

Programme National de Télédétection Spatiale

Demande de financement

Toute demande de financement doit être soumise au format .doc ou .pdf par envoi en document attaché à pnts@cnrs-dir.fr. Le document doit être nommé pnts_<nom_du_responsable>. Une version papier, avec signature du directeur de l'unité, doit être envoyée par courrier postal à Solange Lassalle INSU Cellule Programmes - BP 287-16 - 75766 Paris cedex 16.

Proposant	Ghislain Picard
Mail	Ghislain.picard@lgge.obs.ujf-grenoble.fr
Téléphone	+33 476 82 42 53
Laboratoire	Laboratoire Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE)
Adresse	54 rue Molière 38400 St Martin d'Hères
N° de code CNRS	UMR 5183 CNRS-UJF

Couplage d'un modèle de manteau neigeux avec un modèle d'émission micro-ondes. Adaptation et validation en Antarctique.

Personnel impliqué dans la proposition

Nom	Laboratoire	%	Rôle dans le projet
Ghislain Picard	LGGE	40%	Coordination, couplage et validation
Doctorant	LGGE	100%	Couplage et validation
Laurent Arnaud	LGGE	20%	Image épiscopie et stratigraphie
Michel Fily	LGGE	5%	Expertise télédétection, responsable mesures le long des raids en Antarctique
Pierre Etchevers	CEN / Météo-France	5%	Expertise modélisation couvert neigeux
Yves Durand	CEN / Météo-France	5%	Expertise assimilation de données et télédétection neige
Christian Mätzler	Institute of Applied Physics, University of Bern		Expertise modélisation micro-ondes
Hubert Gallée	LGGE		Expertise modélisation neige

Indiquer le nom, le laboratoire d'origine, le pourcentage de temps consacré au projet et son rôle pour chaque personne contribuant significativement au projet. Ajouter des lignes si nécessaire.

Durée du projet : 3 ans

Financement demandé (en k€)

	Année 1	Année 2	Année n
Fonctionnement	2.5	1.5	1.5
Missions	1	2	1
Analyses	-	-	-

Petit équipement	4.5	0	0
Données	-	-	-
Équipement mi-lourd	-	-	-
Total demandé au PNTS	8	3	2

Le tableau permet une demande pluri-annuelle, mais les propositions peuvent être sur un an !

Commentaires

Indiquer ici si la proposition vient en complément d'une autre proposition soumise, si elle fait appel à des moyens nationaux (avions, bateaux), ou si elle demande des images satellitales dans un cadre particulier

Ce projet vient en complément du projet « Climat Antarctique » (CLIANT) soumis au programme LEFE : Notre objectif général est de développer une modélisation directe du signal télédéteecté en vue de l'inversion des données de télédétection en paramètres météorologiques (température de surface par exemple). La modélisation directe fait partie de ce projet PNTS alors que l'inversion et l'analyse climatique est intégrée dans le projet CLIANT.

Ce projet s'inscrit par ailleurs dans le cadre général des opérations en Antarctique soutenues par l'IPEV et l'INSU : raids scientifiques (TASTE-IDEA), et le projet Concordia.

Résumé du projet

Faire un résumé du projet en maximum une page. Ce résumé doit faire apparaître clairement l'objectif scientifique, les méthodes envisagées, les difficultés attendues et comment elles seront affrontées. Il doit être compréhensible par un non spécialiste et sera utilisé pour la sélection des rapporteurs.

Le faible disponibilité des données météorologiques en Antarctique pose de sérieux problèmes pour les analyses climatiques. Ce manque d'informations représentatives de l'ensemble du continent motive l'utilisation d'observations par télédétection spatiale. La radiométrie micro-ondes en particulier présente de sérieux atouts par rapport aux autres domaines: 1) une sensibilité importante à la température et à la structure de la neige et 2) une excellente disponibilité temporelle de données (1979-présent). Ces données sont une source riche d'information sur le climat de l'Antarctique et leur exploitation est encore insuffisante. Il apparaît donc important de mieux comprendre la physique de la mesure radiométrique en Antarctique pour envisager ensuite l'inversion des données micro-ondes en paramètres météorologiques. C'est pourquoi, **nous proposons de développer un modèle couplé, associant modélisation de la dynamique de la neige** (évolution temporelle du profil de température, densité, ... par CROCUS) **et modélisation de l'émission micro-ondes** (modèle de transfert radiatif MEMLS). Le modèle couplé sera capable de prévoir les températures de brillance mesurées par les radiomètres passifs SMMR, SSM/I et AMSR-E (gamme de fréquence 6Ghz-90Ghz) à partir de données météorologiques de la surface (température, vent, humidité, ...).

Couplage: L'essentiel du travail de couplage vise à réconcilier les différences de description de la structure de la neige (taille de grain, stratigraphie, ...) des deux modèles. Des techniques avancées de mesures de structure de la neige (images en épiscopie et micro-pénétrromètre) seront mise en oeuvre lors du prochain été austral (2006/2007) à la station permanente Concordia en Antarctique. L'analyse de ces mesures devrait permettre d'établir les relations empiriques liant les paramètres de structure des deux modèles.

Validation: La validation du modèle couplé, à savoir la comparaison des températures de brillance observées par satellite et modélisées sera abordée à trois échelles spatiales différentes: 1) à la station Concordia où de nombreuses et diverses observations terrain offrent une bonne caractérisation du milieu 2) le long des raids avec des observations plus limitées mais offrant une information sur la variabilité spatiale et 3) sur l'ensemble du continent.

Ces travaux sont importants à deux égards: 1) l'étude de l'émission micro-ondes par modélisation en Antarctique a été peu abordée malgré sa spécificité (neige éternelle, le sol sous-jacent est très loin). Les études dans les autres régions ne sont donc pas extrapolables à l'Antarctique. 2) ces travaux sont la première étape nécessaire, pour envisager l'inversion par assimilation de données des données micro-ondes en paramètres météorologiques.

Approbation du directeur

Nom du directeur : Michel Fily

Téléphone et Mail : Tél : +33 (0) 4 76 82 42 35 fily@lgge.obs.ujf-grenoble.fr

*En envoyant ce document, le proposant s'engage à avoir reçu une approbation explicite de son directeur.
Une signature est nécessaire pour la version papier uniquement*

Ce projet rentre parfaitement dans le projet de recherche d'un Maître de Conférences (G. Picard) recruté très récemment (2005) au LGGE. Il permet une bonne synergie entre télédétection et opérations de terrain en Antarctique.

Contexte Scientifique et Technique

Indiquer le contexte scientifique et technique sur une à deux pages. Besoin, travaux déjà réalisés dans le domaine, missions spatiales concernées (lancées, prévues ou envisagées)... Suggérer quelques références clé pour un rapporteur curieux.

Le climat de l'Antarctique est encore aujourd'hui mal connu car le nombre de mesures météorologiques est très limité du fait de l'isolement du continent. La température de l'air et l'accumulation nette (précipitations moins l'évaporation et l'advection) sont deux variables de la surface qui intéressent particulièrement les climatologues. Mais, les longues séries temporelles sont rares [Turner et al. 2005] et l'intérieur du continent est largement sous-représenté par rapport aux côtes. Même quand des données sont disponibles depuis longtemps (50 ans) extrapoler les tendances climatiques sur une région entière est souvent spéculatif. De plus, une représentation spatiale détaillée du climat Antarctique permettrait de mieux comprendre les influences « naturelles », comme la téléconnection entre l'oscillation El Niño et le climat de l'Ouest Antarctique ou l'influence de l'oscillation Antarctique, pré-requis à la détection d'un changement anthropique du climat.

La télédétection apparaît donc comme le seul moyen capable de fournir une information spatiale sur ce continent isolé. Le domaine des micro-ondes passives, plus particulièrement, est bien adapté à l'étude des surfaces enneigées: 1) La relation entre les températures de brillance micro-ondes (Tb) et les variables d'intérêts (température, accumulation) est forte. 2) La résolution spatiale est grossière, mais comparable avec celle des modèles régionaux ou globaux de climat (30-60km) et enfin 3) la couverture temporelle par des capteurs quasi-identiques est continue depuis 1979, soit presque trois décades de données (capteurs SMMR et SSM/I). Une mine d'information pour la climatologie!

Cependant les applications réelles sont rares. La radiométrie micro-ondes a permis d'interpoler des mesures d'accumulations nette à l'ensemble du continent, de plus en plus précisément [Vaughan et al. 1999, Arthern et al. 2006] mais des progrès restent à faire. Des relations entre la signature spectrale de la neige dans les micro-ondes et la structure de la neige ont été mises en évidence par le passé (taille de grains/gradient en fréquence ; stratigraphie/polarisation) [Surdyk et Fily, 1993, 1994 ; Genthon et al., 2001] mais le lien avec l'accumulation de neige n'est pas direct. Les mesures de Tb ont fourni des informations qualitatives sur la température, mais aucun travail d'inversion des Tb en température n'a abouti à ce jour.

Il est clair maintenant que les mesures de Tb seules sont insuffisantes pour être inversées précisément en variables climatiques. Pour mieux contraindre l'inversion, il est donc nécessaire d'injecter de l'information supplémentaire comme la physique gouvernant la dynamique et l'émission du manteau neigeux. L'assimilation de données, largement développée en prévision météorologique, permet de combiner la physique (=un modèle) et les observations, et nous paraît être une voie prometteuse pour inverser Tb en température. Pour cette raison, on voit actuellement un regain d'intérêt pour les modèles de physique du manteau neigeux (qui estiment les profils de température, densité, métamorphisme à partir de la météo de surface) couplés avec un modèle électromagnétique d'émission (qui prévoit les températures de brillance à partir des profils dans le manteau) des fins d'assimilation de données: Projet Cartell (A. Royer), projet Princeton University (E. Wood), [Pulliainen, 2006]. Aucun projet de ce type ne concerne l'Antarctique à notre connaissance. Or les conditions et les problèmes de modélisation en Antarctique sont différents: la neige n'est pas saisonnière, il n'y a pas de sol sous-jacent, le métamorphisme est beaucoup plus lent du fait des basses températures, mais a beaucoup plus de temps pour opérer, la taille des grains (qui gouverne la diffusion des micro-ondes) sont plus petits que dans les zones où les modèles d'émission sont validés, etc. Des travaux spécifiques sont donc nécessaires. On peut noter que dans le domaine de optique ou dans les micro-ondes actives, des travaux similaires ont été réalisés et les acquis sont importants pour notre étude. On peut citer par exemple: 1) le lien entre modélisation de la et mesures télédéteectées a été abordé en visible et proche infra-rouge par [Fily et al., 1999] 2) une expérience de faisabilité en micro-onde active

(SAR d'Envisat) avec un modèle électromagnétique simplifié initialisé par le modèle de neige Crocus a permis l'inversion de paramètres moyennés du couvert neigeux humide par assimilation variationnelle [Dedieu et al., 2006].

Dans le cadre de ce projet PNTS, **nous proposons de développer un modèle couplé de dynamique du manteau neigeux et d'émission micro-ondes adapté et validé sur l'Antarctique**. Ce projet s'inscrit dans notre objectif général de recherche, à savoir l'inversion des températures de brillance en variables climatiques par assimilation de données. Mais ce projet vise aussi à améliorer notre connaissance de l'émission de la neige et rentre dans les axes prioritaires « Les études de physique de la mesure (...) développement de modèles d'interaction » de l'appel d'offre PNTS.

De nombreux modèles de dynamique du manteau neigeux sont disponibles [P. Etchevers et al., 2003]. La partie dynamique (résolution de l'équation de la chaleur, bilan de masse et d'énergie) et les informations de sortie sont quasiment identiques pour tous ces modèles. Ils sont donc « techniquement » interchangeable dans un couplage. Ils diffèrent cependant au niveau des paramétrisations et donc des résultats qu'ils fournissent. Dans ce projet, on utilisera le modèle Crocus du Centre d'Etude de la Neige, Météo France.

Au contraire des modèles de neige, les modèles électromagnétiques d'émission de la neige sont moins nombreux et diffèrent largement les uns des autres. Des modèles basés sur la théorie des fluctuations fortes ont été développés [Stogryn, 1996; Surdyk et Fily, 1993] mais sont limités aux fréquences basses quand la diffusion des grains de neige est négligeable (<20GHz alors qu'on s'intéresse aux fréquences 6-90GHz). Le modèle de l'Helsinki University of Technology (HUT) basé sur le Dense Medium Radiative Transfert est populaire mais considère le manteau homogène, donc sans stratification. C'est une limitation importante dans le cas de l'Antarctique et des applications visées (voir partie « description des travaux » pour plus de détail). Idem pour le modèle italien de G. Macelloni. Le seul modèle adapté à notre étude est le modèle de transfert radiatif multi-couches MEMLS [Wiesmann et Mätzler, 1999] fonctionnant sur la gamme de fréquences 6GHz-90GHz.

De plus, le modèle MEMLS a déjà fait l'objet d'une étude de couplage avec Crocus et Sntherm et d'une validation sur les Alpes [Wiesmann et al., 2000]. Bien que concernant les Alpes, les difficultés rencontrées par les auteurs se retrouveront dans le cas de l'Antarctique. Cette étude constitue un point de départ pour notre projet.

Bibliographie:

les entrées bibliographiques des membres de l'équipe sont données dans la partie « compétence de l'équipe.

- Arthern, R. J., et al. (2006), Antarctic snow accumulation mapped using polarisation of 4.3cm wavelength microwave emission, *J. Geophys. Res.*, 111, D06107, doi:10.1029/2004JD005667.
- Dedieu J.P, Niang M., Durand Y., Guyomarc'h G., Mérindol L., Sergent C., 2006. Potentiel des données ASAR-Envisat en bande C pour la détermination des caractéristiques de la neige humide en environnement alpin. *La Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n°179 (2005-3), pp18-27.
- Etchevers, P. et al. (2003) Intercomparison of the surface energy budget simulated by several snow models (SNOWMIP project) *Annals of Glaciology*, pp. 150-158
- Fily M, Dedieu JP, Durand Y (1999) Comparison between the results of a snow metamorphism model and remote sensing derived snow parameters in the Alps. *Remote sensing of environment* 68: 254-263
- Turner, J. et al. (2005), Antarctic climate change during the last 50 years, *International Journal of Climatology*, 25, pp. 279-294.
- Vaughan, D. V., et al. (1999), Reassessment of Net Surface Mass Balance in Antarctica, *J. Climate*, 12, 933-946.
- Stogryn, A. (1986), A study of microwave brightness temperature of snow from the point of view of strong fluctuation theory, *IEEE Trans. Geo. Remote Sens.*, GE-24(2), 220-231
- Macelloni, G. et al. (2001), Microwave emission from dry snow: a comparison of experimental and model results, *IEEE Trans. Geo. Remote Sens.* 39(12), pp. 2649-2656

- Pulliainen, J. T. (2006), Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space-borne microwave radiometer data and ground-based observations, *Rem. Sens. of Enviro.*, 101, 257-269.
- Uppala, S.M. et al., (2005) The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2961-3012.doi:10.1256/qj.04.176
- Wiesmann A., Mätzler C. (1999), Microwave emission model of layered snowpacks, *Remote Sens. Env.*, vol.: 70, pp. 307-316
- Wiesmann A. et al. (2000), Simulation of microwave emission from physically modeled snowpacks, *Annals of Glaciology*, Vol 31, pp. 397-405

Objectif

Indiquer en quelques lignes l'objectif des travaux proposés. Cet objectif doit découler du contexte scientifique

Coupler un modèle de dynamique du manteau neigeux en Antarctique avec un modèle électromagnétique d'émission dans le domaine micro-ondes afin 1) de mieux comprendre l'émission des manteaux neigeux et 2) de simuler précisément les températures de brillance mesurées par les radiomètres SMMR, SSM/I, AMSR (fréquences 6Ghz-90Ghz). Cette étude constitue une première étape en vue de l'inversion des températures de brillance mesurées depuis 27 ans en Antarctique en température du manteau.

Description des Travaux

Décrire en 3 pages maximum les travaux envisagés en montrant leur originalité. Il est important de montrer que l'équipe a bien analysé le travail à accomplir, a identifié les éventuelles difficultés, et a choisi des pistes pour les contourner. Montrer que les travaux permettent de répondre à l'objectif.

Ce projet se déroulera schématiquement en deux étapes: 1) Couplage du modèle de neige Crocus avec le modèle d'émission micro-ondes MEMLS. 2) Validation. En pratique, le travail sera itératif: Une première itération a pour objectif de réaliser le couplage du point de vue technique en s'appuyant sur les travaux de [Wiesmann et al.] et ainsi de réaliser rapidement des simulations. La deuxième itération vise à améliorer les points délicats (structure de la neige, description des couches, etc) Les deux parties suivantes de ce texte décrivent ces deux itérations. La troisième partie décrit la stratégie de validation du modèle couplé et la dernière les résultats escomptés ainsi que les perspectives.

1ère itération. Couplage et variables d'entrée du modèle couplé:

Le couplage « technique » du modèle de neige Crocus et du modèle d'émission micro-ondes MEMLS et la réalisation de simulation ne pose pas de grosses difficultés.

Crocus décrit le manteau par un ensemble de couches, infinies horizontalement, de hauteur variable adaptée aux quantités de précipitations et à l'histoire du manteau. Cette description convient bien à MEMLS. De plus, la plupart des variables de sorties de Crocus correspondent parfaitement aux variables dont MEMLS a besoin: profils de température, de densité et de contenu en eau liquide. La description de la structure de la neige n'est, par contre, pas compatible et un travail spécifique sera réalisé sur cet aspect (voir ci-dessous), mais une solution simple sera adoptée dans un premier temps [Wiesmann et al.].

Pour des raisons d'efficacité (surtout utile dans le contexte de l'assimilation de donnée), nous envisagerons de convertir le code Matlab de MEMLS en Fortran, mais ce n'est pas une obligation pour mener à bien notre projet.

Crocus sera alimenté par des données météorologiques usuelles (température, vent, humidité, précipitations, flux incident) provenant soit des stations météorologiques soit des réanalyses ERA-40 du Centre Européen

de Prévisions à Moyen Terme pour couvrir l'ensemble de l'Antarctique. La chaîne de simulation Crocus / ERA-40 récemment développée au LGGE sera utilisée dans ce projet.

L'essentiel des variables d'entrée de MEMLS est fourni par le couplage avec Crocus. MEMLS a besoin par ailleurs de la température de brillance du ciel. Cette température influence normalement peu les Tb, c'est pourquoi nous utiliserons une valeur constante (30K) ou une modélisation simple en fonction des paramètres atmosphériques. Une étude de sensibilité pourra confirmer la pertinence de cette simplification.

2ème itération. Améliorations du couplage:

Même si le couplage décrit ci-dessus pourra « tourner » rapidement, on peut d'ores et déjà noter deux axes de travail pour améliorer le couplage et l'adapter à nos besoins:

1) Crocus décrit les grains de neige par un paramètre de forme (de -1 pour un grain dendritique à 1 pour un grain sphérique) et un paramètre de taille (= au diamètre quand le grain est sphérique). Crocus prévoit la dynamique de ces paramètres en fonction des gradients thermiques, c'est le métamorphisme de la neige. MEMLS décrit la structure de la neige différemment, au moyen de la longueur de corrélation de la constante diélectrique, autrement dit la longueur de corrélation de la fonction spatiale glace/air. Il n'existe pas de relation univoque ou théorique entre la longueur de corrélation et la taille/forme des grains (ainsi que la densité). Nous proposons donc de caractériser expérimentalement la structure de la neige et du névé en s'appuyant sur :

a) des images de la structure 2D des grains (monocristaux) et des porosités en épiscopie coaxiale [Arnaud et al.]. Cette technique sera utilisée à la station Concordia en 2006/2007 sur des échantillons ayant une cohésion suffisante (à partir d'environ 2 m). Ces images permettront de mesurer conjointement les formes et tailles des grains et la longueur de corrélation en 2D. Il faudra alors estimer la relation en volume entre forme/taille des grains et longueur de corrélation.

b) des stratigraphies très hautes résolutions acquises par un micro-pénétrromètre spécifiquement étudié pour la neige : le SnowMicroPen (Johnson et Schneebeli US Patent 5 831 161). Le micro-pénétrromètre permet de mesurer des résistances à l'enfoncement (mesure à vitesse imposée) à l'échelle du grain depuis la surface jusqu'à 2 m de profondeur. Ces mesures devraient permettre de remonter à des profils de longueur de corrélation.

Des mesures complémentaires classiques (taille de grain, densité, ...) seront réalisées conjointement. Cette caractérisation de la structure sera associée à un suivi sur toute l'année des profils de température jusqu'à 20 m. Cette étude devrait permettre de préciser la relation entre les paramètres de structure de Crocus et ceux de MEMLS et ainsi améliorer le couplage surtout pour les fréquences élevées (>20GHz) pour lesquelles la structure joue un rôle important.

2) La stratification du manteau neigeux se traduit, du point de vue électromagnétique, par des contrastes verticaux de constante diélectrique qui favorisent la réflexion vers le bas des ondes montantes émises par le manteau sous-jacent. Ceci se traduit par une diminution de l'émission par rapport au cas non-stratifié. Mais cette réduction est essentiellement observée en polarisation horizontale car en polarisation verticale la réflexion est plus faible aux incidences qui nous intéressent (proche de l'angle de Brewster $\sim 50^\circ$). Cette différence polarimétrique de « réduction de l'émission » a été exploitée pour estimer le nombre de couches et en déduire l'accumulation nette [Arthern et al.]. Pour mieux comprendre ce phénomène et ainsi mieux estimer l'accumulation, il est crucial de bien quantifier les réflexions. Crocus gère les couches pour des précipitations importantes et épisodiques (typiques des Alpes), c'est à dire qu'il regroupe les couches fines similaires en couches homogènes afin de maintenir le nombre de couche totale raisonnable. Or, sur le plateau Antarctique, les précipitations sont faibles et quasi-continues, si bien que Crocus aura tendance à fusionner les couches et donc « oublier » la stratification. On peut alors s'attendre à une mauvaise émission des Tb en polarisation H comme déjà identifié dans les Alpes [Wiesmann et al.]. Comme conserver toutes

les couches n'est pas envisageable numériquement, nous proposons la solution suivante: pour chaque couche Crocus, une ou des variables d'état conserveront l'information sur le nombre réelle de couche composant la couche Crocus et la variabilité interne des paramètres de structure, densité, etc. Ainsi, il sera possible de reconstituer les couches originales pour MEMLS. Un travail sur les variables d'états pertinentes à retenir doit être réalisé. Les stratigraphies haute résolution pourraient s'avérer utiles dans ce travail.

Il est évident que la comparaison intensive du modèle couplé avec des observations montrera des problèmes qui ne sont pas évoqués ci-dessus. Il sera donc nécessaire d'améliorer les modèles, le couplage et les données de forçage. Pour cela, les mesures terrain complémentaires sont indispensables et sont évoquées dans la suite.

Validation:

La comparaison entre les résultats de modélisation et des observations constitue une part importante de ce projet. Nous adoptons une stratégie de validation multi-échelle: une validation fine à petite échelle et une validation à l'échelle intermédiaire où des mesures terrain sont disponibles et enfin un test à l'échelle de l'Antarctique.

- Échelle locale. La station permanente Concordia, sur le plateau Antarctique offre un site privilégié pour acquérir les informations terrain nécessaires à une validation fine du modèle couplé. Des mesures météo usuelles sont acquises régulièrement (station météo automatique et instrument à la station Dôme C même) ce qui permettra de s'affranchir localement des réanalyses ERA40. De plus, des mesures importantes seront collectées en 2007. Elles comprennent le profil vertical de température (et son évolution temporelle sur les années à venir), le profil de densité, la stratigraphie et les images en épiscopie. Cette bonne connaissance qualitative et quantitative du milieu permettra d'aborder les points 1) et 2) développé ci-dessus et d'une façon plus générale d'identifier les problèmes de modélisation de CROCUS, MEMLS et de leur couplage. Les Tb seront issues des radiomètres AMSR-E, SSM/I et SMMR. L'acquisition de Tb sur le terrain dépassent le cadre de ce projet.
- Généralisation, échelle intermédiaire: Une évaluation des performances du modèle couplé sera réalisé là où des mesures météorologiques et/ou de profil de température sont disponibles. Un recensement des profils de température et stratigraphiques acquis par le passé sera accompli. La récolte des nouvelles mesures (en particulier de nouveaux profils de température) lors de l'Année Polaire International constitue un élément important avec notamment un premier raid en 2007-2008 entre Talos Dome et Dome C. Le travail de validation sera similaire à celui réalisé pour Dôme C, avec cependant moins de mesures, mais une variabilité spatiale des conditions qui permettra une validation plus large du modèle couplé.
- Grande échelle. L'application sur l'ensemble du continent constitue la dernière phase de test. Le modèle sera alimenté par les réanalyses disponibles sur l'ensemble de la zone et les Tbs simulées comparées avec les observations radiométriques de SMMR et SSM/I (+AMSR-E lancé en 2002 avec les réanalyses ERA si elles sont prolongées au delà de 2002, avec les analyses opérationnelles du centre Européen ou les réanalyses NCEP/NCAR sinon). Il ne s'agira pas à proprement parler de valider le modèle couplé, car la qualité des données météo n'est pas connue en dehors des stations météo. Les deux premières étapes de validation présentées ci-dessus se concentre sur des régions où il n'y a jamais ou très rarement de fonte l'été. Par ailleurs, les chances d'inversion des données micro-ondes en température sont faibles en zone de fonte car la structure de la neige est fortement affectée par la présence d'eau liquide et le regèle. Ces régions, relativement marginales en terme de superficie présentent donc une difficulté de modélisation plus importante et un intérêt thématique plus limité. C'est pourquoi nous porterons moins d'attention sur les régions de fonte dans ce projet même si techniquement le modèle couplé pourra y fonctionner.

Résultats attendus et Perspectives:

La réalisation à proprement parler du couplage ne présente pas de grosses difficultés techniques et on peut s'attendre à obtenir de bons résultats aux basses fréquences (6-19 Ghz) où la taille des grains joue un rôle moindre et en polarisation V car la structure stratifiée a peu d'influence. Mais l'objectif de ce projet est de progresser aux fréquences supérieures (22 et surtout 37 Ghz) et en polarisation H de part l'intérêt qu'elles représentent pour les applications climatiques. Les mesures extensives du manteau neigeux à la station Concordia sont un atout.

Au delà de la réalisation du modèle couplé Crocus/MEMLS, les perspectives de ce projet sont:

- 1) Appropriation du **modèle électromagnétique MEMLS**, d'en définir les limitations dans une région aux conditions spécifiques où il n'a jamais été utilisé. Il s'agit donc de développer une compétence sur la mesure physique micro-ondes passive pour les surfaces enneigés. D'où la mise en place d'une collaboration avec C. Mätzler, le concepteur de MEMLS.
- 2) Développement de **l'assimilation de données dans le domaine de la cryosphère**. Ce projet orienté « mesure physique et modélisation directe » est une première étape, obligatoire, pour le développement d'un schéma d'assimilation. Même si les Tb micro-ondes fournissent une information riche sur le manteau neigeux, d'autres données spatiales peuvent s'avérer utile et complémentaire, comme les Tb infrarouge, les mesures d'albédo, les rétrodiffusions radar, etc. Ainsi, le développement d'un schéma d'assimilation ouvre la voie à une utilisation plus large de données satellitaires en Antarctique.
- 3) Un **couplage complet Modèle Atmosphérique / émission Micro-ondes**. Divers modèles de neige seront facilement interchangeable dans notre couplage, au moins techniquement. Ainsi, on pourra utiliser le schéma de surface Sisvat qui fait partie du modèle atmosphérique MAR développé par H. Gallée, LGGE. Ceci offrirait une autonomie par rapport aux données météorologiques et en perspective un schéma d'assimilation 4D beaucoup plus performant incluant la dynamique de l'atmosphère.

Compétences de l'équipe

Indiquer les travaux déjà réalisés par l'équipe. L'objectif est de montrer que l'expérience de l'équipe est bien adaptée aux travaux. Inclure les références pertinentes de l'équipe. Décrire le rôle de chacun dans le projet. Cette section est limitée à 2 pages dans le cas d'un seul laboratoire ; plus si plusieurs laboratoires sont impliqués.

Compétence et collaborations:

Des travaux en télédétection micro-ondes sont menés depuis longue date au LGGE par Michel Fily et de nombreux étudiants. On peut noter les travaux de thèse: de modélisation micro-ondes par S. Surdyk, de mesures radiométriques dans les Alpes et de leur interprétation (radiomètre PORTOS du CNES) par I. Sherjal, d'estimation des zones humides et de la température de surface en zone boréale par A. Mialon et la détection de la fonte estivale en Antarctique par O. Torinesi.

Ces derniers travaux ont été poursuivis récemment à la faveur du recrutement de G. Picard. Ce dernier a mené sa thèse sur la modélisation micro-ondes, mais sur les capteurs actifs (SAR) dans le domaine de la végétation et a acquis une connaissance de la modélisation de l'environnement et de l'assimilation de données en post-doc. Les compétences sur l'Antarctique sont omniprésentes au LGGE que ce soit sur le climat, la neige, les mesures expérimentales (raid, stations Concordia et Dumont d'Urville) ou la modélisation.

Les mesures sur le terrain (image en épiscopie coaxiale et stratigraphie haute-résolution) seront menées par L. Arnaud recruté récemment au LGGE (2006). Ses travaux de thèse portant sur la transformation de la neige en glace à la surface des calottes polaires, l'ont conduit à mesurer des paramètres caractéristiques de la structure du névé (mise au point d'une nouvelle technique d'observation de la structure 2D en réflexion permettant de visualiser simultanément les porosités et les joints de grain).

De façon plus spécifique pour mener ce projet à bien, nous nous appuyons sur des collaborations avec les concepteurs des modèles que nous utiliserons: le Centre d'Etude de la Neige (Yves Durand et Pierre Etchevers), le modèle de neige Crocus, H. Gallée, concepteur du modèle de neige Sisvat (et du Modèle Atmosphérique Regional) et C. Mätzler concepteur du modèle électromagnétique MEMLS (demande de financement sur ce point au PNTS). Une collaboration avec A. Royer (CARTEL, Canada) fera l'objet d'une demande de financement à la « Commission Permanente de Coopération Franco-Québécoise ». A. Royer mène actuellement un projet similaire au notre (couplage modèle de neige Canadien et modèle électromagnétique HUT) mais qui s'intéresse aux régions canadiennes, ce qui fait la spécificité de chacun de nos projets.

Rôles:

- Le couplage et la validation seront menés par un doctorant et G. Picard. Un sujet de thèse concernant le couplage Crocus/MEMLS est déposé à l'Ecole Doctorale Terre, Univers, Environnement de Grenoble et est classé prioritaire par notre laboratoire, mais le recrutement d'un doctorant n'est pas acquis actuellement. Si ce recrutement n'aboutit pas cette année, la demande sera reconduite.
- La définition, la réalisation et l'interprétation des mesures sur le terrain (image en épiscopie coaxiale et stratigraphie) seront réalisées par L. Arnaud. Le financement de la mission pour l'été austral 2006/2007 est acquis.
- M. Fily interviendra dans le projet en tant qu'expert télédétection et assurera la connexion avec les mesures sur les raids (projet ITASE et projet à venir dans le cadre de l'Année Polaire Internationale).
- P. Etchevers, Y. Durand et H. Gallée apporteront leur expérience en modélisation du manteau neigeux, en télédétection neige et en assimilation de données météorologiques.
- C. Mätzler apportera sa compétence en modélisation micro-ondes.

Bibliographie:

- Torinesi O., M. Fily, and C. Genthon, 2003, Interannual variability and trend of the Antarctic summer melting period from 20 years of spaceborne microwave data, *J. of Climate*, 16(7), 1047-1060.
- Gay M., M. Fily, C. Genthon, M. Frezzotti, H. Oerter and J.G. Winther, 2002, Snow grain-size measurements in Antarctica, *Journal of Glaciology*, 48(163), 527-535.
- Genthon C., M. Fily, and E. Martin, 2001, Numerical simulations of Greenland snow-pack and comparison with passive microwave spectral signature, *Annals of Glaciology*, 32, 109-115.
- I. Sherjal, M. Fily, O. Grosjean, J. Lemorton, B. Lesaffre, Y. Page, M. Gay, 1998, Microwave remote sensing of snow from a cable car at Chamonix in the French Alps, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **36** (1), 324-328.
- Sherjal I., and M. Fily, 1994, Temporal variations of microwave brightness temperatures over Antarctica, *Annals of Glaciology*, **20**, 19-25.
- Surdyk S. and M. Fily, 1994, Results of a stratified snow emissivity model based on the wave approach: application to the Antarctic Ice Sheet, *Journal of Geophysical Research*, 100 (C5), 8837-8848.
- Surdyk S., and M. Fily, 1993, Comparison of microwave spectral signature of the Antarctic Ice Sheet with traverse ground data, *Annals of Glaciology*, **17**, 161-166.
- Mialon, A. and Royer, A. and Fily, M. , 2005, Wetlands seasonal dynamics and interannual variability over Northern high latitudes, derived from microwave satellite data. *Journal. Geophys. Res.*, 110, D17102, doi:10.1029/2004JD005697.
- Fily M., A. Royer, K. Goïta, and C. Prigent, 2003, A simple retrieval method for land surface temperature and fraction of water surface determination from satellite microwave brightness temperatures in sub-arctic areas, *Remote Sensing of Environment*, 85(3), 328 -339.

- G. Picard, M. Fily, 2006, Surface melting observations in Antarctica by microwave radiometers: correcting 26-year long time series from changes in acquisition hours. *Accepté par Remote Sensing of Environment*.
- G. Picard, T. Le Toan, F. Mattia, 2003, "Understanding C-band radar backscatter from wheat canopy using a multiple scattering coherent model.". *IEEE-Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No 7, pp.1583-1591.
- G. Picard, T. Le Toan, S. Quegan, Y. Caraglio, T. Castel, 2004, "Radiative Transfer modeling of cross-polarised backscatter from a pine forest using the discrete ordinate and eigenvalue method.". *IEEE-Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol 42, No 8, pp.1720-1730.
- G. Picard, T. Le Toan, S. Quegan, 2004, "A Three-Dimensional Radiative Transfer Model to interpret ranging scatterometer measurements from a pine forest.". *Waves in Random Media*, volume 14, issue 2, pages S317 – S331
- G. Picard, F.I. Woodward, M.R. Lomas, J. Pellenq, S. Quegan, M. Kennedy, 2005, *Constraining the Sheffield dynamic global vegetation model using stream-flow measurements in the United Kingdom*, *Global Change Biology*, volume 11, issue 12, p .2196.
- L. Arnaud, M. Gay, J.M. Barnola, P. Duval, 1998, "Imaging of firn and bubbly ice in coaxial reflected light: a new technique for the characterisation of those porous media.", *J. of Glaciology*, volume 44, p .326-332.

Calendrier

Pour les propositions pluri-annuelles, un calendrier est nécessaire (facultatif pour les autres). Ce calendrier doit faire clairement apparaître des évènements clés qui permettent de juger de l'avancement du projet. Ce calendrier pourra être utilisé par le comité scientifique du PNTS pour recommander ou non la poursuite du financement.

- Couplage « technique »: réalisation du modèle couplé capable de tourner. Première validation à Dôme C. 6 mois.
- Acquisition et analyse des images en épiscopie à Dôme C (été austral 06-07). Dérivation d'une relation entre la taille de grain et la longueur de corrélation. Test et étude de sensibilité dans le modèle couplé. 6 mois.
- Evaluation à Dôme C du problème de la polarisation H. Intérêt des mesures stratigraphiques hautes résolution ? 6 mois.
- Définition de nouvelles mesures à accomplir lors des étés austraux 2007/2008 et 2008/2009 à Dôme C et le long des raids pour les aspects taille de grain et polarisation H. 1 à 2 mois répartis.
- Collecte des données sur l'ensemble de l'Antarctique (stations météo + autres données), test du modèle couplé. Améliorations. 9 mois
- Simulation sur l'ensemble de l'Antarctique, analyse des résultats. 6 mois.

Demande de moyens au PNTS

On détaille ici les moyens qui sont demandés sur la première page. Cette section et la première page doivent donc être cohérents.

Fonctionnement

Les demandes de fonctionnement sont limitées à ce qui est directement en relation avec le projet : Frais de publication, coûts informatiques pour les centres de calcul

- Frais de publication: 0 k€ pour la première année, 1 k€/an pour les années suivantes.
- Petit matériel informatique, consommables, 0.5 k€/an.

- 2 Licences Matlab, dont une avec toolbox d'analyse d'image. 2kE.

Missions

A détailler et justifier. On distinguera les missions qui sont nécessaires à la réalisation du projet, et celles dont le but est de partager les résultats avec la communauté scientifique

- 1 mission en Suisse à Bern pour 2 personnes: 1 kE.
- 1 congrès à l'étranger par an: 1kE/an.

Analyses

Pour les analyses (in situ ou au laboratoire) une justification détaillée (e.g. coût unitaire de l'analyse et nombre d'analyses prévues, coût total par poste) des dépenses envisagées doit être fournie

Petit équipement

A détailler et justifier. Le matériel informatique rentre dans cette catégorie.

- 1 station de calcul pour la durée du projet avec masse de stockage adaptée: 2 kE.
- Maintenance et consommables pour les mesures de structure de la neige: 1kE.
- PC fixe dédié à l'acquisition des données de structure (station Concordia): 1.5 kE.

Données

Les données satellitales entrent dans cette catégorie. Décrire ici et justifier le nombre d'images nécessaire
Données satellitales gratuites.

Equipement mi-lourd

Les équipements dont l'acquisition en 2006 est nécessaire à la réalisation du projet et ayant fait l'objet d'une demande INSU à l'automne 2005 devront être impérativement mentionnés ici. Pour les projets pluriannuels, dont la réalisation nécessite l'acquisition d'équipement mi-lourds au-delà de 2006, les demandes doivent être impérativement mentionnées ici accompagnées d'une justification scientifique et technique, d'une évaluation financière et d'une indication sur le co-financement (mentionner l'équipement et la demande financière ici et remplir un dossier de demande mi-lourd).

Néant.

Autres moyens

Cette section est facultative. Si la proposition au PNTS vient en complément à une autre demande, décrire ici le montage envisagé. Indiquer ici les moyens demandés aux commissions scientifiques en charge de l'examen des demandes de campagnes à la mer, "Vols Avion", "Vols Ballon", les commissions de l'IDRIS pour le temps calcul, les demandes de soutien à la DT INSU, etc...

Labellisation de bourses doctorales ou post-doctorales

Le PNTS ne peut pas offrir de financement de bourses doctorales ou post-doctorales. Par contre, un soutien sous la forme d'un label pourra être accordé à une demande de bourse doctorale ou post-doctorale déposée auprès d'un organisme partenaire du PNTS.

Nature de la bourse (doctorale ou post-doctorale) : doctorale

Organismes concernés par la demande : CNRS, Université Joseph Fourier.

Nom de l'encadrant principal : G. Picard

Titre de la demande : Modélisation de l'émission micro-ondes du manteau neigeux en Antarctique et validation.

Résumé du sujet (500 mots maximum) :

Le nombre de mesures de température est insuffisant actuellement pour évaluer correctement les changements climatiques en Antarctique. Le nombre de stations est en effet trop faible pour couvrir ce large continent où règnent des conditions météorologiques contrastées. L'observation de la Terre par satellite est un moyen d'obtenir des informations climatiques sur de grandes étendues, de façon régulière. En particulier, le potentiel des radiomètres micro-ondes pour mesurer la température de la surface est connu depuis longtemps mais reste encore sous exploité.

L'objectif de cette thèse est de progresser dans ce domaine par une approche de modélisation physique du manteau neigeux et de son émission micro-ondes. Le but est de préciser la relation qui lie les mesures radiométriques par satellite avec la température et les autres paramètres du manteau. Ces travaux se dérouleront en deux étapes: 1) couplage de modèles 2) validation au moyen d'observations terrain et spatiales.

Afin de modéliser l'émission micro-ondes à partir des conditions météorologiques locales, il sera nécessaire de coupler un modèle de manteau neigeux (CROCUS, Centre d'Étude de la Neige, Météo France) et un modèle d'émission électromagnétique (MEMLS de C. Mätzler, Bern, Suisse). L'enjeu est d'adapter les variables de sorties de CROCUS aux entrées de MEMLS. Par exemple, la description de la taille et la forme des grains de neige diffèrent entre les deux modèles et devra être réconciliée. Pour cela, on pourra chercher une relation reliant les deux descriptions dans les mesures expérimentales de structure neige réalisées au LGGE. Il sera sûrement nécessaire, aussi, de poursuivre l'effort d'adaptation de CROCUS, modèle validé sur les Alpes françaises, à l'Antarctique.

La validation constitue une part importante de cette thèse. Elle sera abordée en plusieurs étapes:

1) *Validation locale à la station franco-italienne Concordia, Antarctique.* Outre la station météo AWS (Automatic Weather Station) qui fournirait les données d'entrée de CROCUS, de nombreuses mesures sont réalisées sur le manteau par des équipes du LGGE ou autres laboratoires. On peut citer par exemple les mesures de profil de température dans le manteau neigeux, les stratigraphies, etc. Ces données devraient permettre d'évaluer finement la précision de CROCUS. Les estimations d'émissions de MEMSL seront confrontées aux données AMSR (voir point 3).

2) *Généralisation sur des transects.* De nombreuses mesures ont déjà été acquises le long de raids scientifiques (température, structure), en particulier en collaboration avec nos collègues italiens. Dans le cadre de l'année polaire internationale 2007-2009 d'autres raids scientifiques seront réalisés (Programme TASTE-IDEA). Ces mesures permettront de généraliser la validation de Dôme C à une large gamme de conditions météorologiques.

3) *Validation à grande échelle.* A l'échelle de l'Antarctique, les mesures terrain sont rares. On utilisera donc les données météo issues des réanalyses du centre Européen de Prévisions à moyen terme (ERA-40) et les données du radiomètre AMSR-E capable de fournir l'émission micro-ondes à 11 fréquence/polarisation différentes, sur l'ensemble de l'antarctique, tous les jours depuis juin 2002. Une étude rétrospective depuis 1979 pourra être envisagée en utilisant les radiomètres SMMR et SSM/I.