

Projet soumis à l'Appel à Projets de l'IFR ILEE Janvier 2005**Altimétrie satellitaire radar et suivi des niveaux de cours d'eau : qualification des mesures satellitaires et fusion données satellitaires / données in situ**

Pascal Kosuth, UMR3S

Résumé du Projet

L'objectif de ce Projet est d'élaborer des méthodologies rigoureuses de **caractérisation de la qualité des mesures de niveau de cours d'eau par altimétrie satellitaire radar**, afin de développer le potentiel d'utilisation de ces données par la communauté des hydrologues, en association avec des données terrain.

Les méthodologies envisagées quantifieront à la fois la précision de la mesure instantanée, la pertinence de la période d'échantillonnage effective en regard de la dynamique du système naturel (par des approches hydrologiques et des approches de traitement du signal) et la propagation des erreurs au cours de l'utilisation de ces données (chaînes de traitement, modèles,...). Les déterminants de la qualité des mesures seront analysés : morphologie et dynamique hydrologique des cours d'eau, satellites et capteurs, algorithmes de traitement des formes d'onde, algorithmes de reconstitution de séries continues à partir des données échantillonnées.

Ces méthodes seront appliquées à une centaine de stations limnimétriques et à une centaine d'intersections entre traces de satellites et cours d'eau, choisies sur des fleuves présentant une diversité morphologique et hydrologique.

La production scientifique devrait donner lieu à 3 publications dans des revues de rang A, à l'organisation d'un Colloque international à Montpellier fin 2006 et à la participation à différents congrès et Séminaires.

Le projet associe deux équipes de l'IFR ILEE (UMR 3S et US OBHY) et est ouvert aux équipes désirant s'associer à la démarche. La demande budgétaire est de 17 000 euros sur 2 ans. Un Etudiant Doctorant (Nicolas Bercher, Ecole Doctorale « Terre, Eau, Espace », financement CNES – Alcatel Space) a commencé une thèse à l'UMR 3S sur le sujet et travaillera à temps plein sur le Projet.

1. Type de demande :

Projet de recherche

2. Titre du Projet et nom du porteur :**Altimétrie satellitaire radar et suivi des niveaux de cours d'eau : qualification des mesures satellitaires et fusion données satellitaires / données in situ**

Pascal Kosuth (UMR3S)

3. Unités participantes :**IFR ILEE** : UMR3S, US OBHY, et ouverture souhaitée aux équipes de l'IFR intéressées, notamment l'UMR HydroSciences**Collaborations externes** : LEGOS, LMTG, Alcatel Space, ESRIN, De Montfort University

4.

Argumentaire scientifique :

4.1. Contexte et enjeux,

Le suivi des niveaux des eaux continentales (rivières, lacs, réservoirs, zones d'inondation) constitue l'une des sources majeures de données pour la connaissance et la compréhension du cycle hydrologique, l'étude de la variabilité spatiale et temporelle des ressources en eau, l'analyse des processus hydrologiques et hydrodynamiques, la mise en œuvre de stratégies et de méthodes de gestion des eaux,... Les données sur les niveaux d'eau sont acquises dans le cadre de réseaux d'observation (stations limnimétriques), par des opérateurs humains ou des dispositifs automatisés, avec une précision centimétrique et une fréquence de mesure journalière. Les données sont rassemblées dans des systèmes d'information gérés par des Services Nationaux, des opérateurs publics ou privés, qui se chargent de leur validation, stockage et diffusion et réalisent certains traitements. Plusieurs difficultés sont associées à système : (1) le coût de fonctionnement des réseaux d'observation est élevé ce qui conduit les opérateurs à réduire les dispositifs et se traduit souvent par des lacunes ou des inconsistances dans les séries de données, (2) le délai entre l'acquisition de la donnée et sa mise à disposition potentielle des utilisateurs est souvent long, (3) le rassemblement de données issues de différentes sources (pour des analyses spatiales régionales ou sur des bassins transfrontaliers) est souvent problématique (lacunes, coût, hétérogénéité des données, délai d'accès, etc.). Or les applications opérationnelles d'ingénierie ou de gestion comme les applications scientifiques expriment des besoins croissants en données limnimétriques d'accès rapide, de couverture spatiale et temporelle dense, fiable et homogène, selon des procédures claires et pérennes.

Une technique nouvelle d'observation des niveaux d'eau, *l'altimétrie satellitaire radar*, s'est développée à partir des années 1990, à l'initiative de la communauté des techniques spatiales et de la communauté scientifique océanographique. Basée sur des satellites « recherche » (ERS, Topex Poseidon, ENVISAT) puis « opérationnels » (Jason), l'altimétrie satellitaire radar permet de cartographier le niveau des océans avec une précision centimétrique en déterminant le temps de transfert aller-retour d'une onde radar émise par le satellite et réfléchi par la surface océanique. Cette technique a révolutionné le domaine de l'océanographie en donnant accès à une variable jusqu'ici inconnue (à l'exception des marégraphes côtiers) : elle a permis l'identification, la quantification et la compréhension de processus (oscillations de niveaux dans le Pacifique, montée du niveau des océans,...) et l'alimentation de modèles de circulation océanique.

L'application de *l'altimétrie satellitaire radar aux eaux continentales* s'est faite progressivement à partir de 1995 d'abord sur les mers intérieures et les grands lacs puis sur les grands fleuves (Mississipi, Amazone). La preuve a ainsi été faite que cette technique pouvait apporter une information utile pour le suivi hydrologique des bassins mais un investissement scientifique est indispensable dans plusieurs directions pour qu'elle trouve une place bien définie dans la panoplie d'outils et méthodes mobilisable par les Hydrologues et les gestionnaires de l'eau. Quatre voies de recherche sont actuellement prospectées :

- (1) le traitement des mesures satellitaires sur les eaux continentales pour constituer des bases de données à disposition des hydrologues et climatologues (Projet XXX, Projet CASH)
- (2) l'analyse de la précision et la qualité d'échantillonnage spatio-temporel des mesures satellitaires sur les eaux continentales, leur qualification, leur fusion aux données in situ.
- (3) l'amélioration et l'adaptation aux surfaces continentales des algorithmes de traitement des formes d'onde (retracking) initialement développés pour les surfaces océaniques,
- (4) le développement de nouvelles technologies de mesure satellitaire adaptées aux eaux continentales (lidar, interférométrie, etc.)

Le présent projet est dédié à la seconde voie de recherche (précision et qualité d'échantillonnage de la mesure satellitaire sur les eaux continentales) et vise à renforcer l'interface entre spécialistes de la mesure satellitaire et hydrologues, en intégrant le savoir hydrologique dans le traitement et l'analyse des données satellitaires.

4.2. Objectifs

L'objectif de ce Projet est triple :

- développer **une méthodologie rigoureuse de qualification des mesures de niveau des eaux continentales par altimétrie satellitaire radar** (précision et adéquation de la fréquence d'échantillonnage).
- Mettre à jour les **déterminants hydrologiques et morphologiques de cette qualité**
- guider l'amélioration algorithmique, optimiser la **fusion de données satellitaires et in situ** et leur utilisation dans les modèles

4.3. Cadrage avec les défis de l'IFR ILEE

La présente proposition est cohérente avec le Projet Scientifique de l'IFR ILEE et se positionne à la fois comme

- (1) un investissement méthodologique fort dans le domaine des données d'observation et des systèmes d'information environnementale, potentiellement utile dans de nombreux champs de recherche des Unités de l'IFR,
- (2) une contribution au défi « Impact de la variabilité climatique » par la maîtrise d'une source de données permettant de caractériser spatialement et temporellement les variations actuelles (et futures) du cycle continental de l'eau, en réponse aux changements climatiques et aux pressions anthropiques.

Au-delà de cette cohérence interne le Projet permet également un positionnement à long terme de l'IFR ILEE comme l'un des Pôles de compétence où peuvent s'interfacer Hydrologie et Techniques Spatiales

4.4. Etat de l'art

Depuis 1991 les satellites d'altimétrie radar (ERS1, Topex Poseidon, ERS2, Jason, Envisat), initialement dédiés à la mesure du niveau des océans, ont été progressivement appliqués avec succès au suivi des niveaux des mers intérieures, puis des lacs (3) et enfin des grands fleuves (2, 4), ainsi qu'au rattachement altimétrique des stations limnimétriques fluviales dans un référentiel ellipsoïdal ou géoidal (5). Ils ont également été utilisés pour des études régionales du cycle hydrologique (7). Au cours des dernières années les recherches se sont portées sur l'amélioration des méthodes de correction de la propagation troposphérique du signal, ainsi que sur les algorithmes de traitement des formes d'onde, initialement développés pour les surfaces océaniques et nécessitant une adaptation aux surfaces continentales (6). On peut attendre de ces développements une amélioration de la précision des mesures d'altimétrie satellitaire radar sur les eaux continentales ainsi qu'un accroissement du nombre de mesures interprétées et la possibilité de mesurer les niveaux sur des cours d'eau plus étroits.

En l'état actuel, à quelques rares exceptions près (5), le développement de l'altimétrie satellitaire radar sur les cours d'eau est limité par l'absence de méthodologie rigoureuse de confrontation entre mesures satellitaires et mesures terrain pour quantifier la précision des mesures satellitaires et la relier à la morphologie et à l'hydrologie du cours d'eau. Ainsi à la question « Pour quelle taille de cours d'eau l'altimétrie satellitaire radar permet-elle de suivre les niveaux avec une précision donnée ? » il n'existe actuellement pas de réponse.

Pour pouvoir répondre à cette question une méthodologie doit définir clairement la précision de mesure et analyser statistiquement sa relation avec la largeur du cours d'eau (et éventuellement d'autres variables). Cette méthodologie permettra :

- de comparer pour différentes caractéristiques de cours d'eau les précisions des différents satellites, des différents algorithmes de traitement des formes d'onde, des différentes méthodes de correction de la propagation troposphérique
- de fixer le type de cours d'eau (largeur et hydrologie) pour lesquels la mesure d'altimétrie satellitaire radar garantit une précision compatible avec les besoins des gestionnaires
- de guider les développements algorithmiques vers une amélioration de la précision

Bibliographie :

- (1) Schilkomanov A.I., Lammers R.B. and Vorosmarty C.J., 2002, Widespread decline in hydrological monitoring threatens Pan-Arctic research, *EOS Trans. AGU*, 83, 13-16, 2002.
- (2) Birkett C., 1998, Contribution of the Topex NASA radar altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands, *Water Resour. Res.*, 34, 1223-1239, 1998.
- (3) Mercier F., Cazenave A. and C Maheu, 2002, Interannual lake level fluctuations in Africa from Topex-Poseidon : connections with ocean-atmosphere interactions over the Indian ocean, *Global and Planet. Change*, 32, 141-163, 2002.
- (4) Maheu C., Cazenave A. and Mechoso R., 2003, Water level fluctuations in the La Plata basin (South America) from Topex/Poseidon altimetry, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 3, 2003.
- (5) Kosuth P., Blitzkow D., Cazenave A., Cochonneau G., de Oliveira E., Correa e Castro J., de Oliveira Campos I., Mercier F., Seyler F., Callède J., 2005 Establishment of an altimetric reference network over Amazon Basin using Satellite Radar Altimetry (Topex Poseidon), in preparation
- (6) Berry P.A.M., 2003, Altimeter waveform retracking for land/ocean use, Proceedings of the workshop on Satellite Altimetry, Wuhan, China, 2003.
- (7) De Oliveira Campos, I., Mercier, F., Maheu, C., Cochonneau, G., Kosuth, P., Blitzkow, D., Cazenave, A. 2001. Temporal variations of river basin waters from Topex/Poseidon satellite altimetry. Application to the Amazon basin. C.R. Acad. Sci. Paris 333 :633-643.

4.5. Méthodologie

La méthodologie adoptée pour cette étude est structurée en 5 étapes :

Etape 1. Analyse de la qualité de l'échantillonnage temporel par les satellites d'altimétrie radar. L'échantillonnage théorique à 10 jours de Topex Poseidon et Jason (30 jours pour ERS) implique que la dynamique temporelle du niveau d'eau n'est connue que partiellement.

1.a. Deux approches seront développées pour caractériser l'impact de la période effective d'échantillonnage sur la qualité d'un signal continu :

- une approche « hydrologique » par quantification de critères d'erreur (cm) entre série continue et série reconstituée à partir d'un échantillonnage exact de période donnée,
- une approche « traitement du signal » par analyse fréquentielle du signal continu (transformée de Fourier, ondelettes) et quantification de la partie du signal qui peut être reconstituée selon la fréquence d'échantillonnage adoptée

Ces approches seront mises en oeuvre sur les séries limnimétriques des stations choisies. On testera également différentes méthodes de reconstitution du signal continu à partir des données échantillonnées.

1.b. Ces deux approches seront intégrées en une approche unifiée faisant le lien entre analyse fréquentielle et analyse d'écart. On en déduira des critères de qualité d'échantillonnage. Ces critères seront quantifiés sur une centaine de stations.

Etape 2. Analyse de la précision de la mesure satellitaire. Les recherches réalisées sur les grands fleuves montrent que la précision de la mesure satellitaire se dégrade lorsque la largeur

du cours d'eau diminue, et qu'elle est meilleure en hautes eaux qu'en basses eaux. Une méthode de confrontation entre données satellitaires et données in situ a été développée sur l'Amazonie. Elle consiste à reconstituer la série temporelle de niveaux la plus probable sur une trace de satellite par corrélation entre données satellitaires et données aux stations limnimétriques les plus proches, puis à quantifier la précision par analyse de la dispersion des mesures satellitaires autour de cette série reconstituée et caractérisation des lacunes et de la période d'échantillonnage effective.

2.a. Cette méthode de quantification de la précision sera améliorée (notamment la méthode de reconstitution de la série temporelle la plus probable), standardisée puis testée sur différents fleuves et différents jeux de données.

2.b. Une fois la méthode éprouvée les critères seront quantifiés sur une centaine de traces de satellites.

Etape 3. Développement d'une méthode de « qualification » du suivi de niveaux par altimétrie satellitaire radar (précision associée à la mesure et à l'échantillonnage). La qualité globale du suivi des niveaux par altimétrie satellitaire radar résulte de la conjugaison des incertitudes liée d'une part à la précision de la mesure et d'autre part à la reconstitution d'une série continue à partir de données échantillonnées dans le temps.

3.a. Les résultats des deux premières étapes seront fusionnés pour définir un jeu de critères permettant la caractérisation rigoureuse et reproductible de la qualité des séries de niveaux issues de l'altimétrie satellitaire radar. Ces critères seront quantifiés sur une centaine de traces.

3.b. Un travail de confrontation de la qualité de l'information amenée par les différents satellites d'altimétrie radar actuels (Topex Poseidon, Jason, ERS, Envisat, IceSat) sera mené.

Etape 4. Analyse des déterminants de la qualité : morphologie, hydrologie, algorithmes de retracking, algorithme d'interpolation.

4.a. Les valeurs du critère de qualité d'échantillonnage (étape 1) seront quantifiées sur les stations limnimétriques tests. Elles seront mises en relation avec des variables hydrologiques stables de ces stations (superficie du bassin amont, régime pluviométrique du bassin amont, etc.).

4.b. Les valeurs du critère de précision (étape 2) seront quantifiées sur les stations limnimétriques tests. Elles seront mises en relation avec la morphologie du cours d'eau (largeur du lit mineur, relief environnant, etc.) et son hydrologie (variation intra-annuelle de la largeur inondée, etc.). Cette étape requerra l'acquisition d'information morphologique (in situ, satellitaire, MNT, etc.).

4.c. Les valeurs des critères globaux (qualité des séries de niveaux déterminées par altimétrie satellitaire radar) seront quantifiées sur les stations limnimétriques tests. Elles seront mises en relation avec les caractéristiques des bassins, la morphologie et l'hydrologie des cours d'eau. L'objectif est d'élaborer une méthode et permettant d'indiquer a priori :

- pour une section donnée d'un réseau hydrographique, la qualité de l'information que l'on peut attendre de l'altimétrie satellitaire radar (pour une précision et une période d'échantillonnage données).
- Pour un satellite donné (précision et période retour fixée) la qualité de l'information qu'il peut fournir en différents points des réseaux hydrographiques.

La représentation cartographique de ces résultats sera développée.

Etape 5. Fusion de donnée et propagation d'erreur dans les traitements et les modèles. Pour les hydrologues la qualité des séries de niveaux obtenues par altimétrie satellitaire radar

n'est pas seulement intrinsèque mais dépend également du type de traitement et d'utilisation qui en est fait. Un jeu de données de niveaux peut être de bonne qualité pour calculer des moyennes interannuelles ou des amplitudes de fluctuation annuelle, mais insuffisant pour réaliser des prévisions de niveau à une semaine ou analyser des dynamiques de montée de crue.

5.a. Nous analyserons la propagation, dans les modèles et chaînes de traitement utilisant des séries de niveaux en entrée, des erreurs liées aux séries de niveaux issues de l'altimétrie satellitaire radar. Pour cela différents modèles et chaînes de traitement seront sélectionnées pour couvrir une diversité d'applications hydrologiques.

5.b. Une façon de limiter l'erreur liée à l'altimétrie satellitaire radar est de croiser cette information avec les données in situ disponibles, a priori plus précises. Les différentes méthodes de fusion de données, selon le type d'application qui en est fait, seront analysées et développées.

5. Résultats attendus et stratégie de valorisation (chronogramme et livrables)

5.1. Déroulement et collaborations :

Les recherches se dérouleront conjointement à l'UMR3S (Maison de la Télédétection) et à l'US OBHY, sous la coordination de Pascal Kosuth. L'UMR3S coordonnera les étapes 1, 3 et 5, l'US OBHY les étapes 2 et 4, les deux unités collaborant étroitement au sein de chacune de ces étapes. Les collaborations seront également développées avec les Unités de l'IFR ILEE intéressées (notamment l'UMR Hydrosciences pour l'étape 5).

Des collaborations externes à l'IFR ILEE seront développées avec l'US Espace de l'IRD, le LEGOS, l'Université De Montfort et l'ESRIN (algorithmes de traitement des formes d'onde, Projet « River and Lake-Products from altimetry »), ainsi qu'avec le LMTG (mesures sur les cours d'eau Amazoniens, Projet « CASH »).

5.2. Résultats attendus et stratégie de valorisation :

Les principaux résultats attendus sont :

- (a) Différentes méthodes et algorithmes de reconstitution de séries continues de niveaux à partir de mesures échantillonnées par les satellites d'altimétrie radar (avec ou sans données à des stations limnimétriques proches).
- (b) Une méthode de caractérisation de la qualité des séries de niveaux issues de l'altimétrie radar : précision et qualité d'échantillonnage (liant hydrologie et traitement du signal)
- (c) L'analyse extensive de la qualité des mesures d'altimétrie radar fournies par les satellites actuels et une comparaison de la qualité des résultats de ces différents satellites.
- (d) L'analyse des déterminants de la qualité des mesures d'altimétrie radar (morphologie, hydrologie, algorithmique) et une méthode de prévision spatialisée (le long des réseaux hydrographiques) des performances des missions satellitaires radar.
- (e) Des méthodes de fusion de données entre données satellitaires et données in situ et une analyse de la propagation, dans les chaînes de traitement et modèles, des erreurs liées aux séries issues de l'altimétrie radar)

Ces résultats devraient donner lieu, d'ici fin 2006, à 3 publications dans des revues scientifiques de rang A :

- Qualité de l'échantillonnage temporel des séries de niveaux : approches « hydrologique », approche « traitement du signal » et déterminants hydrologiques des contraintes d'échantillonnage,

- Précision de la mesure de niveau par altimétrie satellitaire radar : déterminants morphologiques, hydrologiques et algorithmiques
- Qualité globale des séries de niveaux issues de l'altimétrie radar : déterminants hydro-morphologiques et comparaison des différents satellites et de leur algorithmes de traitement

ainsi qu'à 3 présentations à colloques et à l'organisation fin 2006 d'un Colloque international.

5.3. Enjeux pour l'IFR ILEE :

Jusqu'ici l'altimétrie satellitaire radar a été développée sur les eaux continentales principalement à l'initiative des spécialistes des techniques spatiales. Or la complexité du système physique « eaux continentales » nécessite un fort investissement de la communauté des hydrologues pour tirer le meilleur parti de cette technique émergente et orienter son développement futur. A travers le présent projet l'IFR ILEE peut contribuer de façon significative à ce développement et plus largement à l'interface entre l'outil spatial et les sciences de l'environnement. La présence sur Montpellier de la Maison de la Télédétection et de l'IFR ILEE, la mobilisation d'organismes comme le Cemagref et l'IRD, de l'Ecole Doctorale « Terre, Eau, Espace » (Thèse de Nicolas Bercher) permettent d'envisager un investissement à long terme dans ce domaine porteur.

6. Fiche budgétaire

6.1. Demande budgétaire (fonctionnement)

Recueil de données terrain :	4 000 euros
Acquisition de données satellitaires	2 000 euros
Moyens de calcul	3 000 euros
Participations à Colloques (4)	3 200 euros
Missions de contact et collaboration	1 800 euros
Organisation de Colloque	3 000 euros
Total demandé	17 000 euros

Autofinancement et co-financement

Thèse Nicolas Bercher financée par CNES et Alcatel Space	pour mémoire
Organisation Colloque	UMR 3S : 10 000 euros
Moyens calcul	10 000 euros

6.2. Moyens humains

UMR 3S	Pascal Kosuth	8 semaines
	Nicolas Bercher (Doctorant)	20 mois
US OBHY	Bernard Thebe	8 semaines
	Jean-Pierre Briquet	8 semaines

	2005												2006											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Soumission du Projet	■																							
Choix des traces de satellite et des stations limnimétriques			■																					
Rassemblement des données			■	■	■	■	■	■																
1. Analyse de la qualité de l'échantillonnage temporel par les satellites d'altimétrie radar.																								
1.a. Méth. de reconstitution de séries continues à partir de données échantillonnées				■	■	■																		
1.a. Approche "hydrologique"			■	■	■	■																		
1.a. Approche "traitement du signal"			■	■	■	■																		
1.b. Approche unifiée et définition de critères de qualité liés à l'échantillonnage						■	■																	
1.b. Mise en œuvre sur ~100 stations							■	■	■	■	■	■							■	■				
2. Analyse de la précision de la mesure satellitaire.																								
2.a. Développement de la méthode de quantification de la précision			■	■	■	■	■																	
2.b. Mise en œuvre sur ~100 traces							■	■	■	■	■	■							■	■				
3. Développement d'une méthode globale de « qualification » du suivi de niveaux par altimétrie satellitaire radar																								
3.a. Définition d'un jeu de critères de qualité intégrant précision et échantillonnage								■	■															
3.a. Mise en œuvre sur ~100 traces												■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3.b. Confrontation de la qualité de différents satellites																								
4. Analyse des déterminants de la qualité des séries de niveau issues de l'altimétrie satellitaire radar																								
4.a. Déterminants de la qualité d'échantillonnage (caractéristiques des bassins											■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4.b. Déterminants de la précision (caractér. morphologiques et hydrologiques)												■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4.c. Déterminants de la qualité globale (caractéristiques des bassins et des fleuves)																								
4.c. Prév. de la qualité des séries de niveaux, représentation cartographique																								
5. Fusion de donnée et propagation d'erreur dans les traitements et les modèles																								
5.a. Propagation des erreurs dans les modèles et chaînes de traitement																								
5.b. Méthodes de fusion de données satellitaires et in situ																								
Participations à Colloques																								

- Participation à Colloque
- Publication
- Organisation de colloque