

Figure 1: Description des différentes réflexions. Source : Hagolle, s. d.	4
Figure 2 : Géométrie de la prise de vue du satellite.	4
Figure 3 : Relative geometry of the sun, the sensor, and the target.....	16
Figure 4 : a) Artefact in self shadow b) Linear regression of illumination versus band 2 cosine- corrected in forest according to ground reference data, Meyer et al. 1993.....	16
Figure 5 : Definition of the resolution, the precision and the accuracy, source : Slocum, 1992.	19
Figure 6 : Localisation globale de l'étude.....	21
Figure 7 : Localisation des bassins versants étudiés.	21
Figure 8 : Localisation des trois stations <i>in situ</i>	23
Figure 9 : Définition de la zone utile de chaque image.	25
Figure 10 : Processus de création du produit TopCos HMA et sa validation.....	27
Figure 11 : Comparaison du masque des nuages CLM (CNES) aux nuages observés.	28
Figure 12 : Comparaison des combinaisons CLM (CNES) - NDVI et CLM (CNES) - Énergie.	31
Figure 13 : Combinaison du NDVI avec l'Énergie.....	32
Figure 14 : Processus de création du masque des nuages CloudCov.	32
Figure 15 : Processus de création des cartes de neige (SCA).....	34
Figure 16 : Exemple des cartes SCA pour les bassins versants de Pheriche et Dingboche.....	35
Figure 17 : Localisation de l'emprise utilisée pour l'étude de la dynamique de l'image.....	36
Figure 18 : Histogramme de la fréquence d'occurrence des réflectances pour les produits SRE, FRE et TopCos HMA normalisés entre 0 et 1.	36
Figure 19 : Densité de probabilité des réflectances pour les produits SRE, FRE et TopCos HMA. a) échelle linéaire, b) échelle logarithmique.	37
Figure 20 : Différences entre les produits de réflectance SRE, FRE, TopCos HMA et TopCos SRTM.	39
Figure 21 : Comparaison de l'albédo <i>in situ</i> aux images de réflectance à la station de South Col.....	40
Figure 22 : Comparaison de l'albédo <i>in situ</i> aux images de réflectance à la station de Changri Nup. ...	41
Figure 23 : Comparaison des produits SRE (a) et TopCos SRTM (b) à l'albédo <i>in situ</i> de la station de South Col.	42
Figure 24 : Comparaison des produits FRE (a) et TopCos HMA (b) à l'albédo <i>in situ</i> de la station de South Col.	42
Figure 25 : Comparaison des produits SRE (a) et TopCos SRTM (b) à l'albédo <i>in situ</i> de la station du Changri Nup.	43
Figure 26 : Comparaison des produits FRE (a) et TopCos HMA (b) à l'albédo <i>in situ</i> de la station du Changri Nup.	44
Figure 27 : Répartition des réflectances par type de produit à la station de South Col.....	45
Figure 28 : Répartition des réflectances par type de produit à la station du Changri Nup.	45
Figure 29 : Évolution temporelle des précipitations à la Pyramide et comparaison avec la hauteur de neige au Changri Nup.	46
Figure 30 : Évolution des couvertures neigeuses et nuageuses et comparaison aux précipitations et à la hauteur de neige dans le bassin de Pheriche.	47
Figure 31 : Comparaison du masque des nuages CLM (CNES) et du masque CloudCov issu de l'algorithme développé, par rapport à la couverture nuageuse observée.	48
Figure 32 : Matrices de confusion du masque CLM (CNES) et du masque CloudCov.	49
Figure 33 : Couvertures neigeuses et nuageuses des bassins versants de Dingboche et Pheriche.	50
Figure 34 : Couvertures neigeuses et nuageuses des bassins versants de Dingboche et Pheriche interpolées.....	51
Figure 35 : Évolution de la couverture neigeuse des bassins de Dingboche et Pheriche.	51
Figure 36 : Évolution saisonnière de la couverture nuageuse.	52
Figure 37 : Altimétrie de la zone d'étude.....	53
Figure 38 : Choix de la composition.	71
Figure 39 : Modification de la couleur.	71
Figure 40 : Edition du raster.....	71

Figure 41 : Onglet Edition de ThRasE.	73
Figure 42 : Active layer.	73

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des données VENμS.	22
Tableau 2 : Définition des seuils de détection de la neige et des nuages avec le NDVI.	30
Tableau 3 : Évaluation qualitative et quantitative des masques CLM (CNES) et CloudCov).	49

Correction des images VENμS (CNES) par la méthode cosinus pour le suivi de l'enneigement et de la couverture nuageuse : Application dans la vallée du Khumbu (Everest, Népal).

Mémoire d'Ingénieur, E.S.G.T., Le Mans 2020.

RESUME

Depuis quelques années, le réchauffement climatique devient une problématique globale touchant le monde entier. L'Himalaya n'est pas épargné par ses conséquences. S'intégrant dans la démarche de recherche de l'IGE (Grenoble, France), ces travaux s'intéressent à la vallée du glacier du Khumbu et ses alentours. Des images optiques ont été acquises depuis le 27 novembre 2017 jusqu'à aujourd'hui, par le satellite VENμS issu d'un partenariat entre le CNES (France) et l'ASI (Israël), avec une orbite héliosynchrone.

Ce projet se concrétise par trois types de produits : (i) des images du proche infrarouge corrigées des effets d'éclairement par la méthode Cosinus (« TopCos »), (ii) des masques des nuages améliorés (« CloudCov ») et (iii) des cartes d'enneigement (« SCA »). Ces trois éléments ont été comparés aux mesures météorologiques *in-situ* de trois stations locales, afin d'étudier : la qualité des images de réflectance corrigées (« TopCos ») et leur vraisemblance par rapport aux mesures d'albédo sur le terrain ; l'apport d'un MNT haute résolution (8 m) par rapport à un MNT d'une résolution de 90 m dans la correction d'éclairement ; le comportement des nuages selon les saisons ; l'évolution de la couverture neigeuse dans la région.

Mots clés : VENμS, télédétection optique, correction cosinus, correction topographique, albédo, couverture neigeuse, Vallée du Khumbu, Everest.

SUMMARY

Since a few years, global warming becomes a worldwide concern, impacting every country. The Himalayan mountains aren't spared by its consequences. This work follows the IGE (Grenoble, France) research process, studying the Khumbu valley and the surroundings. Optical images have been registered from November 27, 2017 to nowadays, by the VENμS satellite. It has a heliosynchronous orbit and is set on a partnership between the CNES (France) and the ASI (Israel).

This project materializes with three output product types: (i) near infrared images corrected from the topographic effects with the Cosine correction ("TopCos"), (ii) improved cloud masks ("CloudCov"), and (iii) snow cover area maps ("SCA"). These three elements have been compared to *in-situ* measurements from three weather stations, in order to study: the corrected reflectance images ("TopCos") quality and their likelihood with the *in-situ* albedo; the contribution of a high-resolution DEM (8 m), compared to a 90 m DEM for the topographic illumination correction; the cloud behavior according to seasons; and the cloud cover evolution over the area.

Key words : VENμS, optical remote sensing, cosine correction, topographic correction, albedo, snow cover, Khumbu valley, Everest