

1.1.1 La Cryosphère

Intervenants : Marie Dumont (CNRM-GAME)

Des axes originaux de recherche en imagerie hyperspectrale ont été proposés bien qu'il n'apparaisse de besoin fort et clairement identifié d'une mission spatiale pour ce thème. Ces axes visent le suivi des propriétés de surface de la neige et de la glace pour une meilleure prévision du risque d'avalanches, des débits en zone de montagne (crues, production hydro-électrique) et une meilleure compréhension des interactions cryosphère/climat critique dans le contexte actuel de changement climatique et d'élévation du niveau des mers.

Contexte

La cryosphère est un milieu en perpétuelle évolution possédant une forte variabilité spatio-temporelle. La neige et la glace se distingue des autres surfaces terrestres de part leur forte réflectivité ou albédo.

L'albédo de la neige et de la glace est déterminé par les caractéristiques physico-chimiques de celles-ci. Tout changement de cette réflectivité entraîne une modification profonde du bilan énergétique de la surface et pour les grandes étendues enneigées comme les calottes polaires, une modification du bilan énergétique terrestre. La connaissance de l'albédo des surfaces terrestres enneigées ou englacées est donc essentielle pour le calcul des bilans énergétiques et donc de la fonte potentielle ainsi que des bilans hydrologiques et de l'élévation globale du niveau des mers.

La spectrométrie à haute résolution permettrait une détermination précise des caractéristiques de surface du manteau neigeux telles que la taille de grains, la concentration et le type d'impureté, le contenu en eau liquide. Cette détermination reste imprécise, voir impossible pour certaines grandeurs, avec des instruments ne mesurant que quelques bandes du spectre solaire.

La spectrométrie haute-résolution permet de répondre à certains besoins de différentes thématiques : la modélisation du manteau neigeux et de l'hydrologie en zone de montagne, la prévision des risques d'avalanches et de crues, le suivi du bilan de masse des glaciers et des calottes polaires et la compréhension des interactions complexes cryosphère/climat.

Pour répondre aux besoins de ces différents domaines, plusieurs missions spatiales multi ou super spectrales ont été mises en place (MODIS, VIIRS, SPOT) ou programmées (Sentinel-2). Ces missions offrent souvent des compromis entre résolution spatiale et résolutions temporelle et spectrale. C'est dans ce contexte que doit se situer l'analyse de l'intérêt d'une mission d'imagerie hyperspectrale pour les applications cryosphériques.

Dans ce contexte, les aspects suivants ont été retenus comme pouvant être pertinents *a priori* pour une mission spatiale d'imagerie hyperspectrale :

- Mesures de propriétés physiques et chimiques des surfaces enneigées ou englacées,
- Amélioration de la modélisation des simulations du manteau neigeux pour une meilleure prévision des risques d'avalanches et de crues en zone de montagnes et une meilleure

compréhension des interactions
cryosphère/climat.

Volet scientifique

Considérations générales

La thématique cryosphère ne constitue pas une thématique dimensionnante pour la mission hyperspectrale. Des axes originaux de recherche sont proposés par les scientifiques et développés dans la suite de ce document en axant la description sur l'apport spécifique d'une mission hyperspectrale pour chacune des thématiques.

Axe no 1 : Suivi des propriétés de surface de la neige et de la glace

La détection ou le suivi de processus de surface nécessite l'imagerie à une résolution inférieure à 10 m en zone de montagne pour appréhender les changements de propriétés de surface du manteau neigeux.

La réflectance de la neige et de la glace dépend de ces propriétés physiques et chimiques. Dans la suite, nous allons décrire l'ensemble des propriétés qu'il est possible de retrouver à partir de l'imagerie optique hyperspectrale.

Fraction de sol enneigé

De nombreux produits télédétektés existent déjà pour l'observation de la surface enneigée, par exemple issus de MODIS (MOD10). Ces produits se heurtent aujourd'hui à deux difficultés : la distinction entre les nuages et la neige, la présence de neige et de végétation au sein d'un même pixel. L'utilisation d'imagerie hyperspectrale permettrait de proposer des solutions adaptées à ces deux problèmes et de calibrer les algorithmes opérationnels pour la détection du couvert neigeux.

Albédo

L'albédo est une variable clef du bilan énergétique de la surface. Déterminer précisément l'albédo des surfaces enneigées et englacées est essentiel afin de mieux caractériser le bilan radiatif et la quantité d'énergie absorbée par la surface. Les capteurs multispectraux se heurtent aux problèmes de la résolution spectrale et ne peuvent permettre de retrouver très précisément l'albédo de la surface. L'imagerie hyperspectrale permettrait cette détermination essentielle pour la compréhension du bilan de masse des grandes calottes par exemple.

Taille de grains en surface

La réflectance de la neige dans le proche infrarouge est très sensible à la taille optique des grains de glace qui constituent le manteau neigeux. Des algorithmes ont été développés permettant de déterminer la taille des grains en intégrant le spectre dans un des motifs d'absorption. Ces algorithmes sont bien plus performants que les algorithmes pouvant être construits à partir des capteurs multispectraux. La taille des grains de neige conditionne l'absorption dans le proche infrarouge, sa connaissance permet de mieux évaluer et valider les simulations du manteau neigeux et de mieux prévoir les stocks d'eau ainsi que le risque d'avalanches.

Contenu et type d'impuretés

Dans les longueurs d'onde visibles, la réflectance de la neige est très sensible aux contenus et au type d'impuretés absorbantes. Dans le contexte actuel de changement climatique, une augmentation du contenu en impuretés dans la neige (et donc de l'absorption d'énergie) a été remarquée dans plusieurs sites. Le peu de longueurs d'onde disponibles sur les capteurs actuels ne permet de retrouver la quantité d'impuretés que pour

des valeurs élevées et ne permet pas d'en connaître le type. L'imagerie hyperspectrale permettrait d'en connaître le type et le contenu même pour des faibles concentrations.

Contenu en eau liquide

Enfin, il existe un décalage spectral entre le spectre d'absorption de la glace et celui de l'eau liquide. Des études ont montré que ce décalage permettait de distinguer les zones de neige humide et les zones de neige sèche afin de mieux appréhender et prévoir la fonte.

Axe no 2 : Modélisation du bilan de masse de la neige et de la glace

Glaciers

Les propriétés exposées précédemment montrent que l'imagerie hyperspectrale est un outil adapté pour déterminer l'étendue des surfaces englacées et de leur albédo afin de mieux déterminer leur bilan de masse dans une optique d'étude des rétroactions cryosphère/climat et de l'élévation future du niveau des mers.

Modélisation du manteau neigeux pour la prévision du risque d'avalanches et des débits en zone de montagne

De nombreux modèles numériques du manteau neigeux sont aujourd'hui utilisés pour la prévision du risque d'avalanches et des débits en zone de montagne soit dans une

optique de protection de la population, soit dans une optique de production hydro-électrique. L'imagerie hyperspectrale permettrait de mieux évaluer ces modèles et par assimilation de données de les améliorer.

Axe no 3 : Détection des dépôts d'avalanches

Il n'existe aujourd'hui que très peu de moyens adaptés à l'évaluation de la prévision du risque d'avalanches. L'imagerie hyperspectrale haute-résolution permettrait de détecter les dépôts d'avalanches en montagne de part le changement des propriétés de surface de la neige dans le dépôt et d'évaluer ainsi la prévision du risque d'avalanches.

Volet utilisateurs

Les utilisateurs de l'imagerie hyperspectrale pour ce thème seraient potentiellement nombreux pour les applications présentant des enjeux économiques importants : la prévision du risque d'avalanches et des débits en zone de montagne, la compréhension des interactions cryosphère/climat dans le contexte actuel de changement climatique et d'élévation du niveau des mers.

1.1.2 Bibliographie thématique

Bryant, A. C., Painter, T. H., Deems, J. S., & Bender, S. M. (2013). Impact of dust radiative forcing in snow on accuracy of operational runoff prediction in the Upper Colorado River Basin. *Geophysical Research Letters*, 40(15), 3945-3949.

Carmagnola, C. M., Domine, F., Dumont, M., Wright, P., Strellis, B., Bergin, M., Dibb, J., Picard, G., Libois, Q., Arnaud, L. and Morin, S. : Snow spectral albedo at Summit, Greenland : measurements and numerical simulations based on physical and chemical properties of the snowpack, *The Cryosphere*, 7, 1139-1160, doi :10.5194/tc-7-1139-2013, 2013.

Dozier, J., Green, R. O., Nolin, A. W., & Painter, T. H. (2009). Interpretation of snow properties from imaging spectrometry. *Remote Sensing of Environment*, 113, S25-S37.

Dumont, M., Gardelle, J., Sirguey, P., Guillot, A., Rabatel, A. and Arnaud, Y., Linking glacier annual mass balance and glacier albedo retrieved from MODIS data, *The Cryosphere*, 6, 1527-1539, doi :10.5194/tc-6-1527-2012, 2012.

Dumont, M., Durand, Y., Arnaud, Y. and Six, D. , Variational assimilation of albedo in a snowpack model and reconstruction of the spatial mass-balance distribution of an alpine glacier, *Journal of Glaciology* , 58, 207, 151–164, doi :10.3189/2012JoG11J163, 2012.

Dumont, M., Brissaud, O., Picard, G., Schmitt, B., Gallet, J.-C., and Arnaud, Y. : High Accuracy measurement of snow Bidirectional Reflectance Distribution Function at visible and NIR wavelengths, *Atm. Chem. and Phys.*, 10, 2507-2520, doi :10.5194/acp-10-2507-2010, 2010.

Green, R. O., Painter, T. H., Roberts, D. A., & Dozier, J. (2006). Measuring the expressed abundance of the three phases of water with an imaging spectrometer over melting snow. *Water Resources Research*, 42(10), W10402.

Libois, Q., Picard, G., France, J. L., Arnaud, L., Dumont, M., Carmagnola, C. M., and King, M. D. : Grain shape influence on light extinction in snow, *The Cryosphere*, 7, 1803-1818, doi : 10.5194/tc-7-1803-2013, 2013.

Mary, A., Dumont, M., Dedieu, J.-P., Durand, Y., Sirguey, P., Mihlem, H., Mestre, O., Kokhanovsky, A.A., Negi, H.S., Lafaysse, M. and Morin, S. Intercomparison of retrieval algorithms for the specific surface area of snow from near-infrared satellite data in mountainous terrain, and comparison with the output of a semi-distributed snowpack model, *The Cryosphere*, 7, 741-761, doi :10.5194/tc-7-741-2013, 2013.

Negi, H. S., & Kokhanovsky, A. (2011). Retrieval of snow albedo and grain size using reflectance measurements in Himalayan basin. *The Cryosphere*, 5(1), 203-217.

Painter, T. H., Rittger, K., McKenzie, C., Slaughter, P., Davis, R. E., & Dozier, J. (2009). Retrieval of subpixel snow covered area, grain size, and albedo from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 113(4), 868-879.

Sirguey, P., Mathieu, R., & Arnaud, Y. (2009). Subpixel monitoring of the seasonal snow cover with MODIS at 250 m spatial resolution in the Southern Alps of New Zealand: Methodology and accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 113(1), 160-181.

Warren, S. G. (1982). Optical properties of snow. *Reviews of Geophysics*, 20(1), 67-89.