

LA NEIGE EN MONTAGNE : UN DÉFI POUR LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE

Par Fatima KARBOU et Marie DUMONT - Centre d'Études de la Neige - Grenoble

Sujette à des évolutions technologiques continues, la télédétection spatiale offre aujourd'hui des possibilités inédites aux scientifiques et aux acteurs de la montagne pour suivre, au plus près et aussi régulièrement que possible, l'évolution du manteau neigeux. De récentes évolutions ont permis par exemple l'émergence de nouvelles observations à haute résolution spatiale et à forte répétitivité dans le temps, offrant ainsi de nouvelles perspectives pour l'observation et le suivi du manteau neigeux, notamment en montagne malgré son extrême hétérogénéité spatiale.

L'exploitation des observations spatiales repose sur la compréhension et la modélisation des interactions entre les différents composants du système Surface-Neige-Atmosphère et le rayonnement électromagnétique. Selon les gammes de longueur d'ondes (ou de fréquences) considérées, les résultats de ces interactions peuvent être plus ou moins bien observés, ce qui permet ensuite de déduire des informations sur les propriétés de surface du manteau neigeux ou sur les caractéristiques de plusieurs couches du manteau neigeux, comme sa température, sa densité ou son épaisseur.

Les avantages de l'utilisation des observations satellites en montagne sont nombreux, parmi lesquels : une couverture homogène des massifs sans aucune considération du problème d'accessibilité qui se pose souvent dans ces milieux, des observations disponibles quotidiennement ou à intervalles réguliers, la forte sensibilité du signal électromagnétique (à certaines longueurs d'onde ou fréquences) à certaines propriétés du manteau neigeux, la faible sensibilité des mesures aux conditions atmosphériques pour certaines longueurs d'onde, ce qui rend possible l'observation de la neige par tous les temps, de jour comme de nuit. Néanmoins, l'exploitation des observations de télédétection est extrêmement complexe car il s'agit de mesures indirectes de la neige, qu'il faut correctement interpréter pour en déduire des informations pertinentes sur le manteau neigeux. Interpréter les résultats d'interactions entre le signal électromagnétique et les différents milieux naturels est en soi un problème mal posé : passer d'une observation satellitaire à une grandeur physique mesurable de la neige est certes possible mais la solution du problème inverse n'est pas forcément unique car les modèles inverses ne sont pas

parfaits et les observations sont entachées d'erreurs.

L'objectif de cet article est de recenser les études en cours au Centre d'Études de la Neige (CEN) dans le but d'exploiter les observations de télédétection spatiale pour l'étude de la neige. Le CEN est l'un des cinq groupes de recherche du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), une unité mixte de recherche associant Météo-France et le CNRS. L'accent est mis sur deux types de données satellitaires : les mesures dans le visible-proche infrarouge et les mesures actives micro-ondes.

LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE DANS LE VISIBLE/PROCHE INFRAROUGE

La neige possède dans le spectre solaire des propriétés de réflexion très différentes de la plupart des autres surfaces terrestres. Dans les longueurs d'onde visibles, son pouvoir réfléchissant, appelé albédo, est très élevé et dépend à la fois de la microstructure de la neige (arrangement tridimensionnel de la glace et de l'air) et de son contenu en impuretés absorbantes (de type carbone suie et poussières minérales par exemple). Dans les longueurs d'onde infrarouge,

↑ Image du massif des Grandes Rousses (Isère), obtenue par le satellite SPOT 6 dans le domaine du visible le 1er novembre 2016. Les zones enneigées correspondent aux plus hautes pentes du massif ; on reconnaît en bas et à gauche L'Alpe d'Huez et la plaine du Bourg-d'Oisans. Image extraite de la base de données Kalideos-Alpes.

le pouvoir réfléchissant de la neige est en revanche nettement plus faible et son albédo ne dépend plus que de la microstructure de la neige. La présence d'eau liquide à l'intérieur du manteau neigeux provoque également un léger décalage spectral des bandes d'absorption. De plus, les longueurs d'onde solaires ne pénètrent que peu profondément dans le manteau neigeux, à l'exception des longueurs d'ondes visibles qui peuvent pénétrer sur plusieurs dizaines de centimètres. L'albédo de la neige nous donne donc une information sur les propriétés physiques et chimiques de la « surface » du manteau neigeux.

Les imageurs embarqués multispectraux dans le domaine du spectre solaire nous permettent donc de mesurer l'albédo de la surface pour certaines longueurs d'ondes et de remonter aux caractéristiques de surface du manteau neigeux. Il existe à ce jour de nombreux imageurs multispectraux ayant des résolutions spatiale et temporelle adaptées à la forte variabilité spatiale du manteau neigeux en zone de montagne. On peut citer entre autres MODIS et VIIRS pour la moyenne résolution, SPOT, LANDSAT et Sentinel-1 et 2 pour la haute résolution. Ces satellites permettent tout d'abord de reconstituer des cartes de couvert neigeux (présence/absence de neige au sol) ainsi que la fraction de sol recouvert par la neige (voir un exemple de ce type de carte ci-dessous). Pour les pixels enneigés, les propriétés optiques de la neige permettent de remonter

à certaines grandeurs de la microstructure de la neige, au contenu en impuretés absorbantes et à la présence d'eau liquide pour les imageurs ayant une très fine résolution spectrale. En plus de permettre le suivi de ces propriétés, ces images pourront également être prises en compte par la modélisation numérique de l'évolution du manteau neigeux (assimilation de ces données par le modèle, de façon à ce qu'il tienne compte de ces données d'observation).

D'autre part, il a été très récemment montré que les données stéréoscopiques acquises à partir des imageurs haute résolution (Pléiades entre autres) permettent de déterminer la hauteur de neige au sol avec une précision raisonnable (de l'ordre 50 cm), ce qui est d'un fort potentiel pour de futures applications, hydrologiques par exemple.

LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE ACTIVE MICRO-ONDE

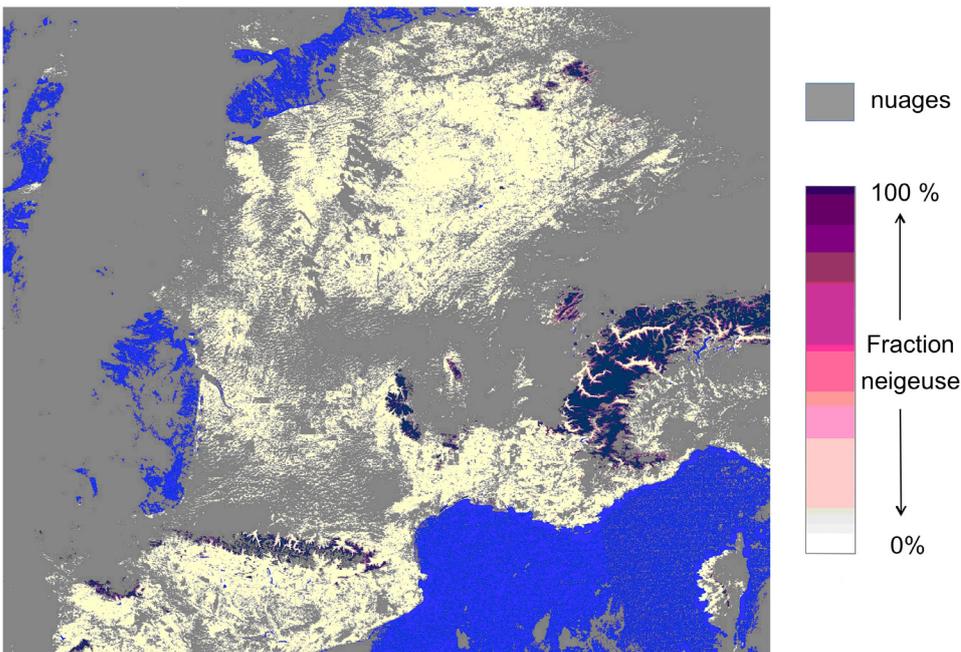
Depuis 2015, le CNRM/CEN exploite des données satellitaires à haute résolution pour l'étude du manteau neigeux et des avalanches en particulier. Les satellites Sentinel-1, opérés par l'Agence spatiale européenne, permettent désormais d'étudier le manteau neigeux à des résolutions spatiales inédites de 20 m, et cela tous les 6 jours. Deux satellites de ce type sont opérationnels : Sentinel-1A lancé en 2014 et Sentinel-1B lancé en 2016. Les deux satellites embarquent deux radars à synthèse d'ouverture (SAR) en bande-C (fréquence de



5,4 GHz), dont les mesures de l'écho radar renvoyé par le manteau neigeux sont sensibles à certaines de ses propriétés, comme sa teneur en eau liquide, et cela par tout type de temps, de jour comme de nuit. Le contenu en information de la mesure SAR ainsi que les résolutions spatio-temporelles particulièrement attractives rendent très prometteuse l'exploitation de ces mesures au-dessus des massifs français.

Pour l'exploitation des mesures SAR, le CEN privilégie deux axes de recherches complémentaires. Le premier vise à fusionner de façon optimale les modèles existants (qui renseignent un état a priori du sol, du manteau neigeux et de l'atmosphère) avec les observations de télédétection, en faisant appel à des méthodes d'assimilation de données. Pour réaliser cette fusion, la compréhension et la modélisation des interactions ondes/neige sont indispensables. Comprendre les interactions des ondes électromagnétiques à cette fréquence avec le milieu neige nécessite de faire appel à la théorie du transfert radiatif dans la neige pour estimer la rétrodiffusion de ces ondes. Il s'agit d'un domaine de recherche extrêmement riche, qui implique une communauté scientifique très large, parmi laquelle la communauté scientifique grenobloise tient une place de choix.

Le second axe de recherche concerne la mise en œuvre de nouveaux algorithmes de caractérisation du manteau neigeux, qui exploitent uniquement les observations satellitaires (sans passer par la modélisation de transfert radiatif). Nous donnons ici deux exemples de tels produits : la détec-



↑ Carte d'étendue du couvert neigeux le 12 mars 2016 à partir de l'imageur VIIRS (Suomi-NPP) (source : Marie Dumont et Centre de Météorologie Spatiale de Météo-France).



← Vue d'artiste du satellite Sentinel-1B © Agence Spatiale Européenne – Pierre Carril

tion des dépôts d'avalanches et la détection de la neige humide.

Pour ce qui est des dépôts d'avalanches, pouvoir les localiser et estimer leur taille revêt une importance particulière pour les études de la stabilité du manteau neigeux et de l'activité avalancheuse associée. Elles permettent notamment d'évaluer et d'améliorer les modèles physiques de prévision du risque d'avalanche et ainsi de mieux identifier les zones et les périodes à risque. À plus long terme, de telles recherches seront capitales pour étudier l'évolution de l'activité avalancheuse naturelle en lien avec le changement climatique. Or, les bases de données actuelles sont principalement constituées de constatations visuelles effectuées ponctuellement sur le terrain, dans des zones très souvent difficiles d'accès. Elles sont donc loin d'être exhaustives. À l'endroit où s'est produite une avalanche, la neige présente des caractéristiques (hauteur, densité, rugosité, etc.) différentes de celles observées aux alentours, ce qui modifie sa signature électromagnétique. La détection par satellite est faite grâce aux importantes variations des coefficients de rétrodiffusion qui en découlent. Un algorithme de détection des avalanches a été développé et testé avec succès dans les Alpes et les Pyrénées (cf. image 3D ci-dessous) et pourrait être automatisé dans un futur proche. Une base de données cartographique des dépôts avalancheux ainsi détectés est par ailleurs en construction (identification des événements depuis l'hiver 2014-2015). Elle constituera un atout indéniable pour l'amélioration de la prévision du risque d'avalanche, notamment

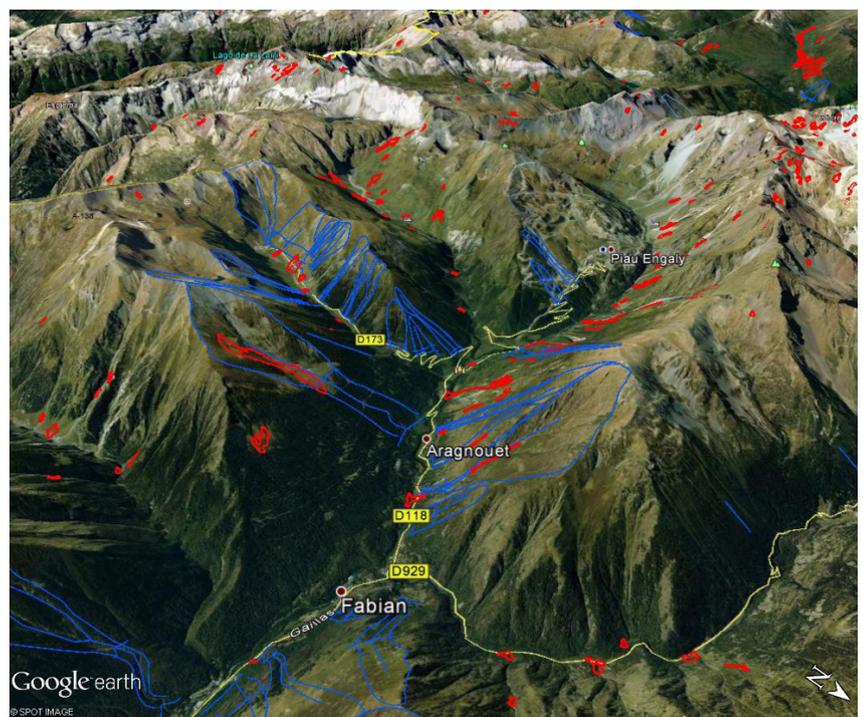
lors des événements de vigilance rouge ou orange. Les méthodes utilisées pour la détection des dépôts d'avalanches reposent sur le principe de détection du changement entre plusieurs scènes SAR observées avant et après l'épisode avalancheux.

Des méthodes similaires sont en cours de test pour produire cette fois-ci des cartes d'étendue de neige humide sur les Alpes et les Pyrénées tous les 6 jours et avec une résolution spatiale de 20 m ■

Le CEN coordonne le projet CNES Kalideos-Alpes (<https://alpes.kalideos.fr>), dont l'un des objectifs à court terme est de construire la plus grande bibliothèque d'images satellitaires à très haute résolution jamais construite concernant les Alpes.

Le consortium Kalideos-Alpes, constitué de plusieurs laboratoires et institutions de recherche, ambitionne de favoriser l'usage des observations de télédétection et le développement de méthodes novatrices dans des thématiques aussi variées que le suivi de la végétation, de la neige, de l'évolution des glaciers et des risques gravitaires.

Les images et les produits dérivés à valeur ajoutée sont gratuitement mis à disposition des scientifiques et de tous les acteurs de la montagne (via une inscription sur le site Internet de Kalideos-Alpes).



↑ Dépôts d'avalanches, en rouge, identifiés avec deux images SAR Sentinel-1 du 22/02/2015 et du 06/03/2015, superposés aux couloirs d'avalanches de l'EPA en bleu (Enquête Permanente sur les Avalanches, IRSTEA) - secteur d'Aragnouet (Hautes-Pyrénées).