



HAL
open science

Détection de mouvements de glaciers rocheux dans les Alpes françaises par interférométrie radar différentielle (D-InSAR) dérivée des archives satellitaires ERS (European Remote Sensing)

Thomas Echelard, Jean-Michel Krysiecki, Michel Gay, Philippe Schoeneich

► To cite this version:

Thomas Echelard, Jean-Michel Krysiecki, Michel Gay, Philippe Schoeneich. Détection de mouvements de glaciers rocheux dans les Alpes françaises par interférométrie radar différentielle (D-InSAR) dérivée des archives satellitaires ERS (European Remote Sensing). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2013, 3, pp.231-242. hal-00926030

HAL Id: hal-00926030

<https://hal.science/hal-00926030v1>

Submitted on 9 Jan 2014

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.

Utilisation des archives ERS pour la détection de mouvements de glaciers rocheux dans les Alpes françaises par interférométrie radar différentielle (D-InSAR).

Thomas Echelard^{1,2}, Jean-Michel Krysiecki², Michel Gay¹, Philippe Schoeneich²

1 : Grenoble Image Parole Signal et Automatique (GIPSA-Lab), 961 rue de la houille blanche – BP 46 – 38402 Saint Martin d'Hères - France.

thomas.echelard gipsa-lab.grenoble-inp.fr ; michel.gay gipsa-lab.grenoble-inp.fr

2 : Université de Grenoble, laboratoire PACTE/Territoires, Institut de Géographie Alpine, 14 bis avenue Marie Reynoard – 38100 Grenoble – France

an-mi gmail.com ; philippe.schoeneich ujf-grenoble.fr

Résumé :

L'interférométrie radar différentielle (D-InSAR) est une méthode de mesure basée sur la mesure de la différence de phase entre deux scènes radars qui permet de détecter et de quantifier les déformations de surface. De récentes recherches ont montré que cette méthode semblait pertinente pour détecter le fluage des glaciers rocheux. Dans cette étude nous nous intéressons à la détection des mouvements des glaciers rocheux sur la totalité des Alpes françaises. Pour cela nous avons utilisé les images d'archives d'ERS et choisi les données pertinentes pour l'étude. Pour analyser et valider cette grande quantité de données, deux méthodes ont été employées : i) une analyse empirique des interférogrammes dans un SIG à l'aide de données exogènes, ii) une comparaison entre les données interférométriques et un inventaire de glaciers rocheux existant. Finalement une carte présentant toutes les détections à l'échelle des Alpes françaises a été réalisée.

Mots clés :

SAR Interférométrie, ERS, glaciers rocheux, pergélisol

Abstract

Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (D-InSAR) is a method of measurement based on the phase difference between two radar images which allow the detection and quantification of ground surface deformation. Recent research has shown that the D-InSAR technique can be used to quantify rockglacier deformation. In this study, we are interested by the detection of rockglaciers movements in all the French Alps. We used all ERS archive data and chose the more relevant of them. To analyse this amount of data two methods were employed : i) an empirical analysis of interferograms helped by hexogen data in a GIS, ii) a comparison between interferograms and existing rockglaciers shape inventory. At the end, a map of the French Alps with all detected movements was edited.

Keywords :

SAR Interferometry, ERS, rockglaciers, permafrost

1-INTRODUCTION

Le pergélisol se définit comme un matériel de subsurface dont la température est inférieure ou égale à 0°C durant une année entière (Delaloye, 2004). Ce phénomène purement thermique se rencontre en France à des altitudes supérieures à environ 2500, voire 3000 m et son étude se fait par l'intermédiaire de mesures de températures du sous-sol via des forages ponctuels et onéreux ou par des observations indirectes. Les formations superficielles des versants alpins en zone de pergélisol sont souvent affectées par des processus de fluage, donnant naissance à des formes telles que les glaciers rocheux qui sont des indices de la présence de pergélisol. Ces derniers sont définis comme l'expression visible, dans des matériaux non-consolidés, de la déformation lente et

continue d'un corps de pergélisol sursaturé en glace (Delaloye, 2004). On distingue différents types de glaciers rocheux (Ikeda and Matsuoka, 2002 ; Delaloye, 2004 ; Delaloye et al., 2010):

-Les glaciers rocheux actifs, qui contiennent de la glace et présentent des mouvements principalement dans le sens de plus grande pente (quelques décimètres à 3 m/an),

-Les glaciers rocheux inactifs, qui contiennent encore de la glace mais ne présentent plus de mouvements,

-Les glaciers fossiles ou reliques, qui ne contiennent plus de glace et ne présentent plus de mouvements,

-Les glaciers rocheux déstabilisés, glaciers rocheux actifs ayant connu au cours de ces dernières années ou décennies une évolution de type glissement de terrain et une forte augmentation de leur vitesse moyenne (supérieur à 3 m/an).

Dans le contexte de la remontée altitudinale de l'isotherme 0°C, on s'attend à une modification des mouvements superficiels des glaciers rocheux. Quelques études ponctuelles en France tendent à montrer cette évolution (Bodin, 2007; Krysiński, 2008; Bodin et al., 2009) mais l'absence de données actuelles de référence sur le degré d'activité des glaciers rocheux dans les Alpes françaises ne permet pas de quantifier ces modifications. Il est alors intéressant d'utiliser l'imagerie satellitaire pour essayer de déterminer les glaciers rocheux actifs et déstabilisés des Alpes françaises.

A l'heure actuelle, l'étude des glaciers rocheux en France se limite au suivi de quelques formes à travers les Alpes françaises. En effet, la méthode la plus utilisée pour suivre le déplacement des glaciers rocheux est celle du GPS différentiel (D-GPS), qui nécessite beaucoup de temps sur le site pour quadriller de points un glacier rocheux. Il existe donc une lacune sur la question du nombre et sur la localisation des glaciers rocheux actifs dans les Alpes françaises.

La technique d'imagerie satellitaire de l'interférométrie radar différentielle (D-InSAR) utilise l'analyse de deux images radar de la même zone géographique pour détecter la présence de mouvements, voire d'établir des champs de vitesses. Les vitesses détectables par interférométrie radar différentielle sont dépendantes de la longueur d'ondes du satellite ainsi que du temps séparant la première acquisition radar de la seconde (par exemple pour TerraSAR-X la plus petite longueur d'onde sera de 2,8 cm pour une résolution temporelle de 11 jours ; pour ERS la longueur d'onde sera de 5,6 cm pour une résolution temporelle de 1 jour, 3 jours ou 35 jours selon les phases du projet). Cette méthode déjà éprouvée pour la détection des vitesses de glaciers blanc (Mattar et al., 1998; Strozzi et al., 2002; Forster et al., 2003; Trouvé et al., 2007) semble également adaptée pour la détection de glacier rocheux (Strozzi, 2004; Delaloye, 2005; Delaloye R., 2007; Echelard, 2010; Echelard et al., 2011, 2012).

La taille des images radar ERS couvrant des zones de 100km x 100km, l'analyse des interférogrammes (images générées par le processus de l'interférométrie radar différentielle) permettrait d'obtenir des données de déplacements sur les glaciers rocheux à l'échelle de massifs entier. L'objectif de cette étude est d'évaluer le nombre de glaciers rocheux actifs dans les Alpes françaises et d'obtenir un maximum de données quantifiées sur les mouvements de ceux-ci et de détecter ceux dont les vitesses sont les plus rapides. Cela permettra par la suite de pouvoir évaluer leurs évolutions et les enjeux potentiels. Pour ce faire, la grande quantité d'images d'archive radar disponibles pour les satellites ERS-1 et 2 a été utilisée. Ces satellites ont acquis des données pendant 20 ans à partir de 1991 et nous permettent de disposer d'un jeu de données exceptionnelles sur les Alpes françaises pour cette étude. Nous avons également comparé nos résultats avec des inventaires existants de glaciers rocheux pour vérifier, modifier et mettre à jour les données globales de mouvements des glaciers rocheux des Alpes françaises.

2-MÉTHODE

2-1 D-InSAR méthode

Se basant sur l'analyse de la différence de phase entre deux images radar acquises soit par satellite soit de manière aéroportée, l'interférométrie radar permet de détecter des mouvements de l'ordre de la fraction de la longueur d'onde du signal émis par le satellite (de quelques millimètres à quelques centimètres selon le type de capteur). Dans notre cas nous avons utilisé des scènes d'ERS-1 et 2 de 100km par 100km en bande C dont la longueur d'onde est de 5,6cm. Si un changement (de relief par exemple) a survenu au sol entre le premier passage du satellite et un second passage, il sera alors possible de mesurer une différence de phase entre les

deux images, relative au déplacement de la surface. Le temps de parcours de l'onde sera très légèrement différent et permettra de quantifier cette différence de phase. Les détections de mouvements de surface entre deux acquisitions pourront être centimétriques dans la ligne de visée du satellite (Gabriel et al., 1989). Cependant pour obtenir des interférogrammes (produit de la différence de phase de deux images de phases) fiables pour les analyses, de nombreux facteurs sont à prendre en compte. L'équation de la différence de phase composée de plusieurs termes peut se synthétiser comme suit (Wegmuller and Strozzi, 1998) :

$$\Delta\Phi = \Phi_{\text{topographique}} + \Phi_{\text{orbitale}} + \Phi_{\text{changement de surface}} + \Phi_{\text{distorsion atmosphérique}} + \Phi_{\text{bruit}}$$

Dans cette équation, seul le terme « changement de surface » nous intéresse. Pour supprimer les autres, nous utilisons des données exogènes :

- La composante topographique est liée à l'effet stéréographique induit par les orbites légèrement différentes des deux satellites au cours de l'acquisition des données. Cela crée des franges interférométriques représentant des lignes d'équivalences du relief. Cette composante est utilisée pour générer des modèles numériques de terrain à haute résolution (voir par exemple (Zebker et al., 1994)). Pour enlever cette composante nous utilisons un modèle numérique de terrain de la zone d'étude (IGN, 25m de résolution) pour simuler une image de phase factice de la topographie et ainsi la soustraire de l'interférogramme.
- La composante orbitale, liée à des paramètres propres à l'orbite des satellites (position, inclinaison, ...) est corrigée grâce aux données orbitales fournies par les agences spatiales avec les images radar.
- Les distorsions atmosphériques (nébulosité, humidité, ...) peuvent être la cause d'erreurs sur les interférogrammes cependant ces distorsions se produisent à l'échelle de la troposphère ce qui n'introduit pas de franges d'interférences nuisibles à l'échelle de glaciers rocheux mesurant quelques centaines de mètres (Kenyi and Kaufmann, 2003).
- Le bruit, représentant une faible partie de l'équation, est fortement atténué par les filtres appliqués aux interférogrammes permettant d'affiner la continuité des franges interférométriques et de supprimer les pixels aberrants.

Théoriquement après ces étapes, seule la composante liée aux changements de surface survenus entre les deux acquisitions radar dans la ligne de visée du satellite est présente sur l'interférogramme.

Une fois cette étape réalisée l'interférogramme est reprojété en « géométrie sol » car l'angle de visée des satellites n'est pas verticale (23° pour ERS) et les images radar sont dites en « géométrie radar ». Certaines zones de l'image sont compressées, d'autres dilatées et d'autres non analysables (figure1). Pour cela nous utilisons un modèle numérique de terrain (MNT à 25m de résolution de l'IGN), qui permet de transformer la « géométrie radar » en « géométrie sol ». Au final la résolution des interférogrammes, pour des pixels homogènes en « géométrie sol » est de 25m de côté par pixel pour les données provenant des satellites ERS. Les images sont ensuite géoréférencées et orthorectifiées dans un SIG pour être analysées.

2-2 Choix du jeu de données

Le choix des images utilisées joue également un rôle important pour la qualité des interférogrammes. Plusieurs critères doivent être respectés dans la sélection des images radar pour que les traitements d'images évoqués dans la partie 2-1 soit efficient. Le premier critère est d'ordre technique car à partir de 2001 ERS-2 a rencontré des problèmes de gyroscopes ce qui a rendu inexploitable toutes les données à partir de cette date pour l'interférométrie radar différentielle. Les critères spécifiques à notre étude sur les glaciers rocheux sont les suivants :

- Les glaciers rocheux actifs se situant pour la plupart au-dessus de 2500 m, nous avons choisi de ne garder que les scènes acquises entre le 15 juillet et le 15 octobre. Période autour de laquelle les glaciers rocheux sont généralement dépourvus de neige.
- L'humidité au sol fausse également le retour de l'onde émise par le satellite et empêche tout exploitation de la donnée. Pour pallier à cela, les données de précipitations de météoFrance ont été utilisées sur sept stations à travers les Alpes françaises afin de ne sélectionner que les scènes pour lesquelles il n'y avait pas

eu de précipitation le jour de l'acquisition ainsi que la veille. Ces stations et leurs coordonnées sont répertoriées dans le tableau 1.

- Les satellites ont une position dans l'espace légèrement différente entre la première et la deuxième acquisition. Cette différence s'appelle la « baseline » et doit être inférieure à 600m dans l'optique d'une utilisation pratique (Coulson and Guignard, 1994). Elle joue un rôle important sur le nombre de franges topographiques présentes sur les interférogrammes. En pratique, plus la « baseline » est petite plus la contribution de la phase topographique sera minimisée et donc aisée à supprimer (cf. § 2-1). Nous avons choisi de ne garder que les scènes ayant une « baseline » inférieure à 200 m pour minimiser les franges topographiques et la décorrélation spatiale.

Pour travailler sur l'ensemble des Alpes françaises il était nécessaire d'acquérir les données de trois scènes différentes en passage ascendant et descendant. La répétitivité des passages d'ERS au-dessus d'une même zone étant de 1 jour, 3 jours ou de 35 jours (selon les périodes), cela représentait 1728 scènes dans les archives d'ERS au-dessus des Alpes françaises. Cependant, une fois tous les critères cités précédemment pris en compte, seule 29 scènes ont été utilisées (tous passages et numéros d'orbites confondus) et ont permis de générer 11 interférogrammes analysables après traitements. Le tableau 2 récapitule les caractéristiques des interférogrammes générés.

2-3 Méthodes d'analyses des interférogrammes

Après les traitements d'images vu précédemment (cf. § 2-1), une analyse visuelle des interférogrammes orthoréctifiés et géoréférencés a été réalisée dans un SIG (Système d'Information Géographique). Des masques ont été créés pour analyser uniquement les zones d'intérêts pour notre étude sur les glaciers rocheux :

- Un masque d'altitude : créé à partir du modèle numérique d'altitude à 25m de résolution de l'IGN (Institut Géographique National). Toutes les zones se situant en-dessous de 2000m ont été écartées de l'analyse. Bien que les glaciers rocheux actifs se situent aux alentours de 2500m, nous avons préféré garder une marge car certains microclimat locaux peuvent permettre la présence de permafrost sporadique, et donc potentiellement de glaciers rocheux, en-dessous de cette valeur moyenne de 2500m.
- Masque des zones analysables : comme vu au paragraphe 2-1, l'acquisition des images radar d'ERS se fait à 23° par rapport à la verticale ce qui induit des zones de repliement et d'ombre du relief et l'impossibilité d'analyser certaines zones comme les zones d'ombres ou celles d'inversion des pixels (réf). Ces zones sont supprimées des interférogrammes pour faciliter l'analyse.
- Masque des zones potentielles de pergélisol : Bodin *et al.* en 2008 (Bodin et al., 2008) ont proposé une carte du permafrost possible et probable dans les Alpes françaises. Un masque faisant figurer cette carte a également été utilisé pour faciliter l'analyse des interférogrammes.

Lors de l'analyse des interférogrammes, les sources d'informations utilisables sont multiples :

- un glacier rocheux peut être détecté ou non, ce qui signifie absence ou présence de mouvements,
- s'il est détecté il peut être corrélé et montrer des franges ou motifs de déplacement,
- ou être décorrélé ce qui signifie que sa morphologie de surface a trop changé entre la première et la deuxième acquisition. Cette différence de morphologie de surface, dans le cas d'un glacier rocheux, s'apparente à un fluage trop rapide par rapport au pas de temps de l'interférogramme.

Pour l'étude, deux géomorphologues ont séparément analysé les données dans le but de limiter le plus possible les erreurs et omissions humaines. Cette analyse des interférogrammes s'est faite sur SIG à l'aide d'orthophotographies, de données topographiques et des masques évoqués précédemment. Les détections des deux géomorphologues ont ensuite été comparées afin de compléter l'inventaire des formes détectées.

Une couche vecteur a été créée dans laquelle figure un point pour chaque détection au centre du glacier rocheux détecté. Dans cette couche de points figure également une base de données implémentée à chaque digitalisation avec les intervalles de temps des interférogrammes sur lesquels le glacier rocheux a été détecté. Cela a permis d'établir un classement des vitesses relatives des glaciers rocheux détectés. Par exemple, un glacier rocheux qui

présente des franges sur des interférogrammes à 3 jours, 6 jours et qui est décorrélé sur des interférogrammes à 9 jours et 12 jours fluera plus rapidement qu'un glacier rocheux qui présente des franges sur des interférogrammes à 6 jours, 9 jours et qui est décorrélé sur un interférogrammes à 12 jours et 15 jours et ainsi de suite. Le tableau 3 illustre le raisonnement mis en œuvre pour obtenir le classement des vitesses relatives.

2-4 Comparaison avec inventaire de glacier rocheux

Pour évaluer l'efficacité et la pertinence des détections sur les interférogrammes, nous avons comparé nos résultats avec un inventaire de glaciers rocheux réalisé par des géomorphologues dans le massif du Queyras à l'aide d'orthophotographie, d'un modèle numérique de l'altitude, de données topographiques et de visites sur le terrain (Echelard, 2010). Cet inventaire fait figurer dans sa base de données une variable d'activité des glaciers rocheux basée sur l'observation d'indices géomorphologiques permettant de présumer de l'activité d'un glacier rocheux comme : l'altitude du front et de la racine, la raideur du front, la présence ou non de végétation ou encore l'analyse diachronique de deux orthophotographies. En comparant les glaciers rocheux détectés grâce aux données D-InSAR et les glaciers rocheux de cet inventaire, cela a permis de chiffrer le pourcentage de détection concordantes, le nombre de formes non détectées et qui auraient pu l'être et de mettre à jour d'éventuelles erreurs d'interprétations dans les inventaires.

3-RESULTATS

3-1 Résultats de l'analyse des interférogrammes

La double analyse des interférogrammes évoqués dans le paragraphe précédent a abouti à une base de données de 152 glaciers rocheux sur l'ensemble des Alpes françaises. La figure 2 présente quelques exemples de détection. La grande majorité de ces détections de mouvements (%) se trouve sur des versants orientés de 180° à 360°. En effet, nous ne disposons que d'interférogrammes provenant d'images satellitaires descendantes. Les interférogrammes provenant d'images ascendantes étaient de mauvaises qualités pour des raisons liées à l'acquisition des données. La figure 3 qui présente la répartition des détections dans les Alpes montre la quasi absence de détection dans le département de la Haute-Savoie. Cela est dû au manque de données exploitables dans ce département.

Le classement des vitesses relatives évoqué au paragraphe 2-3 a permis d'obtenir la répartition suivante des glaciers rocheux détectés : 13,4% de formes fluant à des vitesses dont l'ordre de grandeur est le cm/jour, 19,4% de formes fluant à des vitesses dont l'ordre de grandeur est le cm/semaine, 27,6% le cm/2semaines et 39,6% de l'ordre du cm/mois. Ces résultats sont récapitulés dans le tableau 4. Les résultats trouvés sont cohérents puisque les glaciers rocheux fluent généralement à des vitesses comprises entre quelques décimètres par an et plusieurs mètres par an pour des cas exceptionnels (Delaloye et al., 2010). Sur toutes ces formes détectées, une semble particulièrement intéressante dans le massif de la Vanoise. Nous avons identifié un glacier rocheux qui semble être déstabilisé (cf. figure 2 ; C). Il présente des fractures en son centre attestant de dynamique différente entre l'amont et l'aval et d'après les données interférométriques, sa vitesse de fluage, peu commune, est estimée entre 5 et 10 mètres par an dans sa partie aval.

3-2 Résultats des comparaisons avec l'inventaire

La comparaison avec l'inventaire des glaciers rocheux du massif du Queyras n'a pris en compte que les formes potentiellement détectables par les données radar. Comme nous ne disposons que d'interférogrammes descendants, seuls les glaciers rocheux orientés aux S, SSO, SO, OSO, O, ONO, NO, NNO, N ont été pris en compte (cf. § 3-1). Compte tenu de la résolution des images (pixel de 25m ; cf. 2-1) seuls les glaciers rocheux ayant au moins la longueur ou la largeur supérieure à 300m (soit 12 pixel de long ou de large) ont été retenus. En-deça de cette taille nous avons décidé que trop peu de pixels définiraient le glacier rocheux pour permettre une analyse pertinente.

Sur 18 glaciers rocheux inventoriés potentiellement détectables, 12 l'ont été sur les interférogrammes soit 2/3 de détections concordantes. La figure 4 présente la comparaison entre l'inventaire et les interférogrammes pour le secteur du lac Saint-Anne dans le Queyras. A l'inverse, sur les 24 glaciers rocheux potentiellement détectables par D-InSAR qualifiés d'inactifs ou fossile (donc sans mouvements), aucun n'a été détecté sur les

interférogrammes. Ces résultats confirment donc pleinement les informations provenant de l'inventaire concernant l'absence de mouvements de ces formes. Au total un pourcentage de 85.7% des informations sur l'activité des glaciers rocheux du massif du Queyras provenant de l'inventaire a été confirmé par les données d'interférométrie radar différentielle. En plus des résultats qui viennent d'être évoqués, 7 formes ont été détectées qui n'étaient pas répertoriées et qui seront à ajouter à l'inventaire réalisé. Ces formes étaient dans des zones d'ombres ou sous des nuages sur les orthophotographies utilisées pour l'inventaire. De plus, certains de ces glaciers rocheux sont composés de matériaux fins qui rendent parfois difficile l'interprétation géomorphologique lors de la réalisation d'un inventaire.

4-DISCUSSION

Les résultats obtenus à l'échelle des Alpes françaises sont intéressants puisqu'ils ont permis d'obtenir une première carte faisant figurer 152 glaciers rocheux actifs répartis dans les Alpes françaises alors que jusqu'à présent seuls 7 glaciers rocheux disposaient de données de mouvements. Les autres formes des Alpes françaises qualifiées d'actives, dans les inventaires et la littérature scientifique, le sont uniquement sur la base de données et d'observations indirectes (cf. § 2-4). Cette étude a donc permis de multiplier par plus de 20 le nombre de glaciers rocheux que l'on peut qualifier d'actifs sur la base de données de mouvements. En revanche, plusieurs limitations sont à préciser :

- Le manque de données ascendantes fait que seule une moitié des versants a été analysée (de 180° à 360°).
- Les données de mouvements de surface obtenues sont des ordres de grandeurs relatifs et non des valeurs absolues.
- Les images d'archives d'ERS datent des années 90. Les résultats obtenus sont donc des données de mouvements des glaciers rocheux dans les années 90. Cependant on peut supposer que le volume de glace présent dans les glaciers rocheux actifs ne peut pas disparaître en quelques décennies. On peut donc admettre que la très large majorité des résultats obtenus est toujours valable à l'heure de l'écriture de cet article.
- Compte tenu de la résolution au sol des images radar ERS (25m) il n'est pas possible de détecter les très petits glaciers rocheux de l'ordre de 100 mètres de long pour 50 de large.

En ce qui concerne la comparaison avec l'inventaire de glaciers rocheux, nous avons vu dans le paragraphe 3-2 que 85.7% des données de l'inventaire ont été confirmées par l'imagerie radar. La question est alors de savoir quelle est la cause des 14.7% manquants. Rappelons que ces 14.3% restant non confirmés par les données radar correspondent aux 6 glaciers rocheux qualifiés d'actifs dans l'inventaire mais non détectés sur les interférogrammes. Pour expliquer ses 6 cas, plusieurs hypothèses sont avancées :

- Soit les interprétations des données lors de la réalisation de l'inventaire ont été erronées pour ces 6 glaciers rocheux et la classification dans la catégorie des glaciers rocheux actifs n'est pas correcte car aucun mouvement n'est détecté,
- Soit des artefacts atmosphériques (cf. §2-1) ont rendu la détection impossible sur ses quelques formes,
- Soit les filtres utilisés pendant le traitement des données dans le but de réduire le bruit présent sur les interférogrammes (filtre adaptatif proposé par Werner et Goldstein (Goldstein and Werner, 1997)) ont fait disparaître certaines informations de mouvements de petite ampleur,
- Soit ces glaciers rocheux ne fluaient pas suffisamment rapidement dans les années 90 pour être détectés par des satellites ayant les caractéristiques techniques du type de ceux d'ERS 1 et 2.

En ce qui concerne cette dernière hypothèse, elle semble peu probable aux vues des récentes publications qui tendent à montrer que les glaciers rocheux alpins étaient plus actifs dans les années 1990 qu'à l'heure actuelle (Kaufmann and Ladstädter, 2006; Delaloye et al., 2010). L'hypothèse selon laquelle ces erreurs sont liées à des artefacts semble possible mais limitée car les artefacts atmosphériques laissent apparaître des tâches caractéristiques sur les interférogrammes ; tâches que nous avons pris le soin de vérifier avant d'analyser les interférogrammes. Quant aux filtres utilisés pendant le traitement des données, il est possible qu'ils aient fait disparaître une certaine quantité d'informations présente originellement sur les données et donc potentiellement tout ou partie des 6 glaciers rocheux en question. Cependant, l'hypothèse qui nous semble la plus probable est

celle qui suppose des erreurs d'interprétations lors de la création de l'inventaire de glaciers rocheux. Etant donnée le bon pourcentage d'informations concordantes entre l'inventaire et les données D-InSAR (85,7%) et la difficulté de faire la différence entre un glacier rocheux actif ou inactif sans données directes de déplacements, il semble probable que la majorité des 6 cas particuliers qualifiés d'actifs dans l'inventaire soient en réalité inactifs.

5-CONCLUSION et PERSPECTIVES

Les résultats obtenus au regard de l'objectif de départ sont satisfaisant mais incomplet. Pour la partie concernant l'évaluation du nombre de glaciers rocheux actifs dans les Alpes françaises, les interférogrammes ont permis de dresser une carte en faisant figurer 152. Parmi eux, un cas anormalement rapide a été détecté et sera suivi de près dans les années à venir. Ces informations pourront être utiles aux services de gestion territoriale française. Cependant nous n'avons pu exploiter que des données provenant d'orbites descendantes, ce qui a limité les zones de détection. Un second objectif était d'obtenir des données quantifiées de mouvement, mais la volonté d'obtenir des résultats à l'échelle des Alpes françaises n'a pas été compatible avec le temps et la minutie nécessaire au déroulage de la phase des interférogrammes générés avec les données ERS.

Cette étude a été réalisée avec des images ERS car l'accès aux données d'archives de ces satellites est aisé et cela a permis d'évaluer de manière rapide les zones les plus pertinentes à étudier et à suivre dans les Alpes françaises en termes de glaciers rocheux. A partir de ces résultats d'autres projets sont à envisager en utilisant des satellites de générations plus récentes pour des données mieux calibrées et des résultats de meilleure résolution. Bien que pertinente, cette méthode nécessite tout de même la présence d'utilisateur compétent pour analyser les interférogrammes. L'automatisation des détections via des filtres de zonages et des recherches de « motifs ou pattern » dans les images permettrait un suivi simplifié et efficace des glaciers rocheux par des personnes non spécialiste de l'imagerie radar et de la géomorphologie périglaciaire.

REMERCIEMENTS

Les données utilisées pour ce projet ont été gracieusement mises à notre disposition par l'Agence Spatiale Européenne (ESA©) au travers du projet C1P 8902 et traitées avec le logiciel GAMMA©. Les données topographiques proviennent de l'Institut Géographique National (IGN©).

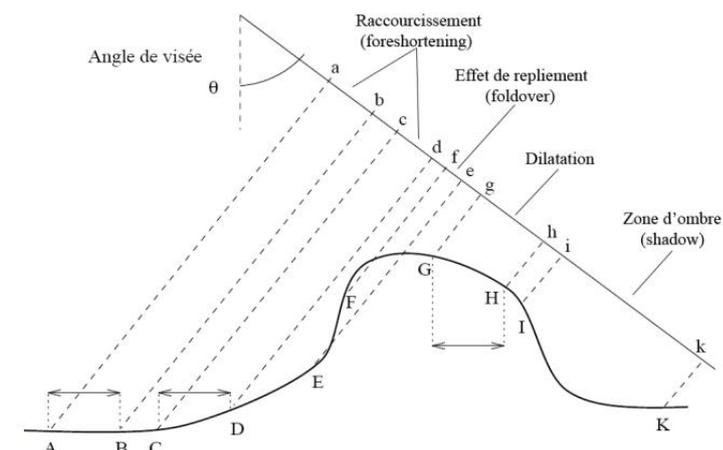


Figure 1 : Distorsions géométriques observées sur les images de RSO en géométrie radar. La distance entre le satellite et la cible étant de plusieurs centaines de kilomètres, les arcs de cercle correspondant aux ondes émises par le radar peuvent être assimilés à leur tangente (traits-tillés), (modifié d'après, Barboux, 2009).

nom station	Longitude	Latitude	Altitude (m)
Col-des-Saisies	6°31'42"E	45°45'30"N	1633

Tignes Val Claret	6°53'48"E	45°27'18"N	2115
Mont-Cenis	6°53'54"E	45°16'06"N	2042
Névache	6°37'48"E	45°01'18"N	1600
Ceillac	6°46'30"E	44°40'12"N	1665
Uvernet-Fours	6°41'30"E	44°19'06"N	1660
Isola 2000	7°08'12"E	44°11'30"N	1870

Tableau 1 : Nom, coordonnées et altitude des stations météo utilisées pour les données de précipitations.

Baseline temporel (jours)	Nombre d'interférogrammes	Zone géographique
1	1	Alpes du nord
3	2	Alpes du sud
6	1	Alpes du sud
9	1	Alpes du sud
15	2	Alpes du sud
27	1	Alpes du sud
35	1	Alpes du nord
70	1	Alpes du nord

Tableau 2 : Caractéristiques des interférogrammes générés.

Intervalle de temps de l'interférogrammes	3J	6J	9J	15J	21J	30J	35J	Vitesses relatives du mouvement
Glacier rocheux 1							D-M	Moins rapide  Plus rapide
Glacier rocheux 2							D-D	
Glacier rocheux 3						D-M	D-M	
Glacier rocheux 4					D-M	D-M	D-M	
Glacier rocheux 5				D-M	D-M	D-M	D-D	
Glacier rocheux 6			D-M	D-M	D-M	D-D	D-D	
Glacier rocheux 7		D-M	D-M	D-M	D-D	D-D	D-D	
Glacier rocheux 8	D-M	D-M	D-M	D-D	D-D	D-D	D-D	

Tableau 3 : Démarche réalisée pour le classement des vitesses relatives des glaciers rocheux détectés par D-InSAR ; D-M : glacier rocheux Détecté présentant un Motif de frange interférométrique, D-D : glacier rocheux Détecté et Décorrélé sur les interférogrammes.

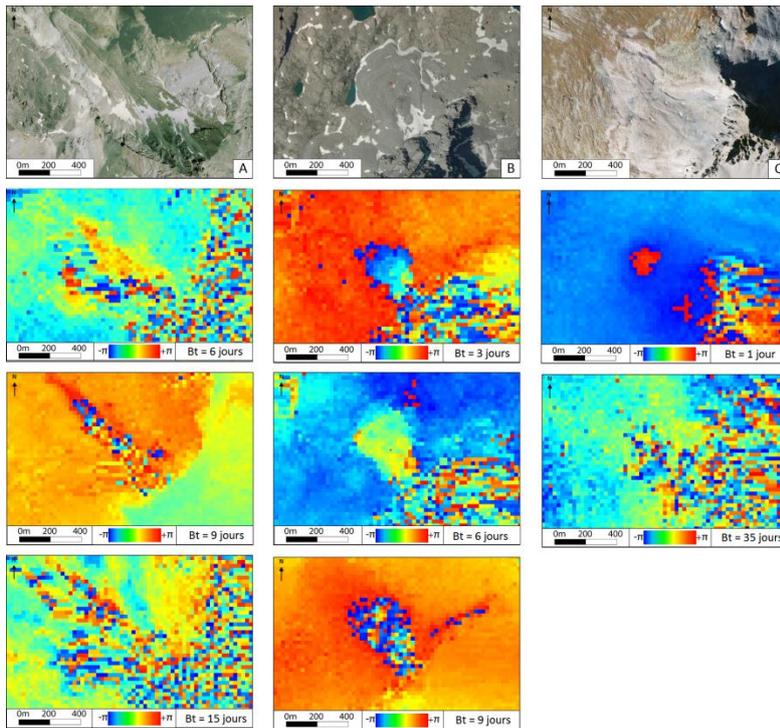


Figure 2 : Exemple de détections de mouvements de glaciers rocheux sur les interférogrammes générés. A : glacier rocheux de Panestrel, massif du Queyras ; B : glacier rocheux du Brec de Chambeyron, massif de l'Ubaye ; C : glacier rocheux de Pierre Brune nord-ouest, massif de la Vanoise ; Bt indique la Baseline temporelle de l'interférogramme, orthophotographies de l'IGN (Institut Géographique National) datant respectivement de 2003, 2009 et 2006.

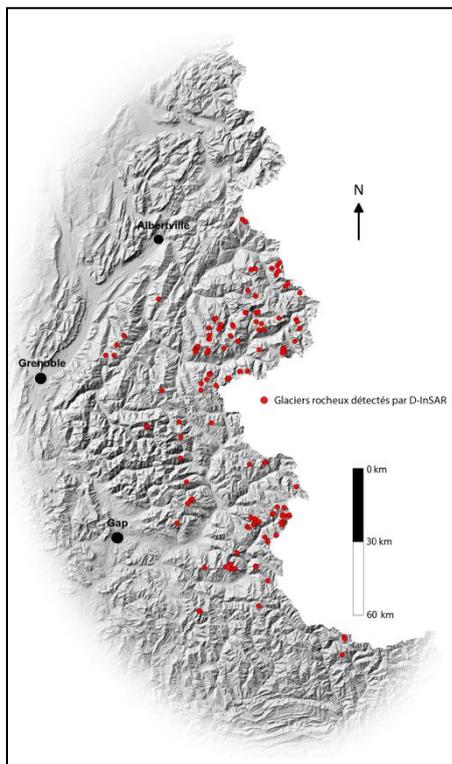


Figure 3 : carte de la répartition des glaciers rocheux détectés par D-InSAR dans les Alpes françaises ; chaque point rouge représente un glacier rocheux détecté.

Ordre de grandeur des vitesses (cm/mois)	Pourcentage des glaciers rocheux détectés (%)
cm/jour	13,4
cm/semaine	19,4
cm/2 semaines	27,6
cm/mois	39,6

Tableau 4 : résultats, en quatre classes, des vitesses relatives des glaciers rocheux détectés par D-InSAR.

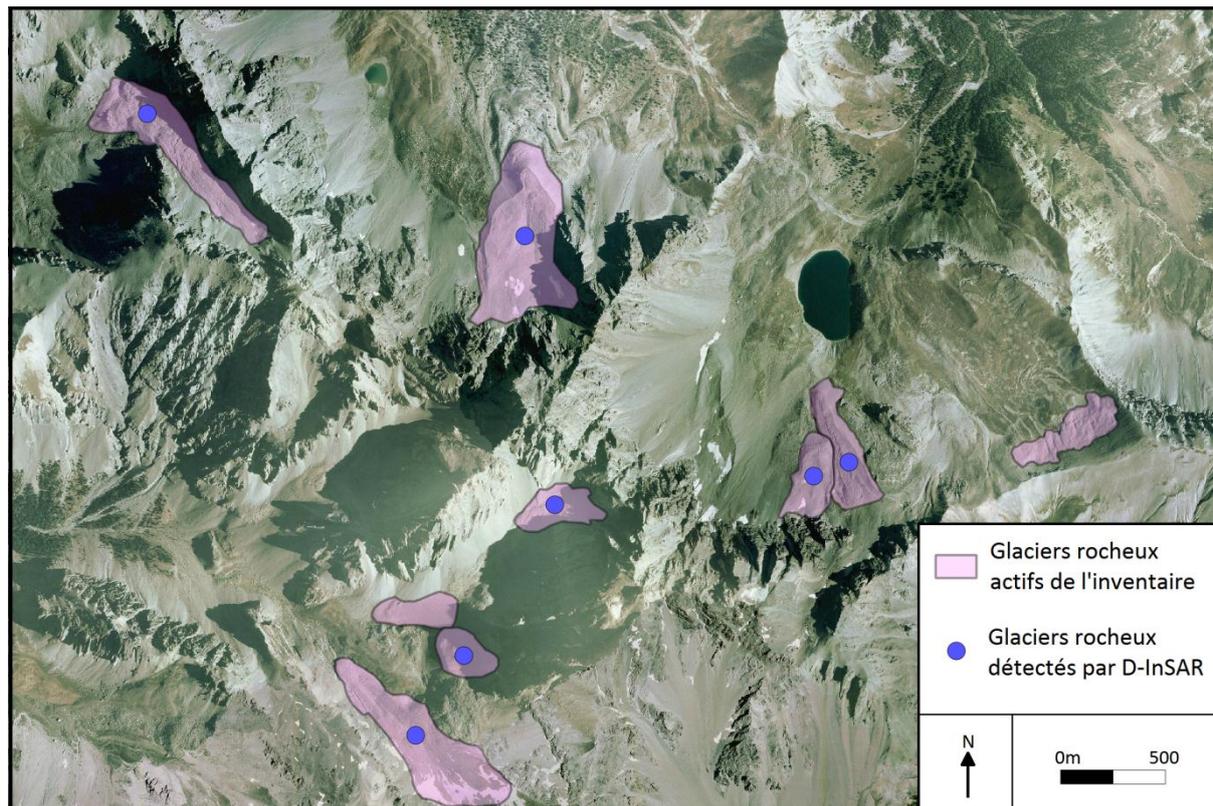


Figure 4 : Comparaison entre glaciers rocheux actifs de l'inventaire (polygones roses) et glaciers rocheux détectés par D-InSAR (points mauves).

BIBLIOGRAPHIE

Bodin, X. (2007). Géodynamique du pergélisol de montagne : fonctionnement, distribution et évolution récente. L'exemple du massif du Combeybot (Hautes Alpes). PRODIG. Paris 7. Paris 7.

Bodin, X., Lhotellier, R., Schoeneich, P., Gruber, S., Deline, P., Ravel, L., and Monnier, S. (2008). Towards a first assessment of the permafrost distribution in the French Alps. (Lugano, Switzerland),.

Bodin, X., Thibert, E., Fabre, D., Ribolini, A., Schoeneich, P., Francou, B., Reynaud, L., and Fort, M. (2009). Two decades of responses (1986-2006) to climate by the Laurichard Rock Glacier, French Alps. *Permafrost and Periglacial Processes* 331–344.

Coulson, S.N., and Guignard, J.P. (1994). SAR interferometry with ERS-1. Head of the Earth Observation Division ESA ESRIN.

- Delaloye, R. (2004). Contribution à l'étude du pergélisol de montagne en zone marginale. Faculté des sciences de Fribourg.
- Delaloye, R. (2005). Validation of InSAR data in permafrost zone (For the Federal Office of Water and Geology (FOWG)).
- Delaloye R., L.C. (2007). ERS InSAR for detecting slope movement in a periglacial mountain environment (western Valais Alps, Switzerland). Proceedings HMRSC-IX, Grazer Schriften Der Geographie Und Raumforschung 43, 113–120.
- Delaloye, R., Lambiel, C., and Gärtner-Roer, I. (2010). Overview of rock glacier kinematics research in the Swiss Alps : seasonal rhythm, interannual variations and trends over several decades. *Geographica Helvetica* 65, 135–145.
- Echelard, T. (2010). Détection de mouvements par interférométrie radar dans les zones à permafrost : application aux glaciers rocheux du massif du Queyras ; principes, méthodologie et premiers résultats. Joseph Fourier university.
- Echelard, T., Krysiński, J.-M., Barboux, C., Gay, M., and Schoeneich, P. (2011). Movement detection by InSAR in permafrost area, Queyras Natural Regional Park, Hautes-Alpes, France. (Vienna, Austria),.
- Echelard, T., Krysiński, J.-M., Schoeneich, P., and Gay, M. (2012). Rockglacier movement detection by D-InSAR in French Alps using ERS archive data and TerraSAR-X data. (Salekhard, Russia),.
- Forster, R.R., Jesek, K.C., Koenig, L., and Deeb, E. (2003). Measurement of glacier geophysical properties from InSAR wrapped phase. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41, 2595–2604.
- Gabriel, A.K., Goldstein, R.M., and Zebker, H.A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas : Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research* 94, 9183–9191.
- Goldstein, R.M., and Werner, C.L. (1997). Radar ice motion interferometry. (Florence, Italy),.
- Ikeda, A., and Matsuoka, N. (2002). Degradation of talus-derived Rock Glaciers in the upper Engadin, Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes* 13, 145–161.
- Kaufmann, V., and Ladstädter, R. (2006). Mapping of the 3D surface motion field of Doesen rock glacier (Ankogel Group, Austria) and its spatio-temporal change (1954-1998) by means of digital photogrammetry. In *Grazer Schriften Der Geographie Und Raumforschung*, (Graz, Austria), pp. 137–144.
- Kenyi, L.W., and Kaufmann, V. (2003). Estimation of Rock Glacier Surface Deformation Using SAR Interferometry Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41, 1512–1515.
- Krysiński, J.-M. (2008). La Rupture du glacier rocheux du Bérard (massif du Parpaillon, Alpes de Haute Provence, 04) : un cas de dégradation du pergélisol de montagne ? Université Joseph Fourier.
- Mattar, K.E., Vachon, P.W., Geudtner, D., Gray, A.L., Cumming, I.G., and Brugman, M. (1998). Validation of alpine glacier velocity measurements using ERS tandem-mission SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36, 974–984.
- Strozzi, T. (2004). Detecting and quantifying mountain permafrost creep from in situ inventory, space-borne radar interferometry and airborne digital photogrammetry. *International Journal of Remote Sensing* 25, No 15, 2919–2931.
- Strozzi, T., Luckman, A., Murray, T., Wegmuller, U., and Werner, C.L. (2002). Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40, 2389–2391.
- Trouvé, E., Vasile, G., Gay, M., Bombrun, L., Grussenmeyer, P., Landes, T., Nicolas, J.M., Bolon, P., Petillot, I., Julea, A., et al. (2007). Combining airborne photographs and spaceborne SAR data to monitor temperate glaciers : potentials and limits. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45, 905–924.
- Wegmuller, U., and Strozzi, T. (1998). Characterization of differential interferometry approaches. In *Proceedings*, (Friedrichshafen, Germany),.

Zebker, H.A., Werner, C.L., Rosen, P., and Hensley, S. (1994). Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32, 823–836.