



HAL
open science

Pré-étude de la surveillance des mouvements de terrain en Savoie par série temporelle d'images radar à synthèse d'ouverture Sentinel-1 (imagerie SAR)

Aurélie Pourrain

► To cite this version:

Aurélie Pourrain. Pré-étude de la surveillance des mouvements de terrain en Savoie par série temporelle d'images radar à synthèse d'ouverture Sentinel-1 (imagerie SAR). Architecture, aménagement de l'espace. 2020. dumas-02965838

HAL Id: dumas-02965838

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02965838>

Submitted on 13 Oct 2020

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.

MASTER 2

Domaine : Sciences Humaines et Sociales (SHS)

Mention : Géographie, Aménagement, Environnement, Développement (GAED)

Parcours : Géographie, Information, Interface, Durabilité, Environnements (GÉOÏDES)



Pré-étude de la surveillance des mouvements de terrain en Savoie par série temporelle d'images radar à synthèse d'ouverture *Sentinel-1* (imagerie SAR)

Aurélie POURRAIN



Mémoire de fin d'étude préparé à Annecy-le-Vieux (Haute-Savoie) au LISTIC (Polytech Annecy-Chambéry, Université Savoie Mont-Blanc)



Mémoire soutenu le 9 septembre 2020 à Grenoble

Tutrice professionnelle : Yajing YAN, Maître de conférences

Tuteur universitaire (membre du jury) : Philippe SCHOENEICH, Professeur des universités

Autre membre du jury : Bruno WILHELM, Maître de conférences

REMERCIEMENTS

Je sais gré à Philippe SCHOENEICH, professeur d'universités, pour son accompagnement et ses conseils dans la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à remercier Yajing YAN pour son soutien et son accompagnement tout au long de mon stage, malgré le contexte sanitaire inédit. Je tiens également à la remercier pour la relecture et la correction de mon mémoire.

Je remercie le LISTIC pour son suivi du bon déroulement du stage à distance, et les moyens mis à disposition.

Je suis reconnaissante également envers toute l'équipe pédagogique de l'IUGA (Institut d'Urbanisme et de Géographie Alpine) pour les connaissances qu'elle m'a apportées ces cinq dernières années.

Enfin, je souhaite remercier mes proches :

- Mes parents qui m'ont donné la possibilité de faire des études,
- Mes amis avec qui nous nous sommes soutenus mutuellement au cours de nos études.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	3
SOMMAIRE	4
SIGLES, ABREVIATIONS ET ACRONYMES	5
RESUMES	6
INTRODUCTION	8
CHAPITRE 1 : PRESENTATION DES SITES D'ETUDE ET DU PRINCIPE DE L'INTERFEROMETRIE SAR... 10	
CHAPITRE 2 : TRAITEMENT DES IMAGES SAR	19
CHAPITRE 3 : ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSION	24
CHAPITRE 4 : RESULTATS ALTERNATIFS ISSUS D'UN AUTRE LOGICIEL : GAMMA	34
CONCLUSION	38
BIBLIOGRAPHIE	39
TABLE DES MATIERES	42
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	45
ANNEXES	47

SIGLES, ABREVIATIONS ET ACRONYMES

	A
AFuTé : Apprentissage Fusion et Télédétection	
ASF : Alaska Satellite Facility	
	B
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières	
	D
D-InSAR : Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (interférométrie radar différentielle)	
dGPS : Differential Global Positioning system (système mondial de positionnement différentiel)	
dGNSS : Differential Global Navigation Satellite System (système mondial de navigation par satellite)	
	E
ESA : European Space Agency (agence européenne spatiale)	
ESD : Enhanced Spectral Diversity (diversité spectrale améliorée)	
ESDIS : Earth Science Data and Information System	
	I
InSAR : Interferometry Synthetic Aperture Radar (radar à synthèse d'ouverture par interférométrie)	
IRMa : Institut des Risques Majeurs	
IW : Interferometric Wide	
	L
LiDAR : Light Detection And Ranging (détection et estimation de la distance par la lumière)	
LISTIC : Laboratoire d'Informatique, Système, Traitement de l'Information et de la Connaissance	
LOS : Line Of Sight (ligne de visée du satellite)	
	M
MNT : Modèle Numérique de Terrain	
	N
NASA : National Aeronautics and Space Administration	
	O
OFEV : Office Fédéral de l'Environnement	
ONF : Office National des Forêts	
	R
RSO : Radar à Synthèse d'Ouverture	
RTM : Restauration des Terrains de Montagnes	
	S
S1A (SA) : Sentinel-1A	
S1B (SB) : Sentinel-1B	
SAR : Synthetic Aperture Radar (RSO : Radar à Synthèse d'Ouverture)	
SIG : Système d'Information Géographique	
SLC : Single Look Complex	
SNAP : SentiNel Application Platform	
SRTM : Shuttle Radar Topography Mission	
	T
TOPS : Terrain Observation with Progressive Scans (observation du terrain par balayage progressif)	

1 Résumé (Français)

Les mouvements de terrain qui touchent environ 7 000 communes en France (Ministère de la transition écologique et solidaire, 2020) peuvent avoir des impacts considérables sur les infrastructures (affaissement, destruction des routes et des bâtis...). Leur surveillance est donc primordiale dans la prévention des risques naturels. Elle permet effectivement d'avoir une meilleure connaissance des aléas liés au mouvement de terrain (éboulement, glissement de terrain, affaissement...) sur une zone définie et d'établir des scénarios d'évolution possibles (Raucoules, 2011). Ce suivi va permettre également d'identifier s'il est nécessaire d'engager des besoins matériels, humains et financiers pour la protection du secteur et de ses alentours.

Ce mémoire réalisé dans le cadre d'un stage de quatre mois et demi au sein du LISTIC (Laboratoire d'Informatique, Système, Traitement de l'Information et de la Connaissance) a pour objectif de savoir s'il est possible de faire un suivi régulier des mouvements de terrain sur de petites zones en utilisant des images radar *Sentinel-1*. Ainsi une pré-étude est faite sur quatre mouvements de terrain situés en Savoie : le mouvement de Montgombert vers Ugine, le mouvement de Bersend vers Beaufort, le mouvement de Ballandaz vers Pralognan la Vanoise et le mouvement de terrain du Freney.

Cette pré-étude utilise la méthode de l'interférométrie radar différentielle (ou interférométrie SAR (Synthetic Aperture Radar)). Celle-ci s'appuie sur une différence de phase entre deux images radar acquises à des dates différentes. A l'aide de cette méthode, il va être possible d'identifier des signaux de déplacements entre deux dates. Dans l'objectif de réaliser cette pré-étude, des images radar *Sentinel-1* couvrant la période entre novembre 2019 et mars 2020 et issues du site de l'ASF (Alaska Satellite Facility) sont téléchargées.

Le traitement de ces données a pu se faire à l'aide de la boîte à outils *Sentinel-1*, un logiciel téléchargeable gratuitement. Deux principaux traitements ont été faits : un traitement « mono-référence » (sur la série descendante) où toutes les images ont été recalibrées par rapport à une seule image (11 janvier 2020) et un traitement « multi-référence » où les images ont été recalibrées par rapport à l'image radar acquise six jours plus tard (sur la série descendante et ascendante).

L'analyse des résultats obtenus a permis de dire qu'un traitement « multi-référence » entraînait des résultats moins « brouillés » qu'un traitement « mono-référence » et qu'elle pourrait être la mieux adaptée. De plus l'étude a pu aussi mettre en avant d'autres points :

- L'utilisation d'un MNT précis est indispensable pour limiter des erreurs lors du traitement de l'interférogramme.
- Les conditions atmosphériques lors de l'acquisition des images peuvent causer une diffraction de l'onde radar et fausser l'interférogramme différentiel.
- La présence de neige (et la densité de végétation) influence sur la qualité des interférogrammes.
- La taille des sites d'études serait assez grande pour le suivi des mouvements.

Mots clefs : Image Radar | Interférométrie radar différentielle | Mouvement de terrain | Surveillance | Savoie

2 Abstract (English)

The ground movements which concern 7,000 municipalities in France (Ministère de la transition écologique et solidaire, 2020) can have significant impacts on infrastructures such as destruction, collapse of the buildings and roads, etc. Therefore, monitoring and studying ground movements is very

important for the prevention of natural risks. In fact, it is the best way to gain knowledge regarding the natural hazards such as rock fall, slide, and land subsidence, etc.... Furthermore, monitoring their movements helps to make better prediction, (Raucoules, 2011) to identify equipment, financial requirements as well as staff to protect the sector and its surroundings.

This Master thesis achieved in traineeship during four and a half months in LISTIC lab (Laboratory of Informatics, System, Information and knowledge Processing) aims to investigate if it is possible to perform regular monitoring of ground movements in small areas using Sentinel-1 radar images. For this, a preliminary study is realised on four sites of landslides located in Savoie (France): The Montgombert ground movement towards Ugine, the Bersend ground movement towards Beaufort, the Ballandaz ground movement near Pralognan la Vanoise and Freney movement.

For this preliminary study, the D-InSAR method was used (Differential Synthetic Aperture Radar). With the help of this method it was possible to analysis the differences between two satellite pictures acquired at two different dates and to analyse these surface movements between two or several days. The goal for this pre-study, Sentinel-1 radar pictures were downloaded in the site of ASF (Alaska Satellite Facility) between November 2019 and March 2020.

The processing of the data was performed thanks to Sentinel-1 Toolbox, a free software. Two major processing were done: a “mono-reference” where all pictures were recalibrated and compared to only one radar picture, and a “multi-reference” where pictures were recalibrated and compared to the radar picture that was acquired six days later.

The results obtained with the “multi-reference processing” generated best results. The pictures were less scrambled compared to the “mono-reference processing”. Therefore, “multi-reference processing” should be used since it gives more accurate information.

This study also showed several other points:

- Accurate study with DEM (Digital Elevation Model) is very important to limit the processing errors.*
- The conditions of the atmosphere can cause a wave diffraction. So the D-InSAR could be incorrect.*
- The presence of snow and vegetation density affects the number of wave cycles in the interferogramm.*
- The surface of the study sites is big enough for the ground movement monitoring.*

Key words: *D-InSAR / Ground movements / Monitoring / Radar pictures / Savoie*

INTRODUCTION

La surveillance des déformations de la Terre permet d'avoir une meilleure connaissance des éventuels aléas sur un territoire (glissements de terrain, retrait-gonflements des sols argileux...) et ainsi avoir la possibilité d'anticiper leurs éventuelles conséquences (affaissement des infrastructures...) (Strozzi et al., 2001). Ce monitoring a donc un rôle important pour la prévention des risques naturels. En effet, la détection de plausibles mouvements peut conduire à la mise en place de moyens de protection des populations se trouvant à proximité. La surveillance permet également de récolter des informations pour établir des scénarios des évolutions possibles de ces déformations (Raucoules, 2011).

Dans le cadre de ce suivi, il existe plusieurs techniques complémentaires choisies en fonction de leurs coûts et de la pertinence souhaitée des résultats :

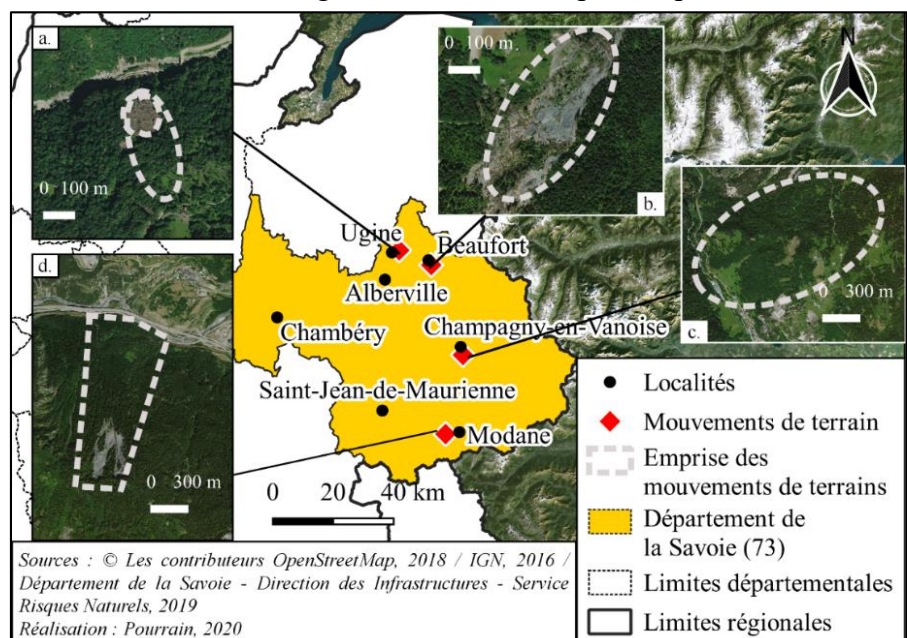
- Mesures au sol : le GPS (Global Positioning System / système mondial de positionnement) existant depuis les années 1970 (Yan, 2013) et le théodolite.
- Mesures à distance (la télédétection) : l'imagerie optique depuis les années 1970 (Yan, 2013) et l'imagerie SAR (Synthetic Aperture Radar / RSO : Radar à Synthèse d'Ouverture) depuis les années 1990 (Yan, comm. pers.) ...

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans une pré-étude de la surveillance des mouvements de terrain en Savoie par série temporelle d'images SAR issus des satellites *Sentinel-1*. Cette pré-étude est nécessaire avant d'engager des ressources humaines et financières pour une surveillance plus poussée sur le long terme.

Le présent travail a été effectué à travers un stage d'un peu plus de quatre mois au sein du LISTIC (Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance) de l'Université Savoie-Mont-Blanc. L'objectif principal de cette unité de recherche est de développer des outils méthodologiques et des logiciels à partir de données issues de capteurs (Polytech Annecy-Chambéry, s.d). Plus précisément, ce stage s'inscrit dans le groupe AFuTé (Apprentissage Fusion et Télédétection) qui a pour but de développer des outils méthodologiques en apprentissage automatique, en fusion d'informations et en traitement des données de télédétection (Yan, comm. pers.). La télédétection pour l'observation de la Terre est un des grands domaines exploités par ce laboratoire annécien pour répondre aux questions socio-environnementales (LISTIC, s.d).

Le bureau d'études SAGE de Grenoble a ainsi missionné le LISTIC pour suivre des mouvements de terrain sur quatre sites dans le département de Savoie (fig. 1).

Figure 1 : Localisation et emprise des mouvements de terrain à suivre en Savoie : **a.** mouvement de Montgombert ; **b.** mouvement du Bersend ; **c.** mouvement de Ballandaz et **d.** mouvement du Freney



Dans le cas de cette étude, il s'agit de caractériser l'avancée des mouvements de terrains grâce à la télédétection et plus précisément grâce à l'imagerie SAR. Ainsi, une question se pose : Est-il possible de suivre des mouvements de terrain de manière régulière à l'aide d'images SAR *Sentinel-1*, sur de petits secteurs ?

Cette interrogation mène aux hypothèses suivantes :

- Il peut tout à fait être possible de surveiller l'évolution de ces sites en raison d'acquisitions régulières d'images SAR de jour comme de nuit quelle que soit la météo.
- Le suivi de ces zones à l'aide d'images SAR peut s'avérer très limité en raison de la taille des sites d'études et de la résolution des images SAR.

Dans l'objectif de répondre à cette problématique, une présentation des quatre mouvements de terrain et une synthèse bibliographique expliquant les images SAR ainsi que le principe de l'interférométrie SAR sont faites dans une première partie. La seconde partie explique la méthodologie (présentation des données, exploitation des données...) employée pour extraire les signaux de déplacement à partir des données récupérées et essayer de répondre à l'objectif de l'étude demandée. Cette étude couvre la période de mi-novembre 2019 à mi-mars 2020. Dans une troisième partie, les premiers résultats obtenus sont présentés et analysés. Cette troisième partie mettra en avant la pertinence de la méthode utilisée et montrera les limites de l'étude. Enfin, un quatrième chapitre présentera des résultats alternatifs obtenus à l'aide d'un autre logiciel de traitement : GAMMA, et des données acquises sur une autre période.

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DES SITES D'ETUDE ET DU PRINCIPE DE L'INTERFEROMETRIE SAR

Afin de mieux connaître le sujet, une synthèse d'éléments bibliographiques est nécessaire. Elle permet de faire un premier état des lieux des mouvements de terrain qu'il a été demandé d'étudier et de comprendre le principe de l'interférométrie radar différentielle autrement appelée interférométrie SAR qui est la méthode utilisée dans cette pré-étude.

1 Présentation des mouvements de terrain à étudier

La figure 1 présente dans l'introduction de ce mémoire, localise les quatre mouvements de terrain à étudier dans le département de la Savoie en Auvergne-Rhône-Alpes.

1.1 **Mouvement de Montgombert**

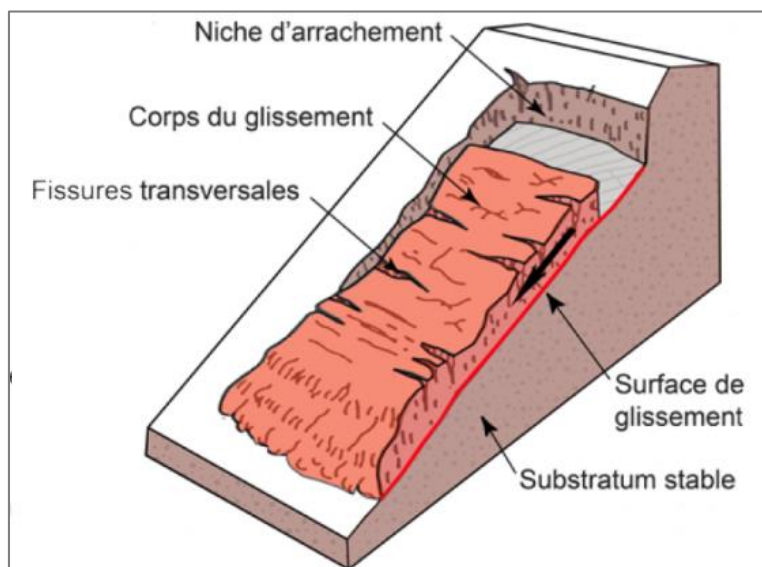
Le mouvement de Montgombert (photo 1) se situe le long de la route départementale des Gorges de l'Arly près d'Ugine et s'étend sur une surface de 46 ha (longueur : 366 m / largeur : 156 m). Une visualisation sous Géoportail permet de dire qu'il est exposé Nord.

Il s'est brusquement réactivé en 2016 (brgm, 2017) avec un déplacement supérieur à dix mètres selon le service des risques naturels du département de la Savoie (comm. pers.).



Photographie 1 : Mouvement de Montgombert : a. Vu de face du mouvement de Montgombert (Photo Brassoud, 2016) et b. Route départementale 1212 coupée (Photo Brassoud, 2018)

En raison d'apports fréquents de matériaux par le glissement, la route départementale 1212 (photo 1b) qui longe les Gorges de l'Arly est régulièrement fermée.



Selon la classification typologique des mouvements de terrain, celui de Montgombert est un glissement translationnel ou glissement plan (fig.2). Ce type de glissement s'apparente aux avalanches en départ en plaque et est parallèle au versant.

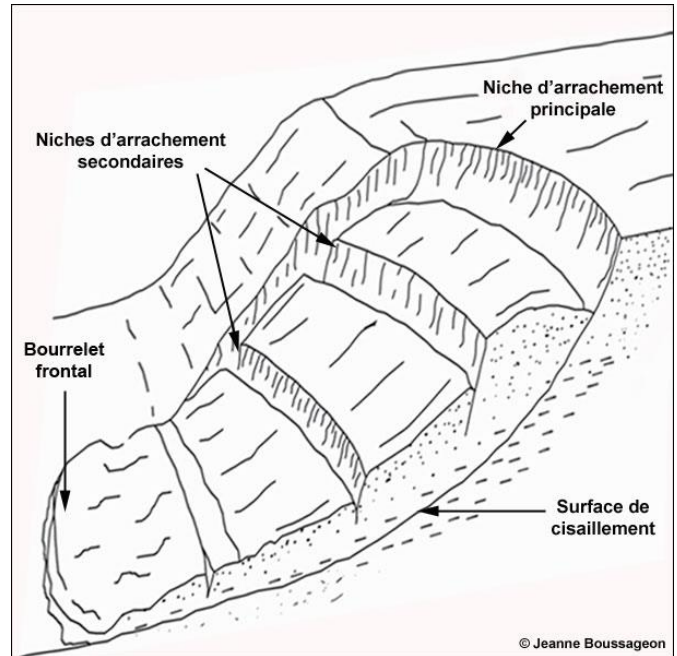
Figure 2 : Schéma d'un glissement de terrain dit translationnel ou plan (d'après l'OFVE, 2016)

1.2 Mouvement du Bersend

Le glissement du Bersend (photo 2) situé à proximité du hameau de Bersend, près de Beaufort, et exposé Nord-Ouest se traduit en surface par une forêt instable (Leleu, 2016) (photo 2b). La surface d'étude de ce site est de 150 ha pour une longueur et une largeur de 645 et 290 m respectivement.

Ce glissement de terrain est de type rotationnel (fig. 3) et s'illustre par une niche d'arrachement principale (Photo 2c) en amont du glissement et un sol plus bombé en aval. Une forte activité de ce type de glissement se traduit par une surface déstructurée (Schwartz, 2010).

Figure 3 : Schéma d'un glissement de terrain dit rotationnel (d'après Boussageon, image issue du site de l'IRMa, s.d)



Ce glissement est fortement surveillé par le RTM (Restauration des Terrains de Montagne), organisme de l'ONF (Office National des Forêt) car le mouvement est important (Leleu, 2016).



Photographie 2 : Glissement de terrain du Bersend : a. une grange poussée par la terre qui avance ; b. arbres basculés en rive gauche et c. niche d'arrachement (Photos Gominet, IRMa, 2016)

L'important glissement du printemps 2016, dû à une fonte nivale et des précipitations importantes (800 mm entre janvier et avril 2016) (Gérard et al., 2018), a mobilisé un grand volume de matériaux : environ quatre millions de mètres cubes (Gérard et Einhorn, 2018 et 2019). Il est alors considéré comme un événement remarquable (Gérard et Einhorn, 2018 et 2019). Cet événement rappelle un autre mouvement qui a eu lieu en 1966 aux alentours du glissement du Bersend et qui avait conduit à l'évacuation des habitants du hameau (Leleu, 2016).

1.3 Mouvement de Ballandaz

Le glissement de Ballandaz (photo 3), connu depuis le siècle dernier (Sanchez, 2007) et exposé Ouest, se situe près de Pralognan la Vanoise sur le lieudit du Planay. Le site étudié couvre 1 189 ha (longueur : 1647 m / largeur : 919 m)

Ce glissement de terrain a déjà fait l'objet de plusieurs études (Sanchez, 2007) : des suivis inclinométriques dans le début des années 2000 pour suivre les déformations du versant et des suivis par tomographie acoustique et électrique pour mesurer la résistivité du sol.



Photographie 3 : Glissement de terrain de Ballandaz le 4 janvier 2020, emportant la route entre Bozel et Pralognan la Vanoise (Photo Letesse, 2020)

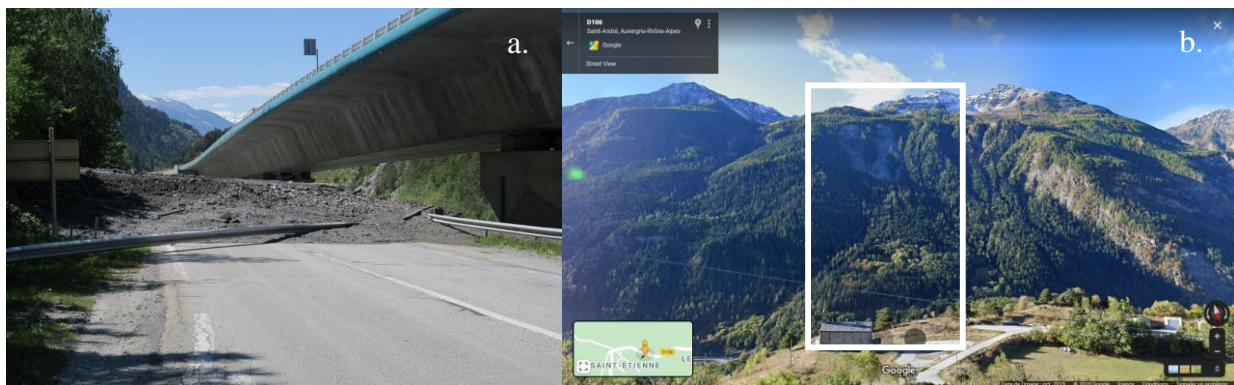
La typologie de ce mouvement de terrain semble assez complexe et compliquée à déterminer en raison des éléments structuraux peu visibles. Une partie du site d'étude semble sujet à un mouvement rotationnel et une autre partie à un glissement plan (photo 4).



Photographie 4 : Structure typologique du mouvement de Ballandaz (Photo Google Earth, modifié par Pourrain, 2020)

1.4 Mouvement du Freney

Le mouvement de terrain du Freney (photo 5), exposé Nord, s'est réactivé en mai 2016. A cette date, ce sont plus de dix mille mètres cubes de roches qui ont été mobilisés (Département de la Savoie, comm. pers.). Ce glissement de versant de mille mètres de dénivelé a été accompagné d'une lave torrentielle.



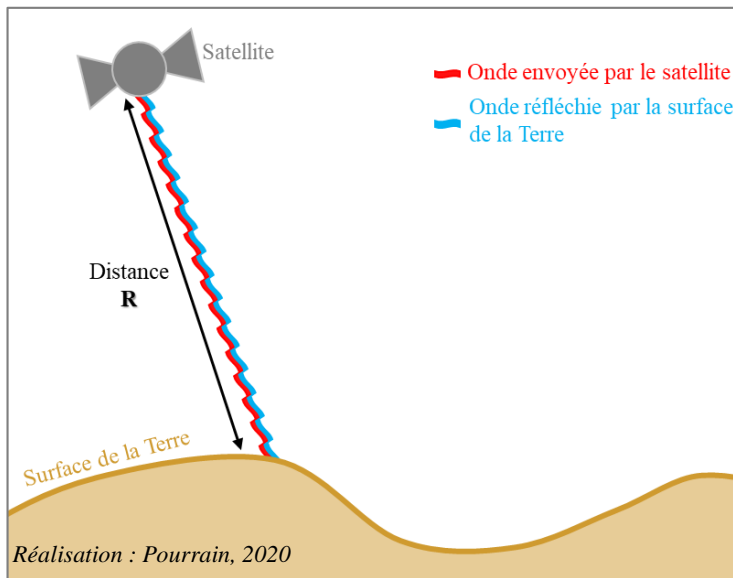
Photographie 5 : **a.** Mouvement de terrain sur la commune du Freney, coupant la route RD 1006 reliant Orelle et Saint-André (Photo le Dauphiné Libéré, 2016) ; **b.** Mouvement du Freney vu face (Photo Google maps)

La structure de ce mouvement de terrain (photo 5b) fait penser à un glissement plan dont la partie rocheuses visible semble être la niche d'arrachement. Ce site d'étude s'étend sur une superficie de 728 ha pour une longueur de 1 429 m et une largeur de 536 m.

L'année 2016 a été marquée par de fortes précipitations brutales dans les Alpes françaises provoquant un nombre plus important de laves torrentielles et de glissements de terrain qui ont causé des dégâts importants, majoritairement sur les infrastructures routières (Gérard et *al.*, 2018).

2 Imagerie SAR

2.1 Qu'est-ce qu'une image SAR ?



2.1.1 Comment fonctionne l'acquisition d'une image SAR

Le schéma en figure 4 illustre le fonctionnement d'une acquisition d'images SAR. Le capteur du satellite (ou de l'avion) envoie une onde électromagnétique (un signal radar) qui permet de détecter un obstacle. En effet, l'onde envoyée est réfléchie par la surface de la Terre, considérée comme un obstacle. Cette onde réfléchie est reçue par le capteur.

Figure 4 : Schéma expliquant l'acquisition d'une image SAR

Connaissant la vitesse v d'une onde électromagnétique, soit environ 3.10^8 m.s⁻¹ (vitesse dans le vide), et le temps t qui s'écoule entre l'envoi et le retour de l'onde (temps aller-retour de l'onde), il est possible de déterminer une distance R entre le capteur et l'obstacle (surface de la Terre) (équation 1).

$$R = 0,5v.t \quad (1)$$

2.1.2 Les Satellites Sentinel-1

Les images radar *Sentinel-1* sont issues de deux satellites *Sentinel-1* : S1A (*Sentinel-1A*), lancé le 3 avril 2014 (data.gouv.fr, 2016 et ASF, s.d), et S1B (*Sentinel-1B*), lancé le 25 avril 2016 (ASF, s.d). Ils ont été spécifiquement mis en place pour l'application de l'interférométrie radar permettant de surveiller les mouvements de la surface de la Terre (Strozzi et al., 2020).

Ces deux satellites naviguant sur la même orbite permettent d'obtenir des images SAR en bande C soit une longueur d'onde comprise entre 3,75 et 7,5 cm (fréquence entre 4 et 8 GHz) (Gouvernement du Canada, 2015) de jour comme de nuit (data.gouv.fr, 2016) tous les six jours en Europe et tous les douze jours sur d'autres régions montagneuses du monde (Strozzi et al., 2020). Tous les six jours, alternativement, les satellites S1A et S1B acquièrent une image radar (image SAR). La longueur d'onde du satellite est une mesure qui détermine la valeur des déplacements mesurable entre deux prises de vues, ici entre 3,75 et 7,5 cm.

Contrairement aux images optiques, les images SAR présentent des avantages. D'une part, l'onde est envoyée puis réfléchie. Cette onde a la capacité de traverser la couverture nuageuse ce qui fait que ces images sont en théorie indépendantes de la météo (data.gouv.fr). D'autre part, il n'y a pas de dépendance à la lumière solaire réfléchie contrairement aux images optiques *Sentinel-2*. Cela explique ainsi le fait qu'il est tout à fait possible d'obtenir une image acquise la nuit (data.gouv.fr).

2.1.3 Modes d'acquisition (ascendant et descendant) et distorsions

Il existe deux modes d'acquisition : l'acquisition ascendante et l'acquisition descendante avec un angle d'incident oblique fixe ($38,8^\circ$ (Talab Ou Ali et al., 2017)) mais avec une orientation différente.

L'acquisition ascendante illustre un passage du satellite du Sud vers le Nord tandis qu'un mode d'acquisition descendant traduit un passage du satellite du Nord vers le Sud (Echelard, 2014). Les trajectoires sont donc opposées.

Les satellites regardent toujours vers leur droite quel que soit leur mode d'acquisition. Un satellite en mode descendant regarde vers l'est, tandis qu'un satellite en mode ascendant regarde vers l'ouest. De plus, l'angle de visée oblique du satellite induit des déformations dans l'image acquise (fig. 5). Par conséquent, du fait de l'angle du signal, l'orientation des distorsions change en fonction de s'il s'agit d'un mode d'acquisition descendant ou ascendant.

En raison de ces différences d'orientation des déformations, il n'est pas possible de combiner directement deux images SAR issues de deux modes d'acquisition différents.

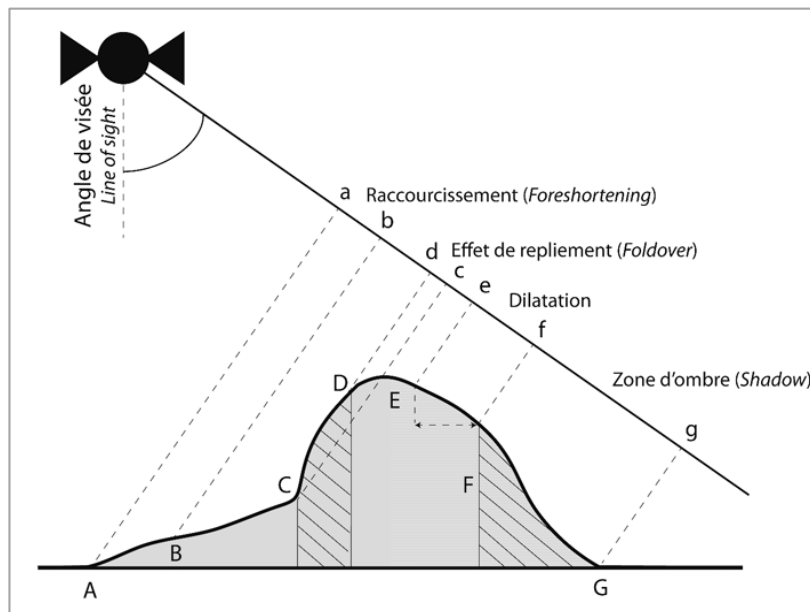


Figure 5 : Distorsions géométriques observées sur des images SAR
(d'après Barboux et al., 2009)

Conditions atmosphériques et distorsions

Ces distorsions ne sont pas seulement dues à l'angle du rayon émis puisque la présence en vapeur d'eau et les conditions ioniques de l'atmosphère entrent également en considération. Elles sont identifiables à l'aide de données météorologiques (Strozzi et al., 2001). Ces conditions atmosphériques peuvent par exemple provoquer une diffraction de l'onde envoyée et ainsi provoquer certaines déformations de la donnée. Pour contrer cette faiblesse de l'imagerie radar il est nécessaire selon Echelard (2014) d'avoir "une table de correspondance entre la géométrie du radar et son équivalent géoréférencé en géométrie sol". Cela nécessite donc de posséder un MNT (Modèle Numérique de Terrain) avec une résolution quasi équivalente à celle de l'image radar ainsi que des informations sur les paramètres des orbites. De plus, l'utilisation de ce MNT rendrait l'analyse de l'interférogramme plus robuste (Strozzi et al., 2001).

2.1.4 Composition d'un signal Radar

Le signal radar est un nombre complexe composé d'une amplitude et d'une phase (Doubre, 2013 et Pathier, 2003). Dans le cas de l'étude de déplacements, la phase est l'élément indispensable à prendre en compte.

Amplitude

L'amplitude correspond à la capacité qu'a un sol à réfléchir la longueur d'onde reçue par le satellite (Raucoules, 2011). Elle est liée aux paramètres du système d'acquisition : la longueur d'onde, la polarisation, le LOS (Line Of Sight / ligne de visée du satellite) et l'angle de vue (Doubre, 2013). Les paramètres liés au terrain entrent également en compte dans l'amplitude : la topographie, la rugosité, les propriétés diélectriques du sol (si un sol est conducteur ou non de l'électricité) et le volume de la surface (Doubre, 2013).

Phase

La phase (fig. 6) correspond à un "déphasage entre le signal rétrodiffusé et le signal émis pris comme référence" (Pathier, 2003). Autrement dit, il s'agit de la "différence de phase entre le signal émis et le signal reçu". (Raucoules, 2011). L'équation 2 (d'après Echelard, 2014 et Raucoules, 2011) correspond au calcul de ce déphasage où R est la distance (calculée dans l'équation 1) et λ est la longueur d'onde.

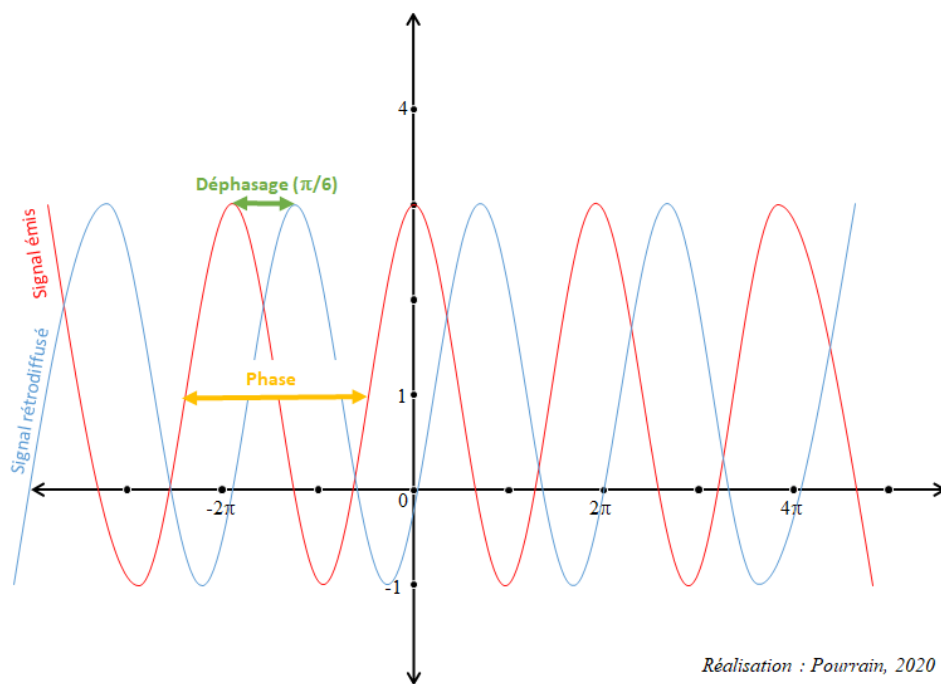


Figure 6 : Illustration de la phase et du déphasage, deux éléments qui composent le signal

$$\varphi_D = \frac{4\pi R}{\lambda} [2\pi] \quad (2)$$

Il faut noter selon Maître (2001) que chaque fois où l'onde envoyée parcourt une distance égale à sa longueur d'onde, sa phase augmente de 2π . L'équation 3 (d'après Echelard, 2014) permet de calculer la phase. Dans cette équation, la phase propre φ_{propre} correspond aux interactions entre l'onde et la cible liées à la nature de l'obstacle et l'angle incident. Cependant, cette donnée est peu utilisée en interférométrie car elle est mal connue (Echelard, 2014).

$$\varphi = \varphi_D + \varphi_{propre} \quad (3)$$

2.2 Qu'est-ce que l'interférométrie SAR ?

D'après la littérature, l'interférométrie radar différentielle ou interférométrie SAR est "une méthode de mesure basée sur la mesure de la différence de phase entre deux images radar (images SAR) acquises

dans un contexte satellitaire, aéroporté ou terrestre.” (Echelard et al., 2013) et acquise dans une même géométrie. Cette technique développée depuis les années 1980 (Zebker et Goldstein, 1986) permet d'identifier des déplacements du sol tels que les mouvements de terrain (glissement, affaissement...), les mouvements des glaciers ou encore l'activité volcanique (Wegmüller et al., 2000), à l'aide de deux images acquises à deux instants T (Raucoules, 2011). La précision du résultat peut aller jusqu'au millimètre sur de très grandes surfaces (Carnec et Raucoules, 2011 ; Ferretti et al., 2000 ; Lanari et al., 2004, et Strozzi et al., 2001).

Cette technique est déjà utilisée depuis plus d'une quinzaine d'années dans la détection des mouvements de glaciers rocheux (Echelard, 2014). D'autres études ont également été menées sur les affaissements de terrain pour le Ruhrgebiet (Allemagne), la ville de Mexico (Mexique) et le bassin géothermique euganéen (Italie) (Strozzi et al., 2001). Ces études ont permis de montrer que le D-InSAR (Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar / interférométrie radar différentielle) pouvait permettre de surveiller les mouvements de terrain que leur vitesse soit de plusieurs centimètres par an ou seulement de quelques millimètres par an (Strozzi et al., 2001).

2.2.1 Pourquoi l'interférométrie SAR (D-InSAR) plutôt qu'une autre méthode ?

Contrairement à certaines méthodes de télédétection ou *in situ*, celle du D-InSAR a la particularité de pouvoir couvrir une grande étendue spatio-temporelle (plusieurs kilomètres carrés et plusieurs années) (Echelard, 2014 et Yan, 2011) et est indépendante des conditions météorologiques (Yan, 2011). La figure 7 illustre quelques différences entre plusieurs méthodes de mesures. Elle met clairement en avant la grande emprise spatiale des données acquises grâce l'interférométrie SAR.

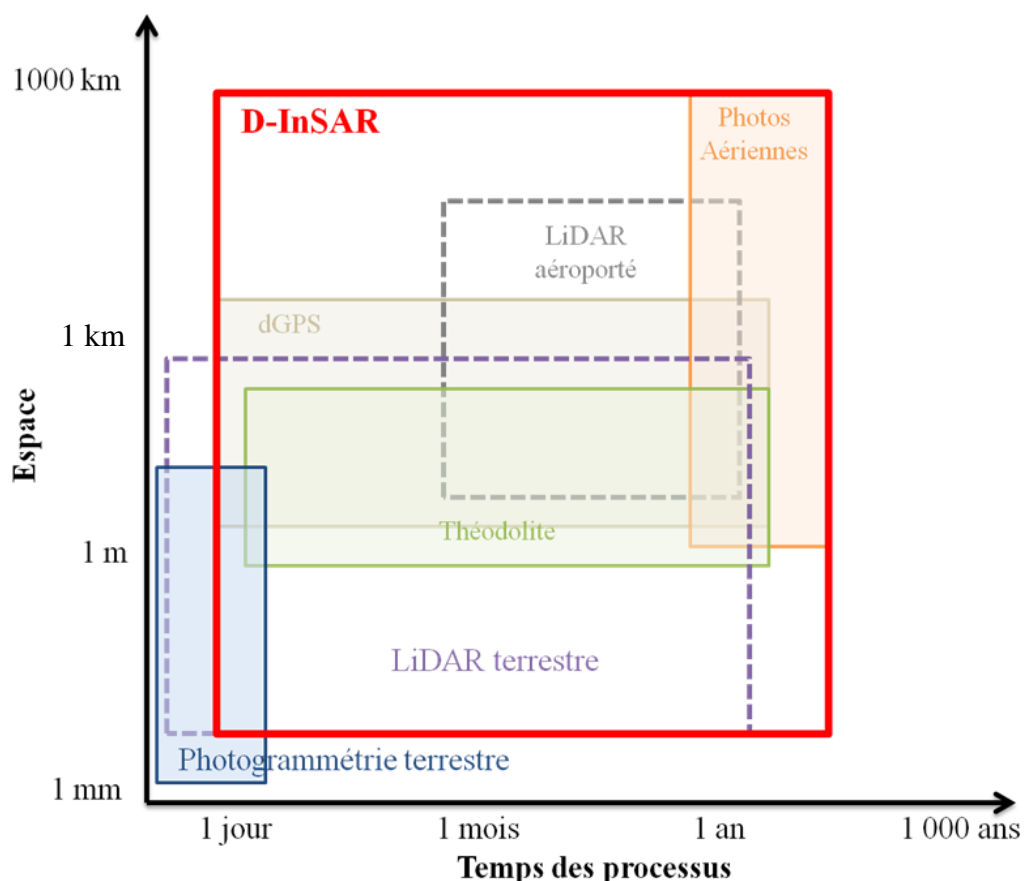


Figure 7 : Les méthodes de mesures placées dans le repère espace-temps des processus (d'après Ravanel, 2010 modifié par Echelard, 2014 ; mis en couleurs par Pourrain, 2020)

Bien que cette méthode semble présenter de nombreux avantages par rapport à d'autres, les méthodes restent complémentaires les unes des autres.

2.2.2 Quelles informations permet d'obtenir l'interférométrie SAR ?

Un interférogramme est le résultat de la méthode d'interférométrie. Il peut donner deux informations (Echelard, 2014) :

- **L'élévation** : identification des différences de relief entre deux dates qui se traduit par un déphasage (fig. 5) sur l'interférogramme.
- Les **mouvements de terrain** : entre deux acquisitions d'images radar, il n'y aura pas le même nombre de cycles car la valeur de phase est différente. Les déplacements se traduisent par une différence de valeur de phase, visible sur l'interférogramme différentiel. L'interprétation de ces signaux et la connaissance du terrain permet par la suite de déterminer s'il s'agit d'un mouvement de terrain.

2.2.3 Interférogramme et interférogramme différentiel

Un interférogramme se forme à partir de deux images SAR acquises dans une même géométrie. L'interférogramme donne des informations sur la phase totale et la cohérence entre les images recalibrées... A l'aide de cet interférogramme créé, un interférogramme différentiel pourra être généré.

Phase interférométrique

La **phase interférométrique** est la différence de phase entre deux images SAR acquises dans une même géométrie (même orbite ascendant ou descendant et une faible distance de position du satellite au moment de la prise de vue). La phase va être utilisée pour estimer le déplacement, d'où son indispensabilité dans cette étude. La valeur de la phase totale issue de l'interférogramme est sensible à plusieurs composantes : la topographie, le déplacement, l'hétérogénéité de l'atmosphère, la position du satellite et le bruit (Dobre, 2013 ; Echelard et al., 2013 et Yan, 2011). Ces composantes vont être utilisées pour déterminer **la phase liée au déplacement** (équation 4 (d'après Echelard, 2014)).

$$\varphi = \varphi_{\text{topographique}} + \varphi_{\text{orbite}} + \underbrace{\varphi_{\text{atmosphérique}} + \varphi_{\text{déplacement}} + \varphi_{\text{bruit}}}_{\text{Phase interférométrique}} \quad (4)$$

En supprimant la phase topographique $\varphi_{\text{topographique}}$, la phase orbitale φ_{orbite} , la phase atmosphérique $\varphi_{\text{atmosphérique}}$ et la phase du bruit φ_{bruit} , il ne restera de la phase totale φ , que la phase du déplacement $\varphi_{\text{déplacement}}$.

Cohérence

Lors de la création de l'interférogramme à partir de deux images recalibrées, une phase et une cohérence sont données. Cette valeur de cohérence varie dans un intervalle de [0 ; 1]. Plus la valeur se rapproche de 1, plus la cohérence, c'est-à-dire la ressemblance, entre deux images est excellente. Si la cohérence est bonne, la qualité de l'interférogramme est bonne, donc l'estimation du déplacement est plus précise. Au contraire, si l'intervalle entre les deux images est grand, il y a un risque de perte de cohérence. Par conséquent, la formation de l'interférogramme différentiel ne marchera plus.

Déroulement de phase : phase unwrapping

En déroulement de phase (phase unwrapped), étape de l'interférométrie, il s'agit de retrouver la "vraie" valeur de la phase interférométrique, qui se traduit par l'équation 5 (d'après Carnec, 1993) et

illustrée par la figure 8. Il faut noter que cette étape est incertaine lorsque la cohérence est faible c'est à dire que la cohérence est proche de 0 (Squarzoni, 2003).

$$\varphi = \varphi_p + 2n\pi \text{ où } n \text{ est un entier} \quad (5)$$

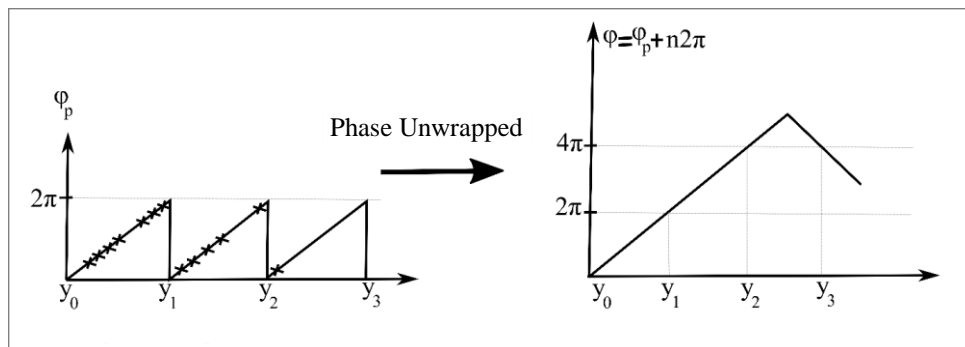


Figure 8: Principe du déroulement de phase (d'après Carnec, 1933 ; modifié par Pourrain, 2020)

Par exemple, si la phase vaut π alors la valeur principale peut-être 3π , 5π ou encore 7π ... ou si la phase vaut 2π alors la « vraie » valeur peut-être 4π , 6π ... selon le cercle trigonométrique.

3 Synthèse du chapitre 1

Ce premier chapitre a permis de découvrir les quatre sites de mouvements de terrain savoyards à étudier : le mouvement du Montgombert, le mouvement du Bersend, le mouvement de Ballandaz et le mouvement du Freney ; ainsi que le principe de l'interférométrie radar différentiel. Le chapitre suivant détaille la procédure de traitement des images radar *sentinel-1*.

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT DES IMAGES SAR

Ce chapitre présente la méthode utilisée du téléchargement des données aux traitements de ces dernières pour aboutir à des résultats.

1 Les images SAR utilisées dans le cadre de l'étude

1.1 Où récupérer les données images SAR *Sentinel-1* ?

Les données utilisées dans le cadre de l'étude sont issues du site de l'ASF (Alaska Satellite Facility) qui nécessite de créer gratuitement un compte et dont voici le lien: <https://search.asf.alaska.edu/#/>. L'ASF appartient à l'université d'Alaska Fairbanks dont leur principal objectif est de rendre les données de télédétection de haute qualité accessibles par les scientifiques du monde entier.

Les données téléchargées sont plus précisément issues du projet ESDIS (Earth Science Data and Information System) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration).

Il faut noter, qu'en raison de la date de lancement des missions *Sentinel-1*, les premières acquisitions téléchargeables remontent au 15 juin 2014. Aucune donnée antérieure à cette date n'est disponible.

1.2 Présentation des données SAR téléchargées

Les images SAR *Sentinel-1* utilisées dans le cadre de cette pré-étude sont téléchargées dans un mode d'acquisition ascendant et descendant sur la période du 24 novembre 2019 au 19 mars 2020 représentant un jeu de donnée acquis sur quarante dates.

Cette période est choisie car il s'agit de la période la plus récente par rapport au moment du début de l'étude (mars 2020). De ce fait, les données téléchargées couvrent une période majoritairement hivernale et pourraient avoir une limite majeure : l'enneigement des versants. *A contrario*, si la période couvrait la saison estivale, la densité de la végétation aurait pu être également une limite principale à l'étude, en brouillant le signal.

Le mode descendant (dont la direction de la LOS est Est) avait été choisi dans un premier temps en raison de l'orientation des versants (principalement Ouest) où se situent les zones d'étude. Effectivement, la série descendante semblait plus appropriée en raison de son orientation et donc des distorsions plus faibles. Une série ascendante (dont la direction de la LOS est Ouest) a été également téléchargée pour affirmer ou non certains constats dans les résultats de la série descendante, par comparaison de ces derniers. Le tableau disponible en annexe 1 est un résumé des paramètres enregistrés sur le site de l'ASF pour télécharger les données utilisées dans cette étude.

Le tableau 1 ci-dessous présente les données téléchargées : les dates des images SAR, le mode d'acquisition et le satellite (SA/SB) duquel elles sont recueillies.

Dates	Satellites	Mode d'acquisition	Dates	Satellites	Mode d'acquisition
24.12.2019	SB	Descendant	26.11.2019	SA	Ascendant
30.11.2019	SA	Descendant	02.12.2019	SB	Ascendant
06.12.2019	SB	Descendant	08.12.2019	SA	Ascendant
12.12.2019	SA	Descendant	14.12.2019	SB	Ascendant
18.12.2019	SB	Descendant	20.12.2019	SA	Ascendant
24.12.2019	SA	Descendant	26.12.2019	SB	Ascendant
30.12.2019	SB	Descendant	01.01.2020	SA	Ascendant

05.01.2020	SA	Descendant	07.01.2020	SB	Ascendant
11.01.2020	SB	Descendant	13.01.2020	SA	Ascendant
17.01.2020	SA	Descendant	19.01.2020	SB	Ascendant
23.01.2020	SB	Descendant	25.01.2020	SA	Ascendant
29.01.2020	SA	Descendant	31.01.2020	SB	Ascendant
04.02.2020	SB	Descendant	06.02.2020	SA	Ascendant
10.02.2020	SA	Descendant	12.02.2020	SB	Ascendant
16.02.2020	SB	Descendant	18.02.2020	SA	Ascendant
22.02.2020	SA	Descendant	24.02.2020	SB	Ascendant
28.02.2020	SB	Descendant	01.03.2020	SA	Ascendant
05.03.2020	SA	Descendant	07.03.2020	SB	Ascendant
11.03.2020	SB	Descendant	13.03.2020	SA	Ascendant
17.30.2020	SA	Descendant	19.03.2020	SB	Ascendant

Tableau 1 : Présentation des données téléchargées dans les deux modes d'acquisition

Les images SAR ont la particularité d'avoir une grande fauchée contrairement à d'autres méthodes. Les figures 9 et 10 localisent la fauchée exacte des images téléchargées, respectivement en modes descendant et ascendant, sur le site de l'ASF issues des deux satellites : S1A et S1B.

Ces deux cartes (fig. 9 et 10) montrent ainsi clairement ce qui a pu être évoqué dans la bibliographie : l'emprise des images est très importante (plusieurs kilomètres carrés). Elle est d'un peu plus de 47 600 km² chacune. Par rapport à nos secteurs d'études (fig.1), celle-ci est très importante.

Etant donné que les images ascendantes issues des satellites SA ne couvraient pas toute la zone d'étude, deux lots d'images SA avec une emprise différente ont été téléchargés par date.

Une liste des noms des fichiers téléchargés sur le site ASF est disponible en annexe 2.

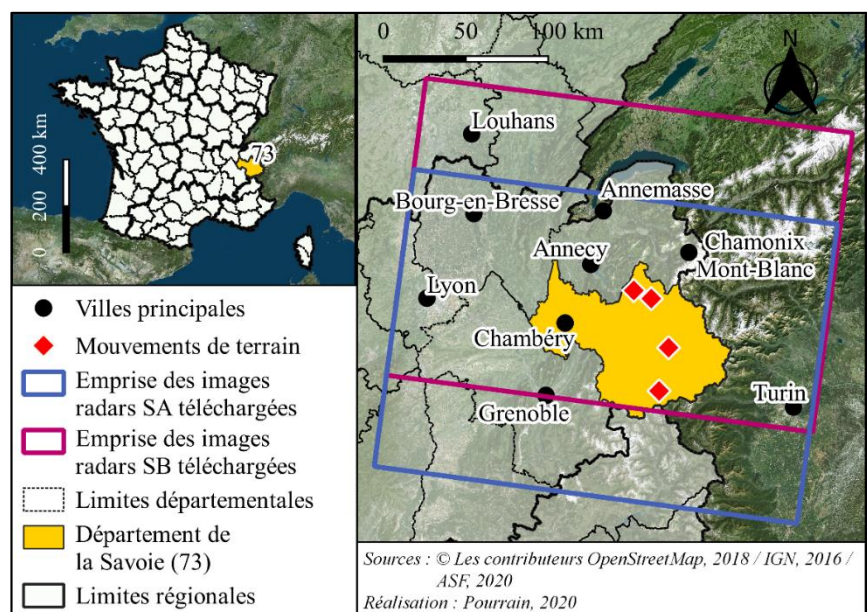


Figure 9 : Emprise des images SAR descendantes téléchargées sur le site de l'ASF

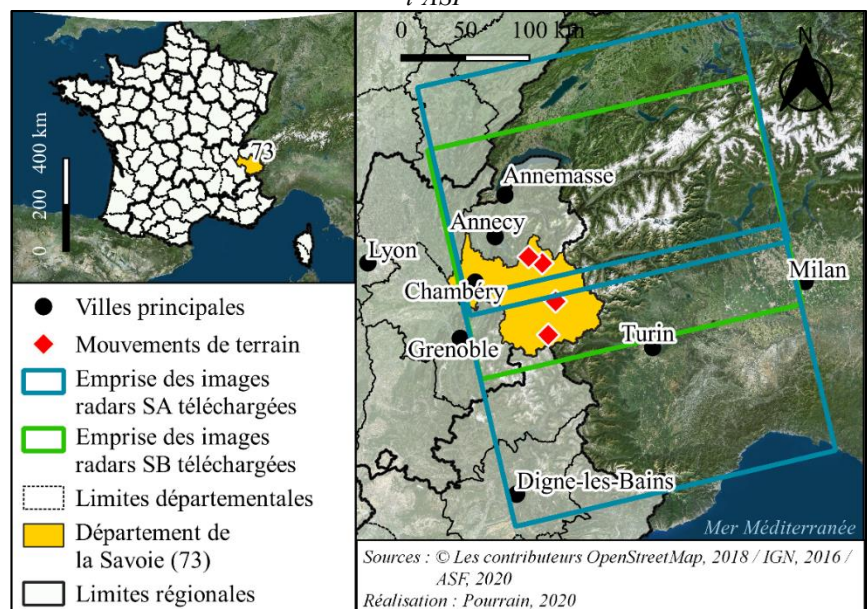


Figure 10 : Emprise des images SAR ascendantes téléchargées sur le site de l'ASF

2 Méthodologie : formation d'un interférogramme différentiel

2.1 Quel logiciel utilisé ?

La boîte à outils *Sentinel-1* (SNAP (SentiNel Application Platform ; fig. 11) est utilisée pour cette pré-étude de ces quatre mouvements de terrain en Savoie. Il s'agit d'un logiciel gratuit téléchargeable via ce lien : <http://step.esa.int/main/download/>. Cette boîte à outils a été créée par la Commission Européenne et développée par l'ESA (European Space Agency / agence européen spatiale). Il s'agit d'un outil permettant le traitement d'images radar pour une meilleure connaissance de la Terre et de son fonctionnement. L'annexe 3 présente l'ensemble des fonctions SNAP utilisées dans cette étude pour former les interférogrammes différentiels. Cette annexe présentera de manière plus détaillée les étapes de traitement.



Figure 11 : Logiciel Sentinel-1 Toolbox

2.2 Prétraitement des données

Chaque image SAR téléchargée se compose de « bursts » séparés par des lignes de démarcation et en faisceaux « IW » (Interferometric Wide) (fig.12). Dans l'objectifs de former les interférogrammes différentiels chaque image SAR a été réduite à une zone de traitement en sélectionnant les « bursts » et le faisceau souhaité.

Dans le cas de cette étude, une image (= une date) est traitée en deux parties séparément au lieu d'une en raison de la limite de la capacité de calcul. D'une part ce sont les « bursts » 6 et 7 qui ont été traités ensemble, puis les « bursts » 8 et 9 pour les images SB (fig.12) et d'autres part ce sont les « bursts » 3 et 4, puis 5 et 6 des images SA qui sont traités de la série descendante. De plus, pour les deux types d'images, IW2 est sélectionné. Les autres « bursts » et largeurs ne sont pas utilisés car aucun mouvement de terrain à étudier ne se trouve sur cette zone d'étude. Pour la série ascendante, ce sont les « bursts » 2 et 3 puis 4 et 5 des images SB qui sont sélectionnés et pour les images SA (dont deux lots ont dû être téléchargés pour avoir toutes les zones d'études) ce sont les « bursts » 8 et 9 du lot 1 et 1 et 2 du lot 2. Pour l'ensemble de cette série ascendante, le mode de faisceau utilisé est IW1.

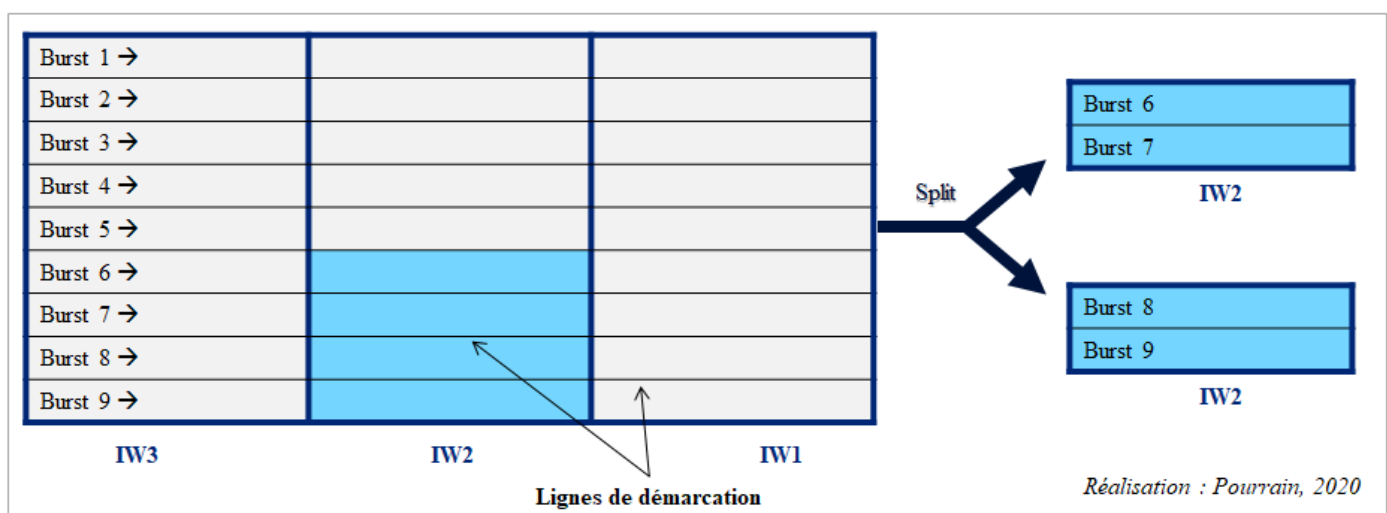


Figure 12 : Schéma expliquant la structure et le découpage (split) des images issues des satellites SB descendants

2.3 Recalibrage des données en deux stratégies : « mono-référence » et « multi-référence »

Le calibrage consiste en un ré-échantillonnage des données par rapport à une image de référence dite image « Primaire » ou « de référence ». L'objectif de cette étape est de corriger les petites déformations et de recalibrer les images entre elles pour que l'interférométrie SAR marche. Les images « Secondaires » sont recalibrées par rapport à une image « Primaire », et deviennent des images appelées images « secondaires ré-échantillonnées ».

Le choix des images « primaires » est libre à chacun en fonction de la stratégie adoptée.

2.3.1 Ré-échantillonnage « mono-référence »

Dans cette première stratégie, toutes les images dites images « Secondaires » de la série descendante sont recalibrées par rapport à une image « Primaire » : le 11 janvier 2020. Cette date est choisie car elle se trouve au milieu de la série de données descendante. Ici le traitement ne s'est fait que sur la série descendante. Dans cette stratégie, plusieurs intervalles de dates entre les interférogrammes différentiels seront donc faits (six jours, douze jours...).

2.3.2 Ré-échantillonnage « multi-référence »

Dans cette seconde stratégie, pour chaque date "secondaire", l'image de référence est la date acquise six jours plus tard, soit la date la plus récente par rapport à aujourd'hui. Ce principe est appliqué à l'ensemble du jeu de données ascendant et descendant. Le traitement sur la série ascendante permet dans cette stratégie de confirmer ou non certains résultats constatés sur la série descendante. De plus, il pourra mettre en lumière certains résultats non visibles sur la première série en raison des distorsions dues au mode d'acquisition (cf. chapitre 1).

3 Formation de l'interférogramme différentiel

L'analyse de la phase permet de trouver le déplacement recherché. En effet, d'après la formule suivante (équation 6), à partir de la phase « totale » φ donnée par l'interférogramme précédemment créé et d'autres paramètres (= composantes) plus ou moins connus, la phase correspondant au déplacement $\varphi_{\text{déplacement}}$ peut être estimée en supprimant la phase topographique, la phase orbitale...

$$\varphi = \varphi_{\text{topographique}} + \varphi_{\text{orbite}} + \varphi_{\text{atmosphérique}} + \varphi_{\text{déplacement}} + \varphi_{\text{bruit}} \quad (6)$$

3.1 La phase orbitale

Dans cette étape il s'agit de demander à l'algorithme de trouver les informations liées à l'orbite du satellite lors de la prise de l'image, dans les paramètres de celle-ci, et de les prendre en compte dans le traitement.

3.2 La phase topographique

Le paramètre lié à la topographie $\varphi_{\text{topographique}}$ est corrigé à l'aide d'un MNT. La boîte à outils et la fonction associée à la suppression de ce paramètre fournit automatiquement un MNT plus ou moins précis, adapté dans son calcul. Il s'agit d'un MNT issu du SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) d'une résolution de 90m. Pour un résultat plus précis il est conseillé d'obtenir son propre MNT avec une meilleure résolution¹. Il est préférable que cette résolution soit proche de celle des images SAR (ici 20 m).

¹ Le contexte sanitaire actuel n'a pas permis d'obtenir à temps ce MNT qui devait nous être transmis pour l'étude.

3.3 La phase atmosphérique et la phase liée au bruit

Les paramètres liés aux conditions atmosphériques $\varphi_{atmosphérique}$ ne sont pas éliminés. Effectivement, la complexité de cet élément ne permet pas de l'exclure de l'équation. Enfin, le facteur bruit φ_{bruit} est supprimé en deux temps mais ne peut pas être entièrement corrigé. La phase liée au bruit est dans un premier temps filtrée avant le déroulement de phase (phase unwrapping) dans l'objectif de faciliter ce prochain traitement, puis est supprimée après le déroulement de phase.

A ce stade du traitement, il ne reste que la phase liée à l'atmosphère et une partie de la phase liée au bruit. Seules la phase orbitale et la phase topographique ont pu être supprimées. Le résultat de l'interférogramme différentiel présente ainsi la phase interférométrique ($\varphi_{atmosphérique} + \varphi_{déplacement} + \varphi_{bruit}$) et est exprimé en radian dans un intervalle de $-3,14$ à $3,14$ correspondant à l'intervalle $[-\pi ; \pi]$.

4 Géocodage

Le géocodage permet de référencer l'image dans un système de coordonnées géographiques choisi (WGS84, Lambert 93...) et donc de passer de la géométrie radar à la géométrie sol. Cela contribue par la suite à pouvoir visualiser les résultats dans un logiciel SIG (Système d'Information Géographique) tel que QGIS, ou dans Google Earth...

Les interférogrammes différentiels précédemment créés sont géocodés en Lambert 93, système de coordonnées français, afin d'identifier des signaux de déplacement et d'estimer par la suite s'il est nécessaire de procéder au déroulement de phase et à la conversion des unités radians en unités métriques.

La qualité du MNT utilisé dans la formation de l'interférogramme différentiel influence la précision du géoréférencement des résultats. De ce fait, la résolution du MNT utilisé étant de 90 m, ce géoréférencement risque de ne pas être très précis.

5 Synthèse du chapitre 2

Les données utilisées sont issues du projet ESDIS de la NASA et ont été récupérées sur le site de l'ASF. Elles couvrent la période du 24 novembre 2019 au 19 mars 2020. Cette série de données est issue d'un mode d'acquisition ascendant et descendant.

Suite au téléchargement des données à l'aide du script python associé, l'outil SNAP de l'ESA a permis de les étudier et de générer des interférogrammes différentiels. Le traitement des données s'est fait en partie à l'aide d'un Graph Builder (ou Model Builder) (fig. 13) permettant d'automatiser une suite de traitements répétitifs. Ce modèle permet de générer l'interférogramme différentiel à partir des images découpées.



Figure 13 : Graph Builder représentant la chaîne de traitement automatisée utilisée dans cette étude pour former un interférogramme différentiel (Yan, 2003, Comm.pers.)

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre présente les premiers résultats qu'il a été possible d'obtenir suivant une stratégie mono-référence et multi-référence. Il met en avant également la méthode la plus adaptée dans le cadre de l'étude et expose les limites de l'interférométrie différentielle dans le cadre du suivi de nos quatre sites d'étude.

1 Identification des signaux de déplacements : un exemple de signal

La figure 14 présente un signal de déplacement qui a pu être facilement identifiable au niveau de Lochieu dans l'Ain (01) sur trois interférogrammes différentiels issus de la série descendant en stratégie mono-référence : le 11 janvier 2020 - 18 décembre 2019, 11 janvier 2020 - 30 décembre 2019 et 11 janvier 2020 - 17 janvier 2020. Ce signal de déplacement est plus ou moins visible sur d'autres interférogrammes différentiels.

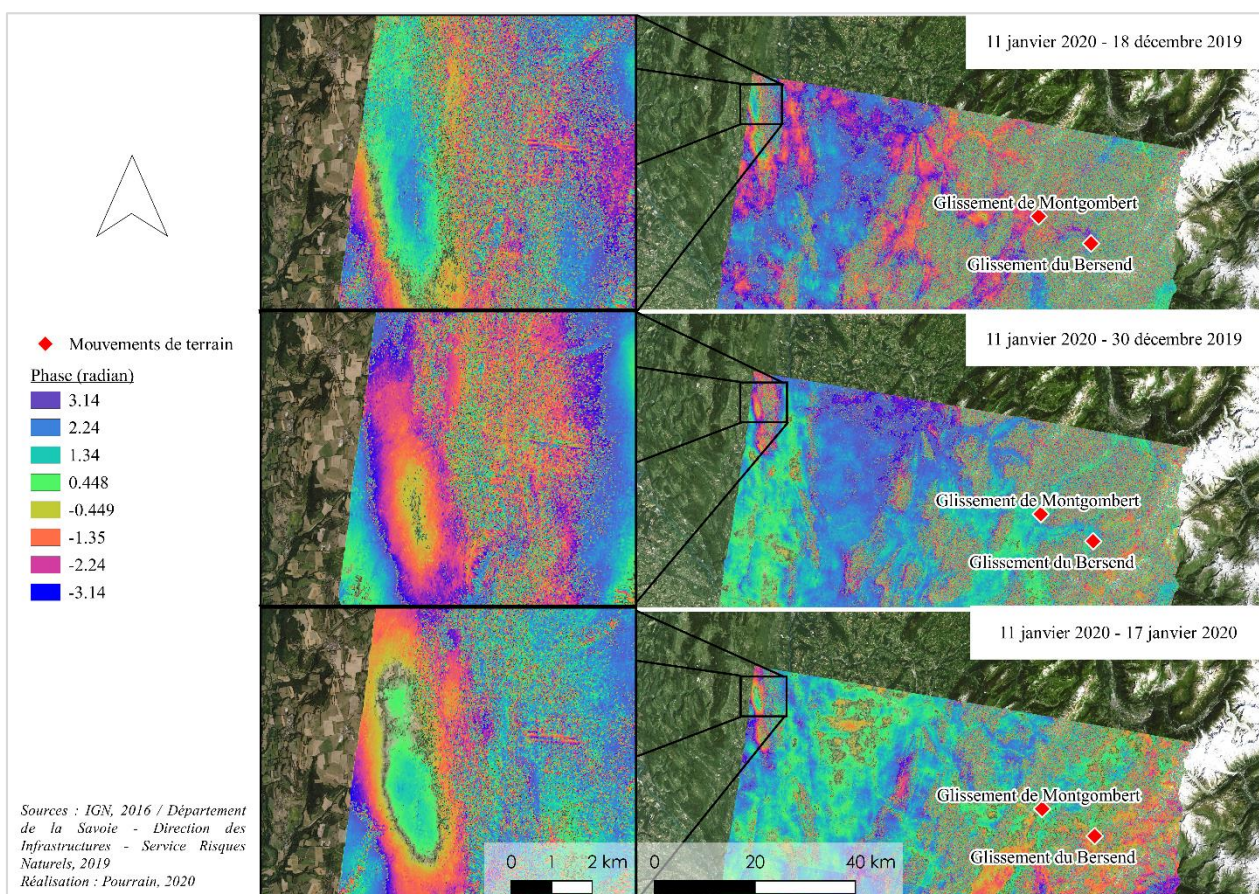


Figure 14 : Signal de déplacement au niveau de Lochieu (Ain) sur trois interférogrammes différentiels : 11 janvier 2020 - 18 décembre 2019, 11 janvier 2020 - 30 décembre 2019 et 11 janvier 2020 - 17 janvier 2020

Un signal de déplacement sur un interférogramme différentiel se traduit par des franges interférométriques plus ou moins marquées formant un "cercle" comme cela est visible sur les zooms de la figure ci-dessus. Sur cette figure, le signal de déplacement couvre une grande surface de plusieurs kilomètres carrés ce qui suppose qu'une grande surface de terrain a bougé entre les deux dates d'acquisition. Une visualisation sur image aérienne permet de dire que ce signal de déplacement se situe en bas d'un versant, particulièrement couvert de surfaces agricoles. Cet exemple montre qu'un mouvement de terrain sur de grandes surfaces pourrait parfaitement être détectable sur des interférogrammes différentiels avec une résolution de 20 m. En fonction des dates utilisées pour la création des interférogrammes différentiels, et donc dans ce cas de l'intervalle entre les dates, la phase

n'a pas la même valeur. Effectivement en regardant les zooms du 11 janvier 2019 – 18 décembre 2019 et 11 janvier 2019 – 17 janvier 2020, la valeur au centre du signal avoisine les 0,448 radians et les -2,24 radians en périphérie. Pour le troisième interférogramme différentiel, celui du 11 janvier 2019 – 30 décembre 2019, la valeur centrale n'est plus 0.448 radians mais des valeurs proches de -0,449 radians et la valeur en périphérie est très proche de $-\pi$.

L'intervalle entre les dates de l'interférogramme différentiel influe sur la vitesse du mouvement détectable : si le mouvement est trop faible (inférieur à sa demi-longueur d'onde) (Schoeneich, comm. pers.), celui-ci ne sera pas détecté sur des intervalles trop courts. De ce fait, il faut utiliser des intervalles plus grands pour voir le mouvement. *A contrario*, si le mouvement est rapide, celui-ci est détectable sur des intervalles courts mais le signal sera incohérent si ces intervalles sont trop éloignés.

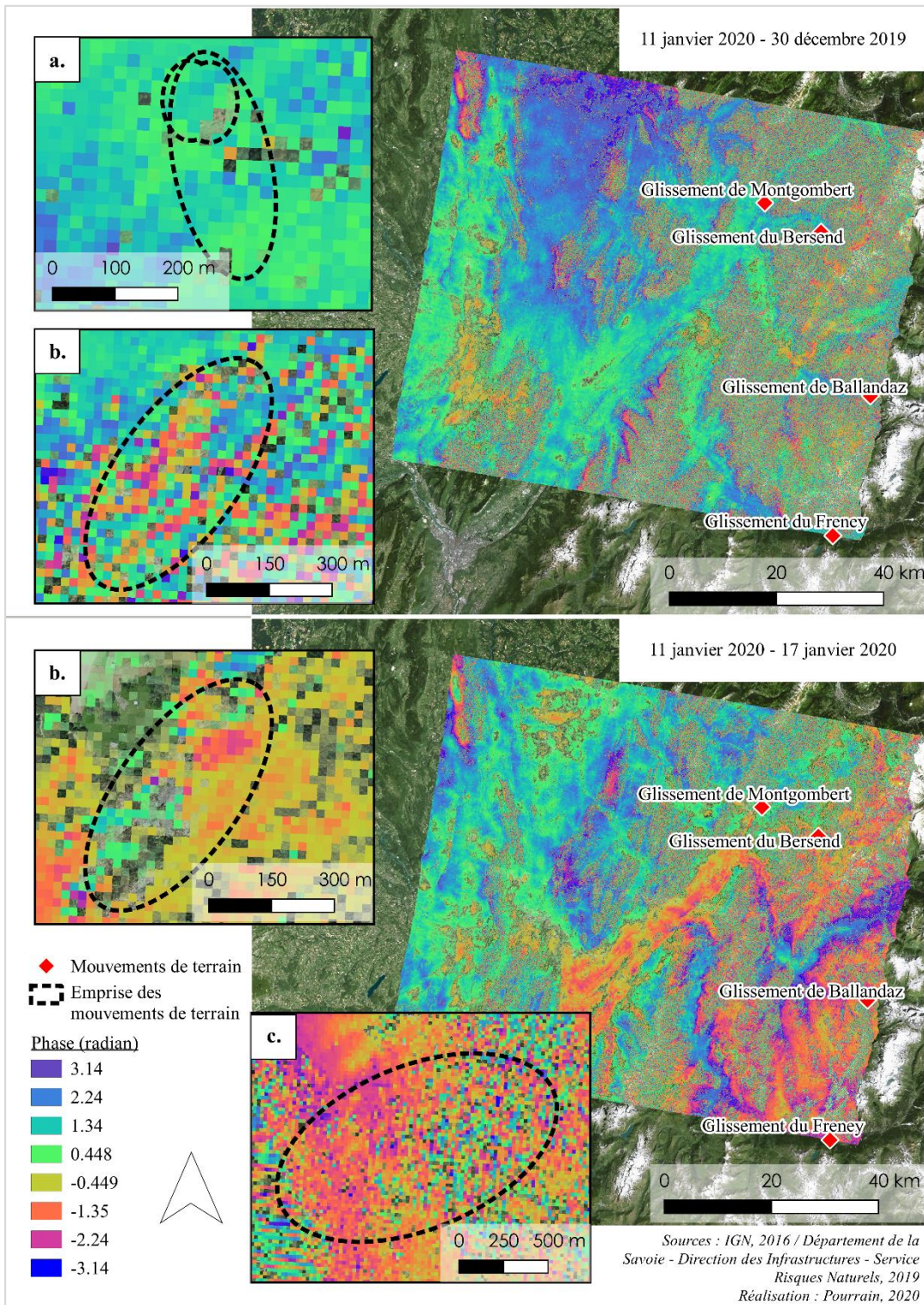
2 Analyse des interférogrammes différentiels sur les quatre sites d'étude

2.1 Analyse des résultats issus de la stratégie mono-référence

Les premiers résultats (l'ensemble des résultats observés sont disponibles en annexe 4) ont laissé paraître peu, voire aucun signal de déplacement notamment sur le secteur d'étude. Au vu de la visualisation de ces résultats, les interférogrammes différentiels les plus acceptables sont ceux du 11 janvier 2020 - 30 décembre 2019, 11 janvier - 05 janvier 2020, le 11 janvier - 17 janvier 2020 et 11 janvier - 23 janvier 2020. La figure 15 (page suivante) présente deux de ces interférogrammes différentiels et la figure 16 présente une date où l'interférogramme différentiel n'est pas interprétable.

Les résultats de la figure 15 laissent paraître des interférogrammes différentiels moins décorrélés (« brouillés ») que ceux de la figure 16. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les dates du D-InSAR de la figure 16 soient plus éloignées que celles de la figure 15. Ainsi, il y a plus de cohérence entre les dates des interférogrammes différentiels de la figure 15 ce qui rend possible l'identification d'un signal de déplacement. Aussi, en s'intéressant de plus près aux cartes de la figure 15 (où seuls les zooms potentiellement intéressants sont faits), un signal de déplacement pour le mouvement du Bersend est identifié sur l'interférogramme différentiel du 11 janvier - 17 janvier 2020 (zoom b). Effectivement, un « cercle » allant du violet au centre à l'orange jaune vers l'extérieur le caractérise. Quant au mouvement de Montgombert du 11 janvier 2020 -30 décembre 2019, la nuance de couleur bleue vers vert n'est pas assez prononcée pour affirmer un possible signal de déplacement.

Pour la figure 15 et 16, il peut être noté un effet de vallée : les zones les moins décorrélées se trouvent dans les fonds de vallées, des zones non couvertes par la végétation.



◀ **Figure 15** : : Interférogrammes différentiels les plus acceptables : **a.** zoom sur le mouvement de Montgombert ; **b.** zooms sur le mouvement de Bersend ; **c.** zoom sur le mouvement de Ballandaz

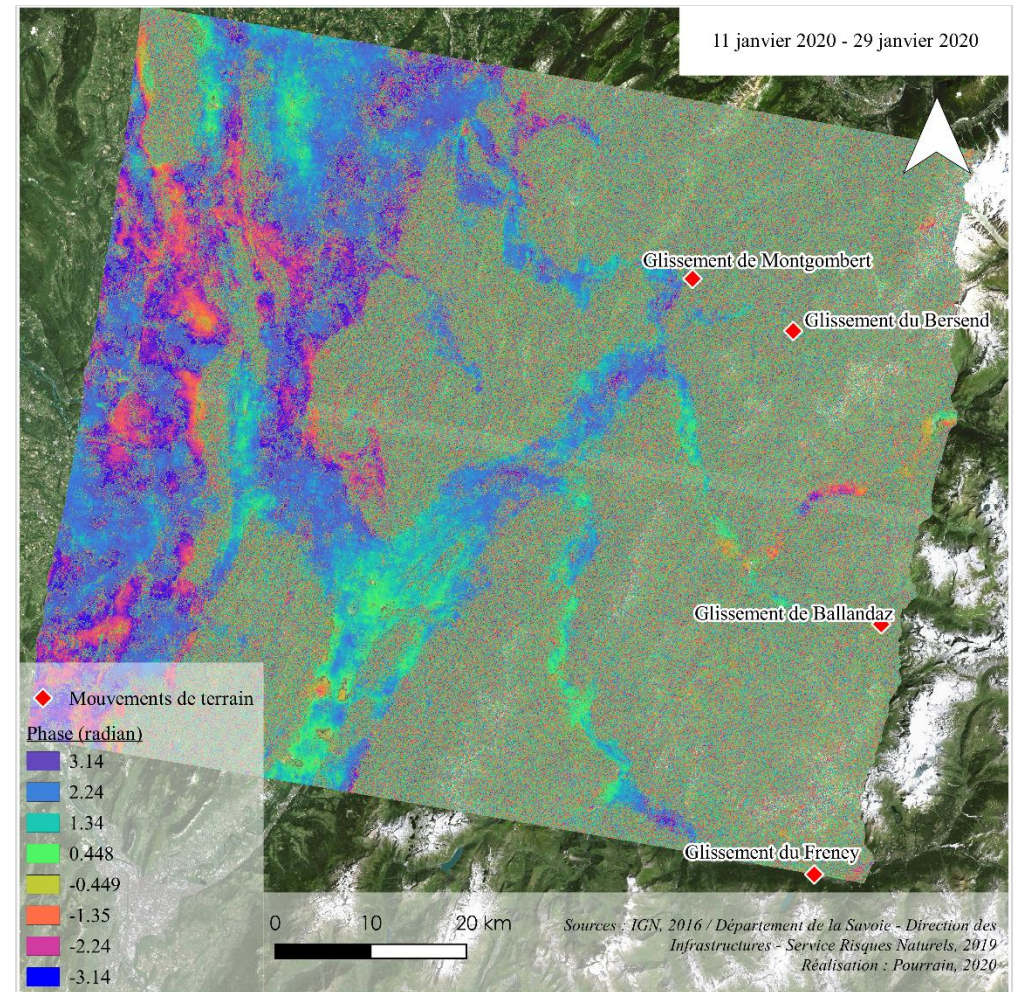


Figure 16 : Interférogramme différentiel du 11 janvier - 29 janvier 2020 parmi les D-InSAR les moins conclusifs

Bien que les résultats précédents ne puissent pas apporter une réponse claire, ils ont permis de réfléchir sur cette première stratégie mono-référence utilisée. En effet, les interférogrammes différentiels de la figure 15 ont des dates d'intervalle proches (6 à 12 jours) du fait qu'elles sont issues de dates proches de l'image "Primaire" (11 janvier 2020). Ainsi, leur cohérence est plus élevée. Il semblerait alors, que des dates trop éloignées ne soient pas la meilleure stratégie sur de petites zones. Au vu de ce premier constat, une stratégie multi-référence pourrait être plus adaptée.

2.2 Analyse des résultats issus de la stratégie multi-référence

Les résultats de cette deuxième stratégie (l'ensemble des résultats observés sont disponibles en annexe 5) présentent des interférogrammes différentiels créés à partir de deux dates à six jours d'intervalle et des résultats issus de la série descendante et ascendante.

Les résultats présentés dans les figures 17 et 18 (page suivante) sont les plus parlants et présentent des résultats parmi les plus acceptables. Ces figures montrent également une concordance visuelle entre les zooms des deux interférogrammes différentiels

La figure 17 (à gauche) présente un résultat quasi similaire en mode ascendant et descendant pour le glissement de Montgombert avec majoritairement une couleur bleue et quelques pixels rouges-orangés au centre. Le résultat semble pour autant trop décorrélé pour dire si oui ou non, un signal de déplacement est présent.

Concernant la figure 18 (à droite), le zoom sur le glissement du Bersend, en série descendante (17 janvier – 23 janvier 2020), laisse paraître un signal de déplacement marqué allant des couleurs chaudes au centre vers des couleurs froides à l'extérieur de ce signal. Ce signal de déplacement visible en mode descendant semble être confirmé sur la série ascendante. Cependant, l'hypothèse de l'effet de vallée peut être de nouveau évoquée. En regardant les interférogrammes différentiels dans leur ensemble, les fonds de vallées, souvent moins végétalisés, sont moins décorrélés que les versants. Ces effets de vallées peuvent être aussi dus à la qualité du MNT ayant une résolution de 90 m : ce qui pourrait sembler à un signal de déplacement au niveau du glissement du Bersend serait peut-être dû à des résidus de MNT.

Concernant le mouvement de Montgombert, en série descendante, l'interférogramme différentiel pourrait peut-être faire penser à un signal de déplacement, mais la qualité du résultat est encore évoquée en raison de la résolution du MNT utilisé. De plus, cette observation ne se confirme pas en série ascendante, où le résultat est homogène sur le mouvement de Montgombert.

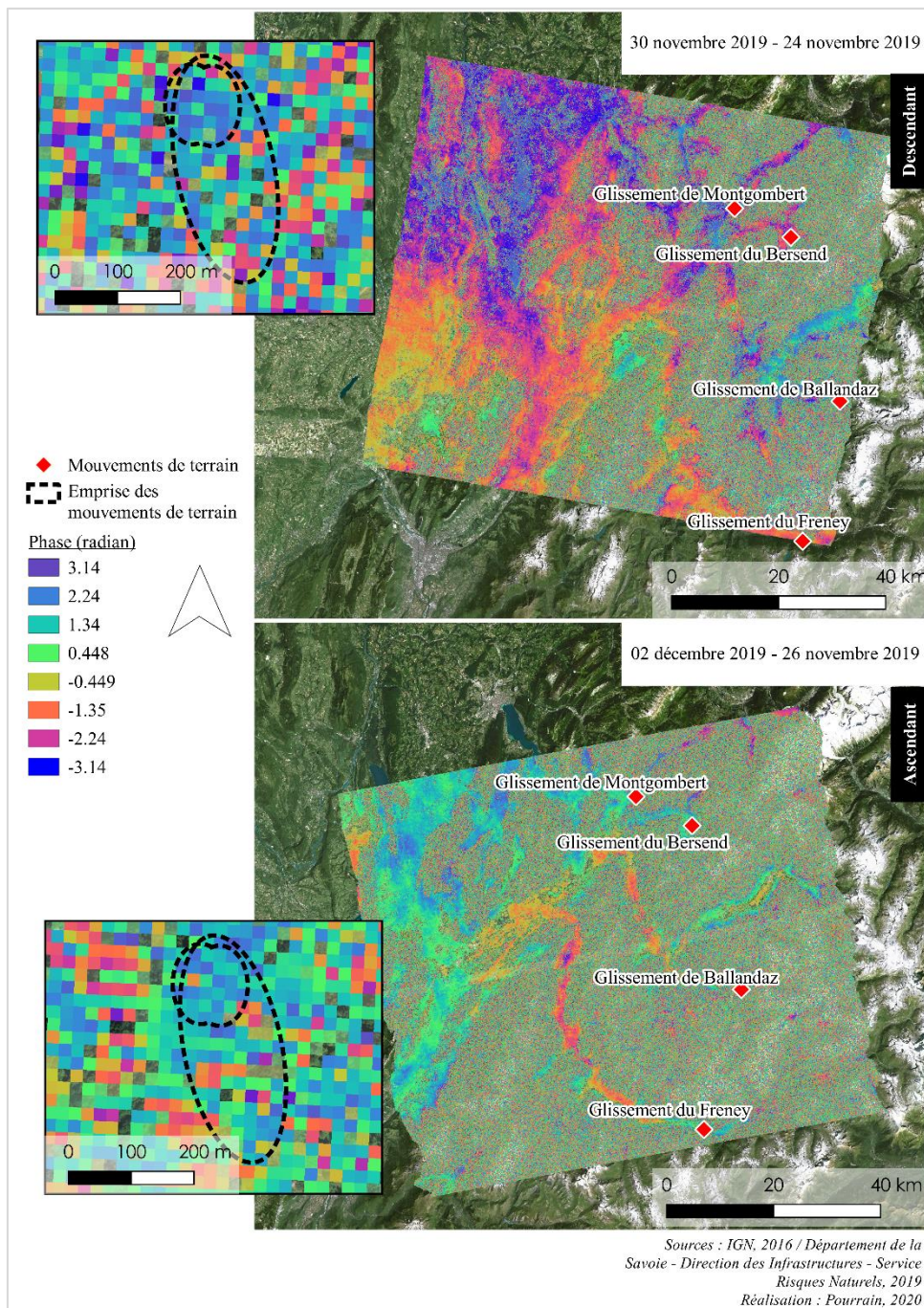


Figure 17 : Interférogrammes différentiels des 24 novembre – 30 novembre 2019 (descendant) et 26 novembre – 02 décembre 2019 (ascendant) et zoom sur le mouvement de Montgombert.

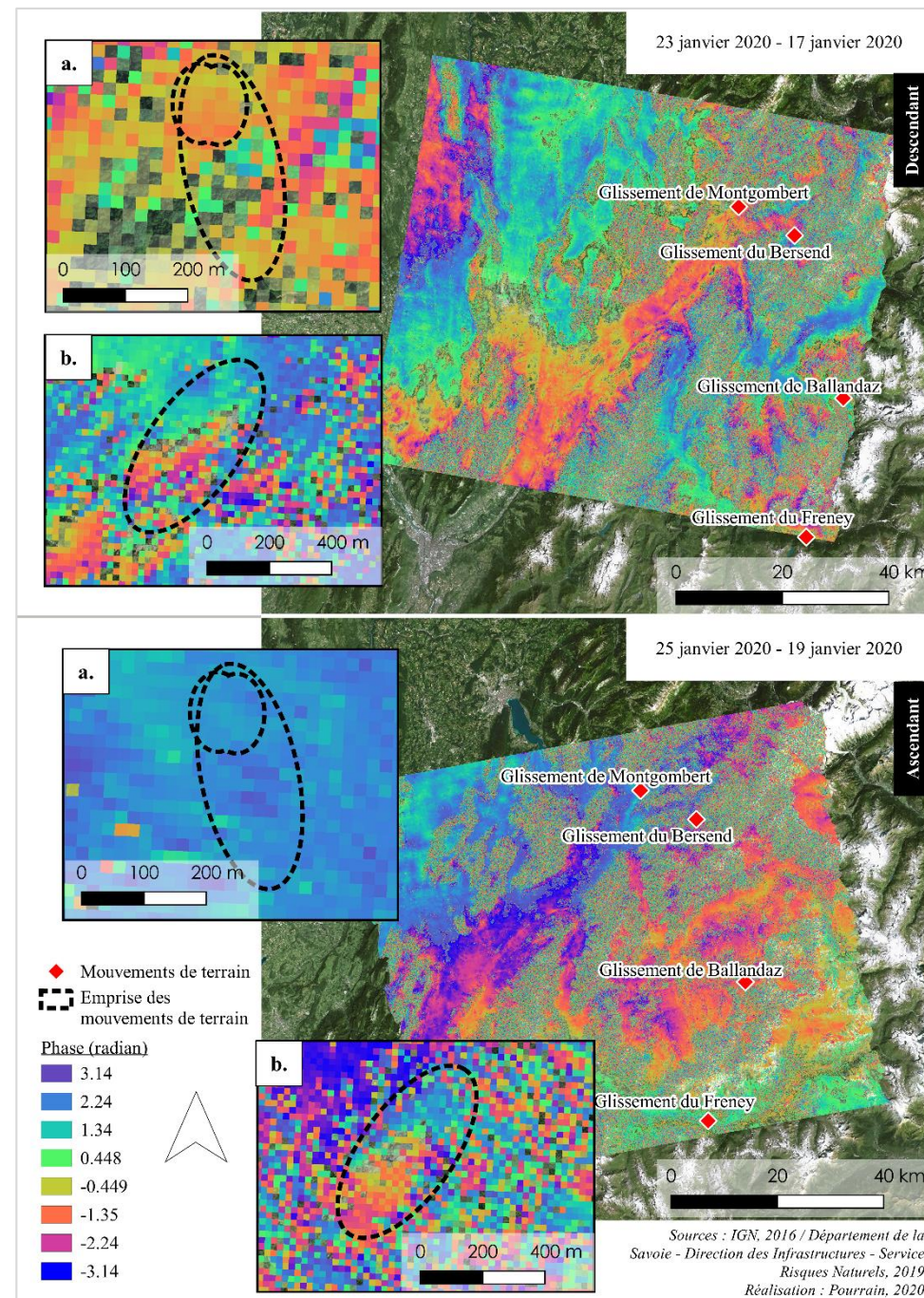


Figure 18 : Interférogrammes différentiels des 17 janvier – 23 janvier 2020 (descendant) et 19 janvier – 25 janvier (ascendant) : a. zoom sur le mouvement de Montgombert ; b. zooms sur le mouvement de Bersend

3 Discussion des résultats

Les résultats précédents portent tout de même des limites (effet de vallée, effet atmosphérique) quel que soit le mode d'acquisition.

3.1 Les effets de vallée et MNT

La figure 19 montre des effets de vallée qui résultent principalement d'erreurs de MNT. Le MNT utilisé n'était pas suffisamment précis (90 m) par rapport à la résolution des images SAR (20m).

Ce constat d'effet de vallée est visible sur l'ensemble des interférogrammes différentiels (annexes 4 et 5) quel que soit le mode d'acquisition. Cette erreur de MNT est très flagrante au niveau du mouvement du Freney.

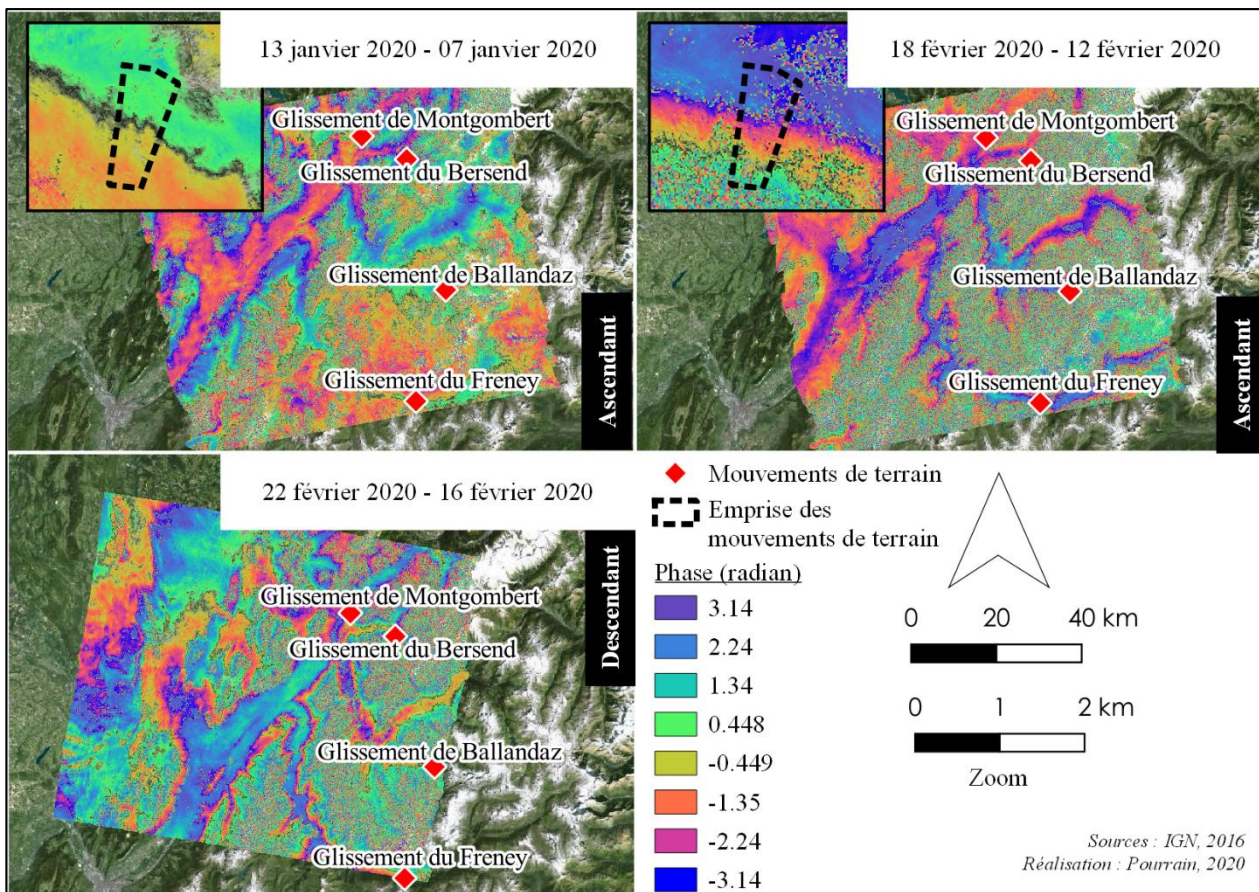


Figure 19 : Effets de vallée sur trois interférogrammes différentiels et zooms sur le mouvement du Freney

3.2 Les effets atmosphériques

La figure 20 montre les deux types d'effets atmosphériques pouvant être présents sur des interférogrammes différentiels. Ces effets atmosphériques résultent des conditions atmosphériques lors de l'acquisition des images SAR formant l'interférogramme différentiel. La nébulosité de l'atmosphère lors de l'acquisition peut provoquer une diffraction de l'onde radar et induire des déformations sur les interférogrammes différentiels.

Deux types d'effets peuvent être recensés :

- **Effet atmosphérique stratifié** (fig. 20a) : impact sur de grandes zones dû à des différences de pressions, de températures... Cet effet se traduit par un résultats non homogène (des couleurs vertes parmi des couleurs bleues par exemple). En théorie, dans les zones sans signal de déplacement, les couleurs sont unies.

- **Effet atmosphérique turbulent** (fig. 20b) : impact sur des zones plus localisées dû à des différences de précipitations, d'humidité... Ce phénomène se traduit sur les interférogrammes différentiels par des « tourbillons » identifiables à des signaux de déplacements. Cependant, la localisation en vallée et la quantité de ces « tourbillons » permettent de dire qu'il s'agit bien d'un effet atmosphérique. En s'intéressant à la météo du 29 janvier et du 04 février à 6h00 (les images radar ont été prises à environ 5h45) sur le secteur zoomé (Chambéry) (tableau 2) il est noté que des précipitations ont eu lieu à ce moment, avec une humidité relativement importante.

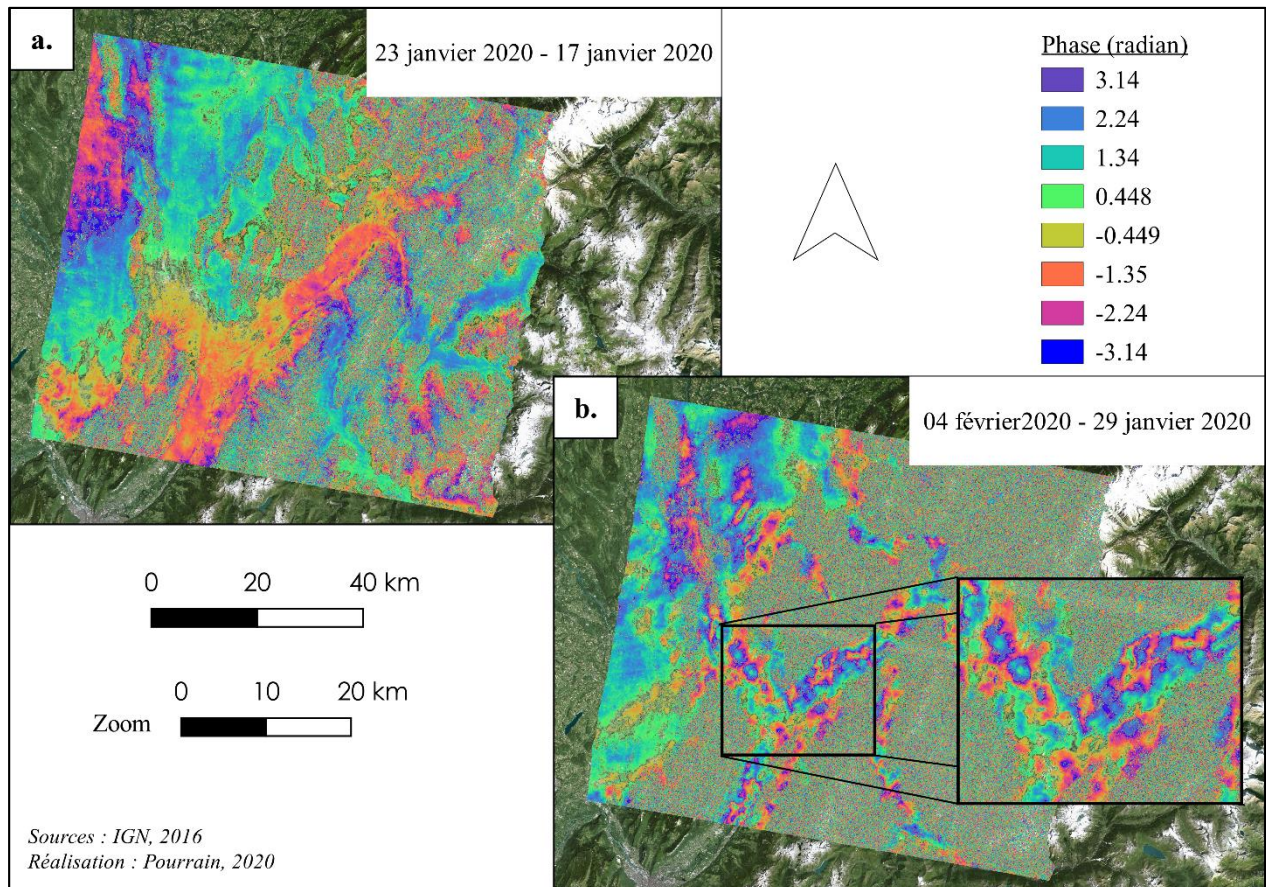


Figure 20 : Effets atmosphériques sur des interférogrammes différentiels issus de la série descendante: **a.** effet atmosphérique stratifié ; **b.** effet atmosphérique turbulent

Station météorologique de Chambéry – Aix-Les-Bains (Savoie) : Aéroport de Vaulx						
Altitude : 235 m						
Coordonnées : 45°38'29''N 5°52'41''E						
Dates	Températures (°C)	Précipitations (mm.h ⁻¹)	Humidité (%)	Pression (hPa)	Visibilité (km)	Hauteur plafond nuageux (m)
17/01/2020	-0,4	0	85	1026,8	15	NA
23/01/2020	-1,6	0	89	1030,4	2,9	NA
29/01/2020	6,1	0,6	86	1017,6	7	1170
04/02/2020	10,6	3,1	63	1021,0	60	720

Tableau 2 : Météo à Chambéry - Aix-Les-Bains du 17, 23, 29 janvier et du 4 février 2020 (d'après infoclimat)

L'annexe 6 présente un tableau avec la météo en Savoie le jour de l'acquisition des images SAR.

Pour contrer les effets atmosphériques, il est important d'avoir un MNT de bonne résolution (Echelard, 2014). Selon Strozzi et al. (2001) la résolution de ce MNT doit être *quasi* équivalente à celle des images SAR utilisées, soit 20 m.

Ce constat marque une fois de plus l'importance de posséder un MNT suffisamment précis pour limiter les effets indésirables sur les interférogrammes différentiels.

3.3 Neige et végétation

La présence de neige peut impacter également sur les résultats. Effectivement, la présence de neige ou non entre deux dates va jouer sur la cohérence, car entre deux dates la surface aura totalement changé. L'acquisition des données étant faite durant la période hivernale, des questions quant à la qualité des résultats peuvent être posées, d'autant plus que les sites d'études se trouvent en majorité en altitude (tableau 3).

La photo 6 (reprenant la photo 3), traduit la présence de neige cet hiver 2019-2020.

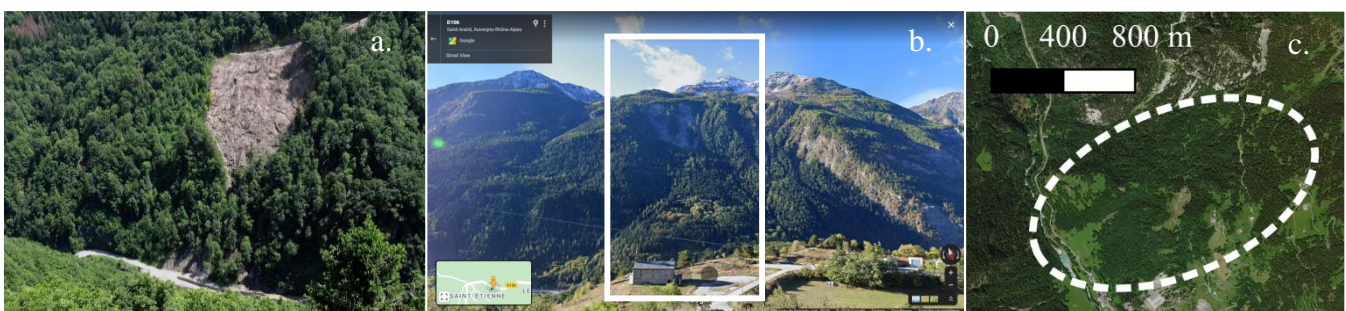


Sites	Altitude (m)
Montgombert	596
Bersend	1 207
Ballandaz	1 454
Freney	1 674

Tableau 3 : Altitude (m) des sites d'études

Photographie 6 : Glissement de terrain de Ballandaz le 4 janvier 2020, emportant la route entre Bozel et Pralognan la Vanoise (Photo Letesse, 2020)

Concernant la végétation, la visualisation d'image optique sur Géoportail, Google Earth et de photos (photo 7), permet de constater que les sites sont majoritairement sous couvert forestier (Freney, Ballandaz, Montgombert). La densité de végétation interfère avec le signal radar émis (Squarzoni, 2003). Cela pourrait ainsi expliquer l'absence de signal, voire un signal brouillé sur les interférogrammes différentiels couvrant notamment des zones forestières. En effet, les changements de surface (ou d'occupation du sol (Pathier, 2004)) entre deux acquisitions d'images SAR impactent le nombre de phases du signal émis pour chaque pixel (Squarzoni, 2003). De ce fait, tout comme la présence en neige, la présence en végétation influe sur le nombre de cycles de l'onde radar entre deux acquisitions d'images SAR, ce qui rend impossible l'étude interférométrique (Squarzoni, 2003).



Photographie 7 : Sites végétalisés : a. Site de Montgombert vu de face (Photo Brassoud, 2016) ; b. Mouvement du Freney vu de face (Photo Google mas) et c. Site de Ballandaz vu du ciel ((QGIS) IGN, 2016 ; réalisation Pourrain, 2020)

La série d'images radars étant acquise en hiver, il serait intéressant de s'intéresser plus précisément à la phénologie des végétaux et leurs caractéristiques. Cela permettrait de savoir s'il s'agit de conifères ou de feuillus et de connaître la période où ils n'ont plus de feuilles, d'autant plus qu'avec le vent, les feuilles bougent aléatoirement ce qui peut affecter les interférogrammes.

3.4 Nombre de pixels par zone d'étude et taille des sites

Les résultats, semblant plus concluant pour une stratégie multi-référence, le calcul du nombre de pixels par zone d'étude a été fait uniquement sur les interférogrammes différentiels issus de cette stratégie en mode descendant. Le tableau 4 ci-dessous présente ainsi la moyenne du nombre de pixels des dix-huit interférogrammes différentiels pour trois sites : Ballandaz, Bersend et Montgombert².

On estime qu'à partir de cent pixels par site, des résultats acceptables de signaux de déplacement peuvent être visibles (Yan, comm. pers.). Cependant, cela peut être relatif et dépendre de la taille des interférogrammes différentiels. En s'intéressant aux résultats du tableau 4, tous les sites d'étude ont plus d'une centaine de pixels, cela permet de dire que les signaux de déplacements pourraient être facilement identifiables et que les sites d'études ne seraient pas trop petits.

Sites	Surface (ha)	Moyenne
Montgombert	46	115
Bersend	150	376
Ballandaz	1 189	2968

Tableau 4 : Moyenne du nombre de pixels des interférogrammes différentiels sur trois sites d'études

Cependant, ce seuil de cent pixels dépend également de la taille des interférogrammes différentiels. Les interférogrammes issus des images SAR de la série descendante, mesurent environ 2 115 555 ha, ce qui représente une emprise très importante par rapport aux sites d'études.

4 Synthèse du chapitre 3

Dans ce chapitre, cinq principaux constats ont été faits :

- Une stratégie multi-référence (plusieurs dates « Primaires ») avec des dates proches étaient plus appropriée qu'une stratégie mono-référence (une date « Primaire »).
- Les résultats ont également mis en avant les effets de vallée générés sur les interférogrammes différentiels en raison d'une mauvaise résolution du MNT utilisé (90 m) par rapport à celle des images SAR (20 m). Il peut alors être dit que la qualité du MNT a moins d'effet sur les fonds plats que sur les versants.
- Les résultats ont révélé que les conditions d'acquisition de l'image radar pouvaient impacter le résultat : bien qu'en théorie l'acquisition des images radar soit indépendante de la couverture nuageuse et du moment de la journée ; en pratique en fonction de la composition de l'atmosphère (nébulosité par exemple), l'onde radar peut être réfractée, induisant des déformations dans les interférogrammes différentiels (effets atmosphériques stratifiés et effets atmosphériques turbulents).
- L'étude de photos et la période d'acquisition des images pourraient laisser penser que la présence de neige a contribué à certaines erreurs sur les interférogrammes différentiels. Tout comme la neige, la végétation est un des phénomènes pouvant expliquer les changements de conditions de surface (ou occupation du sol (Pathier, 2004)). Dans le cas de l'étude présentée dans ce mémoire, ces deux facteurs (neige et végétation) ne sont que des hypothèses et restent discutables. Ils posent la question de la possibilité de détecter un mouvement de terrain en milieu forestier ou en présence de neige même si le mouvement de terrain peut conduire à la destruction d'une partie

² Etant donné que les interférogrammes différentiels générés ne couvrent pas entièrement le site de Freney, celui-ci n'a pas été pris en considération dans le tableau.

de la forêt comme cela est par exemple le cas pour le glissement du Bersend se traduisant par une forêt instable en surface.

- Le nombre de pixels occupés par les sites sur les interférogrammes est suffisant pour observer des signaux de déplacements.

CHAPITRE 4 : RESULTATS ALTERNATIFS ISSUS D'UN AUTRE LOGICIEL : GAMMA

Les résultats précédemment créés ont été générés grâce au logiciel de traitement SNAP *Sentinel-1 Toolbox*. Ce quatrième chapitre présente des résultats générés à l'aide de GAMMA, un logiciel développé par la société suisse GAMMA remote sensing. Tout comme SNAP, GAMMA permet de traiter des images SAR.

1 Avant-propos

Sur les prochains résultats, le traitement est effectué sur une série ascendante et descendante sur plusieurs dates entre septembre 2016 et février 2019 et avec plusieurs intervalles. Contrairement aux interférogrammes différentiels présentés dans le chapitre 3, ici, un MNT de haute résolution est utilisé. Par ailleurs, les images radar *Sentinel-1* exploitées sont acquises en période estivale ce qui ne pose pas le problème de la neige.

2 Visualisation des résultats

2.1 Un effet de vallée moins marqué

Au vu de ces premiers résultats (fig. 21³), les effets de vallée sont moins persistants quel que soit le mode d'acquisition. Cela semble être dû à la résolution du MNT qui aurait limitée ces effets en éliminant de manière plus précise la phase topographique. Bien que les vallées soient moins marquées que dans les interférogrammes différentiels du précédent chapitre, sur un des résultats suivants (21 février 2019 - 27 février 2019), la vallée rejoignant Chambéry à Albertville se démarque.

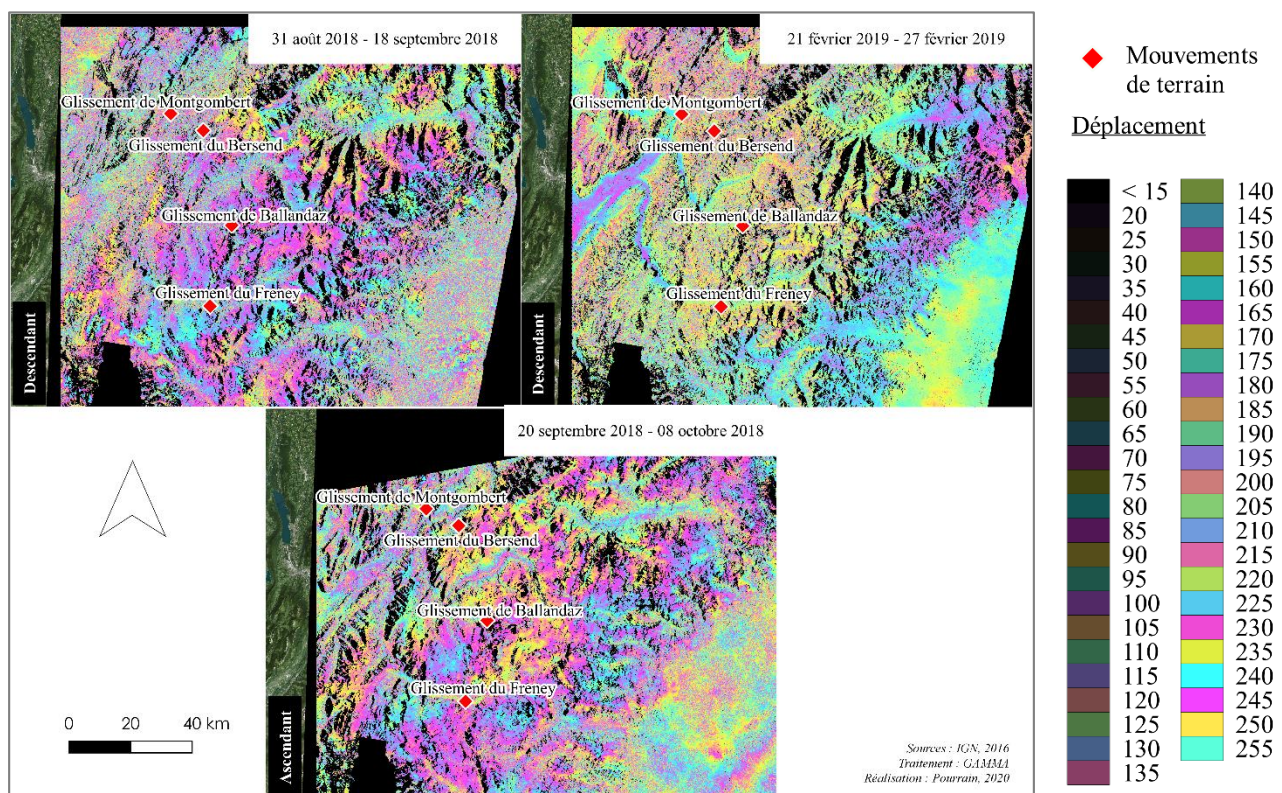


Figure 21 : Interférogrammes différentiels générés par le logiciel GAMMA, montrant de faibles effets de vallée (Echelard, comm. pers.)

³ Une légende plus détaillée est disponible en annexe 7 / les zones en noires correspondent aux zones d'ombre

2.2 Des effets atmosphériques persistants

L'interférogramme différentiel (fig. 22) présente un exemple de résultats générés par GAMMA et où les effets atmosphériques sont présents. Il peut être dit qu'il s'agit plus précisément d'un effet atmosphérique turbulent, comme cela a pu être expliqué dans le précédent chapitre. Au vu de ce résultat en partie erroné par le facteur atmosphérique, il n'est pas conseillé de l'utiliser de manière précise dans l'interprétation des résultats et pour identifier un signal de déplacement.

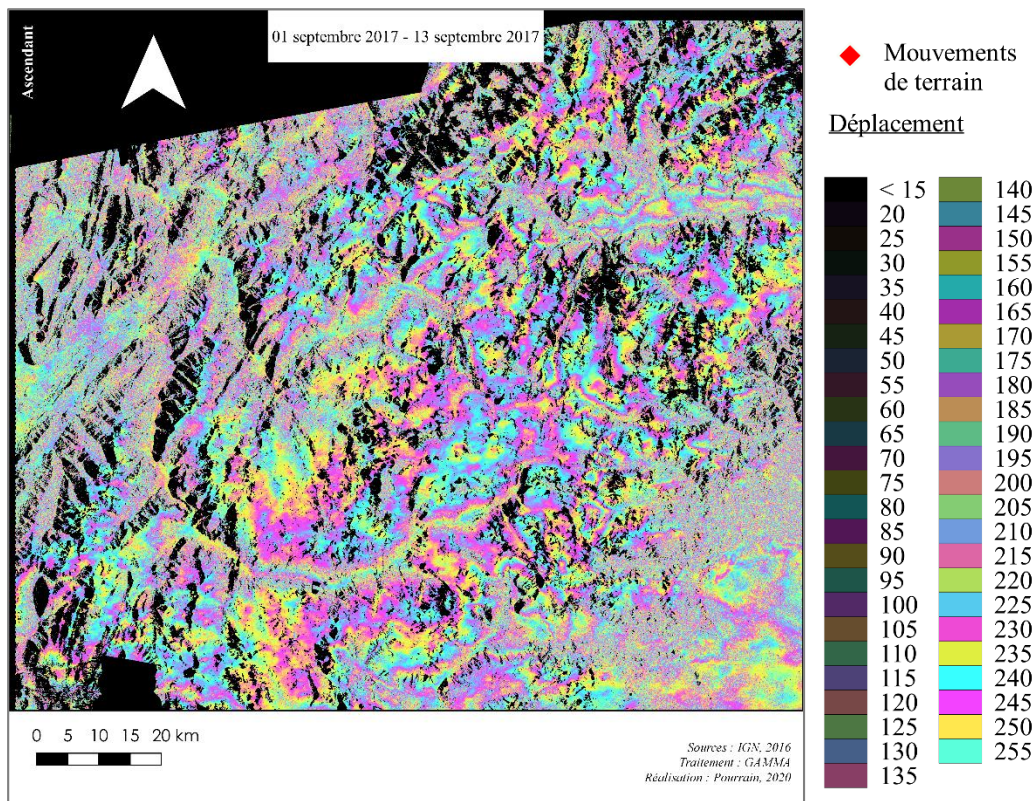


Figure 22 : Effets atmosphériques visibles sur des interférogrammes différentiels générés à l'aide du logiciel GAMMA (d'après Echelard, comm. pers.)

2.3 Des interférogrammes différentiels qui peuvent rester tout de même décorrélés

Certains interférogrammes différentiels sont tout de même décorrélés (fig. 23) dans les deux modes d'acquisition. Le constat est fait sur les interférogrammes différentiels dont l'intervalle entre les dates utilisées est très importante. Cette constatation rejoint la conclusion faite précédemment avec SNAP : la stratégie "pluri-référence" est plus adaptée en raison de la proximité des dates d'acquisition (six jours d'intervalle) utilisées pour générer les interférogrammes différentiels.

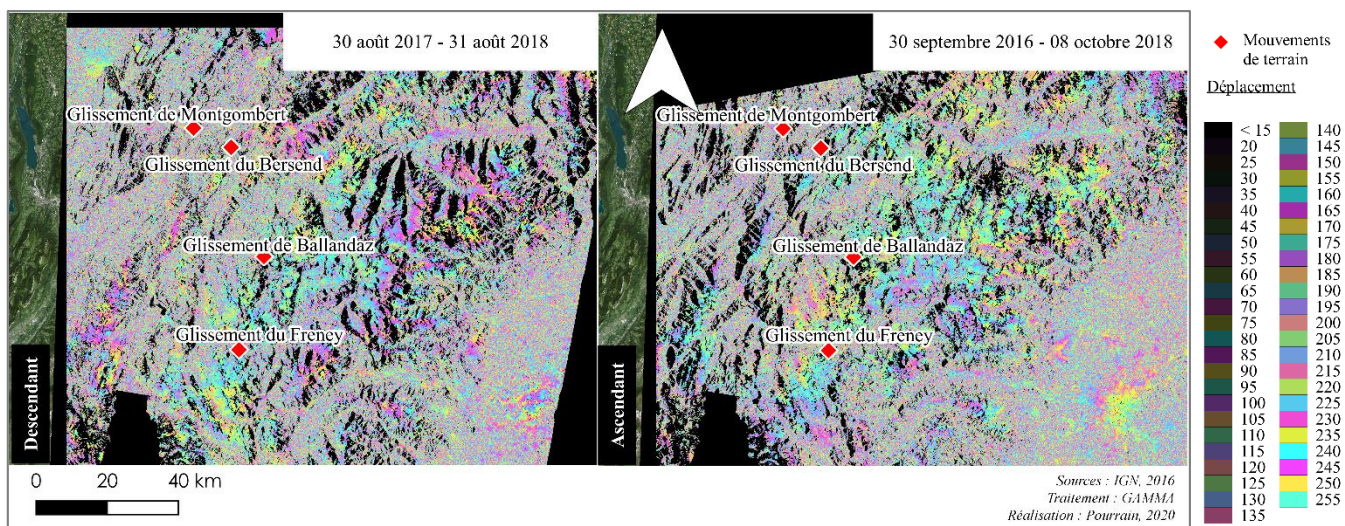


Figure 23 : Interférogrammes différentiels peu conclusifs (généré par GAMMA ; d'après Echelard, comm. pers.)

3 Zooms sur les secteurs d'études

La figure 24 ci-dessous fait un zoom de plusieurs interférogrammes différentiels sur les quatre secteurs d'étude. Cette carte montre plusieurs points.

Tout d'abord, le zoom sur le secteur du Freney montre bien l'absence de l'effet de vallée comme cela avait été remarqué sur les résultats (fig. 19 du chapitre 3) effectués avec le logiciel SNAP, alors que l'intervalle entre les dates des interférogrammes différentiels est le même : six jours.

Ensuite, concernant le mouvement de Ballandaz, l'intervalle de deux ans entre les images radar utilisées pour cet interférogramme différentiel a généré un résultat complètement décorrélé. Cela pourrait laisser penser que l'intervalle utilisé est beaucoup trop grand et qu'il faudrait le réduire. Cependant, la visualisation des autres interférogrammes différentiels sur ce secteur est aussi fortement décorrélé. Etant donné que ce secteur est en partie fortement boisé, il pourrait alors être supposé que la forêt a complètement interféré avec le signal et l'a donc décorrélé.

Enfin, à propos du mouvement du Bersend et celui de Montgombert, deux interprétations opposées des interférogrammes ressortent, bien que l'intervalle entre les dates soient de six jours chacune. L'interférogramme différentiel sur le glissement du Bersend est globalement homogène ce qui suppose une trop grande cohérence entre les deux dates utilisées : 12 septembre 2018 et 18 septembre 2018. *Contrario*, pour le mouvement de Montgombert, le résultat est décorrélé.

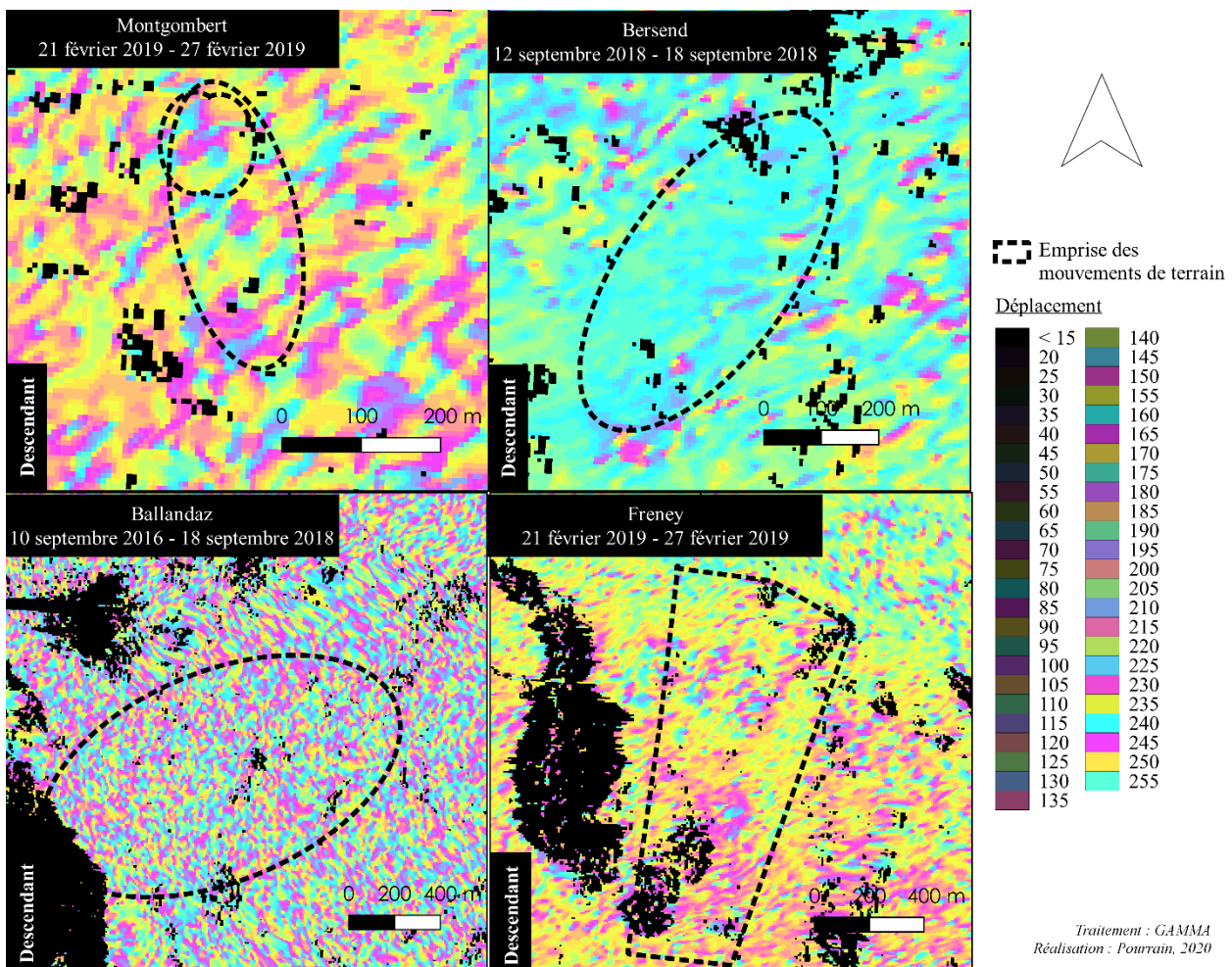


Figure 24 : Zoom de plusieurs interférogrammes différentiels générés par GAMMA sur les quatre secteurs d'étude

Cette figure 24, ne montrait que des exemples de résultats sur les secteurs d'étude. La visualisation de l'ensemble (annexe 8) des interférogrammes différentiels générés par la société GAMMA remote sensing, montre qu'aucun signal de déplacement sur les secteurs d'étude ne sont visibles et que la

majorité des résultats sont décorrélés. Ce constat, pourrait-il être expliqué par le fait que les secteurs soient situés dans des zones boisées et que donc la végétation interfère avec le signal radar ?

4 Synthèse du chapitre 4

Ce dernier chapitre a mis en avant plusieurs points :

- L'importance d'utiliser un MNT précis et permettre donc de limiter les effets de vallée.
- Les effets atmosphériques peuvent persister sur les interférogrammes différentiels, les rendant inexploitable, pour la détection des signaux de déplacements.
- Le choix de l'intervalle entre les dates des images SAR utilisés dans les interférogrammes, jouent sur leur qualité. Ainsi, des dates plus proches rendraient un résultat plus clair.
- L'occupation du sol par la forêt des secteurs, pourrait être un facteur limitant le suivi de ces sites d'étude.

CONCLUSION

Cette pré-étude avait pour objectif de savoir s'il était possible de suivre des mouvements de terrain de manière régulière à l'aide d'images SAR *Sentinel-1* sur de petits sites.

L'analyse des interférogrammes différentiels à partir des images radar téléchargées a permis de constater que bien que l'acquisition d'images SAR était régulière de jour comme de nuit, elle était tout de même limitée suivant la composition de l'atmosphère et l'occupation du sol. Effectivement, l'étude a su mettre en avant plusieurs points pouvant limiter l'interprétation des résultats : les conditions atmosphériques, la présence de neige et la végétation. Des limites ayant été remarquées dans le cadre de d'autres études (Squarzoni, 2003 et Pathier, 2004). Effectivement, cette pré-étude a su mettre en avant l'indispensabilité à analyser la météo et la présence de neige pour choisir les images radars les plus adaptées, c'est-à-dire les images qui influencent le moins sur la mauvaise qualité des interférogrammes différentiels. Par ailleurs, la localisation des sites d'étude sous couverture majoritairement forestier a également fortement limité la possible détection de signaux de déplacement sur les interférogrammes différentiels et a donc limité la détection des mouvements de terrains ; tandis qu'en milieu non boisé la détection a été plus facile comme cela a été le cas pour le signal de déplacement identifié au niveau de Lochieu.

Pour limiter ces aspects lors de la création des interférogrammes, l'utilisation d'un MNT de qualité (haute résolution) est évoquée car il limiterait notamment les effets de pentes et permettrait d'éliminer de manière précise la phase topographique. Ces différents points (conditions atmosphérique, occupations du sol...) ne valident donc pas la première hypothèse : « *Il peut tout à fait être possible de surveiller l'évolution de ces sites en raison d'acquisitions régulières d'images SAR de jour comme de nuit quelle que soit la météo* ».

Par ailleurs, le nombre de pixels étant supérieur à cent pour trois sites (Montgombert, Bersend et Ballandaz), il peut être supposé que les sites soient suffisamment grands pour avoir un signal de déplacement. Ce constat pourrait donc *a priori*, invalider la deuxième hypothèse : « *Le suivi de ces zones à l'aide d'images SAR peut s'avérer très limité en fonction de la taille des sites d'étude et de la résolution des images SAR* ».

Ainsi, concernant l'interrogation de départ, à savoir s'il était possible de suivre des mouvements de terrain de manière régulière à l'aide d'images SAR *Sentinel-1* sur des petits secteurs, il peut être dit que : oui, l'acquisition régulière d'images radar (tous les six jours) de jour comme de nuit pourrait permettre effectivement de faire ce suivi. De plus, la taille des quatre sites d'étude serait suffisamment grand pour identifier de possible signaux de déplacement. Cependant, les conditions d'acquisitions de ces images (conditions météorologiques, occupation du sol...) jouent sur la qualité des interférogrammes différentiels et donc sur le résultat final. Il faudrait alors pouvoir associer ces résultats avec d'autres données et d'autres méthodes pour un suivi régulier le plus précis possibles.

BIBLIOGRAPHIE

- Copernicus Satellite Sentinel 1A, Data.gouv.fr. 2016. Consulté le 28/05/2020 sur <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/copernicus-satellite-sentinel-1a/>
- InfoClimat, s.d. Consulté le 23/07/2020 sur <https://www.infoclimat.fr/observations-meteo/archives/24/novembre/2019/chambery-aix-les-bains/07491.html>
- Principes de base des radars, Gouvernement du Canada. 2015. Consulté le 26/08/2020 sur <https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-publications/imagerie-satellitaire-photos-aer/tutoriels-sur-la-teledetection/teledetection-par-hyperfrequence/principes-de-base-des-radars/9356>
- Prevention des risques naturels, Ministère de la transition écologique et solidaire. 2020. Consulté le 29/05/2020 sur <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/prevention-des-risques-naturels#:~:text=Au%20plan%20mondial%2C%20les%20mouvements,un%20niveau%20de%20gravit%C3%A9%20fort.>
- Laboratoire d'Informatique, Systèmes de Traitement de l'Information et de la Connaissance. Polytech Annecy Chambéry. Consulté le 11/03/2020 sur <https://www.polytech.univ-smb.fr/recherche/laboratoire-listic.html>
- Les glissements de terrain dans le Trièves et l'Beaumont, Institut des Risques Majeurs, s.d. Consulté le 13/07/2020 sur http://www.irma-grenoble.com/05documentation/04dossiers_articles.php?id_DTart=60&id_DT=7
- Level-1 SLC Products, esa, Sentinel Online. Consulté le 14/05/2020 sur <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-1-algorithms/single-look-complex>
- Présentation. LISTIC. Consulté le 11/03/2020 sur <https://www.listic.univ-smb.fr/presentation/>
- Sentinel-1 About, ASF. Consulté le 28/05/2020 sur <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/sentinel-1/sentinel-1-about/>
- Barboux C., Gay M., et Vasile G. 2009 – *Permafrost detection in the french Southern Alps*. Saint-Martin-d'Hères: Gipsa-Lab DIS Department, Permanent project report, unpublished.
- Brassoud R. 2016. Glissement de terrain de Montgombert : les élus veulent rouvrir rapidement la route. *Le Dauphiné Libéré*. juin 2016. Consulté le 06/03/2020 sur <https://www.ledauphine.com/savoie/2016/06/11/glisement-de-terrain-de-montgombert-les-elus-veulent-rouvrir-rapidement-la-route> et sur https://cdn-s-www.ledauphine.com/images/0CFAF62F-3357-4D6D-BFB1-E96B1C578A44/MF_contenu/glisement-de-terrain-de-montgombert-les-elus-veulent-rouvrir-rapidement-la-route-1465589730.jpg
- Brassoud R. 2018. Gorges de l'Arly : il faudra prendre son mal en patience. *Le Dauphiné Libéré*. janvier 2018. Consulté le 06/03/2020 sur <https://www.ledauphine.com/environnement/2018/01/13/il-faudra-prendre-son-mal-en-patience>
- Brgm. 2017. Grandes instabilités historiques de versant à hauteur des Gorges de l'Arly (communes de Cohennoz et d'Ugine en Savoie). *brgm*. octobre 2017. Consulté le 06/03/2020 sur <https://www.brgm.fr/projet/grandes-instabilites-historiques-versant-hauteur-gorges-arly-communes-cohennoz-ugine-savoie>
- Carnec C., 1993, *Interferométrie SAR Différentielle - application à la détection des mouvements de terrain.*, Université Paris VII, BRGM, juin 1993, 57p. Consulté le 03/06/2020 sur <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-37331-FR.pdf>
- Carnec C. et Raucoules D. 2000. Assessment of SAR interferometry within operational application : Mapping and modelling of peri-urban subsidence. In *ESA-ENVISAT Symposium*, number SP-461.532, pages 1–5
- Dobre, C. 2013. . Barcelonnette, 23 août 2013. *Traditional Differential Interferometry Synthetic-Aperture Radar (D-InSAR)*
- Echelard T., Krysiecki J-M., Gay M., et Schoeneich P. 2013. Détection des mouvements de glaciers rocheux dans les Alpes françaises par interférométrie radar différentielle (D-InSAR) dérivée des archives satellitaires ERS (European Remote Sensing). *Géomorphologie*, Vol.19, n°3, pp. 231-242. Consulté le 02/03/2020 sur <https://journals.openedition.org/geomorphologie/10264>
- Echelard T. 2014. *Contribution à l'étude de la cinématique des glaciers rocheux dans les Alpes françaises par interférométrie radar différentielle (D-InSAR)*. Thèse pour l'obtention du grade de docteur de l'Université de Grenoble spécialité Géographie, Université de Grenoble, avril 2014, 215 p. Consulté le 04/03/2020 sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01128087/document>
- Ferretti A., Prati C., et Rocca F. 2000. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5) :2202–2212.
- Gérard S. et Einhorn B. 2018. *Changement climatique et risques naturels dans les Alpes : Événements remarquables 2016*. Rapport technique PARN, 18 pp. + Annexes. | PDF
- Gérard S., Calla Jiménez R. et Einhorn B., 2018, *Changement climatique et risques naturels dans les Alpes : Événements remarquables 2016*. Pôle Alpin d'études et de Recherche pour la prévention des Risques Naturels, 25p. Consulté le 25/05/2020 sur

<http://risknat.org/alpes-climat->

[risques/Base de connaissances/Evenements remarquables/fiches evenements/2016/Evenements remarquable risknat 2016 PARN\(2018\) final.pdf](http://risknat.org/alpes-climat-risques/Base_de_connaissances/Evenements_remarquables/fiches_evenements/2016/Evenements_remarquable_risknat_2016_PARN(2018)_final.pdf)

Gérard S. et **Einhorn B.** 2019. *Changement climatique et risques naturels dans les Alpes : événement remarquables 2018*. Pôle Alpin Risques Naturels. 32 pp. Consulté le 06/03/2020 sur

https://www.researchgate.net/profile/Benjamin_Einhorn/publication/336680869_Changement_climatique_et_risques_naturels_dans_les_Alpes_Evenements_remarquables_2018/links/5dacc68f92851c577eb938e8/Changement-climatique-et-risques-naturels-dans-les-Alpes-Evenements-remarquables-2018.pdf

Gominet S. 2016. Glissement de terrain du Bersend, *Institut des Risques Majeurs (IRMa)*, mai 2016. Consulté le 06/03/2020 sur

http://www.irma-grenoble.com/photos/diaporama_phototheque.php?id_photos=4914&theme=2#image-1

Lanari R., Mora O., Manunta M., Mallorqui J., Bernardino P., et Sansosti E. 2004. A Small Baseline Approach for Investigating Deformations on Full-Resolution Differential SAR Interferograms. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 42(7) :1377–1386

Le Dauphiné Libéré. 2016. La RD 1006 fermée plusieurs jours. *Le Dauphiné Libéré*. mai 2016. Consulté le 06/03/2020 sur

<https://www.ledauphine.com/savoie/2016/05/17/le-freney-la-rd-1006-fermee-plusieurs-jours>

Leleu J. 2016. Éboulements, glissements de terrain, inondations...Faut-il s'inquiéter ? *Le Dauphiné Libéré*. mai 2016. Consulté le 06/03/2020 sur

<https://www.ledauphine.com/savoie/2016/05/20/eboulements-glissements-de-terrain-inondations-faut-il-s-inquieter>

Letesse V., Glissement de terrain : une partie de la route emportée entre Bozel et Pralognan-la-Vanoise. *France Bleu Savoie*. janvier 2020. Consulté le 06/03/2020 sur

<https://www.francebleu.fr/infos/transports/affaissement-de-chaussee-la-route-de-pralognan-la-vanoise-totalement-fermee-en-savoie-1580815574>

Ma Z., Jiang M., Zhao Y., Malhotra R. et Yong B., Minimum Spanning Tree Co-registration Approach for Time-Series Sentinel-1 TOPS Data, in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 12, no. 8, pp. 3004-3013, Aug. 2019, doi: 10.1109/JSTARS.2019.2920717. Consulté le 28/05/2020 sur <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8738828>

Maître H. 2001. *Traitement des images RSO*, Paris: Hermes science. 352p.

OFEV, 2016. *Protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain*. Aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux glissements de terrain, aux chutes de pierres et aux coulées de boue. Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n° 1608: 98 p

Pathier E. 2003. *Apport de l'interférométrie radar différentielle à l'étude de la tectonique active de Taiwan*. Thèse pour l'obtention du doctorat en Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne-la-Vallée, décembre 2003, 281 p. Consulté le 03/03/2020 sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00007464/document>

Raucoules D. 2011. *Mesure des déformations sur la surface de la Terre à partir de techniques de télédétection spatiales*. Mémoire pour l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches spécialité de Sciences de l'Univers, Université d'Orléans, mai 2011, 68 p. Consulté le 03/03/2020 sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00601459/document>

Ravel L. 2010. *Caractérisation, facteurs et dynamiques des écroulements rocheux dans les parois à permafrost du massif du Mont Blanc*. Chambéry: Université de Savoie. PhD : 326p.

Sanchez O., 2007, *Imagerie Géophysique du glissement de terrain de Ballandaz*. Rapport de stage. RP-55746-FR, 88p. 56 fig. consulté le 26/05/2020 sur <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-55746-FR.pdf>

Schwartz S., 2010, *Etude morphologique de l'évolution de glissements de terrain par technique Lidar : Application au suivi des glissements d'Avignonet et de l'Harmalière (Trieves)*. Grenoble : laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines, 26p

Squarzoni C., 2003, *Mesures des champs de déplacement de surface et modélisation numérique des glissements de terrain*. Thèse pour l'obtention du diplôme de Doctorat. Université Claude Bernard et Università degli studi di Padova, décembre 2003, 221p. Consulté le 04/06/2020 sur http://www.ano-omiv.cnrs.fr/images/Publications/PDFs/Lavalette/PhdThesis/2003-Squarzoni_PhDThesis.pdf

Strozzi T, Wegmüller U., Tosi L., Bitelli G., et Spreckels V. 2001. Land Subsidence Monitoring with Differential SAR Interferometry. *Photogrammetric engineering and and Remote Sensing*. Novembre 2001, pp.1261-1270

Strozzi T., Caduff R., Jones N., Barboux C., Delaloye R., Bodin X., Kääh A., Mätzler E. et Schrott L., Monitoring Rock Glacier Kinematics with Satellite Synthetic Aperture Radar, *Remote Sensing*. 2020, 12, 559

Talab Ou Ali H., Niculescu S., Sellin V. et Bougault C. 2017. *Contribution de la nouvelle série d'images Sentinel-1 pour le suivi de la végétation côtière dans le Pays de Brest*. Rouen, France 18p. Consulté le 28/08/2020 sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01650671/document>

Wegmüller U., Strozzi T., et Tosi L. 2000. ESA and ENVISAT differential SAR interferometry for subsidence monitoring. In *ESA-ENVISAT Symposium*, pages 1–8.

Yan Y. 2011. *Fusion de mesures de déplacement issues d'image SAR : Application aux modélisations séismo-volcaniques*. Thèse pour l'obtention du doctorat en Sciences Terre, Univers et Environnement, Université de Grenoble, décembre 2011, 225 p.

Yagüe-Martínez N., Prats-Iraola P., Rodríguez González F., Bric R., Shau R., Geudtner D., Eineder M. et Bamler R., Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data, in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, no. 4, pp. 2220-2234, April 2016, doi: 10.1109/TGRS.2015.2497902. Consulté le 28/05/2020 sur <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7390052>

Zebker H. et Goldstein R. 1986. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research*, 91 :4993 – 4999.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	3
SOMMAIRE	4
SIGLES, ABREVIATIONS ET ACRONYMES	5
RESUMES	6
1 Résumé (<i>Français</i>)	6
2 Abstract (<i>English</i>).....	6
INTRODUCTION	8
CHAPITRE 1 : PRESENTATION DES SITES D'ETUDE ET DU PRINCIPE DE L'INTERFEROMETRIE SAR... 10	10
1 Présentation des mouvements de terrain à étudier	10
1.1 Mouvement de Montgombert.....	10
1.2 Mouvement du Bersend	11
1.3 Mouvement de Ballandaz.....	11
1.4 Mouvement du Freney	12
2 Imagerie SAR.....	13
2.1 Qu'est-ce qu'une image SAR ?.....	13
2.1.1 Comment fonctionne l'acquisition d'une image SAR.....	13
2.1.2 Les Satellites Sentinel-1.....	13
2.1.3 Modes d'acquisition (ascendant et descendant) et distorsions	13
2.1.4 Composition d'un signal Radar.....	14
2.2 Qu'est-ce que l'interférométrie SAR ?	15
2.2.1 Pourquoi l'interférométrie SAR (D-InSAR) plutôt qu'une autre méthode ?.....	16
2.2.2 Quelles informations permet d'obtenir l'interférométrie SAR ?.....	17
2.2.3 Interférogramme et interférogramme différentiel	17
3 Synthèse du chapitre 1.....	18
CHAPITRE 2 : TRAITEMENT DES IMAGES SAR	19
1 Les images SAR utilisées dans le cadre de l'étude	19
1.1 Où récupérer les données images SAR <i>Sentinel-1</i> ?.....	19
1.2 Présentation des données SAR téléchargées	19
2 Méthodologie : formation d'un interférogramme différentiel.....	21
2.1 Quel logiciel utilisé ?	21
2.2 Prétraitement des données.....	21
2.3 Recalibrage des données en deux stratégies : « mono-référence » et « multi-référence » ..	22
2.3.1 Ré-échantillonnage « mono-référence ».....	22

2.3.2	Ré-échantillonnage « multi-référence »	22
3	Formation de l'interférogramme différentiel	22
3.1	La phase orbitale	22
3.2	La phase topographique	22
3.3	La phase atmosphérique et la phase liée au bruit.....	23
4	Géocodage	23
5	Synthèse du chapitre 2.....	23
CHAPITRE 3 : ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSION		24
1	Identification des signaux de déplacements : un exemple de signal	24
2	Analyse des interférogrammes différentiels sur les quatre sites d'étude	25
2.1	Analyse des résultats issus de la stratégie mono-référence.....	25
2.2	Analyse des résultats issus de la stratégie multi-référence	27
3	Discussion des résultats.....	29
3.1	Les effets de vallée et MNT	29
3.2	Les effets atmosphériques.....	29
3.3	Neige et végétation.....	31
3.4	Nombre de pixels par zone d'étude et taille des sites	32
4	Synthèse du chapitre 3.....	32
CHAPITRE 4 : RESULTATS ALTERNATIFS ISSUS D'UN AUTRE LOGICIEL : GAMMA		34
1	Avant-propos	34
2	Visualisation des résultats	34
2.1	Un effet de vallée moins marqué	34
2.2	Des effets atmosphériques persistants.....	35
2.3	Des interférogrammes différentiels qui peuvent rester tout de même décorrélés.....	35
3	Zooms sur les secteurs d'études	36
4	Synthèse du chapitre 4.....	37
CONCLUSION.....		38
BIBLIOGRAPHIE		39
TABLE DES MATIERES		42
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....		45
1	Figures	45
2	Photographies	46
3	Tableaux	46
ANNEXES		47

1	Annexe 1 : Paramètres enregistrés sur le site de l'ASF pour le téléchargement des données utilisées.....	47
2	Annexe 2 : Liste des données téléchargées	48
3	Annexe 3 : Détail des traitements et accès à la commande dans la boîte à outils <i>Sentinel-1</i>	51
4	Annexe 4 : Visualisation de l'ensemble des interférogrammes différentiels descendants dont l'image « Master » est le 11 janvier 2020	54
5	Annexe 5 : Visualisation de l'ensemble des interférogrammes différentiels « multi-référence » dans les deux modes d'acquisition	57
6	Annexe 6 : Météo en Savoie le jour de l'acquisition des images SAR.	62
7	Annexe 7 : Légende complète des interférogrammes différentiels générés par le logiciel GAMMA (Chapitre 4).....	64
8	Annexe 8 : Résultats, sur les secteurs d'étude, des interférogrammes différentiels générés par GAMMA remote sensing.	65

TABLE DES ILLUSTRATIONS

1 Figures

Figure 1 : Localisation et emprise des mouvements de terrain à suivre en Savoie : a. mouvement de Montgombert ; b. mouvement du Bersend ; c. mouvement de Ballandaz et d. mouvement du Freney .. 8	
Figure 2 : Schéma d'un glissement de terrain dit translationnel ou plan (d'après l'OFVE, 2016)..... 10	
Figure 3 : Schéma d'un glissement de terrain dit rotationnel (d'après Boussageon , image issue du site de l'IRMa, s.d)) 11	
Figure 4 : Schéma expliquant l'acquisition d'une image SAR..... 13	
Figure 5 : Distorsions géométriques observées sur des images SAR (d'après Barboux et al., 2009)... 14	
Figure 6 : Illustration de la phase et du déphasage, deux éléments qui composent le signal radar..... 15	
Figure 7 : Les méthodes de mesures placées dans le repère espace-temps des processus (d'après Ravel, 2010 modifié par Echelard, 2014 ; mis en couleurs par Pourrain, 2020)..... 16	
Figure 8 : Principe du déroulement de phase (d'après Carnec, 1933 ; modifié par Pourrain, 2020)..... 18	
Figure 9 : Emprise des images SAR descendantes téléchargées sur le site de l'ASF 20	
Figure 10 : Emprise des images SAR ascendantes téléchargées sur le site de l'ASF..... 20	
Figure 11 : Logiciel Sentinel-1 Toolbox 21	
Figure 12 : Schéma expliquant la structure et le découpage (split) des images issues des satellites SB descendants..... 21	
Figure 13 : Graph Builder représentant la chaîne de traitement automatisée utilisé dans cette étude pour former un interférogramme différentiel (Yan, 2003, Comm.pers.)..... 23	
Figure 14 : Signal de déplacement au niveau de Lochieu (Ain) sur trois interférogrammes différentiels : 11 janvier 2020 - 18 décembre 2019, 11 janvier 2020 - 30 décembre 2019 et 11 janvier 2020 - 17 janvier 2020 24	
Figure 15 : : Interférogrammes différentiels les plus acceptables : a. zoom sur le mouvement de Montgombert ; b. zooms sur le mouvement de Bersend ; c. zoom sur le mouvement de Ballandaz 26	
Figure 16 : Interférogramme différentiel du 11 janvier - 29 janvier 2020 parmi les D-InSAR les moins conclusifs..... 26	
Figure 17 : Interférogrammes différentiels des 24 novembre – 30 novembre 2019 (descendant) et 26 novembre – 02 décembre 2019 (ascendant) et zoom sur le mouvement de Montgombert..... 28	
Figure 18 : Interférogrammes différentiels des 17 janvier – 23 janvier 2020 (descendant) et 19 janvier – 25 janvier (ascendant) : a. zoom sur le mouvement de Montgombert ; b. zooms sur le mouvement de Bersend..... 28	
Figure 19 : Effets de vallée sur trois interférogrammes différentiels et zooms sur le mouvement du Freney..... 29	
Figure 20 : Effets atmosphériques sur des interférogrammes différentiels issus de la série descendante: a. effet atmosphérique stratifié ; b. effet atmosphérique turbulent 30	

Figure 21 : Interférogrammes différentiels générés par le logiciel GAMMA, montrant de faibles effets de vallée (Echelard, comm. pers.) 34

Figure 22 : Effets atmosphériques visibles sur des interférogrammes différentiels générés à l'aide du logiciel GAMMA (d'après Echelard, comm. pers.) 35

Figure 23 : Interférogrammes différentiels peu conclusifs (généré par GAMMA ; d'après Echelard, comm. pers.) 35

Figure 24 : Zoom de plusieurs interférogrammes différentiels générés par GAMMA sur les quatre secteurs d'étude 36

2 Photographies

Photographie 1 : Mouvement de Montgombert : **a.** Vu de face du mouvement de Montgombert (Photo Brassoud, 2016) et **b.** Route départementale 1212 coupée (Photo Brassoud, 2018) 10

Photographie 2 : Glissement de terrain du Bersend : **a.** une grange poussée par la terre qui avance ; **b.** arbres basculés en rive gauche et **c.** niche d'arrachement (Photos Gominet, IRMa, 2016) 11

Photographie 3 : Glissement de terrain de Ballandaz le 4 janvier 2020, emportant la route entre Bozel et Pralognan la Vanoise (Photo Letesse, 2020) 11

Photographie 4 : Structure typologique du mouvement de Ballandaz (Photo Google Earth, modifié par Pourrain, 2020) 12

Photographie 5 : **a.** Mouvement de terrain sur la commune du Freney, coupant la route RD 1006 reliant Orelle et Saint-André (Photo le Dauphiné Libéré, 2016) ; **b.** Mouvement du Freney vu face (Photo Google maps) 12

Photographie 6 : Glissement de terrain de Ballandaz le 4 janvier 2020, emportant la route entre Bozel et Pralognan la Vanoise (Photo Letesse, 2020) 31

Photographie 7 : Sites végétalisés : **a.** Site de Montgombert vu de face (Photo Brassoud, 2016) ; **b.** Mouvement du Freney vu de face (Photo Google maps) et **c.** Site de Ballandaz vu du ciel ((QGIS) IGN, 2016 ; réalisation Pourrain, 2020) 31

3 Tableaux

Tableau 1 : Présentation des données téléchargées dans les deux modes d'acquisition 20

Tableau 2 : Météo à Chambéry - Aix-Les-Bains du 17, 23, 29 janvier et du 4 février 2020 (d'après infoclimat) 30

Tableau 3 : Altitude (m) des sites d'études 31

Tableau 4 : Moyenne du nombre de pixels des interférogrammes différentiels sur trois sites d'études 32

1 Annexe 1 : Paramètres enregistrés sur le site de l'ASF pour le téléchargement des données utilisées

Dans cette pré-étude, les données utilisées sont téléchargées sur la période du 24 novembre 2019 au 19 mars 2020, représentant, un jeu de données acquis sur vingt dates.

Outre cette information, d'autres filtres sont à indiquer tels que le type de fichier, la polarisation et le mode d'acquisition.... Pour l'étude présentée dans ce mémoire, le tableau ci-dessous présente les paramètres à enregistrer sur le site ASF ainsi que leur explication. Dans la sélection de ces paramètres, un large choix a été sélectionné dans un premier temps afin de trouver toutes les images satellites disponibles dans le cadre de l'étude souhaitée.

Noms des filtres	Explications	Eléments cochés
Types de fichier	Il s'agit du type de produit	L1 Single Look Complex (SLC) : Le niveau 1 du SLC signifie que les pixels de l'image téléchargée sont composés d'un nombre complexe contenant les informations d'amplitude et de phase. Pour rappel, la phase est la principale valeur utilisée en interférométrie différentielle. (esa, s.d)
Mode faisceau	Le mode décrit la fauchée c'est-à-dire l'étendue de l'image satellite	IW ⁴ : Principal mode d'acquisition sur Terre avec une résolution spatiale de 5 à 20m
Polarisation	Il s'agit d'une particularité de l'acquisition par le radar : - La première lettre indique l'orientation de l'onde reçue - La deuxième, celle de l'onde émise	VV + HV ⁵
Direction	Il s'agit du mode d'acquisition	Ascending Descending
Sous-types	Les images SA sont acquises tous les 12 jours et SB également. Tous les 6 jours il y a une alternance entre SA et SB.	SA SB

⁴ IW : Interferométric Wide

⁵ H pour « horizontale » et V pour « Verticale ».

2 Annexe 2 : Liste des données téléchargées

La liste suivante donne le nom des données téléchargées sur le site de l'ASF.

- **24/11/2019 (descendant) :**
S1B_IW_SLC__1SDV_20191124T054257_20191124T054324_019065_023FAA_DCAD
- **26/11/2019 (ascendant) :**
S1A_IW_SLC__1SDV_20191126T172304_20191126T172331_030085_036FAA_F3F4
S1A_IW_SLC__1SDV_20191126T172329_20191126T172356_030085_036FAA_F7CC
- **30/11/2019 (descendant) :**
S1A_IW_SLC__1SDV_20191130T054347_20191130T054414_030136_037175_D5EC
- **02/12/2019 (ascendant) :**
S1B_IW_SLC__1SDV_20191202T172239_20191202T172306_019189_0243A7_A5B9
- **06/12/2019 (descendant) :**
S1B_IW_SLC__1SDV_20191206T054257_20191206T054324_019240_024537_9BC0
- **08/12/2019 (ascendant) :**
S1A_IW_SLC__1SDV_20191208T172303_20191208T172330_030260_0375AB_3C28
S1A_IW_SLC__1SDV_20191208T172328_20191208T172355_030260_0375AB_1062
- **12/12/2019 (descendant) :**
S1A_IW_SLC__1SDV_20191212T054347_20191212T054414_030311_03777F_53BB
- **14/12/2019 (ascendant) :**
S1B_IW_SLC__1SDV_20191214T172239_20191214T172306_019364_024938_0DE2
- **18/12/2019 (descendant) :**
S1B_IW_SLC__1SDV_20191218T054256_20191218T054323_019415_024ACE_D985
- **20/12/2019 (ascendant) :**
S1A_IW_SLC__1SDV_20191220T172303_20191220T172330_030435_037BBC_2C6E
S1A_IW_SLC__1SDV_20191220T172328_20191220T172355_030435_037BBC_8F18
- **24/12/2019 (descendant) :**
S1A_IW_SLC__1SDV_20191224T054346_20191224T054413_030486_037D8C_BC20
- **26/12/2019 (ascendant) :**
S1B_IW_SLC__1SDV_20191226T172238_20191226T172305_019539_024EC6_1BBB
- **30/12/2019 (descendant) :**
S1B_IW_SLC__1SDV_20191230T054256_20191230T054323_019590_02505C_1BEF
- **01/01/2020 (ascendant) :**
S1A_IW_SLC__1SDV_20200101T172302_20200101T172329_030610_0381C7_11BB
S1A_IW_SLC__1SDV_20200101T172327_20200101T172354_030610_0381C7_8DE4
- **05/01/2020 (descendant) :**
S1A_IW_SLC__1SDV_20200105T054346_20200105T054413_030661_038397_4C06
- **07/01/2020 (ascendant) :**
S1B_IW_SLC__1SDV_20200107T172238_20200107T172305_019714_02545A_94A8
- **11/01/2020 (descendant) :**
S1B_IW_SLC__1SDV_20200111T054255_20200111T054322_019765_0255EE_4235
- **13/01/2020 (ascendant) :**
S1A_IW_SLC__1SDV_20200113T172302_20200113T172329_030785_0387DD_5E66
S1A_IW_SLC__1SDV_20200113T172327_20200113T172354_030785_0387DD_9BDC
- **17/01/2020 (descendant) :**

S1A_IW_SLC__1SDV_20200117T054345_20200117T054412_030836_0389B6_2680

- **19/01/2020 (ascendant) :**

S1B_IW_SLC__1SDV_20200119T172237_20200119T172304_019889_0259EC_72B3

- **23/01/2020 (descendant) :**

S1B_IW_SLC__1SDV_20200123T054255_20200123T054322_019940_025B80_17C2

- **25/01/2020 (ascendant) :**

S1A_IW_SLC__1SDV_20200125T172301_20200125T172328_030960_038E07_D164
S1A_IW_SLC__1SDV_20200125T172326_20200125T172353_030960_038E07_3F8B

- **29/01/2020 (descendant) :**

S1A_IW_SLC__1SDV_20200129T054345_20200129T054412_031011_038FDD_E33A

- **31/01/2020 (ascendant) :**

S1B_IW_SLC__1SDV_20200131T172237_20200131T172304_020064_025F8C_79C9

- **04/02/2020 (descendant) :**

S1B_IW_SLC__1SDV_20200204T054255_20200204T054321_020115_02612C_E7EA

- **06/02/2020 (ascendant) :**

S1A_IW_SLC__1SDV_20200206T172301_20200206T172328_031135_039421_2388
S1A_IW_SLC__1SDV_20200206T172326_20200206T172353_031135_039421_CD4E

- **10/02/2020 (descendant) :**

S1A_IW_SLC__1SDV_20200210T054344_20200210T054411_031186_0395F6_26E4

- **12/02/2020 (ascendant) :**

S1B_IW_SLC__1SDV_20200212T172236_20200212T172304_020239_026536_BB19

- **16/02/2020 (descendant) :**

S1B_IW_SLC__1SDV_20200216T054254_20200216T054321_020290_0266CD_8D3E

- **18/02/2020 (ascendant) :**

S1A_IW_SLC__1SDV_20200218T172301_20200218T172328_031310_039A30_3549
S1A_IW_SLC__1SDV_20200218T172326_20200218T172353_031310_039A30_CB0D

- **22/02/2020 (descendant) :**

S1A_IW_SLC__1SDV_20200222T054344_20200222T054411_031361_039BFC_C069

- **24/02/2020 (ascendant) :**

S1B_IW_SLC__1SDV_20200224T172236_20200224T172303_020414_026AD8_C4A0

- **28/02/2020 (descendant) :**

S1B_IW_SLC__1SDV_20200228T054254_20200228T054321_020465_026C69_083A

- **01/03/2020 (ascendant) :**

S1A_IW_SLC__1SDV_20200301T172301_20200301T172328_031485_03A030_8DE4
S1A_IW_SLC__1SDV_20200301T172326_20200301T172352_031485_03A030_68AC

- **05/03/2020 (descendant) :**

S1A_IW_SLC__1SDV_20200305T054344_20200305T054411_031536_03A209_F1F1

- **07/03/2020 (ascendant) :**

S1B_IW_SLC__1SDV_20200307T172236_20200307T172303_020589_027066_3CB9

- **11/03/2020 (descendant) :**

S1B_IW_SLC__1SDV_20200311T054254_20200311T054321_020640_0271FC_D81C

- **13/03/2020 (ascendant) :**

S1A_IW_SLC__1SDV_20200313T172301_20200313T172328_031660_03A643_2929
S1A_IW_SLC__1SDV_20200313T172326_20200313T172353_031660_03A643_8B7C

- **17/03/2020 (descendant) :**

S1A_IW_SLC__1SDV_20200317T054344_20200317T054411_031711_03A819_B64B

- **19/03/2020 (ascendant) :**

S1B_IW_SLC__1SDV_20200319T172236_20200319T172304_020764_0275F3_6561

3 Annexe 3 : Détail des traitements et accès à la commande dans la boîte à outils Sentinel-1

Sélection de la zone à étudier

Chaque image s'étend sur une importante emprise et se découpe en plusieurs parties : neuf "bursts" séparés par des lignes de démarcation, et en trois faisceaux IW1, IW2 et IW3. De plus, les images téléchargées comportent deux types de polarisation : VV et VH. Dans l'objectif de former des interférogrammes différentiels, chaque image SAR a été réduite à une zone de traitement en sélectionnant les « bursts » et le faisceau souhaité. Cette étape permet ainsi l'image radar volumineuse à un secteur plus restreint et est indispensable. Elle donc à faire en premier

Dans le cas de cette étude, une image (= une date) est traitée en deux parties séparément au lieu d'une en raison de la limite de capacité de calcul de l'ordinateur utilisé. Effectivement, d'une part ce sont les bandes 6 et 7 qui ont été traitées ensemble, puis les bandes 8 et 9 pour les images SB et d'autre part ce sont les bandes 3 et 4, puis 5 et 6 des images SA qui sont traitées, pour la série issue d'un mode d'acquisition descendant. De plus, pour les deux types d'images, IW2 est sélectionné. Les autres « bursts » et faisceaux de l'image SAR ne sont pas utilisés car aucun site d'étude ne s'y trouve. Concernant la série ascendante, ce sont les « bursts » 2 et 3 puis 4 et 5 des images SB qui sont sélectionnés et pour les images SA (dont deux lots ont dû être téléchargés pour avoir toutes les zones d'études) ce sont les « bursts » 8 et 9 du lot 1 et 1 et 2 du lot 2. Pour l'ensemble de cette série ascendante, le mode de faisceau utilisé est IW1

Enfin, dans cet algorithme, il est demandé de ne prendre en compte que la polarisation VV.

Prise en compte de l'orbite

La phase de l'interférogramme est la somme d'un ensemble de composantes (atmosphérique, topographie...) dont l'orbite. Dans l'objectif de former l'interférogramme différentiel plus tard, il faut prendre en compte cet élément. Dans cette étape il s'agit de demander à l'algorithme de trouver les informations liées à l'orbite du satellite, lors de la prise de l'image, dans les paramètres de celle-ci et de la prendre en compte dans le traitement. Il s'agit ici de faire un deuxième nettoyage de la donnée pour la préparer à l'interférogramme différentiel.

Recalibrage

Le recalibrage consiste en un ré-échantillonnage des données par rapport à une image de référence dite image « Primaire ». L'objectif de cette étape est de corriger les petites imperfections et de recalibrer toutes les images entre elles pour avoir des données homogènes. Deux stratégies ont été adoptées pour ce recalibrage des données :

- Stratégie « mono-référence » : toutes les images dites images « secondaires » sont recalibrées par rapport à une image « Primaire », et deviennent des images appelées images « secondaires ré-échantillonnées ». Le choix de cette image « Primaire » est entièrement à la charge de la personne qui traite la donnée ; il n'y a pas de critère de sélection. Ici le 11 janvier 2020 (descendant) avait été choisi car il se trouvait au milieu de la série de données
- Stratégie « multi-référence » : chaque image radar est recalibrée par rapport à l'image radar acquise six jours plus tard.

Le recalibrage des images laisse tout de même quelques résidus indésirables. Afin de les corriger, l'approche ESD (Enhanced Spectral Diversity / diversité spectrale améliorée) est utilisée. L'ESD va permettre d'obtenir une image ré-échantillonnée avec une meilleure précision (Yagüe-Martínez et al., 2016), proche d'un millième de pixel (Ma et al., 2019). Si la précision du recalage n'atteint pas un

millième de pixel, le recalage peut être considéré comme non réussi car il va générer des erreurs dans les traitements suivants (Yan, 2020, comm. pers.).

Formation de l'interférogramme

Lors de la création de l'interférogramme à partir de deux images recalibrées, une phase et une cohérence sont données. Cette valeur de cohérence varie dans un intervalle de $[0 ; 1]$. Plus la valeur se rapproche de 1, plus la cohérence, c'est-à-dire la ressemblance, entre deux images est excellente. Au contraire, plus la valeur se rapproche de 0, plus il y a de différenciations entre ces deux images. De ce fait, si la cohérence est parfaite entre les deux dates, alors il est compliqué de constater un signal de déplacement. Il est donc plus judicieux à ce compte de prendre des images acquises à des moments plus éloignés. Cela permet donc de diminuer probablement la cohérence entre les deux images et espérer identifier des différences entre les deux dates. Cependant, s'il y a trop d'incohérence entre les dates alors aucun signal de déplacement est visible.

Recollage des « bursts »

Les images sont composées de bandes (bursts) séparées par des lignes de démarcation qui recouvre des pixels. Cette étape va permettre de coller les bandes entre elles pour faire un seul ensemble continu et supprimer cette ligne (figure ci-contre). L'algorithme va chercher les valeurs des pixels cachés sous la ligne de démarcation.

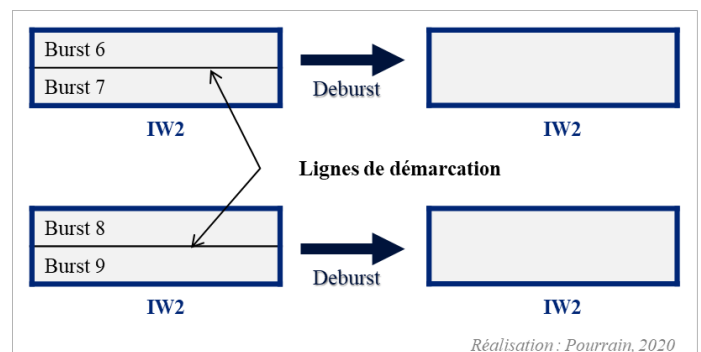


Schéma expliquant le principe du recollage des "bursts" à partir de l'interférogramme précédemment créé

Formation de l'interférogramme différentiel

Un interférogramme donne deux informations : l'amplitude et la phase. L'analyse de la phase permet de trouver le déplacement recherché. En effet, d'après la formule ci-dessous (Echelard, 2014), à partir de la phase « totale » φ donnée par l'interférogramme précédemment créé et d'autres paramètres (= composantes) plus ou moins connus, la phase correspondant au déplacement $\varphi_{\text{déplacement}}$ peut être estimée en supprimant les autres paramètres.

$$\varphi = \varphi_{\text{topographique}} + \varphi_{\text{orbite}} + \varphi_{\text{atmosphérique}} + \varphi_{\text{déplacement}} + \varphi_{\text{bruit}}$$

Dans cette étude, le paramètre lié à l'orbite φ_{orbite} a déjà été corrigé au tout début du traitement. Le paramètre lié à la topographie $\varphi_{\text{topographique}}$ est corrigé à l'aide d'un MNT. La boîte à outils et la fonction associée à la suppression de ce paramètre fournit automatiquement un MNT d'une résolution de 90m, adapté dans son calcul. Les paramètres liés aux conditions atmosphériques $\varphi_{\text{atmosphérique}}$ ne sont pas éliminés. Effectivement, la complexité de cet élément ne permet pas de l'exclure de l'équation. Enfin, le facteur bruit φ_{bruit} est supprimé en deux temps mais ne peut pas être entièrement corrigé.

Le résultat de l'interférogramme différentiel est exprimé en radians dans un intervalle de $-3,14$ à $3,14$ correspondant à l'intervalle $[-\pi ; \pi]$.

Géocodage

Le géocodage permet de référencer l'image dans un système de coordonnées géographiques choisi (WGS84, Lambert 93...) et ainsi passer de la géographie radar à la géographie sol. Cela permet par la

suite de pouvoir visualiser les résultats dans un logiciel SIG (Système d'Information Géographique) tel que QGIS, ou dans Google Earth...

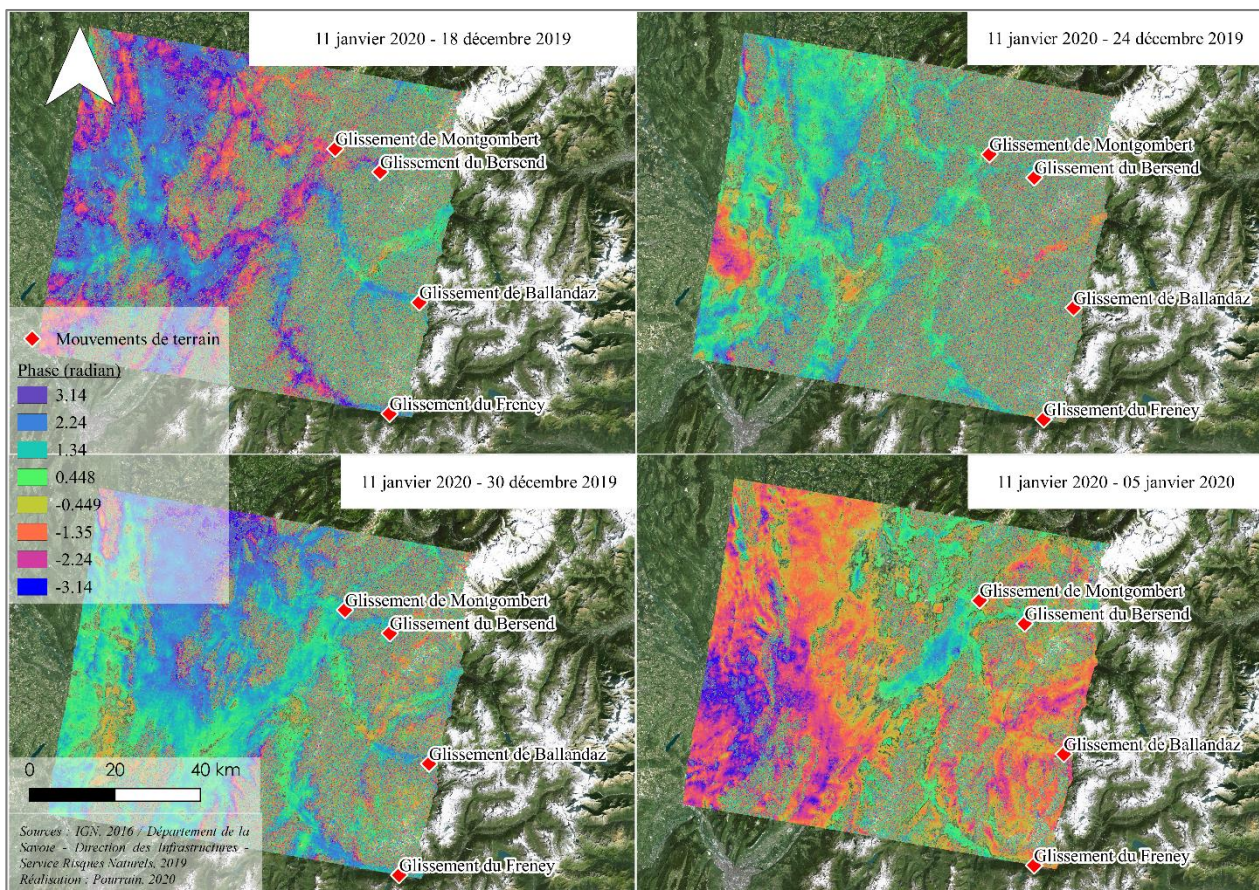
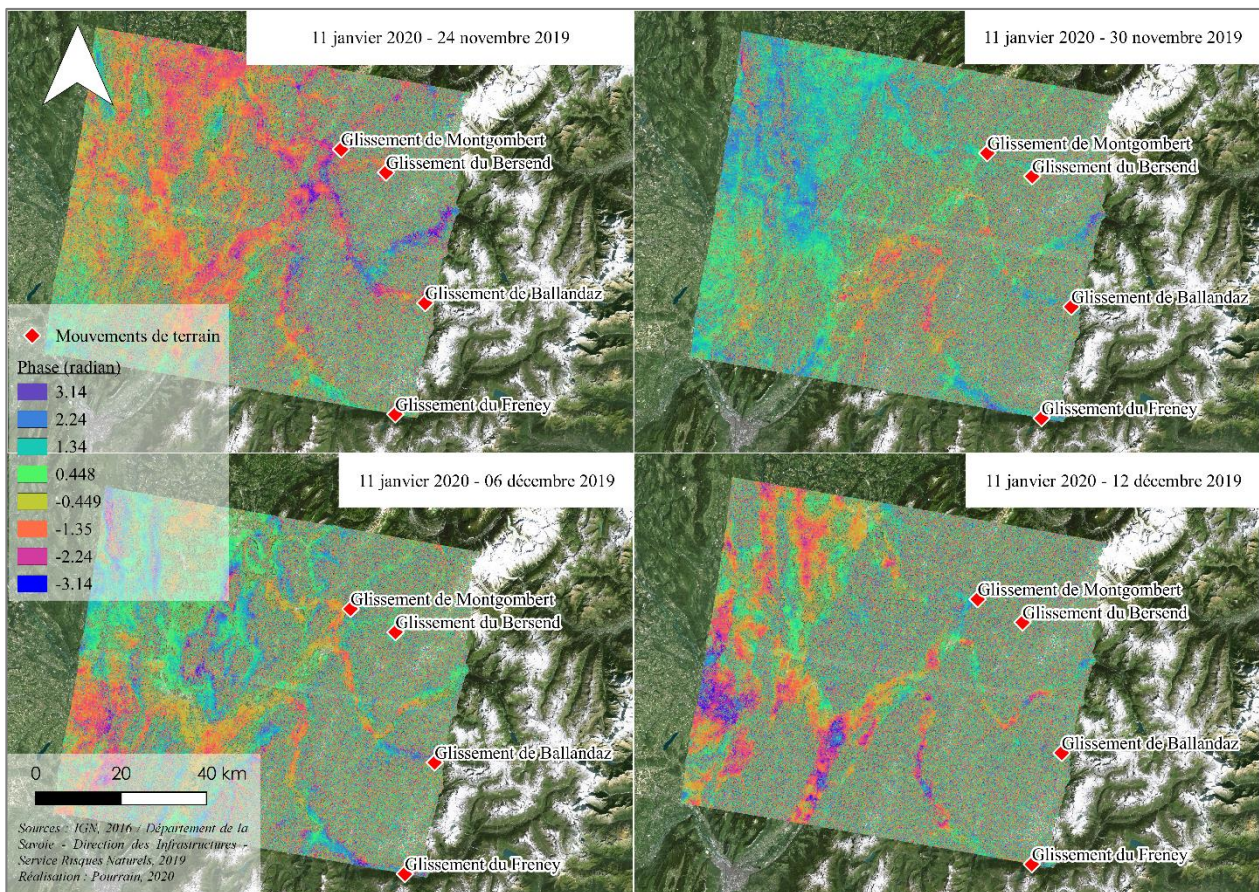
Les interférogrammes différentiels créés sont géocodés en Lambert 93 afin d'identifier, système de coordonnées utilisé en France, des signaux de déplacement et d'estimer par la suite, s'il est nécessaire de procéder au déroulement de phase et à la conversion des unités radians en unités métriques.

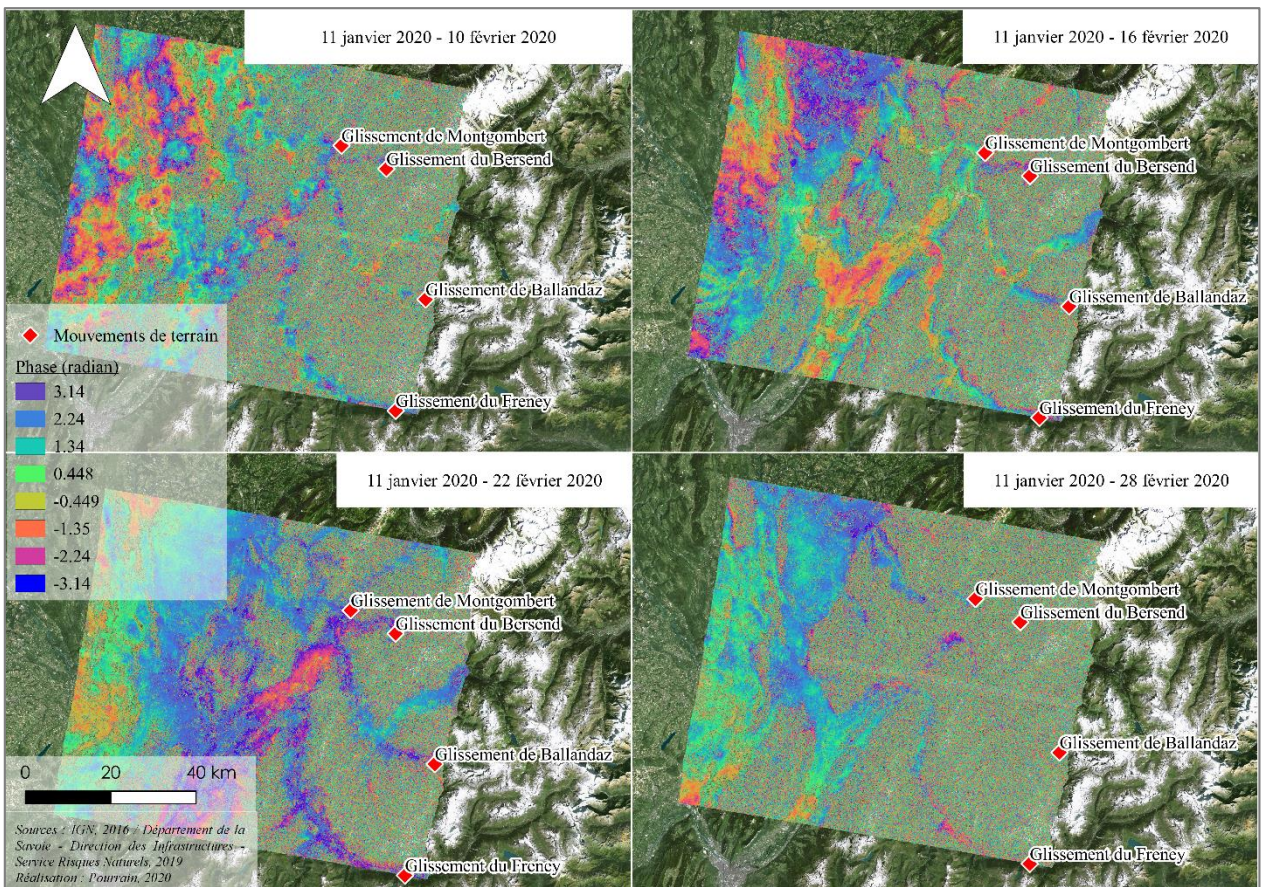
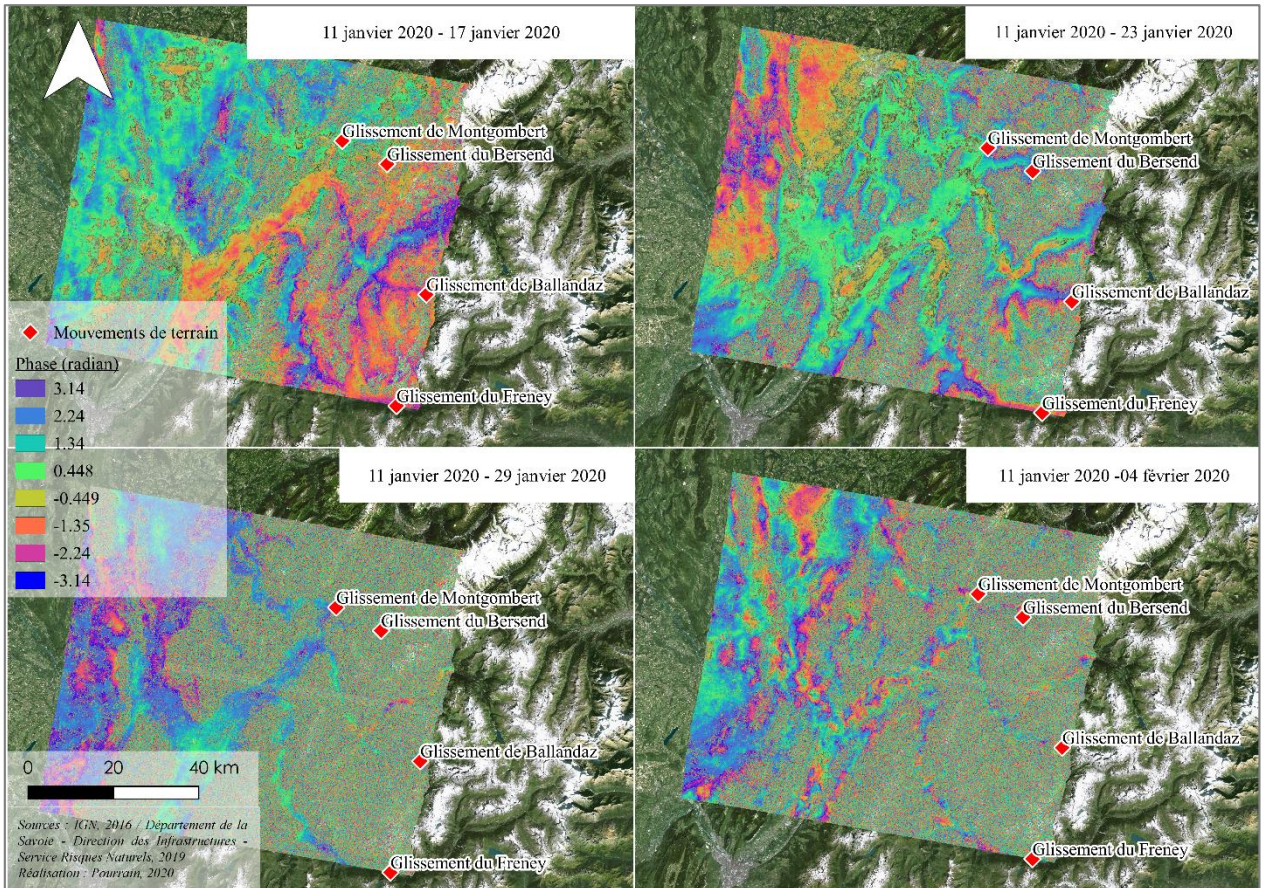
Chemin d'accès aux fonctions dans la boîte à outil SNAP

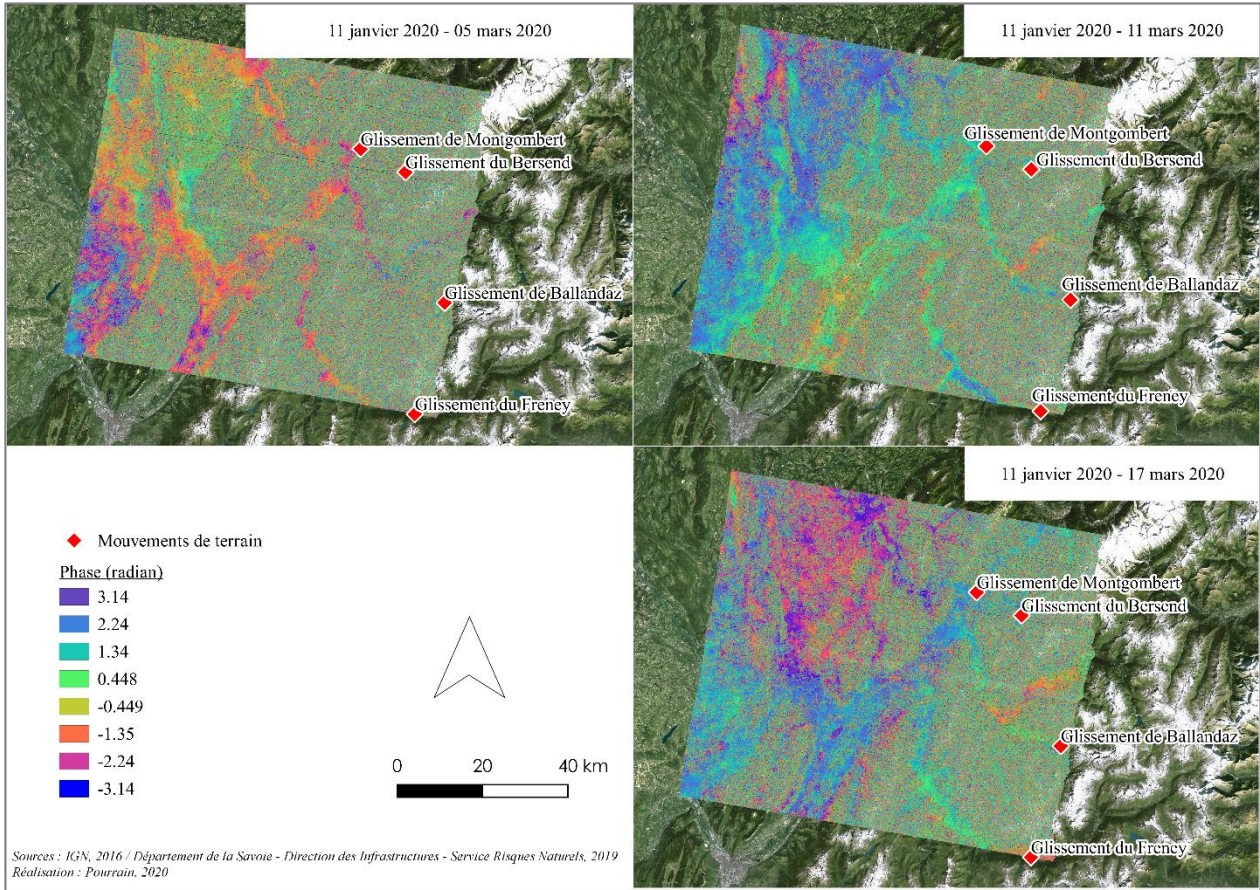
Version de la boîte à outil : 7.0.3 (version utilisée dans cette étude)

Objectifs de la fonction		Noms de l'outil / fonctions	Chemins d'accès
Importer une donnée (fichier zippé)		Open product	<i>menu > File > Open Product...</i>
Découper (sélectionner la zone d'étude)		Split	<i>menu > Radar > Sentinel-1 TOPS > S-1 Tops split</i>
Prendre en compte les informations liées à l' orbite		Apply-orbit-file	<i>menu > Radar > Apply Orbit File</i>
Ré-échantillonner une image esclave à partir d'une image Master		Back-Geocoding	<i>menu > Radar > Coregistration > S1 Tops Coregistration > S-1 Back Geocoding</i>
Améliorer le ré-échantillonnage		Enhanced-Spectral-Diversity	<i>menu > Radar > Coregistration > S1 Tops Coregistration > S-1 Enhances Spectral Diversity</i>
Recoller des « bursts » entre eux pour former un ensemble continu		Deburst	<i>menu > Radar > Sentinel-1 TOPS > S-1 Tops Deburst</i>
Former l' interférogramme		Interferogramm formation	<i>menu > Radar > Interférogramme > Products > Interferogram formation</i>
Former l' interférogramme différentiel	Suppression de la phase topographique	TopoPhaseRemoval	<i>menu > Radar > Interferometric > Products > Topographic Phase Removal.</i>
	Première suppression de la composante bruit	Multilooking	<i>menu > Radar > SAR Utilities > Multilooking</i>
	Deuxième suppression de la composante bruit	GolsteinPhaseFiltering	<i>menu > Radar > Interferometric > Filtering > Goldstein phase Removal</i>
Geocoder		Doppler Terrain Correction	<i>menu > Radar > geometric > terrain Correction > Range Doppler Terrain Correction</i>
Exporter les résultats		Export	<i>menu > File > Export ></i>

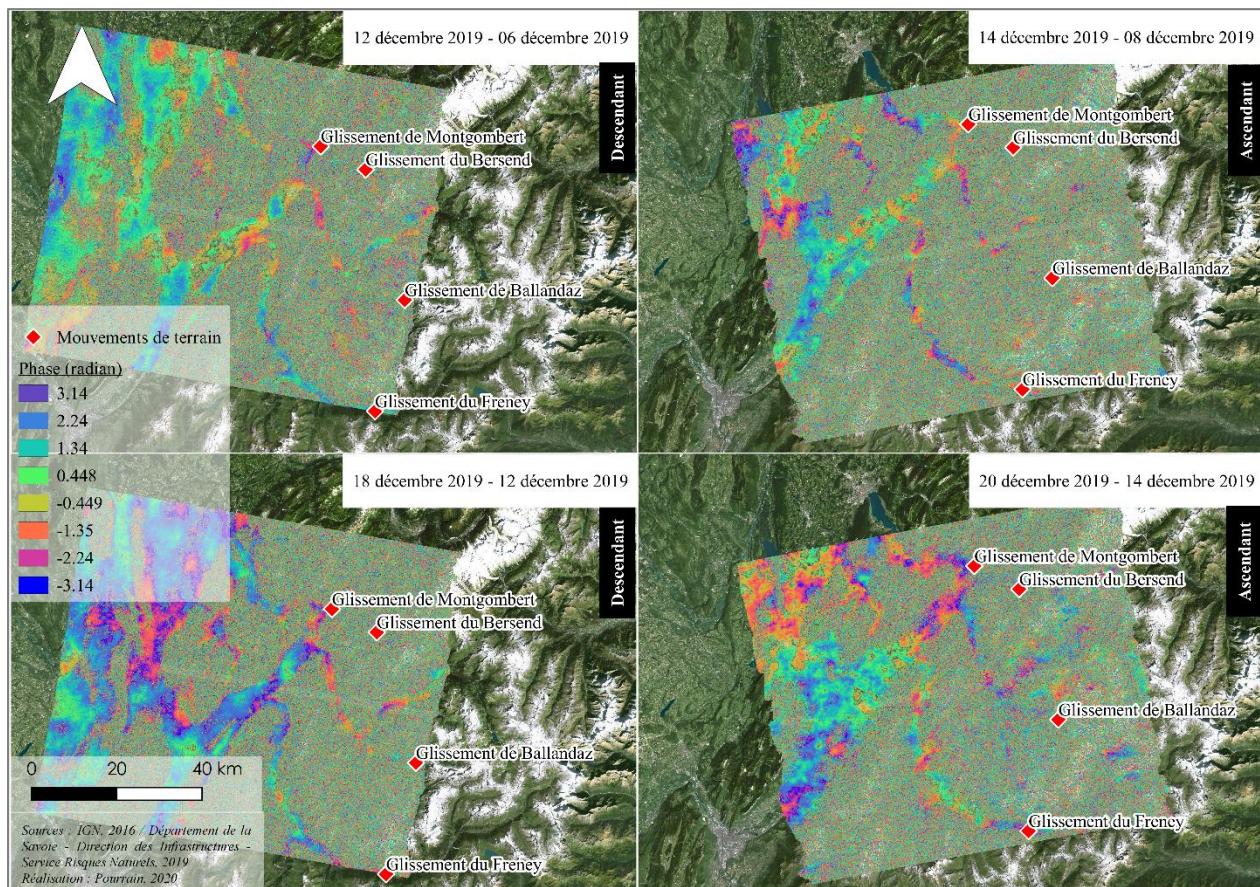
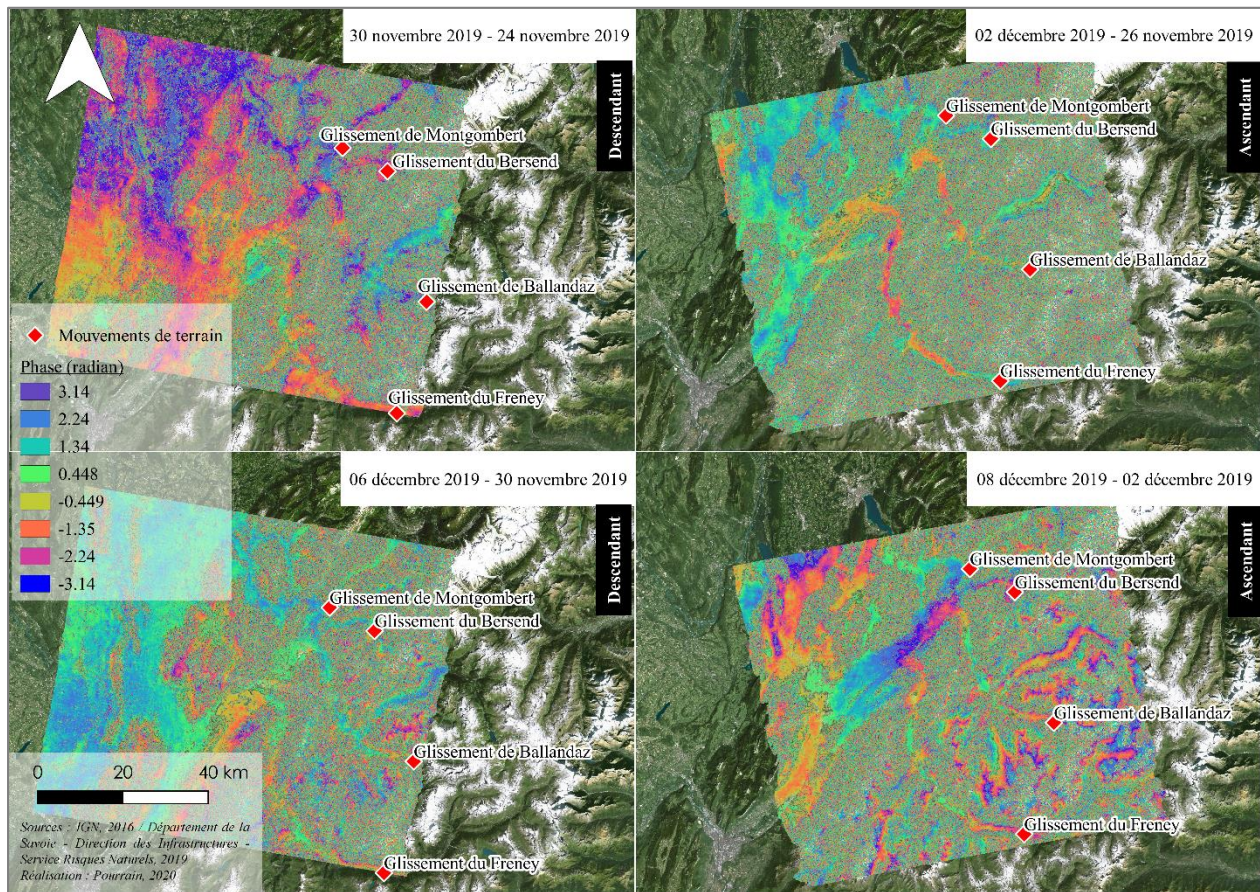
4 Annexe 4 : Visualisation de l'ensemble des interférogrammes différentiels descendants dont l'image « Master » est le 11 janvier 2020

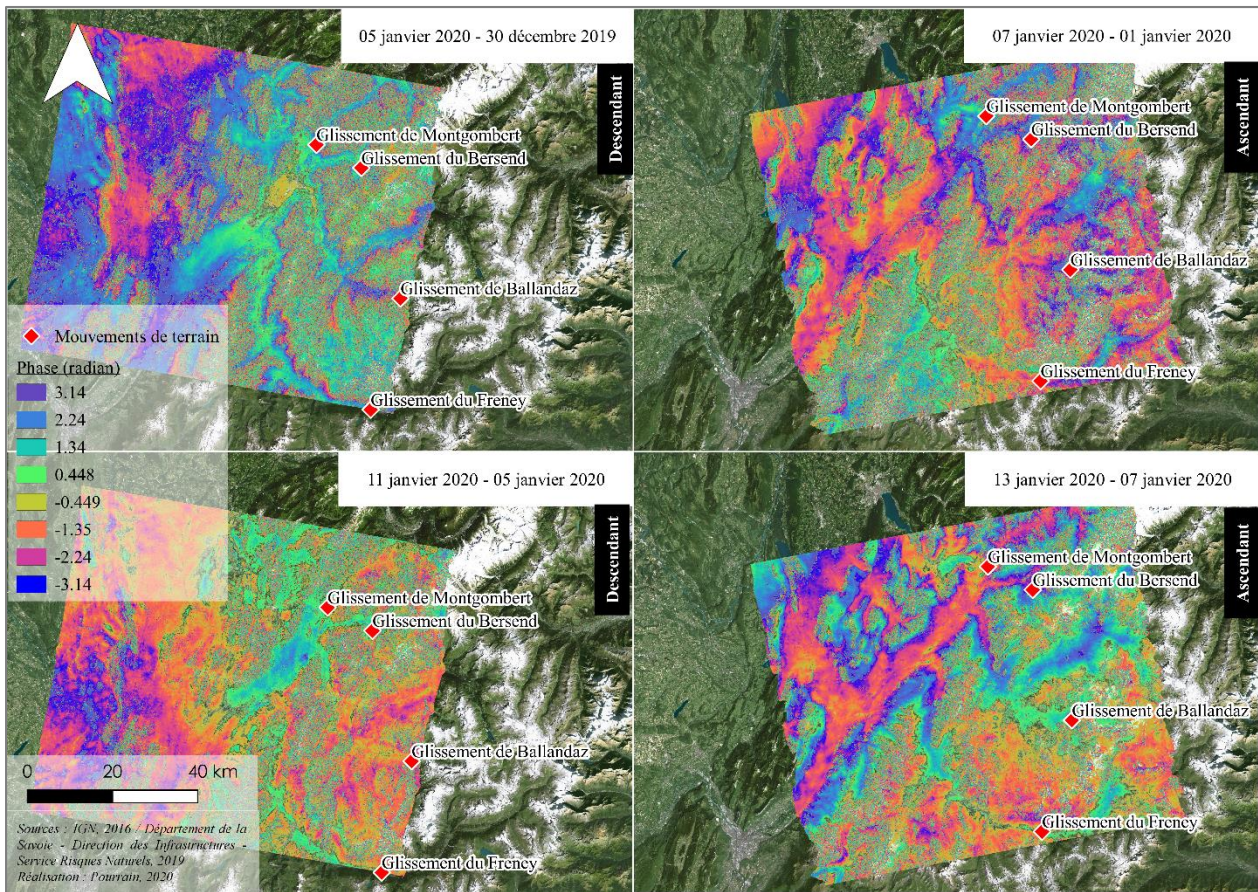
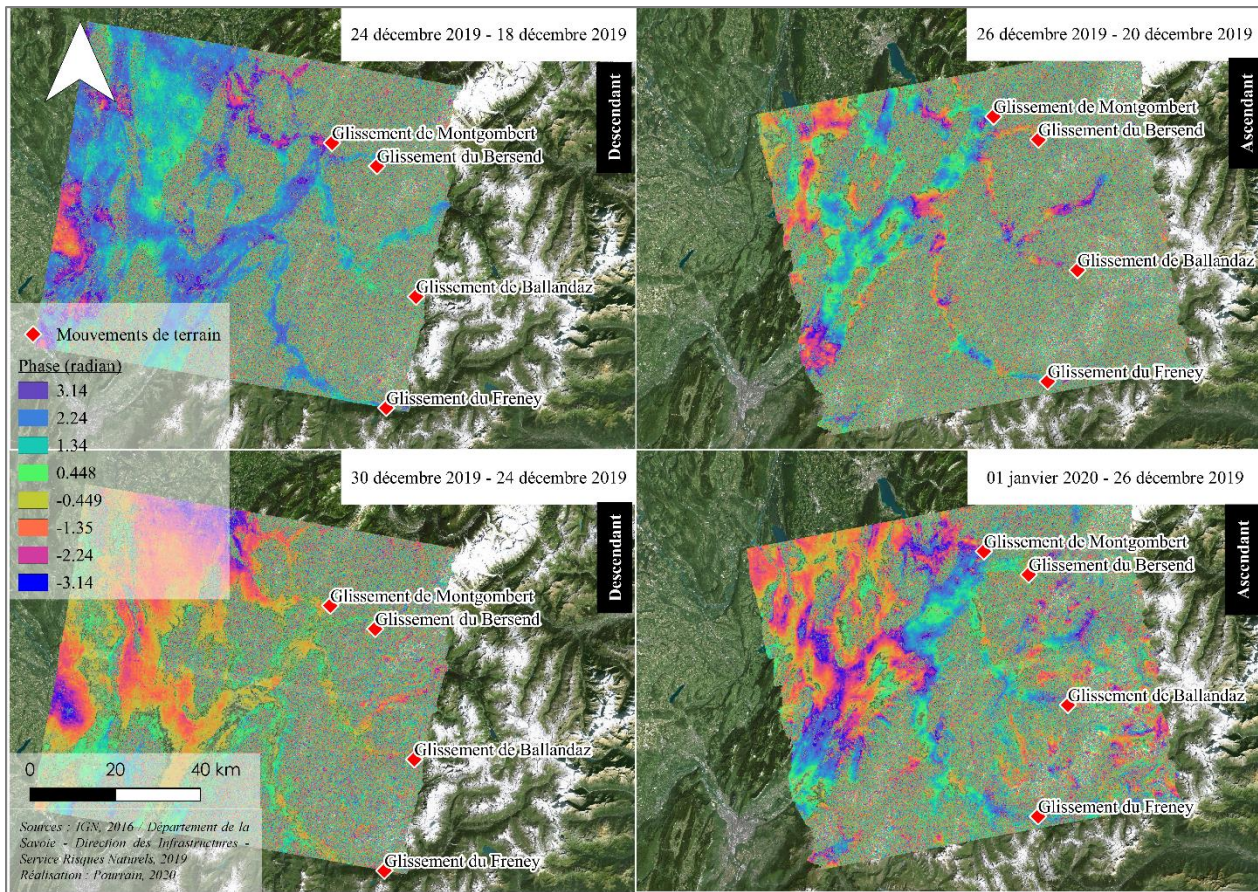


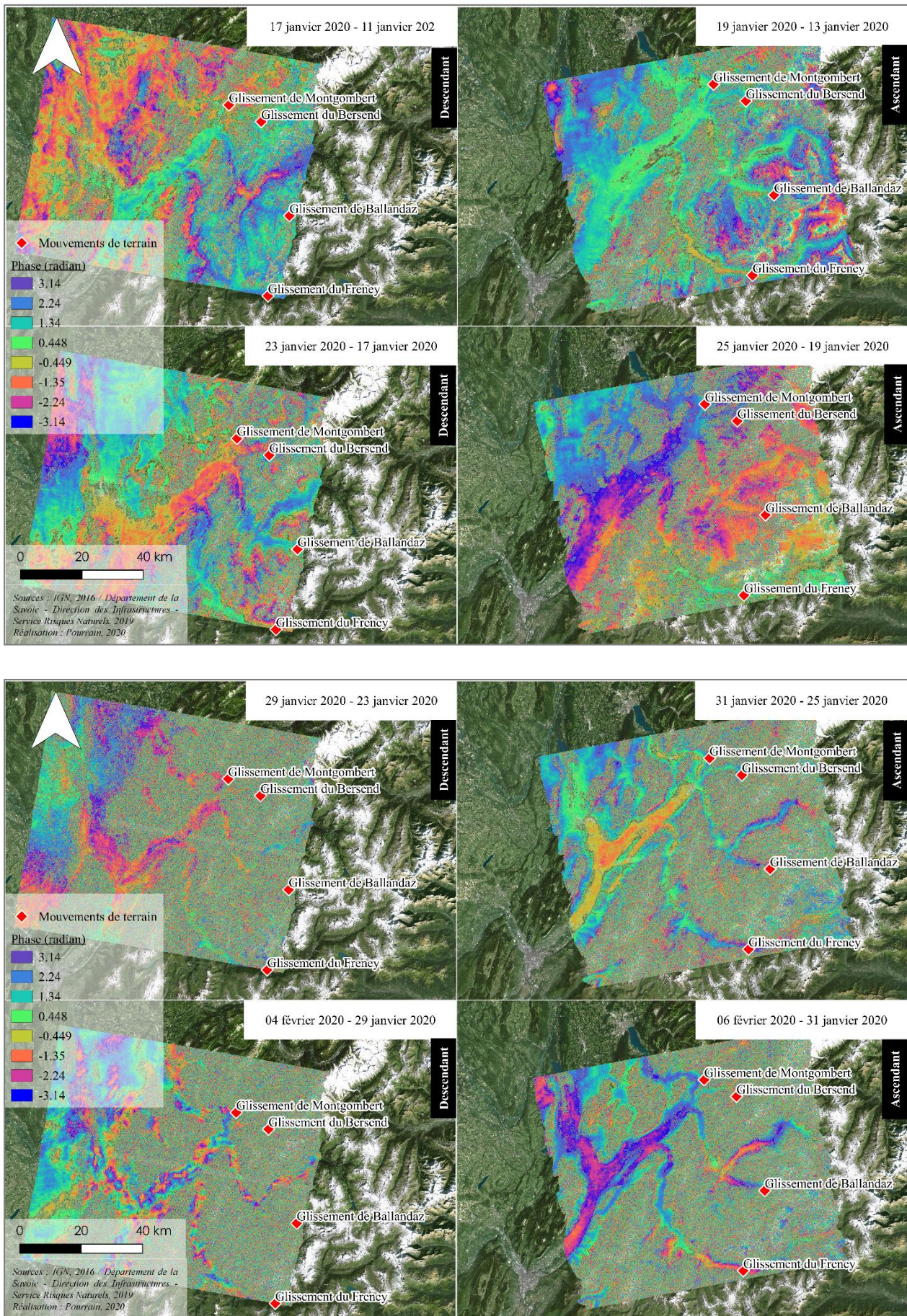


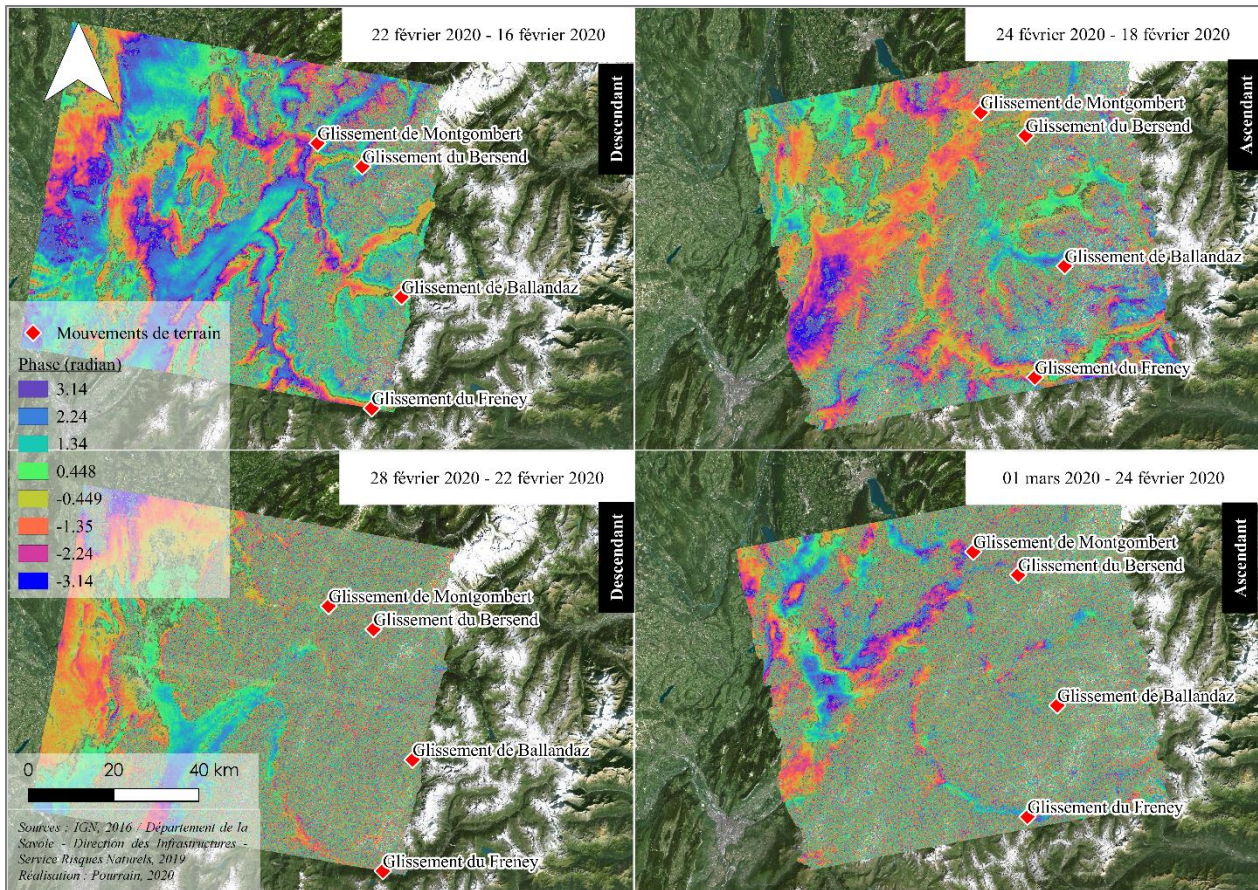
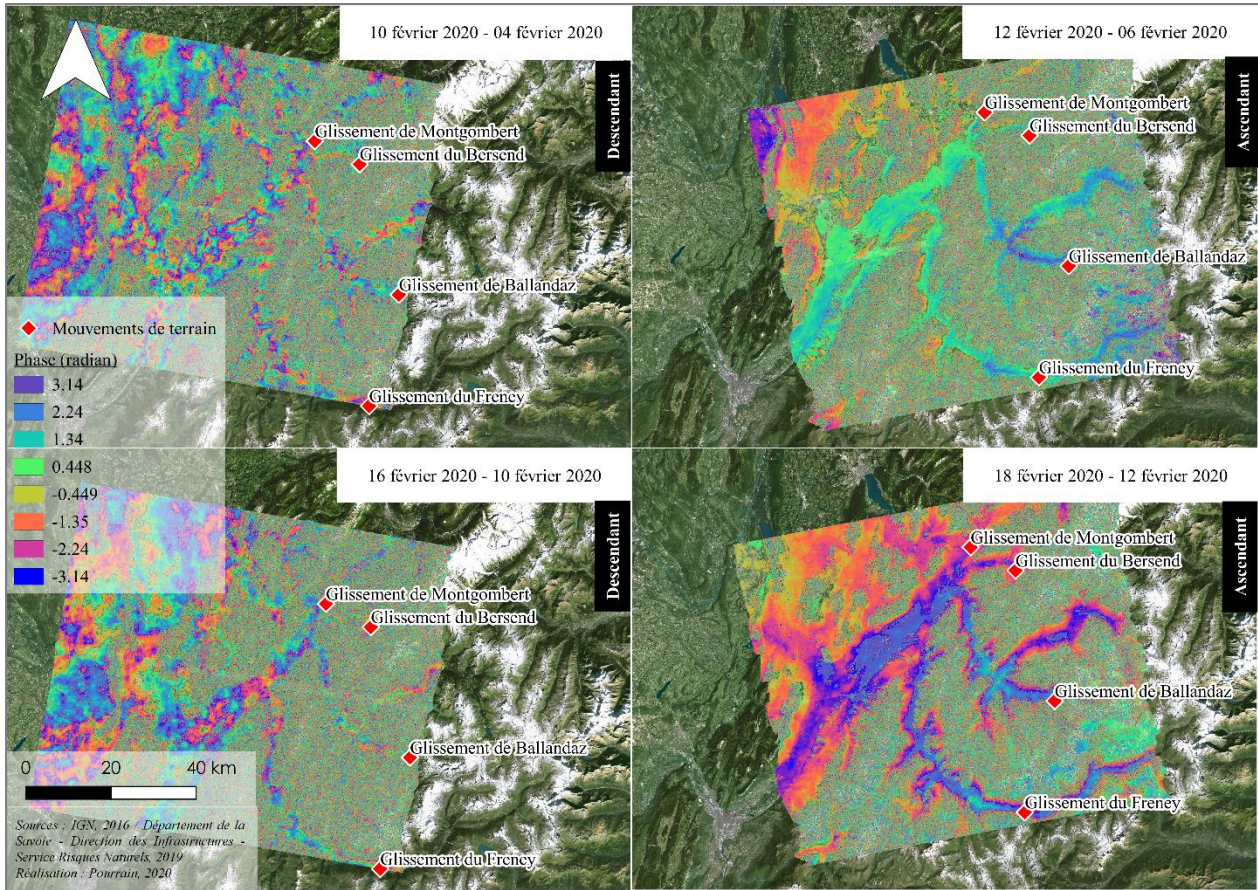


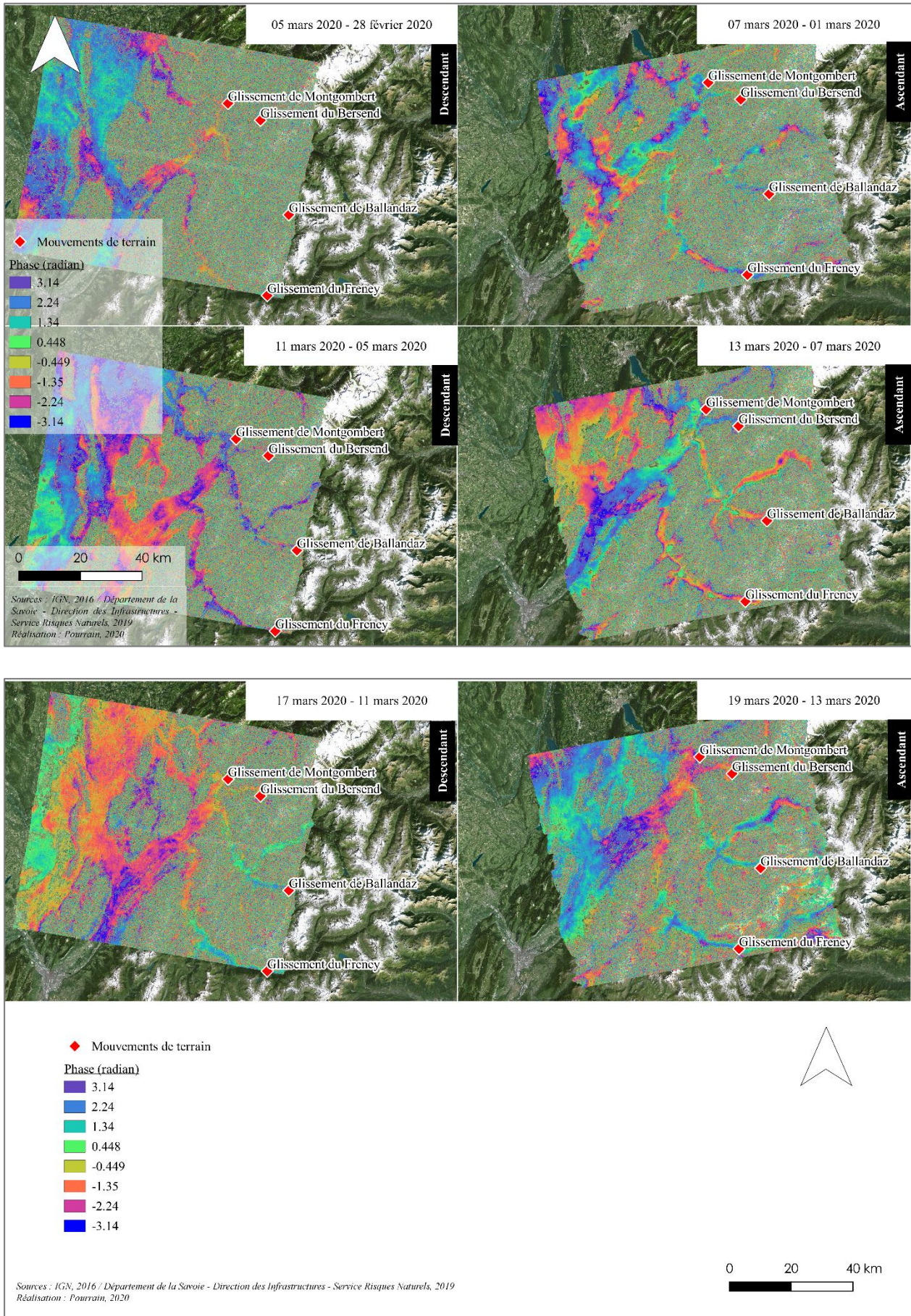
5 Annexe 5 : Visualisation de l'ensemble des interférogrammes différentiels « multi-référence » dans les deux modes d'acquisition











6 Annexe 6 : Météo en Savoie le jour de l'acquisition des images SAR.

Source : Infoclimat, s.d

Date ascendant : météo à 17h00

Dates descendant : météo à 6h00

Station météorologique de Chambéry – Aix-Les-Bains (Savoie) : Aérodrome de Vauglans

Altitude : 235 m

Coordonnées : 45°38'29''N | 5°52'41''E

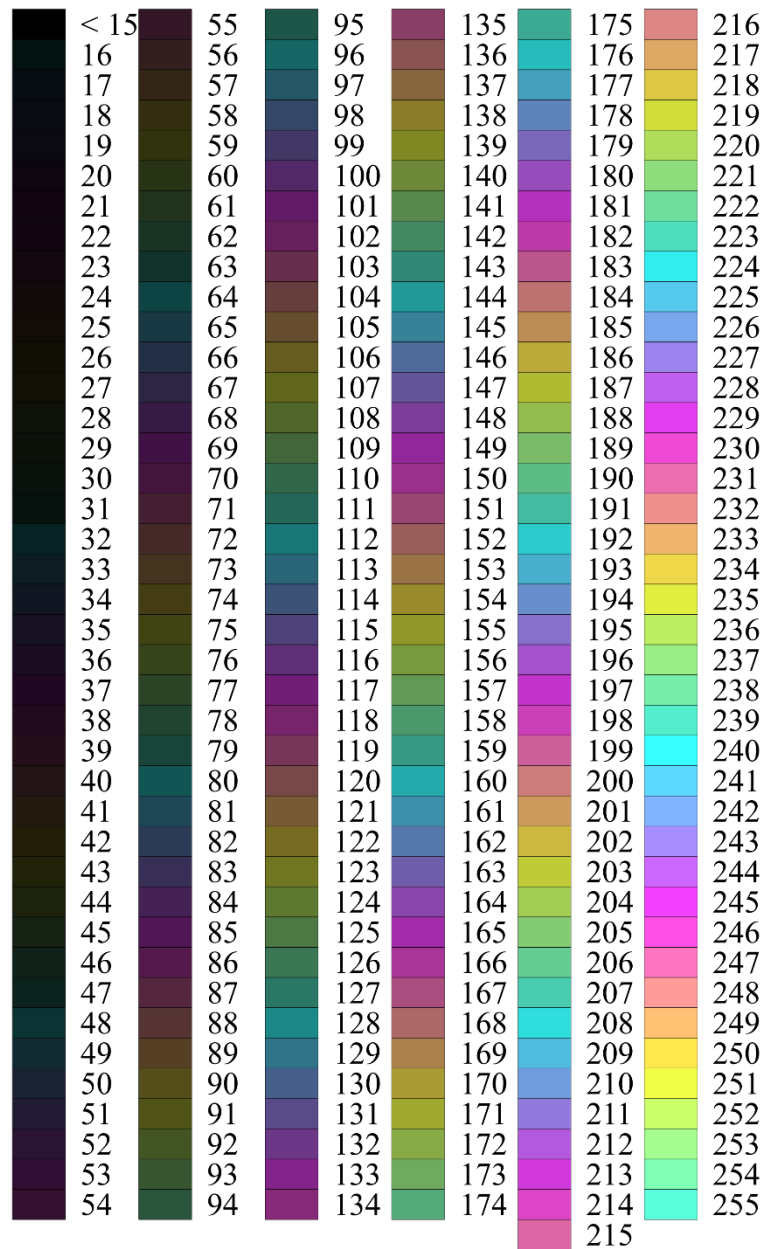
Dates	Températures (°C)	Précipitations (mm.h ⁻¹)	Humidité (%)	Pression (hPa)	Visibilité (km)	Hauteur plafond nuageux (m)
24.11.2019	4,4	0	95	1004,7	2,3	240
26.11.2019	8,7	0	83	1007,5	9	NA
30.11.2019	5,9	0	95	1021,8	10	210
02.12.2019	7,8	0	69	1021,3	55	810
06.12.2019	-0,1	0	97	1026,5	1,1	30
08.12.2019	9,1	0	63	1017,0	35	7260
12.12.2019	3,7	0	80	1013,4	8	360
14.12.2019	8,7	0,2	92	1011,7	17	300
18.12.2019	9,1	0	82	1017,2	40	2220
20.12.2019	9,4	4,7	89	998,7	6	1140
24.12.2019	6,4	0,2	77	1023,8	19	1680
26.12.2019	6,2	0	92	1028,7	19	1440
30.12.2019	3,5	0	75	1036,0	12	570
01.01.2020	1,9	0	82	1033,6	6	360
05.01.2020	-0,1	0	90	1036,2	11	NA
07.01.2020	5,6	0	75	1030,1	12	NA
11.01.2020	1,6	0	93	1033,1	3,7	900
13.01.2020	3,0	0	72	1023,0	10	NA
17.01.2020	-0,4	0	85	1026,8	15	NA
19.01.2020	5,8	0	51	1032,2	55	1560
23.01.2020	-1,6	0	89	1030,4	2,9	NA
25.01.2020	6,3	0	67	1021,6	10	NA
29.01.2020	6,1	0,6	86	1017,6	7	1170
31.01.2020	9,6	0	83	1018,8	28	NA
04.02.2020	10,6	3,1	63	1021,0	60	720
06.02.2020	3,7	0	71	1029,5	13	NA
10.02.2020	10,6	0	67	1020,2	60	1500
12.02.2020	7,9	0	54	1024,4	55	NA
16.02.2020	1,9	0	92	1026,1	19	NA
18.02.2020	8,8	0	58	1030,6	55	NA
22.02.2020	-2	0	91	1034,2	9	NA
24.02.2020	16	0	53	1019,6	55	NA
28.02.2020	-1,7	0	85	1023,62	35	NA
01.03.2020	10,6	0	62	1002,5	5	900

05.03.2020	6,5	NA	83	1007,0	13	510
07.03.2020	9,8	0	41	1022,0	60	1920
11.03.2020	6,8	0	93	1025,6	5	1050
13.03.2020	12,8	0	48	1020,8	60	1740
17.30.2020	3,7	0	90	1031,6	16	NA
19.03.2020	20,2	0	42	1020,0	40	NA

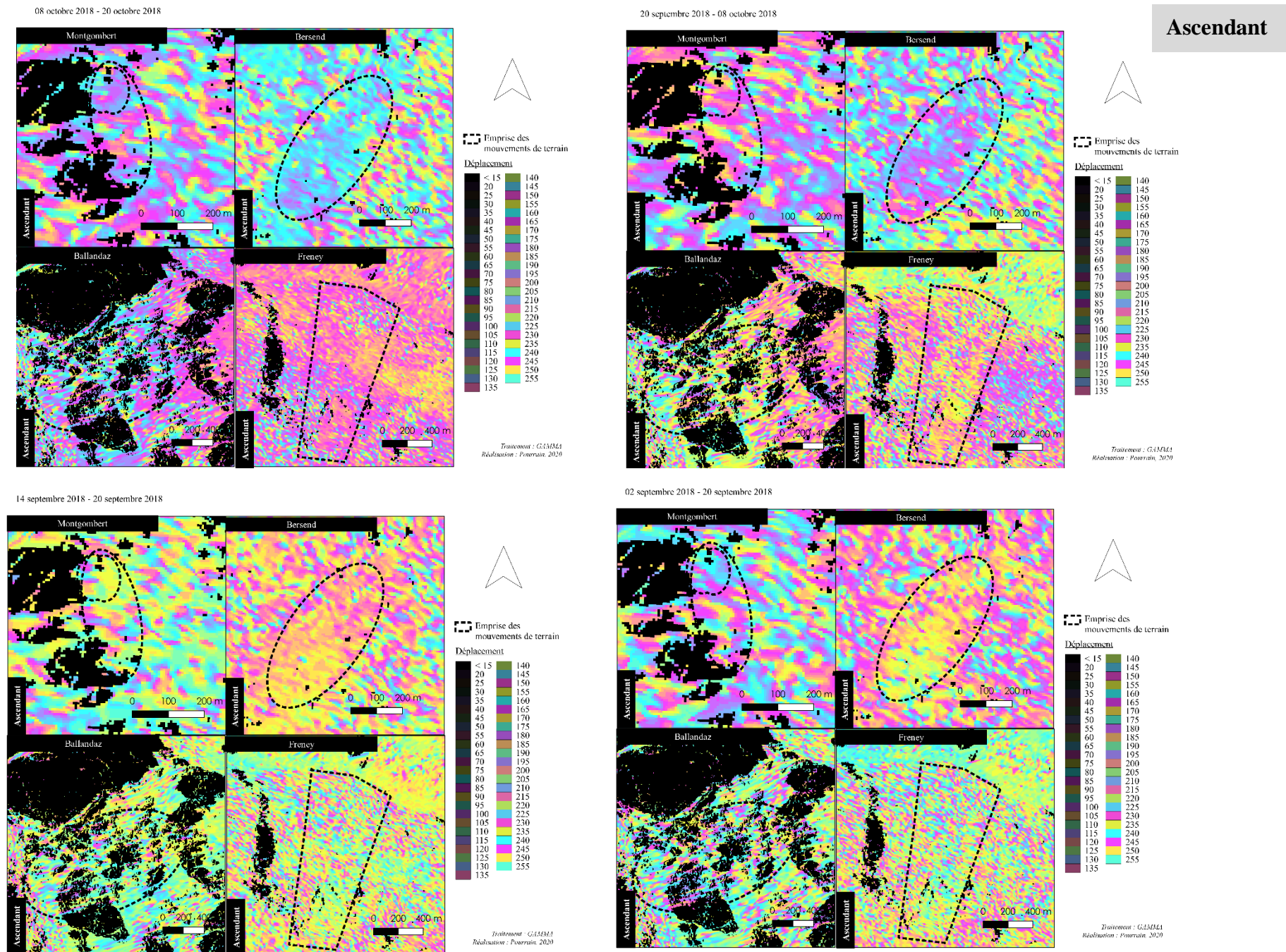
7 Annexe 7 : Légende complète des interférogrammes différentiels générés par le logiciel GAMMA (Chapitre 4)

◆ Mouvements de terrain

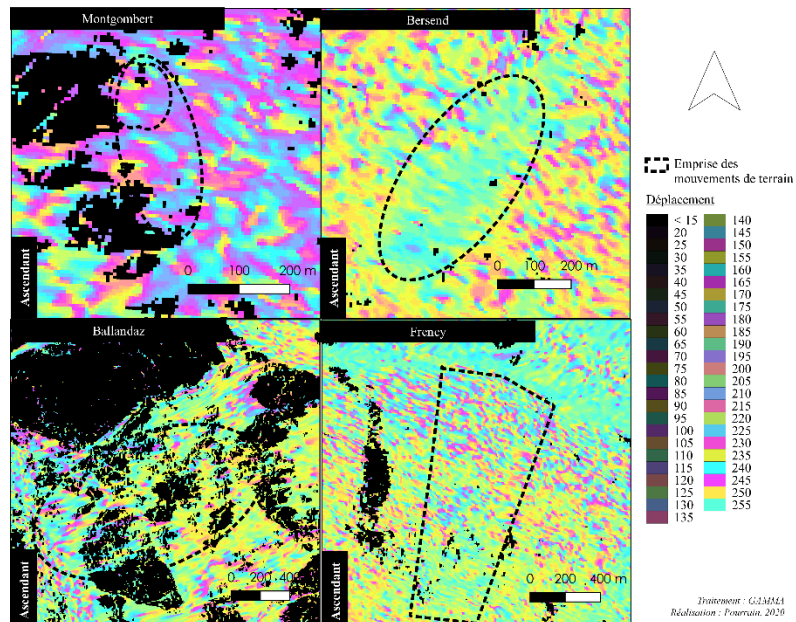
Déplacement



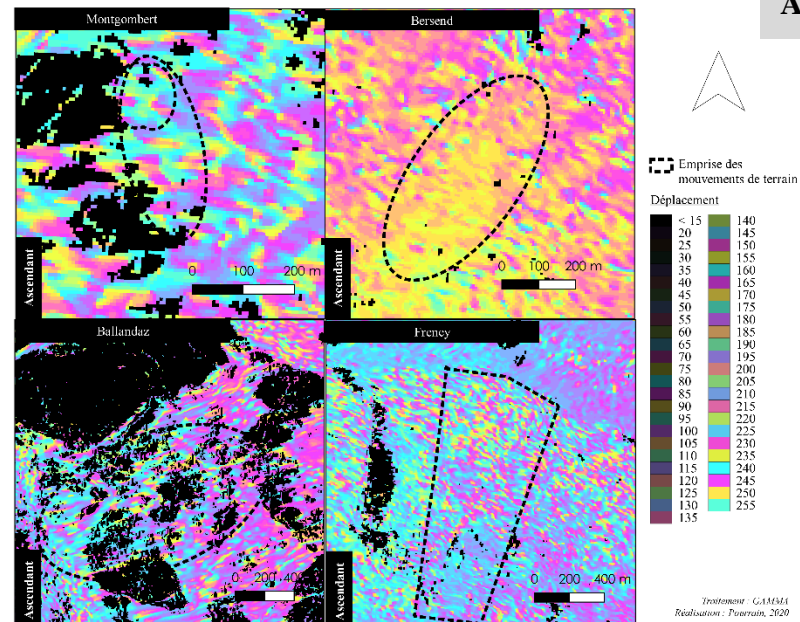
8 Annexe 8 : Résultats, sur les secteurs d'étude, des interférogrammes différentiels générés par GAMMA remote sensing.



02 septembre 2018 - 14 septembre 2018

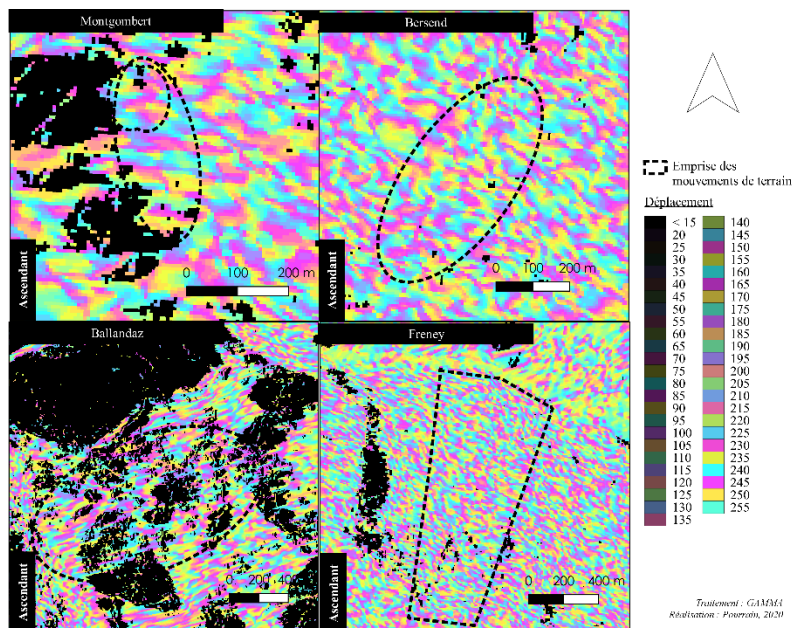


27 août 2018 - 02 septembre 2018

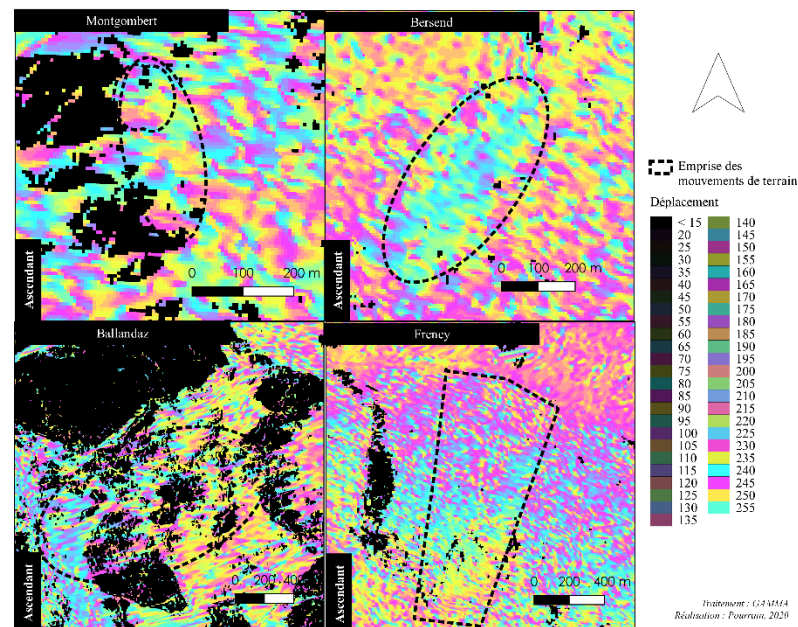


Ascendant

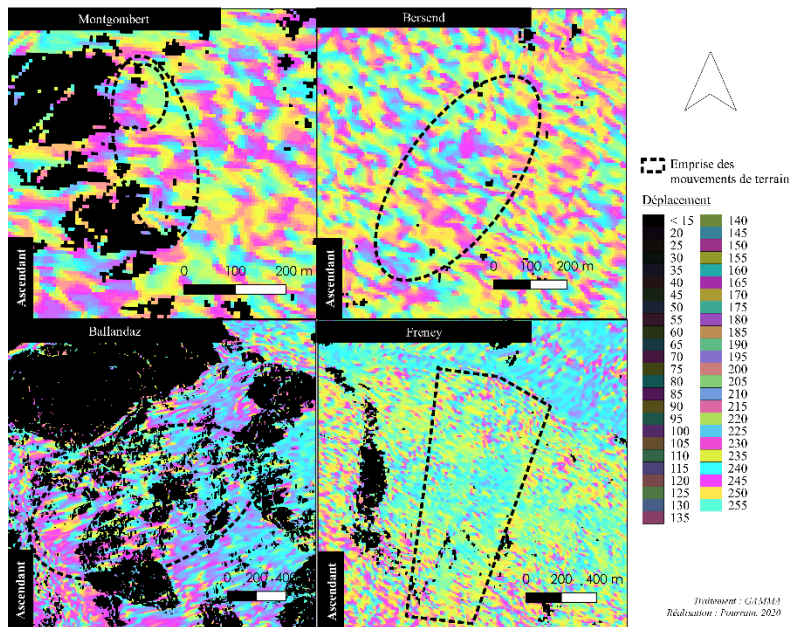
25 octobre 2017 - 26 octobre 2018



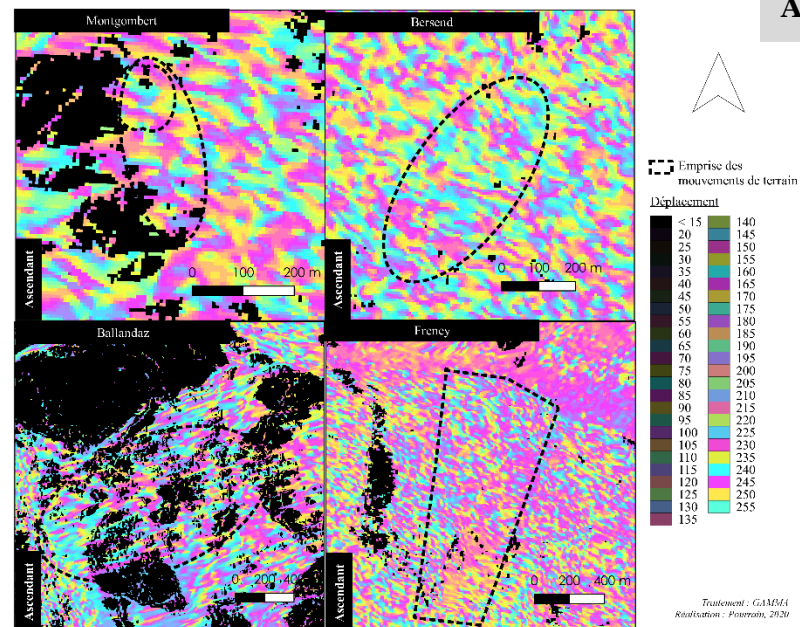
19 octobre 2017 - 25 octobre 2017



07 octobre 2017 - 25 octobre 2017

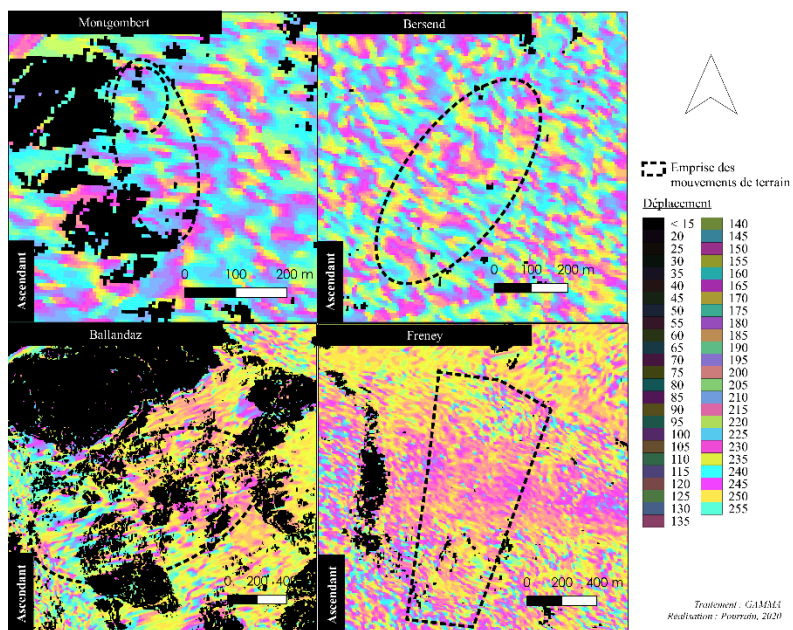


19 septembre 2017 - 07 octobre 2017

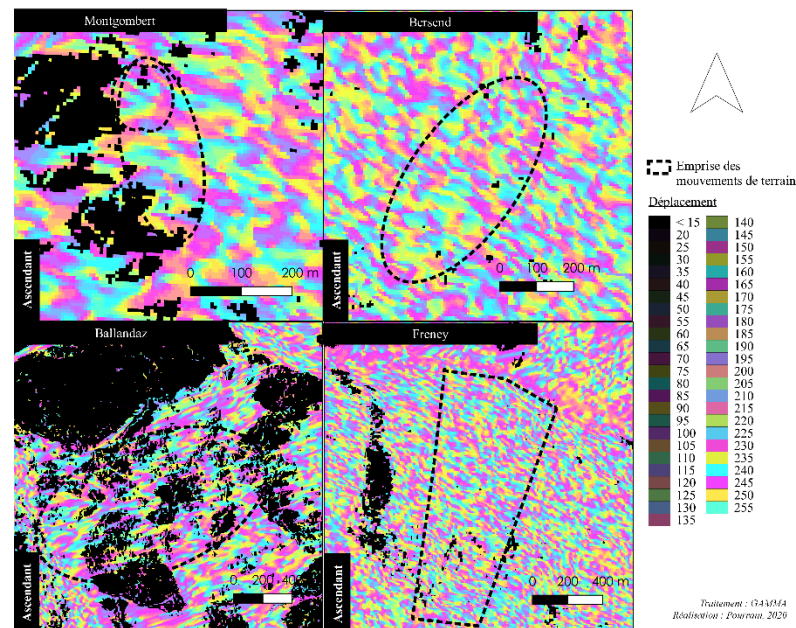


Ascendant

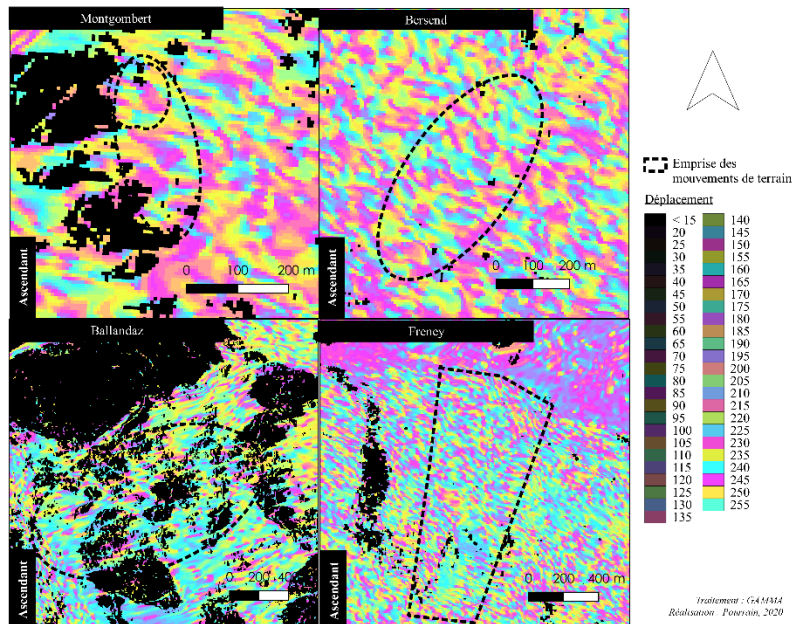
13 septembre 2017 - 01 octobre 2017



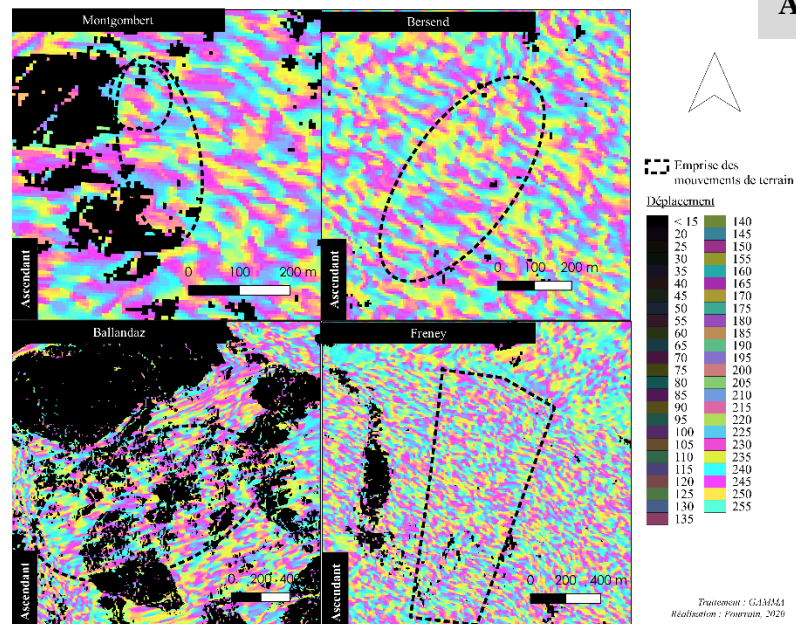
01 septembre 2017 - 02 septembre 2018



01 septembre 2017 - 13 septembre 2017

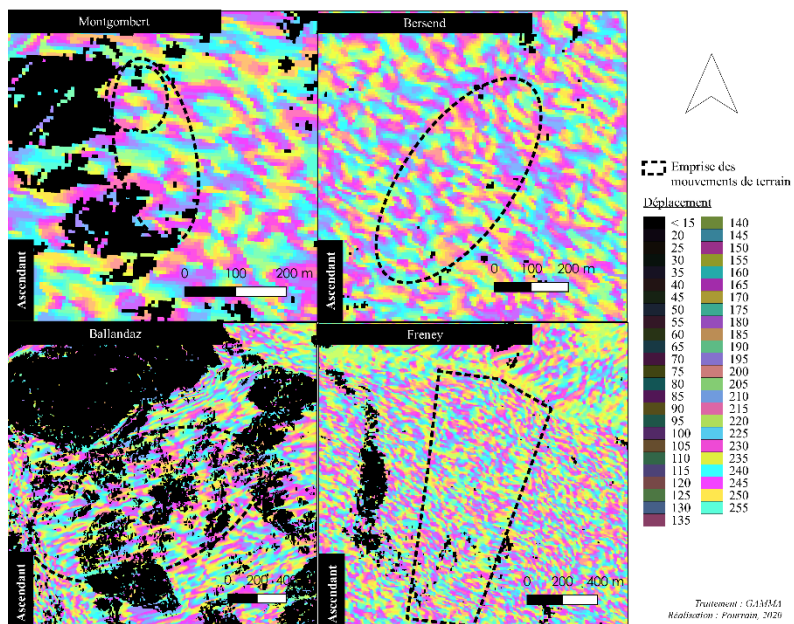


12 octobre 2016 - 20 octobre 2018

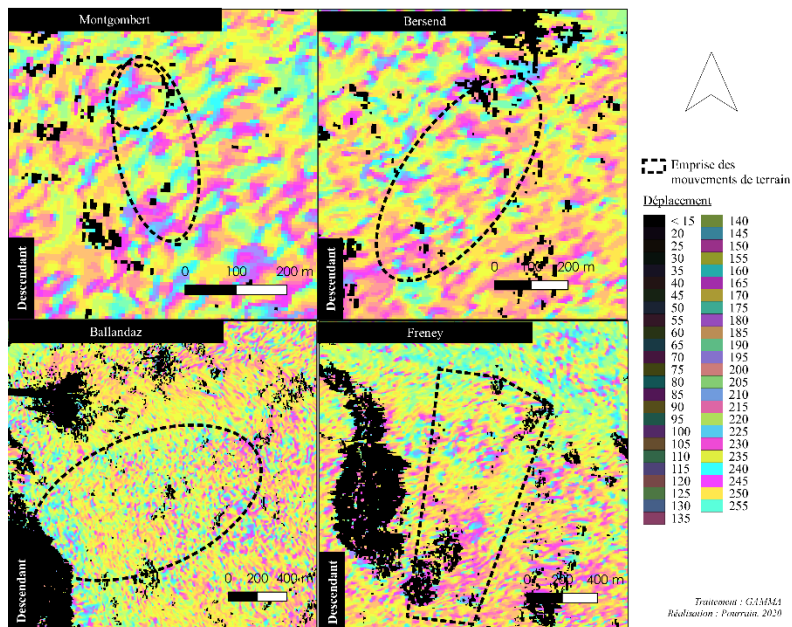


Ascendant

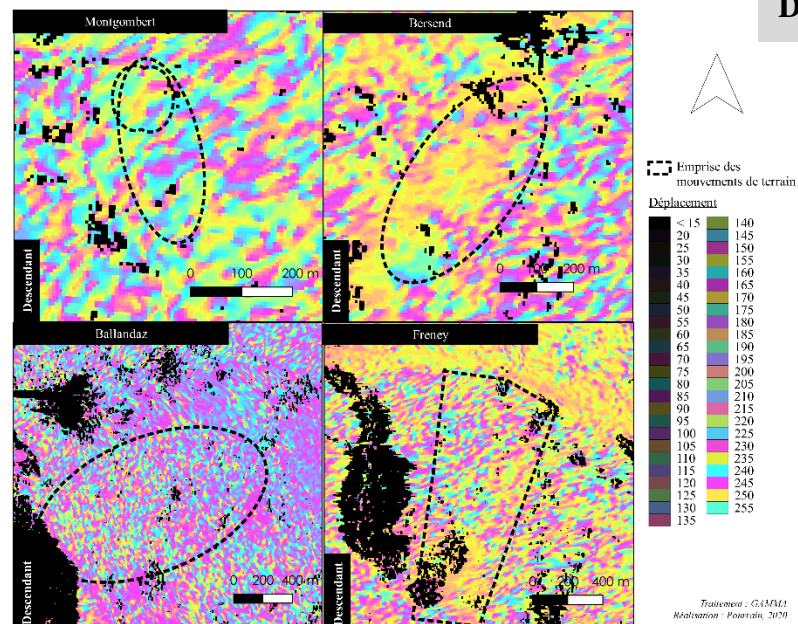
30 septembre 2016 - 08 octobre 2018



21 février 2019 - 27 février 2019

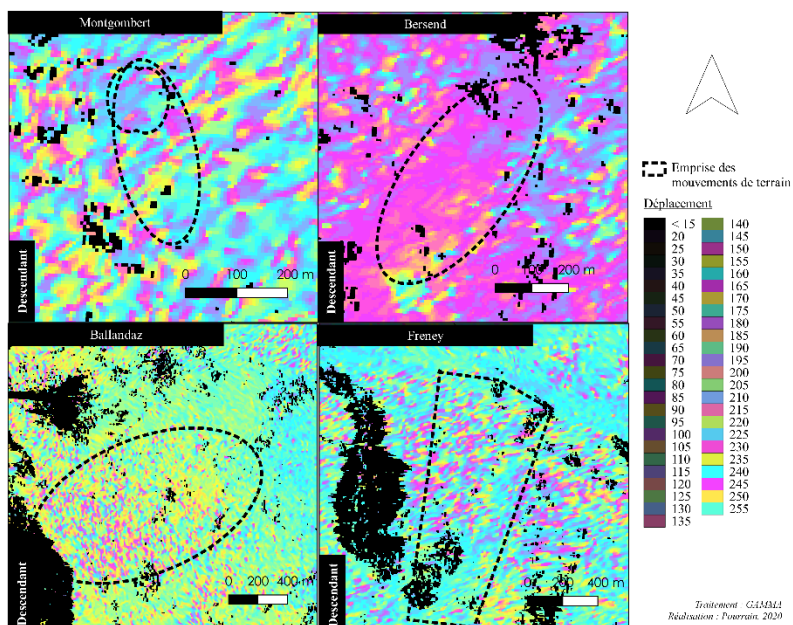


06 octobre 2018 - 18 octobre 2018

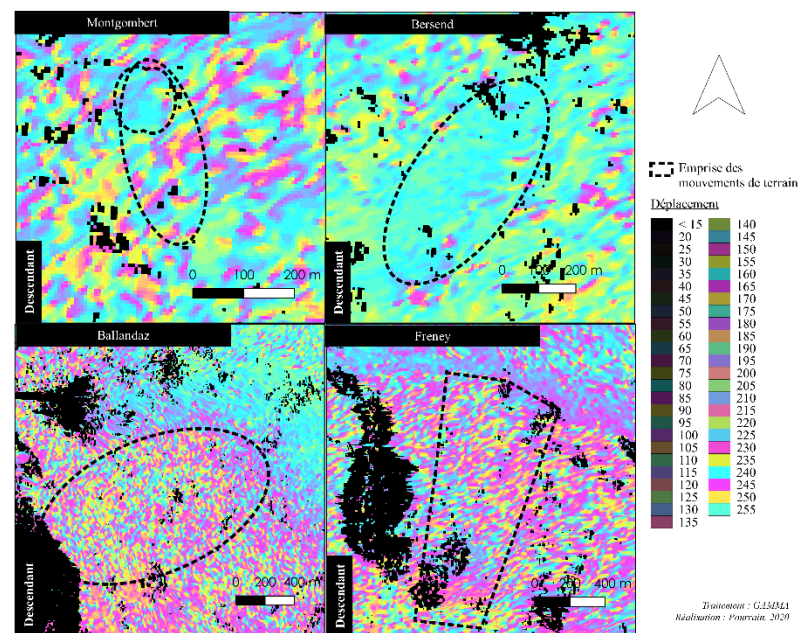


Descendant

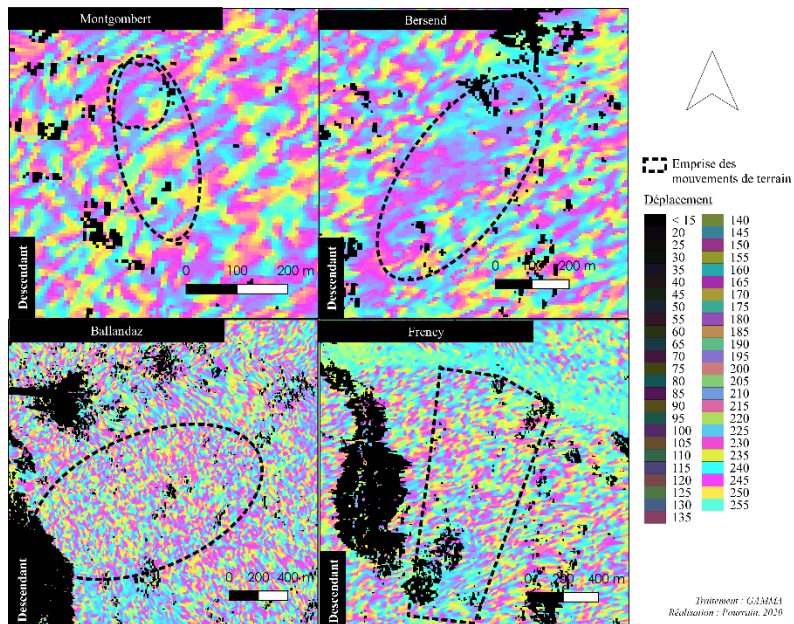
30 septembre 2018 - 06 octobre 2018



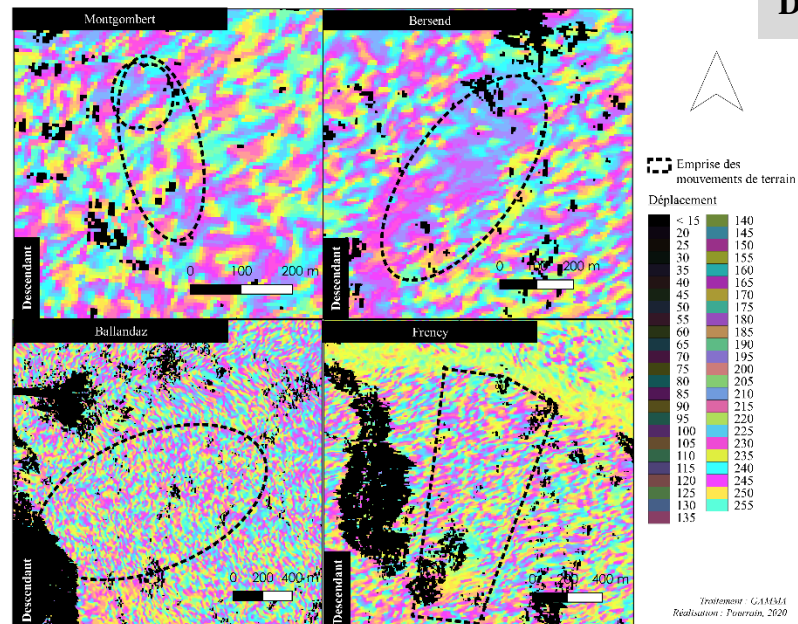
12 septembre 2018 - 18 septembre 2018



31 août 2018 - 18 septembre 2018

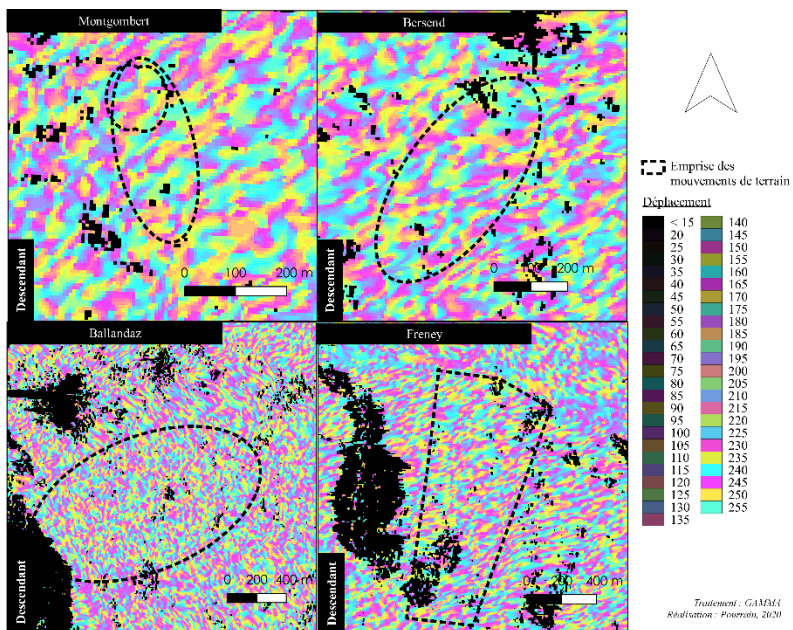


31 août 2018 - 12 septembre 2018

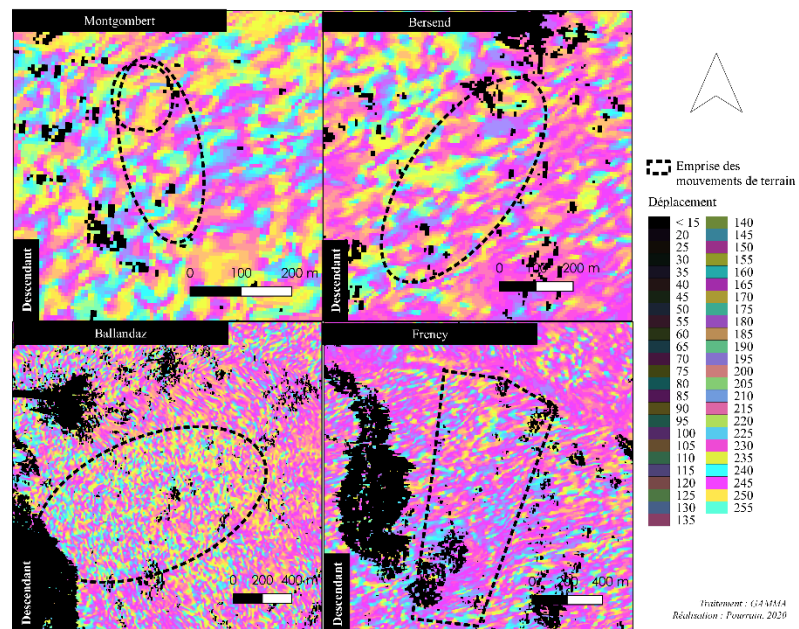


Descendant

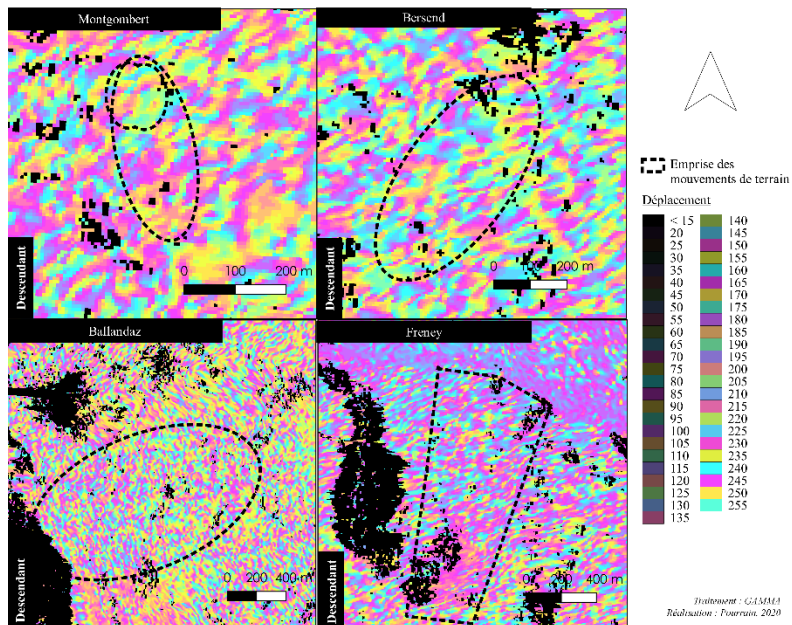
17 septembre 2017 - 18 septembre 2018



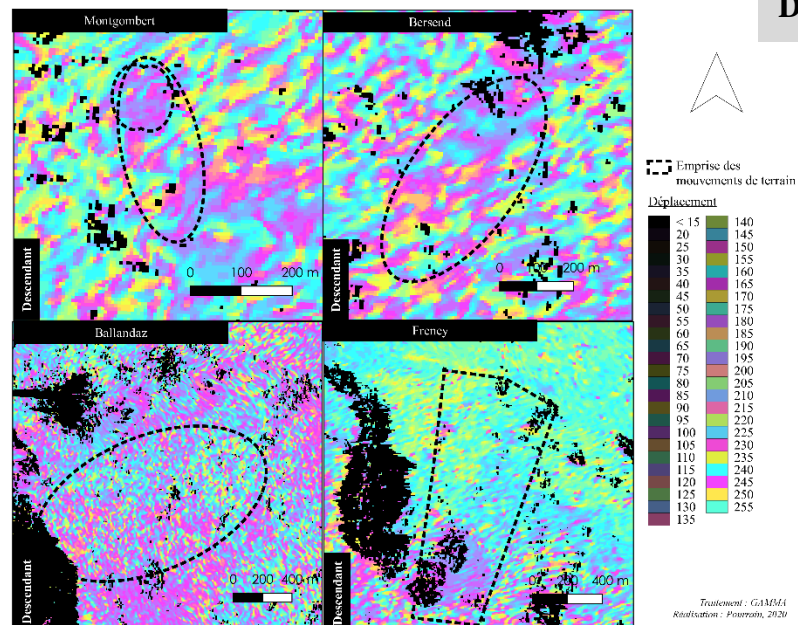
17 septembre 2017 - 29 septembre 2017



11 septembre 2017 - 29 septembre 2017

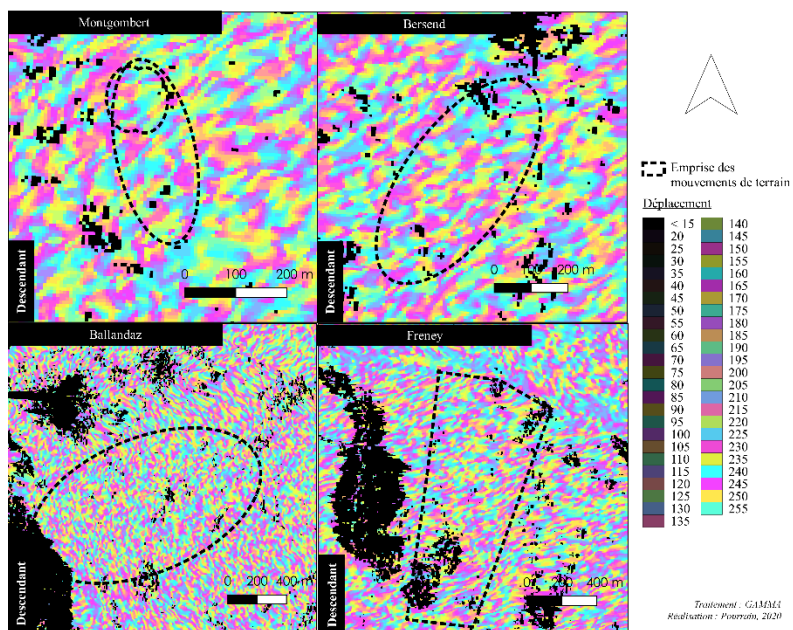


11 septembre 2017 - 17 septembre 2017

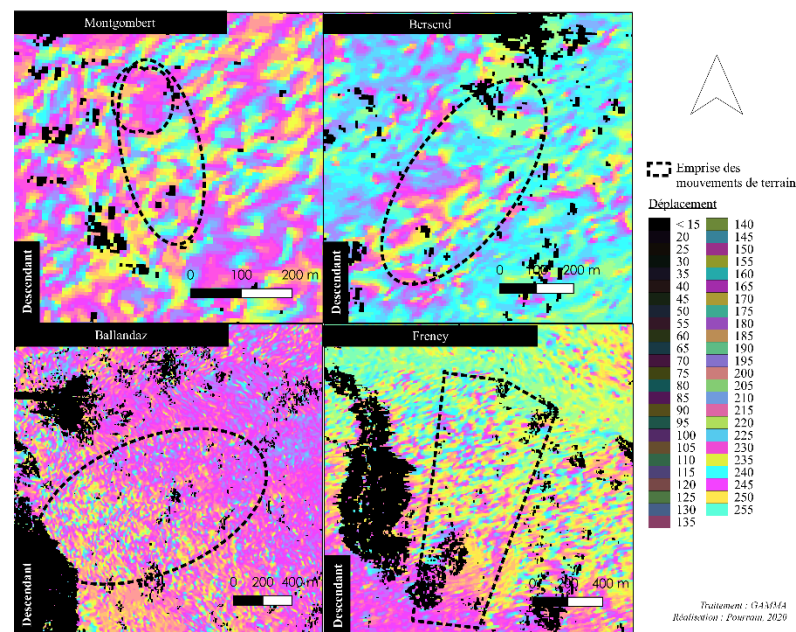


Descendant

30 août 2017 - 31 août 2018



24 août 2017 - 30 août 2017



Descendant

