

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES DE LA ROUE INTERFEROMETRIQUE

Note de synthèse pour le CNES. Michel Kasser, mars 2003

A. Introduction

La roue interférométrique fournira un MNT mondial de tout premier plan en termes de précision (de l'ordre de 1 mètre, pour un maillage de 20 mètres) et d'exhaustivité. Rappelons à toutes fins utiles que les topographies de Vénus et Mars sont actuellement mieux connues que celles des surfaces terrestres émergées (et, bien sur, de celles qui sont immergées...). Une précision de niveau métrique n'est en vue dans aucun des projets actuellement discutés dans les agences spatiales, hormis dans des « niches » telles que celle de CRYOSAT. Les perspectives scientifiques majeures de ce projet sont donc sous-tendues par deux grands domaines d'applications :

- L'obtention en quelques mois de mission d'un MNT mondial très précis vient en amont de la plupart des domaines de recherche en sciences de la Terre,
- La variabilité temporelle de tels MNT sur des zones choisies par une méthode tous temps est très attrayante, mais est encore à valider, et c'est l'autre aspect essentiel que propose ce projet.

Nous présentons ci-après quelques applications scientifiques immédiates de ce projet. Les quelques paragraphes qui suivent sont donnés à titre d'exemple, et ne forment pas une liste complète, qu'il serait d'ailleurs fort difficile à établir compte tenu du nombre de domaines dans lesquels les MNT sont utiles.

B. Géophysique, géologie

De nombreuses études nécessitent de disposer d'une topographie précise de la zone étudiée pour l'exploitation de différentes données géophysiques ou géologiques acquises à terre, par moyens aéroportés ou par satellite. Ce point est toujours délicat car la topographie n'est souvent connue que de façon fragmentaire par des documents cartographiques dont la projection et le système géodésique sont fréquemment des systèmes locaux, et dont les paramètres de transformation sont rarement bien connus. Dans certaines régions, seule une topographie très peu précise et de basse définition (fichiers globaux à 30" d'arc par exemple) peut être disponible.

Nous donnons ci-après les principales applications pour lesquelles il est indispensable de disposer d'un MNT précis et le degré de précision requis pour mener à bien les études envisagées. Nous mentionnons à la suite les études qui pourront être conduites si des MNT haute précision et haute définition sont disponibles à différentes époques, permettant un suivi temporel de l'évolution de la topographie.

B.1. Etudes géophysiques et géologiques nécessitant la connaissance d'une topographie précise.

Il s'agit à la fois d'études à caractère académique ou appliqué et également de contributions à l'évaluation des aléas sismiques, volcaniques et gravitaires.

B.1.1. Connaissance de la structure interne : gravimétrie et électromagnétisme

Les études gravimétriques permettent, par le calcul et l'inversion des anomalies de Bouguer, d'identifier les variations de densité dans le sous-sol. Les applications sont nombreuses et dépendent de l'échelle à laquelle le levé des mesures est réalisé et de la précision des mesures. Elles vont de la cartographie d'interfaces profonds à la modélisation fine de la structure interne d'objets géophysiques (volcans, zones sismiques, ...). L'obtention des anomalies de Bouguer se fait à partir de mesures précises des variations spatiales de la pesanteur (obtenues par méthodes terrestres, aéroportées ou spatiales) en appliquant des corrections qui dépendent (i) de l'altitude du point de mesure et (ii) de la topographie locale qui influence au premier ordre la valeur de la pesanteur mesurée et doit être corrigée soigneusement. Compte tenu de la précision actuelle des gravimètres de terrain et du positionnement réalisé, le facteur limitant la précision finale des anomalies de Bouguer est la connaissance du relief autour des points de mesure. Il est donc fondamental de disposer de modèles numériques de terrain précis, d'autant plus précis que les mesures sont effectuées dans une zone présentant un relief accidenté.

Typiquement, pour une étude de l'anomalie de Bouguer à l'échelle d'une région de quelques milliers de km², il faut utiliser un MNT précis à 10 m avec une maille de 50 m. Pour des levés gravimétriques denses au niveau de zones actives, il faut disposer d'un MNT de précision métrique avec une maille de 10-20 m.

En électromagnétisme, les MNT sont essentiels pour tous les types de prospections magnétiques ou électriques du sol. Ces méthodes de prospection nécessitent des mesures espacées de 25 m en moyenne le long de cheminements bien identifiés. Ces cheminements doivent être parfaitement repérés par rapport à la topographie du terrain puisque l'on cherche à mettre en relation des anomalies électriques ou magnétiques avec les accidents géologiques qui y sont associés. De plus, comme en gravimétrie, le MNT est indispensable pour éliminer les effets topographiques inhérents à ces prospections au sol.

Notons également que plusieurs programmes de cartographie globale du champ de pesanteur et de ses variations dans le temps depuis l'espace seront réalisés dans le courant de la prochaine décennie (projets CHAMP, GRACE et GOCE). Il est clair que les données sur le champ de pesanteur issues de ces missions spatiales ne pourront être analysées en terme de structure ou de comportement mécanique de la lithosphère à grande échelle que si l'on dispose d'une information de qualité équivalente sur la topographie. L'obtention d'un MNT global de précision homogène - et de surcroît de grande précision - est la condition indispensable à la réalisation de ces études.

B.1.2. Détermination des anomalies du géoïde sur une zone donnée

La connaissance des anomalies de pesanteur permet de calculer la forme du géoïde à condition de disposer d'une topographie précise. Cette information est utile pour les études de structure et également pour passer d'altitudes nivelées classiques à des altitudes GPS. En effet, les altitudes obtenues par GPS sont exprimées relativement à un ellipsoïde de référence, alors que les données de nivellement classiques sont des hauteurs sur le géoïde. Le passage d'un système à l'autre peut se faire soit par la réalisation, à une époque commune, de mesures GPS et de mesures classiques (très difficile à mettre en oeuvre pratiquement), soit par le calcul des anomalies du géoïde à partir des données gravimétriques disponibles, d'un MNT précis et de quelques points géodésiques mesurés simultanément par les deux méthodes. Le fait de rendre compatibles les données de nivellement collectées dans le passé et les données GPS actuelles est nécessaire pour conserver l'histoire des mouvements verticaux depuis le début des mesures. Sur de nombreuses provinces sismiques, des données de nivellement sont disponibles depuis plusieurs décennies (plus d'un siècle en France), et le fait de savoir convertir précisément ces altitudes sur l'ellipsoïde permet de conserver l'usage des données

anciennes pour des études de déformation à long terme. Le passage d'un système à l'autre présente également une très grande importance pour les géomètres et professionnels de la topographie.

B.1.3. Mesure des déformations du sol par interférométrie radar

Les études de déformation du sol, par exemple après un séisme, sont basées sur l'utilisation de données géodésiques (GPS, nivellement, ...) et en outre depuis quelques années sur l'interprétation d'interférogrammes SAR. Le calcul d'interférogrammes SAR exige un MNT de départ dont la précision conditionne la qualité des images interférométriques générées. La précision requise pour le MNT est de 3 à 5m avec une maille de 20 à 40 m pour exploiter le plus grand nombre possible de scènes en générant toutes les combinaisons susceptibles d'interférer.

B.1.4. Modélisation des champs de déformation

Les déformations sur une région sismique ou une structure volcanique résultent de la réponse mécanique du milieu à une source de perturbation (variations de pressions dans un réservoir magmatique, ouverture d'une fissure éruptive, déplacement sur un plan de faille, ...). La compréhension des phénomènes mis en jeu passe par une estimation des caractéristiques de cette source de perturbation et implique une démarche de modélisation. Ne pas prendre en compte la topographie dans la modélisation peut conduire à des valeurs de paramètres erronées (par exemple, sur-estimation de la variation de volume, mauvaise estimation du pendage des fractures) voire même une non-adéquation du modèle au problème donné. En effet, la présence d'une topographie significative influence le champ de contraintes à l'intérieur du milieu et modifie les conditions aux limites du problème. Une interprétation des champs de déformations sans prise en compte de la topographie est généralement trop imprécise pour être vraiment utile.

B.1.5. Zonage de l'aléa volcanique

Lors d'une éruption volcanique, les produits (coulées de lave ou écoulements pyroclastiques, ...) se mettent le plus souvent en place de manière étroitement liée à la topographie. Suivant leur vitesse de mise en place et leur viscosité, les produits seront canalisés par des topographies plus ou moins hautes. Dans le cas de coulées de lave, un calcul préventif d'écoulements nécessite de disposer d'un MNT de précision 1 à 2 m avec un maillage de 5 à 10m. En raison de leur énergie cinétique élevée, le calcul de mise en place pour les écoulements pyroclastiques nécessite une précision moindre, de l'ordre de 5-10 m. Enfin, l'évaluation du risque de lahars et/ou d'écoulements pyroclastiques secondaires à partir de dépôts récents exige une très bonne connaissance de l'épaisseur de ces dépôts, de l'ordre de 1-2 m.

B.1.6. Etude des déstabilisations de flanc sur les édifices volcaniques

De nombreux volcans ont connu dans un passé plus ou moins récent un ou plusieurs épisodes d'écroulement massif de leur flanc (une fraction à plusieurs dizaines de kilomètres cube). Les déstabilisations de flanc ont des effets dévastateurs d'une part par les explosions dirigées latéralement qu'elles peuvent générer lorsque des terrains saturés d'eau surpressurisée et de gaz divers se retrouvent subitement en surface mais aussi par l'avalanche de débris qu'elles produisent. Lorsque le volcan est située sur une île, ces avalanches de débris peuvent atteindre rapidement la mer pouvant provoquer d'importants tsunamis. Ces phénomènes représentent

des événements souvent catastrophiques et jouent un rôle prépondérant dans l'évolution des édifices volcaniques. Il est donc nécessaire de les identifier dans l'histoire passée des volcans.

Une analyse de géomorphologie quantitative (calculs des pentes, courbures,) peut contribuer à la recherche des événements passés (structure en fer à cheval cicatrice de la tête du glissement, modification du réseau hydrographique, dépôts à morphologie en blocs,): elle nécessite de disposer d'un MNT de précision métrique avec une maille de 10 à 20 m.

B.1.7. Etude des instabilités de versant

Les instabilités de versant représentent actuellement l'un des risques naturels les plus coûteux et les plus meurtriers à l'échelle du globe. Ce terme générique inclut les glissements de terrain, les coulées boueuses, les laves torrentiels, les chutes de bloc... La taille réduite de ces phénomènes (quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres) nécessite l'utilisation d'outils de télédétection à très haute résolution.

Un MNT de précision métrique avec une maille de 10 à 20 m sur les versants potentiellement instables serait un outil extrêmement précieux pour l'analyse morphologique en facilitant la détection et la quantification des structures caractéristiques des zones d'instabilité (escarpement sommital, bourrelets frontaux de pied de glissement, fissures arrières). Ces informations permettent de mieux caractériser la phénoménologie du glissement. En outre la gravité étant le moteur principal des mouvements, une connaissance précise de la topographie est une donnée fondamentale pour le développement de modèles numériques de la dynamique des glissements.

B.1.8. Appréciation du degré d'activité des failles sismiques

L'imagerie satellitaire ou aéroportée a permis de faire des progrès considérables dans l'identification des escarpements et autres traceurs morphologiques de failles actives dans les régions sismiques. Cette identification à partir de données satellitaires permet le plus souvent d'identifier la localisation et l'extension géographique des failles, mais donne une information assez peu précise sur leur rejet, en particulier pour les petites structures. Des campagnes de terrain sont souvent entreprises pour mesurer précisément à la fois le rejet cumulé ainsi que celui correspondant aux derniers événements sismiques. Un MNT d'une précision de 1 m avec une maille de 5 à 20 m permettrait une amélioration très significative dans ce domaine. Un tel MNT permettrait, au delà de la simple cartographie des structures actives sismogènes, de quantifier les déplacements intégrés sur plusieurs cycles sismiques (typiquement sur une fenêtre de temps de quelques 10 000 à 100 000 ans), donnant accès au degré d'activité « long terme » de ces structures (paramètre essentiel en matière d'ingénierie parasismique, actuellement fondée sur un échantillonnage sur une fenêtre de temps de 35 ans à 1000 ans correspondant respectivement aux sismicités instrumentale et historique).

En effet, le degré d'activité des failles affectées par des mouvements rapides (typiquement supérieurs à 1 mm/an) est plutôt renseigné par les décalages emboîtés de marqueurs passifs (fronts montagneux, déviations de rivières..), localisés à proximité de l'accident. Le degré d'activité des failles plus lentes et/ou n'émergeant pas en surface est surtout renseigné des marqueurs dynamiques, et en particulier par le réseau hydrographique. On analyse alors la migration des perturbations liées à l'activité récente, qui sont à longueurs d'onde spatiales beaucoup plus importantes que dans le cas précédent.

B.2. Etudes exploitant la variabilité temporelle de MNT précis

B.2.1 Grandes modifications topographiques (mise en place de coulées, dépôts pyroclastiques, glissements de terrain)

La possibilité d'obtenir de manière répétée des MNT de haute précision, permet d'évaluer l'emplacement et le volume de produits mis en place à la surface terrestre (coulées de lave, dépôts pyroclastiques, ...) ou déplacés (glissements de terrain). Dans le cas de volcans, la remise à jour fréquente de MNT lors de la mise en place de nouvelles coulées est indispensable si l'on veut maintenir la capacité prédictive pour les coulées suivantes (voir 2.B.1.5). Après une mise en place de dépôts pyroclastiques sur un volcan explosif, la comparaison de deux MNT de haute précision obtenus avant et après l'événement pourrait permettre de connaître les zones les plus exposées à la re-mobilisation de ces dépôts instables et susceptibles d'être entraînés sous forme de lahars lors des premiers épisodes pluvieux survenant après l'éruption (cas de l'éruption du Galunggung en 1982 par exemple). Les régions sismiques sont également sujettes à d'importantes variations topographiques lors de séismes : d'une part les déformations co-sismiques elles-mêmes peuvent atteindre quelques mètres pour des séismes de magnitude 7 à 8 ; d'autre part, les séismes s'accompagnent très souvent, surtout en région tropicale, de glissements de terrain.

Dans le cas des instabilités de versant, l'acquisition de MNT à plusieurs époques offrirait la possibilité d'effectuer des bilans de masse extrêmement utiles pour le suivi et éventuellement la prévention des crises dans les zones potentiellement instables.

B.2.2. Cartographie des dommages après un séisme

Un MNT précis à 1m avec une maille de l'ordre de 20 m permettrait de dresser des cartes très précises des dommages après un séisme. De même après un séisme ayant provoqué des destructions en zones urbaines, une étude différentielle du MNT urbain (mission de démonstration) peut fournir très rapidement une localisation fine des destructions, en particulier en utilisant la levée d'ambiguïté apportée par le troisième satellite.

B.2.3. Suivi des déformations du sol d'origine anthropique

De nombreuses zones d'extraction minière, gazière ou pétrolière, donnent naissance à des subsidences pouvant affecter des zones très étendues, générant parfois même de véritables désordres (mines de Lorraine par exemple). Le suivi précis et régulier de telles zones doit apporter des réponses utiles en matière de sécurité civile, et il convient d'en faire une démonstration à caractère probatoire. L'avantage par rapport à l'interférométrie radar classique tient à la capacité d'identifier et de mesurer des mouvements brutaux et pluri-métriques.

B.2.4. Suivi de l'érosion

Dans l'analyse des bassins versants, la quantification de l'érosion régionale fait appel à différents paramètres pouvant être déduits d'un MNT : pente, différence de lithologie, différence d'occupation des sols, etc... L'obtention de plusieurs MNT précis sur une zone donnée peut permettre le suivi de phénomènes d'érosion catastrophique (glissements de terrain, transferts de masse et remobilisation). Par ailleurs il devient possible d'effectuer un suivi dynamique des systèmes dunaires, et sans doute aussi des pergélisols.

La mission ne prévoyant pas de disposer d'un MNT différentiel global, les applications identifiées dans les sections B.2.1, B.2.2, B.2.3 et B.2.4 seront réalisées sur des sites sélectionnés (A définir)

C. Hydrologie

Potentiellement, la roue interférométrique apparaît comme une solution à un problème d'accessibilité à la mesure topographique, mesure indispensable au développement d'une *hydrologie de grande échelle*.

L'hydrologie modélise la composante continentale du cycle de l'eau. Les précipitations (pluies et/ou neige) migrent dans et à la surface du sol, et constituent ainsi l'origine:

- des ressources en eaux des bassins versants (nécessaires à l'agriculture, etc.),
- des crues et des inondations, risques naturels les plus importants en termes de dommages pour de nombreux pays (dont les nôtres).

Les chemins empruntés par ces précipitations, et notamment leurs partitions entre infiltration et ruissellement, dépendent étroitement des caractéristiques hydrodynamiques des sols parcourus (infiltration) et de la topographie des bassins versants (ruissellement et écoulements latéraux dans les premiers mètres des sols).

Dans une modélisation physique, les mesures d'altimétrie doivent ainsi être suffisamment précises pour permettre de prendre en compte les phénomènes de concentration des écoulements de surfaces en réseau linéaire (facteur aggravant de crues) et la redistribution latérale des humidités dans les premières couches des sols (impact sur l'évaporation et donc sur les bilans).

Mais un bassin versant est constitué de versants dont l'échelle caractéristique n'est pas fonction de la taille du bassin. La modélisation physique des processus hydrologiques nécessite ainsi une précision d'altimétrie qui ne diminue pas avec la taille du bassin versant étudié.

A ce jour, la plupart des études hydrologiques se concentraient sur des bassins versants de taille relativement modeste (typiquement 10 000 km²). Des campagnes aériennes et/ou les organismes nationaux pouvaient fournir les MNT nécessaires (avec beaucoup de difficulté dans les pays en développement).

Mais dorénavant l'hydrologie se développe pour devenir aussi une hydrologie de grande échelle. En effet, (i) la quantification des impacts locaux d'éventuels changements climatiques sur la ressource en eaux et les risques d'inondations, et (ii) le couplage entre les prévisions météorologiques et hydrologiques (à méso-échelle et à l'échelle des continents) à court et moyen termes, sont quelques-unes des questions fondamentales et récentes qui sont posées à l'hydrologie.

Elles nécessitent toutes une approche à très grande échelle, couplée aux modélisations atmosphériques et océanographiques.

A l'échelle du globe les types de sols et certaines de leurs caractéristiques hydrodynamiques sont maintenant assez bien répertoriés (ou en passe de l'être). Par contre, la topographie du globe n'est pas encore accessible aux précisions nécessaires à la modélisation physique des processus hydrologiques.

En offrant la possibilité de mesurer la topographie aux précisions requises par la modélisation hydrologique physique, la roue interférométrique permet de fournir les données manquantes au développement d'une hydrologie de grande échelle.

D'un point de vue plus exploratoire et démonstratif, il sera intéressant de tester les capacités de la roue interférométrique à :

- mesurer le niveau de la surface libre tout le long des grands fleuves. Ces niveaux sont en effet d'une importance fondamentale dans la modélisation de l'hydraulique des fleuves puisqu'ils donnent accès aux pentes d'énergie des écoulements. L'assimilation des pentes d'énergie calculées grâce aux mesures de la roue interférométrique dans des modèles hydrauliques peut ainsi laisser espérer une amélioration de la modélisation de l'hydraulique des grands fleuves, qui est de première importance dans les modélisations climatiques par exemple.
- mesurer le contenu en eau des sols superficiels. Une interaction intéressante actif/passif avec le projet de satellite SMOS est à envisager, puisque celui-ci fournit la même variable avec une répétitivité temporelle de l'ordre de la journée, mais avec une résolution spatiale très lâche de l'ordre de 50 km. Des procédures de désagrégation des données SMOS avant assimilation dans les modèles hydrologiques sont donc nécessaires. La roue interférométrique pourrait fournir des données complémentaires, c'est à dire avec une résolution spatiale très précise mais une faible répétitivité temporelle, qui pourraient être directement assimilées dans les modèles hydrologiques, et qui permettraient également de valider les procédures de désagrégation des données SMOS.

D. Océanographie

Un des gros problèmes des océanographes est le manque de données à la mer. Les campagnes à la mer coûtent très cher, elles ne permettent de couvrir que des zones assez restreintes en regard de l'ensemble des océans, et enfin elles ne permettent pas de recueillir les données de façon synoptique. L'utilisation des satellites représente un progrès considérable à cet égard. Ils permettent une couverture globale, de façon quasi synoptique. La masse de données ainsi obtenue peut être utilisée pour le suivi direct des structures océaniques, et pour être assimilée dans les modèles numériques, permettant ainsi de limiter leur dérive.

Actuellement, les satellites fournissent essentiellement deux types d'informations aux océanographes. Par leurs mesures passives, ils permettent de calculer le « rayonnement » des océans. Dans le domaine visible, ceci permet de remonter à la couleur de l'eau (et ainsi par exemple à l'activité primaire); dans le domaine des infra-rouges, on peut accéder à la température de surface. Les altimètres permettent de mesurer le niveau de la mer par une mesure active. Leur précision est meilleure que 5 cm pour le satellite Topex/Poséidon. Ces mesures sont actuellement les seules informations océaniques de nature dynamique que nous communiquent les satellites (une autre technique, l'imagerie SAR, rencontre des problèmes de traitement). C'est dans ce domaine que peut intervenir la roue interférométrique.

Pour en montrer les intérêts, voyons plus précisément ce que nous fournissent les altimètres. En l'absence d'une connaissance précise du géoïde, l'utilisation du niveau qu'ils mesurent n'est possible que sous forme d'anomalie par rapport à un niveau moyen, lui-même calculé en moyennant les mesures du satellite sur plusieurs passages. Ces mesures sont utilisables de façon directe pour le suivi d'anomalies (ondes, tourbillons), et comme données d'assimilation dans les modèles numériques. Par ailleurs, en considérant une hypothèse de

géostrophie (c'est-à-dire que le gradient de pression est équilibré par la seule force de Coriolis), elles permettent d'accéder aux anomalies de vitesse de surface normale aux traces, avec une précision de l'ordre de 10 cm/s. Ceci n'est cependant plus vrai au voisinage de l'équateur (à l'intérieur de $\pm 10^\circ$ de latitude), où l'hypothèse de géostrophie tombe en défaut.

En milieu côtier, un certain nombre d'obstacles supplémentaires apparaissent. La présence de forts gradients de topographie et la proximité des continents réduisent la précision de la mesure du niveau. D'autre part, les altimètres décrochent lorsqu'ils passent au-dessus de la Terre, et ont besoin d'une certaine distance pour raccrocher, c'est-à-dire fournir à nouveau des mesures lorsqu'ils repassent au-dessus de la mer. Globalement, on estime que les mesures altimétriques ne sont pas utilisables à moins de 25 km (au moins) des côtes. Le problème de la correction des marées y est beaucoup plus crucial qu'en milieu hauturier (car les marées y sont plus importantes). Enfin, l'hypothèse de géostrophie utilisée pour accéder aux anomalies de vitesse y est beaucoup moins valable.

La roue interférométrique apporterait des informations de nature différente de celles fournies par les altimètres, puisqu'elle mesurerait directement la vitesse absolue des courants de surface. A cet égard, elle présente un intérêt certain, tant pour le suivi direct de tout type de phénomène océanique (et non seulement d'anomalies), que pour l'assimilation de données. D'autre part, il semblerait qu'elle n'aurait pas les limitations que rencontrent les altimètres au voisinage des côtes, ce qui permettrait d'accéder à des données dans les régions côtières. La précision requise pour être exploitable est donnée par les échelles spatio-temporelles des phénomènes océaniques : pour l'océan hauturier, quelques dizaine de kilomètres et de l'ordre de dix jours; pour l'océan côtier, de l'ordre de 10 km et de quelques jours. Dans tous les cas, les courants sont de l'ordre de quelques dizaines de cm/s.

E. Utilité et besoins pour les applications en glaciologie

E. 1 Les calottes polaires

Les calottes polaires contiennent 99% de l'eau douce stockée à la surface de la Terre. Leur rôle est celui de pôle froid, réserve de masse d'eau gelée, plus ou moins importante suivant les périodes climatiques, qui intervient directement sur les variations du niveau des océans. Deux thèmes d'étude scientifiques peuvent utiliser la roue interférométrique :

- l'étude des variations actuelles d'épaisseur de la glace et de leur contribution aux variations du niveau moyen des océans. En effet, cette thématique est habituellement traitée par altimétrie radar, mais l'altimétrie présente une limite lorsque les pentes de surfaces sont trop importantes ($\sim 1^\circ$). L'altimétrie permet ainsi de suivre 80% de la surface des calottes polaires, mais s'avère inapte au suivi des régions côtières. Le suivi de ces régions côtières est pourtant primordial pour fermer le bilan de masse parce que ce sont les régions qui réagissent le plus rapidement à un changement de climat.
- l'étude de la dynamique des calottes polaires et de leur capacité de réaction à un changement climatique à plus ou moins long terme. Deux quantités sont utiles pour cette thématique, la topographie précise et le champ de vitesses d'écoulement de la glace en surface qui sont toutes les deux accessibles avec la roue interférométrique.

La roue interférométrique peut servir de démonstrateur dans le cadre de la première thématique, et fournir une topographie précise de référence pour d'autres missions, qu'elles soient du même type ou basées sur des techniques différentes (par exemple les missions d'altimétrie Laser). La deuxième thématique peut se contenter de cette seule mission pour l'objectif de topographie précise pour l'étude de la dynamique ainsi que pour la mesure de vitesses d'écoulement, par interférométrie.

E. 2. Les glaces de mer

Les glaces de mer induisent un important forçage du climat des hautes latitudes à l'échelle annuelle et inter-annuelle. Elles régulent les échanges océans atmosphère et stockent de l'énergie sous forme de chaleur latente. L'étendue des glaces de mer est maintenant surveillée en mode opérationnel avec le concours de nombreux instruments de type AVHRR. En revanche, une inconnue forte que la roue interférométrique peut permettre de mesurer reste l'épaisseur de ces glaces de mer, directement reliée à une quantité d'énergie. La méthode utilisée serait basée sur la mesure de différence de niveau entre l'océan libre et l'océan gelé aux alentours des "trous d'eau" (méthode dite du "free-board").

La roue interférométrique peut servir de démonstrateur dans le cadre de cette thématique et éventuellement d'outil pour des études locales sur une courte durée.

E. 3. Les glaciers alpins

Les glaciers alpins constituent d'excellents témoins des variations actuelles de climat. Il s'agit d'étudier leur retrait, mais aussi leur instabilité par le suivi de leur ligne d'équilibre (liée à la forme du glacier). L'établissement d'une topographie de ces glaciers est une première étape qui peut servir de base pour un suivi temporel, c'est aussi une donnée utile pour tester l'état de stabilité ainsi que pour contraindre les modèles numériques de vidange du glacier.

La roue interférométrique peut servir de démonstrateur pour cette thématique, mais aussi de base pour un suivi à long terme. Une limite d'application est à prévoir pour les glaciers trop pentus ou dans des vallées trop encaissées.

F. Applications de la mesure bistatique

En amont des différentes thématiques, le principe même de la mesure ouvre des perspectives sur l'utilisation de l'observation radar des cibles (image d'amplitude). L'information bistatique nous donne non seulement la rétrodiffusion du satellite actif, mais aussi la diffusion dans la direction des capteurs passifs, selon des angles différents. On a donc accès à une information angulaire sur la fonction de diffusion de la surface survolée en chaque pixel (σ_0 , $d\sigma_0/d\theta$).

Comme l'étalonnage absolu des micro-satellites n'est pas un objectif nominal de la roue interférométrique, ces études devront être conduites en s'appuyant sur des étalonnages relatifs.

La contrainte est alors plus forte pour séparer les effets de rugosité de surface des effets de constante diélectrique. Cette formulation est générale et doit être précisée pour chaque type de surface. Par exemple, l'humidité des surfaces, la salinité de la glace de mer, les taux d'accumulation sur les calottes polaires...

G. Utilisation dans les SIG (Systèmes d'information géographique)

L'accessibilité de plus en plus aisée à des images spatiales ou aériennes sous forme numérique n'a cessé de poser le problème de la remise en géométrie de ces images afin de les transformer en documents rigoureusement métriques, superposables à des cartes et permettant la gestion de territoires plus ou moins étendus (orthophotographies, images SPOT niveau III, etc...). Parmi les données essentielles qui manquent en imagerie très détaillée, les MNT constituent aujourd'hui un enjeu essentiel. Parmi les applications qui seront beaucoup mieux couvertes si le projet présenté ici voit le jour, nous citerons seulement quelques exemples :

- orthorectification d'images aériennes numériques, évitant une grande partie des processus actuels de restitution photogrammétrique. Les orthoimages obtenues forment de plus en plus souvent le document de base de SIG urbains, et la couche de base d'informations mises à jour régulièrement.
- description fine des environnements urbains pour simuler au mieux la localisation optimale des retransmetteurs de téléphonie cellulaire.
- travaux de cartographie institutionnelle, qui exigent des surfaces considérables de MNT. Les besoins nationaux évoluant vers des échelles de plus en plus détaillées (la France met au point par exemple une base de données topographiques de précision d'un mètre sur tout le pays), les besoins en altimétrie fine ne cessent d'augmenter.
- enfin de nombreux domaines techniques exigent un accès aisé à de tels MNT : agriculture, environnement, forêts, risques hydrologiques et géologiques, etc...

H. Principe de la mesure selon les missions

La mission primaire est la production d'un jeu de données permettant le calcul d'un modèle numérique (MNT) de terrain **global** de la Terre, le calcul effectif étant réalisé à la demande. Les missions probatoires concernent 1) l'exploration du potentiel ultime en MNT très précis (sub-métrique), 2) le test des capacités de mesure des courants côtiers, voire hauturiers, par interférométrie le long de la trace en sélectionnant un angle d'incidence faible dans la gamme permise par le radar émetteur, différent de celui de la mission de référence, 3) l'analyse du comportement physique de l'image radar bistatique et 4) le test en grandeur réelle, et en réception simultanée, de la super-résolution en distance et en azimut. On pourra prévoir de doter la "roue" d'un écartement maximal, en fin de mission primaire, afin de tester (1) et (4) ou bien de la régler à un écart temporel compatible avec la durée de vie des cibles "marines" pour réaliser (2). La demi-seconde du §1 correspond à une base horizontale moyenne d'environ 3.3 km, donc à une base verticale de 1 km. Notons que la mission n'a aucun objectif d'étalonnage lié à l'image d'amplitude.

La mission proposée pourra donc être constituée d'au moins deux phases distinctes :

- 1) Une phase longue de topographie opérationnelle, avec un réglage d'écartement faible (voir plus loin le calcul de sensibilité) et un objectif de couverture global des terres émergées. Une minute de fonctionnement par orbite sur des fauchées de 70 à 100 km de large produit typiquement 30000 km^2 et il y a 5000 orbites par an, mais toutes ne seront pas

utilisables. Cette phase affichera une sensibilité topographique modérée, par exemple de 40 m par frange, et fonctionnera sur pratiquement n'importe quel type de pente.

- 2) Une phase plus courte à sensibilité maximale, où l'écartement est égal à 70% des bases critiques. Cette phase permettra le test de l'amélioration de la résolution d'un facteur 1.7 dans les deux directions. Elle permettra également d'obtenir localement des interférogrammes de sensibilité élevée grâce à une altitude d'ambiguïté plus faible.

Donnons maintenant les ordres de grandeur nécessaires au dimensionnement. Imaginons d'exploiter ALOS à la résolution correspondant à 28 MHz d'échantillonnage et sous 45° d'incidence, au moins dans le cadre de la mission principale. Pour les applications sur l'océan, l'incidence sera de 23°. Ces incidences seront conservées pour ENVISAT, mais avec la bande de fréquence de 16 MHz de ce satellite. Dans les deux cas, la constellation pourra se trouver 150 km devant le satellite suivi, ce qui écarte tout risque de collision même en cas de manœuvres (voir §3).

Les caractéristiques sont alors calculées comme suit :

	ENVI. 23°	ENVI. 45°	ALOS 23°	ALOS 45°
Source d'éclairage radar				
Echantillonnage en distance	16 MHz	16 MHz	28 MHz	28 MHz
Base verticale critique	6.4 km	10.4 km	42 km	66 km
Base horizontale critique	13.2 km	16.8 km	56 km	68 km
Taille de pixel en azimuth	3.9 m	3.9 m	3.4 m	3.4 m
Taille de pixel en distance, au sol	24 m	13.2 m	13.7 m	7.5 m
Surface totale du pixel	94 m ²	51 m ²	47 m ²	25 m ²
Gain en dB pour une cellule 30 x 30 m	9.8	12.5	12.8	15.6
Gain en dB pour une cellule 20 x 20 m	6.3	8.9	9.3	12
Gain en dB pour une cellule 10 x 10 m	0	2.9	3.3	6
Perte de gain en surface d'antenne	4.6	4.6	8.4	8.4
Altitude d'ambiguïté à 70% de la base verticale critique	12.3 m	9.5 m	7 m	5.4 m
Altitude d'ambiguïté à 5% de la base verticale critique	172 m	132 m	99 m	76 m