



HAL
open science

Validation des mesures de l'altimètre SARAL/AltiKa pour l'hydrologie continentale dans les bassins du Gange-Brahmapoutre et de l'Irrawaddy

Florian Jordy

► **To cite this version:**

Florian Jordy. Validation des mesures de l'altimètre SARAL/AltiKa pour l'hydrologie continentale dans les bassins du Gange-Brahmapoutre et de l'Irrawaddy. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2014. dumas-01179252

HAL Id: dumas-01179252

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01179252>

Submitted on 22 Jul 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

Spécialité : Géomètre et Topographe

par

Florian JORDY

**Validation des mesures de l'altimètre SARAL/AltiKa pour l'hydrologie
continentale dans les bassins du Gange-Brahmapoutre et de l'Irrawaddy.**

Soutenu le 7 JUILLET 2014

JURY

PRESIDENT : M. Mathieu BONNEFOND

MEMBRES : M. Laurent POLIDORI Professeur référent

M. Frédéric FRAPPART

M. Fabrice PAPA

Remerciements

Mes remerciements vont tout particulièrement à Frédéric Frappart et Fabrice Papa qui m'ont très chaleureusement encadré. Et malgré le fait que Fabrice soit en Inde, ils m'ont guidé et fait part de leurs connaissances avec une grande disponibilité. Au-delà de leurs conseils et leur soutien qu'ils m'ont apporté, cette période passée avec eux fut une expérience riche humainement au cours de laquelle j'ai découvert le monde de la recherche scientifique.

D'autre part je tiens à remercier le LEGOS et le GET, et plus particulièrement Mme Mena, de m'avoir accueilli.

Mes pensées vont à bien évidemment aussi à ma famille pour son précieux soutien.

Merci à Laurent Polidori pour ses conseils et son aide.

Enfin je souhaite remercier l'ensemble de mes collègues stagiaires du LEGOS et du CNES. Grace à eux, le stage n'en est devenu que plus agréable.

Liste des abréviations

- BWDB : Bangladesh Water Development Board
- CNES : Centre National d'Etudes Spatiales
- CTOH : Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère
- DORIS : Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite
- EMQ : Ecart Moyens Quadratiques
- Envisat : Environmental Satellite
- EPOC : Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux
- ERS : European Remote Sensing Satellite
- ESA : European Space Agency
- GNSS: Global Navigation Satellite System
- GPS: Global Positioning System
- GRACE: Gravity Recovery and Climate Experiment
- IGN : Institut Géographique National
- ISRO : Indian Space Research Organization
- LRA : Laser Retroreflector Array
- LEGOS : Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales
- NASA : National Aeronautics and Space Administration
- NSE : Nash-Sutcliffe Efficiency
- OMP: Observatoire Midi-Pyrénées
- SARAL : Satellite with Argos and AltiKa
- SPOT: Satellite Pour l'Observation de la Terre
- SWOT : Surface Water Ocean Topography
- TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission
- WGS84 : World Geodetic System 84

Glossaire

Altimétrie : Elle permet de mesurer les différents niveaux de terrain, afin de positionner un relief ou un objet en hauteur. (Glossaire IGN)

Ellipsoïde : Figure mathématique utilisée pour la représentation en première approximation d'une planète, de la Terre par exemple (IGN).

Géoïde : Surface équipotentielle du champ de pesanteur coïncidant avec le niveau moyen des océans (IGN).

Hauteur ellipsoïdale : Elévation par rapport à l'ellipsoïde de référence

Hydrologie : Science de la Terre qui s'intéresse au cycle de l'eau.

Ionosphère : Couche de l'atmosphère supérieure caractérisée par l'ionisation partielle des gaz.

Micro-onde : Onde électromagnétique de longueur d'onde intermédiaire entre l'infrarouge et les ondes de radiodiffusion.

Onde électromagnétique : Modèle utilisé pour représenter les rayonnements électromagnétiques.

Orbite : Trajectoire immatérielle décrite par un satellite autour d'un astre.

Radar : Système utilisant les ondes électromagnétiques pour détecter un objet ou une surface.

Série temporelle : Suite de valeurs numériques (dans notre cas, hauteur d'eau ou débit) représentant l'évolution d'une quantité spécifique au cours du temps.

Station virtuelle : Intersection virtuelle entre une trace de satellite et une cours d'eau ou un lac. C'est l'endroit à sur lequel les mesures satellites seront effectués.

Trace : C'est la ligne immatérielle formée par l'ensemble des points de la surface terrestre que survole un satellite (CNES).

Troposphère : Partie de l'atmosphère terrestre située au plus proche de la surface du globe.

Table des matières

I.	L'altimétrie satellitaire	9
I.1.	PRINCIPE DE L'ALTIMETRIE NADIR RADAR	9
I.1.1.	<i>PHYSIQUE DE LA MESURE ET PRECISIONS ASSOCIEES</i>	10
I.1.2.	<i>LES CORRECTIONS</i>	11
I.1.3.	<i>LES DIFFERENTES BANDES DE FREQUENCE</i>	12
I.1.4.	<i>LES MISSIONS ALTIMETRIQUES</i>	13
I.2.	L'ALTIMETRIE SPATIALE ET L'HYDROLOGIE CONTINENTALE	17
II.	Zones d'études et contexte	18
II.1.	CHOIX DES ZONES D'ETUDES	18
II.2.	LE BASSIN GANGE-BRAHMAPOUTRE	18
II.2.1.	<i>CARACTERISTIQUES TOPOGRAPHIQUES</i>	19
II.2.2.	<i>CARACTERISTIQUES HYDROGRAPHIQUES</i>	20
II.2.3.	<i>CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES</i>	20
II.3.	L'IRRAWADDY	20
III.	Données utilisées	22
III.1. LES DONNEES ALTIMETRIQUES	.....	22
III.1.1.	<i>PROVENANCE DES DONNEES</i>	22
III.1.2.	<i>DISPOSITION DES DONNEES</i>	22
III.2.	LES DONNEES IN-SITU 23	23
.....	.....	23
III.3. LES DONNES PLUVIOMETRIQUES TRMM	.....	23
IV.	Méthodes	25
IV.1. CREATION DES SERIES TEMPORELLES	.....	25
IV.1.1.	<i>DEFINITION DES ZONES D'ETUDES</i>	25
IV.1.2.	<i>TRAITEMENT DES DONNEES</i>	26
IV.1.3.	<i>LES SERIES TEMPORELLES</i>	29
IV.2. ESTIMATEURS STATISTIQUES UTILISEES POUR LA VALIDATION	.....	31
V.	Comparaisons, Evaluations et validation : Analyse des mesures d'AltiKa sur le Bassin de Gange-Brahmapoutre	32
V.1.	COMPARAISON AVEC ENVISAT	32
V.1.1.	<i>COMPARAISON DE PROFILS DU FLEUVE</i>	32
V.1.2.	<i>COMPARAISON DES SERIES TEMPORELLES DE NIVEAU D'EAU</i>	36

V.2.	COMPARAISON AVEC JASON 2	38
V.3.	COMPARAISON DES HAUTEURS D'EAU AVEC LES STATIONS IN-SITU	39
V.4.	CONCLUSION SUR LA COMPARAISON DES HAUTEURS D'EAU	41
V.5.	APPLICATIONS : ESTIMATIONS DU DEBIT DU GANGE-BRAHMAPOUTRE PAR ALTIMETRIE	41
<i>V.5.1.</i>	<i>ANALYSE ET COMPARAISON DES DEBITS</i>	<i>41</i>
V.6.	APPLICATIONS : COMPARAISON AVEC LES DONNEES TRMM	46
Ouvrages imprimés		48
Travaux universitaires :		48
Articles de périodiques imprimés		48
Sites web		49
Communication dans un congrès		50

Introduction

L'eau douce représente un enjeu économique, social et environnemental important en tout endroit de la Terre alors qu'elle est rare car elle ne représente que moins de 3% de l'eau planétaire et moins de 1% de la surface terrestre (*Papa et al, 2014*). Connaître et comprendre les mécanismes du cycle de l'eau et ses anomalies éventuelles est donc fondamental pour la gestion de cette ressource trop rare. Les eaux douces de surface, les plus accessibles, sont essentielles au fonctionnement de l'écosystème, du climat et des sociétés humaines qui y sont liées. Ces eaux indispensables sont essentiellement situées dans des réservoirs comme les neiges éternelles, les glaciers, les zones humides, les lacs naturels ou artificiels et les rivières. Leur indisponibilité, ou leur excès dans le cas des crues, entraîne de nombreux problèmes dans beaucoup de parties du monde. A titre d'exemple, le sous-continent indien, 4% de la surface terrestre mais plus de 25% de la population mondiale, est particulièrement sensible à ces problèmes de ressources hydriques. Un des pays de cette région du monde, le Bangladesh, est régulièrement victime de crues meurtrières et certaines régions de cette partie du monde sont victimes de sécheresse catastrophiques. A titre d'exemple, en 2012, des glissements de terrains et des inondations ont provoqué la mort de centaines de personnes et en ont déplacées des milliers d'autres.

L'étude des mécanismes expliquant la circulation des eaux de surface est donc essentielle et, pendant plusieurs siècles, les scientifiques ont dû se contenter de mesures in-situ. Même si les mécanismes globaux du cycle de l'eau sont de mieux en mieux connus, les phénomènes régionaux de distribution hydrique le restent relativement peu. Cette méconnaissance est accrue dans les zones difficilement accessibles comme les forêts équatoriales, les zones montagneuses ou les pays instables. Elles étaient donc peu connues et peu comprises. Dans le cadre de conflits liés à la ressource hydrique, l'accessibilité à certaines données est également difficile à la communauté scientifique. Néanmoins l'avènement du secteur spatial a bouleversé la science, y compris dans ce domaine de l'hydrologie continentale.

Les techniques d'altimétrie spatiales utilisant les micro-ondes, autrefois essentiellement utilisées pour l'océanographie pour déterminer le niveau moyen des mers, sont aujourd'hui de plus en plus utilisées pour l'étude de l'hydrologie continentale, notamment pour les lacs importants et les grands fleuves. Par exemple, dès le début des années 90, des études des eaux continentales ont été faites à l'aide des satellites Topex/Poseidon ou Jason 1. A cela on peut ajouter les missions d'imagerie comme SPOT ou la mission gravimétrique GRACE qui sont complémentaires pour déterminer le volume des eaux, notamment en cas de crue ou dans les zones humides.

Le satellite franco-indien SARAL est l'un des derniers nés de cette famille de satellite altimétriques, sa principale nouveauté, en plus d'être issu d'une coopération inédite, est d'embarquer à son bord AltiKa, le premier radiomètre en bande Ka. Les anciens satellites utilisaient plutôt la bande Ku. Cette innovation technologique, ayant de nombreux avantages sur le papier, nécessite d'être évaluée et comparé au regard de données existante, en particulier parce qu'elle sera utilisée dans la future mission SWOT.

Les objectifs de ce TFE seront les suivants :

- Quantifier la qualité des mesures altimétriques de la mission SARAL, la première à utiliser un altimètre fonctionnant en bande Ka, en termes de précision et de dispersion, pour l'estimation des niveaux d'eau et des débits des fleuves, au moyen de données in-situ.

- Déterminer si les résultats obtenus sont meilleurs que ceux issus des mesures effectuées en bande Ku avec les missions précédentes. En effet, d'autres satellites de bande Ku ont déjà été testés avec succès dans leurs mesures pour l'hydrologie continentale, notamment dans notre zone d'étude (*Malbeteau et al, 2013*), sur des lacs-réservoirs (*Maubant et al, 2013*) ou sur d'autres bassins hydrologiques comme le bassin amazonien (*Frappart et al, 2006*).
- Assurer la continuité de l'estimation des débits pour le suivi des transferts d'eau douce dans la baie du Bengale et le forçage des modèles océanographiques (*Benshila et al., 2014*).

Nous utiliserons également des données terrestres provenant de stations hydrologiques, néanmoins ces données ne proviennent pas de la communauté scientifique et devront être manipulées avec des précautions. Elles sont également difficiles à obtenir.

Nous étudierons la fiabilité de ce satellite dans le delta du Bassin Gange Brahmapoutre et sur l'Irrawaddy, nous expliquerons les raisons de ce choix et leurs caractéristiques dans le développement du mémoire.

I. L'altimétrie satellitaire

Du premier altimètre Skylab aux missions actuelles, l'altimétrie spatiale a connu une évolution considérable en termes de précision des mesures. De 50 cm à la fin des années 70, elle est désormais de l'ordre de 2 cm sur l'élévation de la surface des océans. L'altimétrie radar a été initialement utilisée pour le suivi des variations de la topographie dynamique des océans (*Fu et Cazenave, 2001*). Cette technique d'observation spatiale est également employée depuis peu pour le suivi des calottes polaires (*Legresy et Rémy, 1997*) et pour l'étude des variations des niveaux d'eau d'où sont déduites, en combinaison avec d'autres sources de données, différentes observations hydrologiques, comme les débits (*Zakharova et al, 2004*) ou les volumes d'eau (*Frappart et al, 2008*) dans les grands bassins fluviaux.

I.1. Principe de l'altimétrie nadir radar

Comme il est illustré sur la figure 1, l'altimétrie nadir radar mesure directement l'élévation grâce à une pulsation radar aller-retour qui est émise du satellite vers le sol. Cette pulsation radar est une onde électromagnétique qui se propage dans un milieu matériel (l'atmosphère) à la vitesse $v < c$. Pour simplifier la détermination de R , on considère qu'elle se propage à la vitesse de la lumière et on applique des retards liés à la traversée de l'atmosphère. L'onde est réfléchie du sol vers le satellite puis la distance satellite-sol (appelée aussi range R) est calculée grâce à la détermination du temps aller-retour de l'onde Δt .

$$R = c \times \Delta t / 2$$

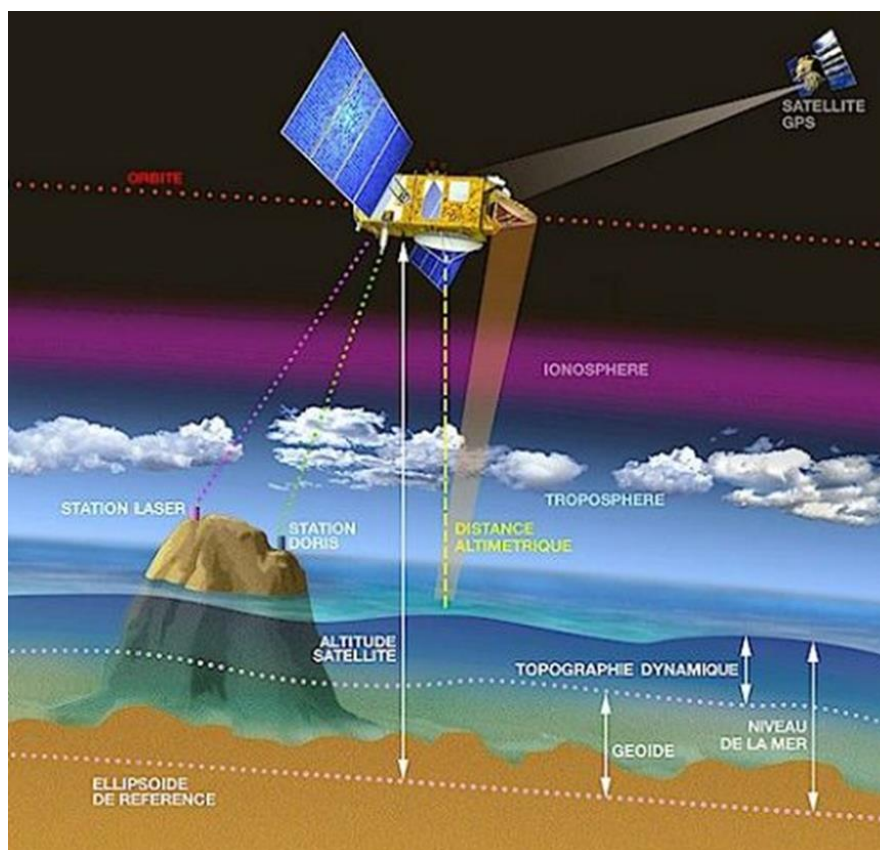


FIGURE 1 : PRINCIPE DE L'ALTIMETRIE SATELLITAIRE (SOURCE : CNES)

Le principal objectif est d'obtenir l'élévation du point mesure par rapport à la surface mathématique de référence qu'est l'ellipsoïde, il est donc nécessaire de connaître la distance d'élévation du satellite lui-même par rapport à l'ellipsoïde. On utilise pour cela qui ont recours aux mesures des systèmes de navigation de type DORIS ou le GNSS qui sont parfois combinés. Le système DORIS, développé par le CNES, est un système civil d'orbitographie composé d'une cinquantaine de balises émettrices permettant de connaître précisément la vitesse du satellite sur son orbite par l'effet Doppler.

La hauteur altimétrique est obtenue de la manière suivante (Chelton et al, 2001):

$$H = H_{sat} - R + C_i + C_d + C_w + C_s + C_p$$

Où **H_{sat}** représente la hauteur ellipsoïdale du satellite, **C_i** la correction du retard ionosphérique, **C_d** et **C_w** représentent respectivement la composante sèche et humide du retard troposphérique, **C_s** est la correction de marée solide et **C_p** la correction de marée polaire.

Les corrections seront détaillées après la partie relative à la physique de la mesure.

I.1.1. Physique de la mesure et précisions associées

Le radar émet une impulsion réfléchiée par la surface terrestre. L'étude de cette forme d'onde est importante afin de caractériser les données. Sur des milieux hétérogènes (océans avec houle ou continents), l'interprétation est en effet difficile.

L'amplitude et la forme des échos (ou formes d'onde) contiennent également des informations sur les caractéristiques de cette surface-cible (figure 2). Afin d'extraire toutes les informations contenues dans les signaux altimétriques, ces derniers font l'objet d'un traitement dont le principe consiste à ajuster la forme d'onde obtenue à un modèle de forme théorique (figure 2).

Il existe plusieurs types de forme d'ondes, une description des éléments de la forme la plus commune est donnée ici :

- Le milieu de front de montée τ (nommé sur la figure *epoch at mid-height*) donne le retard attendu de l'écho en retour
- L'amplitude P du front de signal
- Le bruit thermique P_0
- La pente du front de montée, liée, dans l'altimétrie océanographique, à la hauteur significative des vagues
- La courbe du front de montée, également appelé *skewness*
- La pente du flanc liée au dépointage de l'antenne

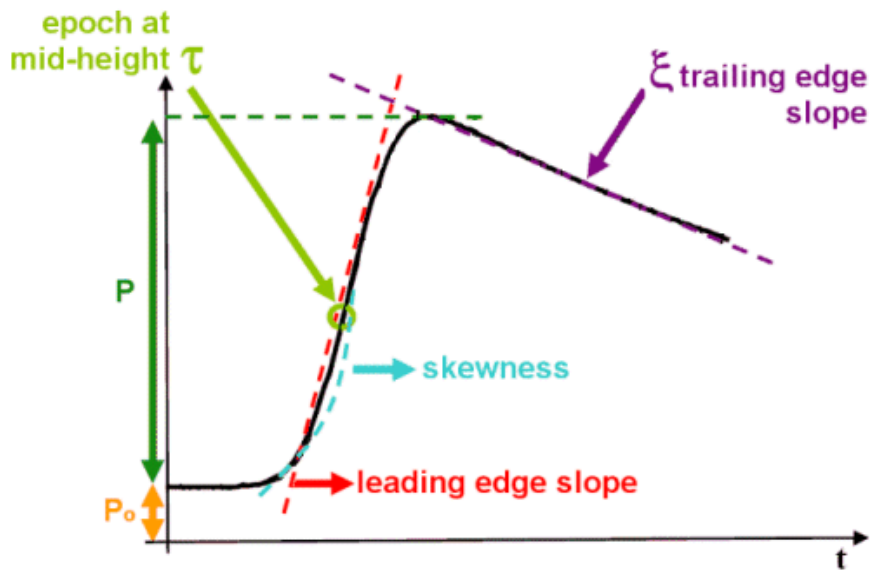


FIGURE 2 : SCHEMA D'UNE FORME COMMUNE D'ONDE (SOURCE : CNES)

A bord du satellite, on effectue l'opération de *tracking* (traitement) pour ajuster le milieu de front de montée dans la fenêtre d'analyse.

Les formes d'onde sur les océans ressemblent souvent au modèle standard de la figure 2 car les missions altimétriques ont été conçues initialement pour la mesure du niveau des mers et que la surface de l'eau est relativement « lisse ». Néanmoins sur les zones continentales, l'impulsion retour n'est pas nette et des phénomènes, comme plusieurs pentes, peuvent survenir. On procède alors à un *retracking* pour diminuer ce phénomène et garantir la précision des données. Il existe plusieurs méthodes de *retracking*. Dans notre étude, nous utiliserons le *retracking* Ice-1, dont la robustesse a été démontrée (Frappart et al, 2006). Ice-1 a été à l'origine utilisée pour les surfaces polaires et fonctionne sur un principe de seuillage nécessitant l'estimation de l'amplitude P de l'onde, cette amplitude d'émission étant donnée par le coefficient de d'émission (et donc indirectement du coefficient de rugosité du milieu).

I.1.2. Les corrections

I.1.2.1. Les corrections troposphériques

Les signaux arrivant au radar altimétrique à bord du satellite nécessitent plusieurs corrections afin d'avoir des données précises. Ces effets sont majoritairement liés à la double traversée de l'atmosphère du signal émis puis réfléchi mais aussi à la déformation de la Terre. Les altimètres à micro-onde sont très sensibles à la présence de vapeur d'eau dans les basses couches de l'atmosphère, également appelée troposphère. La vapeur d'eau produit un phénomène de ralentissement sur l'onde électromagnétique, entraînant une erreur allant jusqu'à 40cm dans le cas d'un air très humide (Tapley et al. 1982).

Cette correction de troposphère humide est de $\sim 0.5 \text{ m} \pm 0.2 \text{ m}$ en fonction des conditions météorologiques locales. Elle se base généralement sur un modèle météorologique ayant un

maillage de 25 km par 25 et reste néanmoins complexe à déterminer.

On estime une correction de troposphère sèche pour remédier aux effets des autres gaz atmosphériques comme le diazote ou le dioxygène qui modifient l'indice de réfraction et induisent des erreurs aléatoires. On utilise un modèle appliquant une correction systématique de 2.3 m avec une composante variable allant de 2 cm à 5 cm.

I.1.2.2. La correction ionosphérique

Dans la couche de l'atmosphère appelée ionosphère, les rayonnements du soleil entraînent une ionisation des gaz. Ces particules chargées ralentissent les ondes électromagnétiques la traversant. L'erreur, d'un maximum de 20 cm, est généralement corrigée par des modèles, en utilisant DORIS ou par la bi-fréquence comme sur Topex-Poseidon ou Jason.

I.1.2.3. La correction de la marée solide

A l'instar des marées océaniques, les parties terrestres sont aussi déformées par l'action des astres selon un mouvement vertical, ce phénomène ne peut être négligé car il peut atteindre 50cm. La marée solide a été modélisée par un certain nombre de scientifiques grâce aux variations constatées des mesures gravimétriques. Les modèles actuellement utilisés sont assez satisfaisants, malgré quelques résidus constatés d'une centaine de nanogals. Néanmoins, ils se basent sur des hypothèses simplifiant à l'extrême la structure de la Terre. De nouveaux modèles, se basant notamment sur la tomographie sismique, sont donc à l'étude.

I.1.2.4. La correction de la marée polaire

Ce phénomène est dû au déplacement de la Terre par rapport à son axe de rotation. Son ordre de grandeur est de 2cm sur plusieurs mois.

I.1.3. Les différentes bandes de fréquence

Les altimètres radars fonctionnent dans diverses bandes de fréquence appartenant toutes au domaine des micro-ondes. Chaque fréquence a ses atouts et ses contraintes qui limitent son usage. Il est possible de combiner les données de plusieurs missions utilisant des fréquences distinctes pour pallier à ses désavantages ou tirer profit des complémentarités.

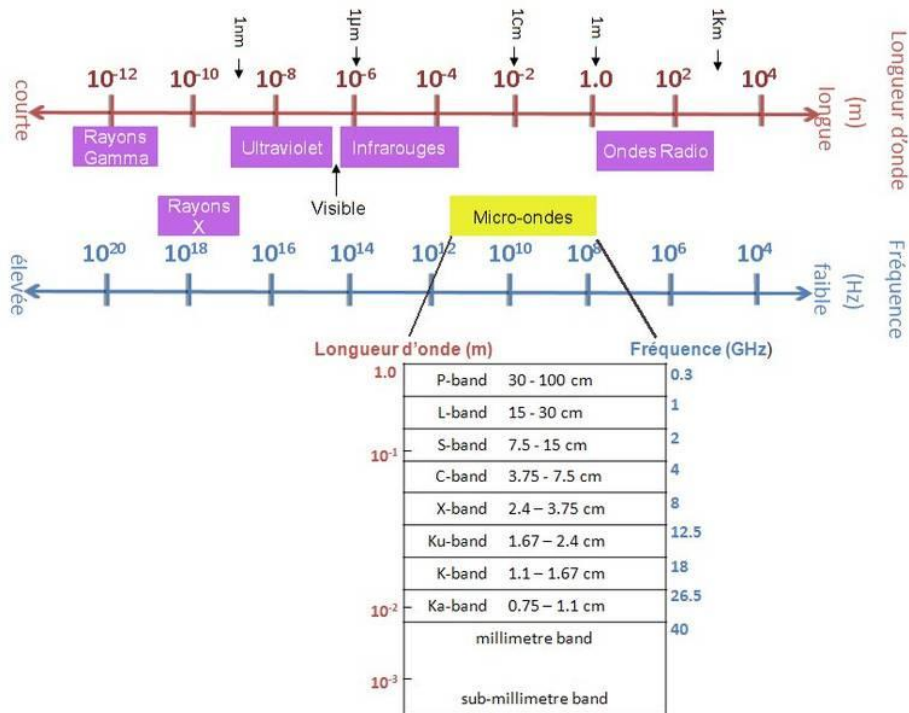


FIGURE 3 : LES DIFFERENTS DOMAINES DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES (SOURCE : LEGOS)

I.1.3.1. La bande Ku

La bande Ku a une fréquence moins élevée que la bande Ka. Elle est la plus communément utilisée en altimétrie comme sur les instruments de Topex/Poseidon, Jason-1, Envisat et ERS 1 et 2. Elle est peu sensible aux perturbations ionosphériques mais très vulnérable aux effets troposphériques dues à la présence de vapeur d'eau. L'association avec les bandes C ou S corrigent ce problème.

I.1.3.2. La bande Ka

La bande Ka (35GHz) est celle utilisée par SARAL/AltiKa. Elle convient bien aux observations de la glace des zones côtières et des terres émergées. Elle offre une large bande passante, une plus haute résolution et peu de sensibilité au contenu électronique de l'ionosphère. Le défaut majeur de la bande Ka est sa sensibilité à la vapeur d'eau troposphérique et à la pluie.

I.1.3.3. Les autres bandes

Ce sont les bandes C (5.3GHz) et S (3.2GHz). Elles permettent de pallier les défauts de sensibilité à la vapeur d'eau de la bande Ku.

I.1.4. Les missions altimétriques

Le principe de l'altimétrie radar a été conçu dans les années soixante et reconnu comme une priorité scientifique au congrès de Williamstown en 1969. Le premier objectif était de mesurer la forme de la Terre, il a évolué au cours du temps et des progrès technologiques. L'erreur des premiers radars spatiaux était de l'ordre de 100 m. Les missions Skylab de 1973, GEOS-3 de 1975 et Seasat de 1978 ont contribué aux améliorations techniques. GEOS-3 a effectué un grand bond en

avant en réduisant considérablement le bruit du signal. Dans les paragraphes suivants, les missions altimétriques, dont les données seront utilisées dans le cadre de mon stage, seront décrites en détail.

I.1.4.1. Les anciennes missions

Ce tableau présente les principales anciennes missions altimétriques. La plupart avaient pour principal but l'étude du niveau des océans ou de la composition en vapeur d'eau de l'atmosphère, mais certaines missions pouvaient être utilisées pour l'observation des reliefs ou de l'hydrologie continentale. Le premier satellite présenté, Geosat, avait par exemple pour mission de déterminer le géoïde terrestre.

TABLEAU 1 : LES ANCIENNES MISSIONS ALTIMETRIQUES, D'APRES *COASTAL ALTIMETRY*, S. VIGNUDELLI, A.G. KOSTIANOV, P. CIPOLLINI ET J. BENVENISTE

Altimètre	Lancement-fin de mission	Organisme responsable	H (km)	Inclinaison (°)	Bande	Fréquence du radar (GHz)	Répétitivité (jours)
Geosat	12/03/1990 à 01/1990	US Navy	800	108	Ku	13.5	17
ERS-1	17/17/1991 à 10/03/2000	ESA	784	98	Ku	13.8	3, 35, ou 168 en fonction des utilisations
ERS-2	21/04/1995 à 05/09/2011	ESA	784	98	Ku	13.8	35
TOPEX	10/08/1992 à 05/01/2006	CNES/NASA	1336	66	Ku C	13.6 5.3	9.9156
Poseidon	10/08/1992 à 05/01/2006	CNES/NASA	1336	66	Ku	13.65	9.9156
GFO	10/02/1998 à 25/09/2008	US Navy	800	108	Ku	13.5	17
Jason-1	07/12/2001 à 01/07/2013	CNES/NASA	1336	66	Ku C	13.6 5.3	9.9156
Envisat	01/02/2002 à 05/2012	ESA	784	98	Ku S	13.6 3.2	35

I.1.4.2. La mission ENVISAT

Le satellite Envisat est le successeur d'ERS-1 et ERS-2 et a été construit par l'ESA. Lancé le 1^{er} mars 2002, il a terminé sa mission le 08 juin 2012. Envisat suivait une orbite héliosynchrone avec une répétitivité de 35 jours. Il a embarqué des altimètres de bande Ku et S ainsi qu'un système d'orbitographie DORIS pour observer le niveau des océans dans le cadre d'étude du climat et de l'atmosphère. Il a aussi eu des applications dans l'océanographie et la glaciologie.

I.1.4.3. Les missions actuelles et futures

L'altimétrie connaît actuellement un développement continu. Les missions passées sont prolongées par des satellites modernisés et de nouveaux objectifs apparaissent, tels que l'étude de phénomènes climatiques complexes comme El Niño ou l'étude des polluants atmosphériques dans certaines tranches du programme Sentinel. Des défis techniques sont en cours d'expérimentation, par exemple l'utilisation de la bande Ka sur laquelle la mission SARAL permettra d'entrevoir les possibilités de mise en œuvre.

Ce tableau présente les principales missions altimétriques aujourd'hui effectives ou en projet.

TABLEAU 2 : LES MISSIONS ACTUELLES ET FUTURES, D'APRES *COASTAL ALTIMETRY*, S. VIGNUPELLI, A.G. KOSTIANOV, P. CIPOLLINI ET J. BENVENISTE

Altimètre	Lancement (prévisions si futur)	Organisme responsable	H (km)	Inclinaison (°)	Bande	Fréquence du radar (GHz)	Répétitivité (jours)
Jason-2	20/06/2008	CNES/NASA	1336	66	Ku C	13.6 5.3	9.9156
Cryosat-2	08/04/2012	ESA	717	92	Ku	13.6	369
HY-2	15/08/2011	China Academy of Space Technology	971	99.3	Ku C	13.6 5.3	14 et 168
SARAL/AltiKa	25/02/2013	ISRO/CNES	800	98.55	Ka	35	35
Sentinel-1	Printemps 2014	ESA	693	98.18	C	5.3	/
Sentinel-3	De 2014 à 2020	ESA	814	98.6	Ku C	13.6 5.3	27
SWOT	2020	NASA/CNES	890	77.6	Ka	36	21

I.1.4.4. La mission Jason-2

Issu de la collaboration franco-américaine entre la NASA et le CNES, le satellite Jason-2 prend la suite du programme Topex/Poseidon et Jason-1. Il suit une orbite non héliosynchrone.

Il embarque la troisième génération, améliorée au niveau du traitement du bruit, des instruments tels que l'altimètre Poseidon ainsi qu'un radiomètre pour déterminer le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère. Il dispose aussi à son bord des systèmes de positionnement Doris (par effet Doppler), GPS (par positionnement satellite) et LRA (par récepteur laser embarqué). Il embarque aussi de nouveaux instruments scientifiques, deux radiomètres et un instrument mesurant les décalages d'horloge) pour améliorer la qualité des mesures.

On attend de ce satellite une précision de 2.5 cm sur la mesure altimétrique. L'altimètre Poseidon-3 de dernière génération, utilisant les fréquences de la bande Ku et C, ne nécessite pas beaucoup d'énergie et utilise la nouvelle technique de la « poursuite en boucle ouverte » utilisant un MNT des zones survolées mémorisés dans l'altimètre. Cette technique offre de meilleures mesures pour les zones côtières.

I.1.4.5. La mission SARAL/AltiKa

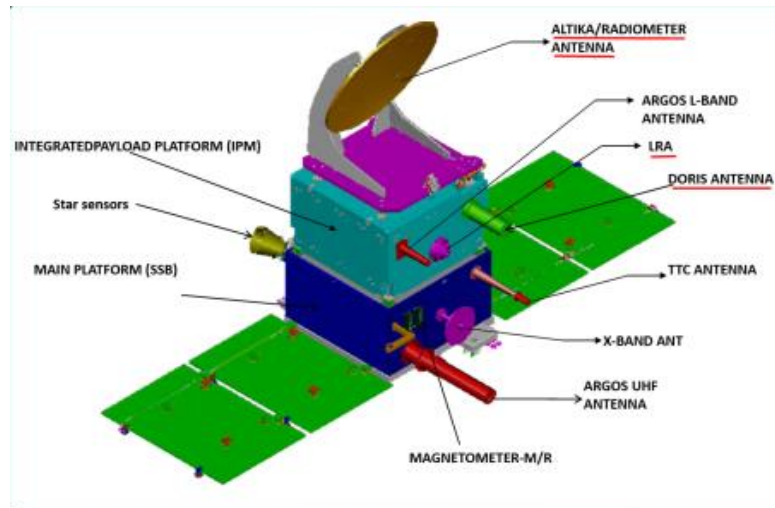


FIGURE 4 : LES INSTRUMENTS SUR SARAL (CEUX A LA CHARGE UTILE ALTIKA SONT SURLIGNES EN ROUGE) (SOURCE : AVISO.ALTIMETRY.FR, 2014)

Ce satellite, lancé le 25 février 2013, a été créé dans le cadre d'une coopération entre le Centre National d'Etudes Spatiales français et l'organisme spatial indien, l'ISRO. Il prend la suite des missions ERS et Envisat en passant sur la même orbite héliosynchrone que ses satellites et en ayant la même répétitivité.

La mission, d'une durée de vie nominale de trois ans, répond à plusieurs objectifs :

- Une observation globale et répétitive des océans, des côtes et des continents
- La continuité du service altimétrie avec Jason-2
- La prise en compte des besoins des chercheurs, notamment ceux étudiant les variations climatiques ou océaniques
-

Le satellite SARAL (Satellite with Argos and AltiKa) embarque un altimètre de bande Ka (3.5GHz) nommé AltiKa. Parmi les avantages de la bande de fréquence d'AltiKa, on peut citer :

- la faible sensibilité aux perturbations ionosphériques
- un plus grand nombre d'échos par seconde
- un bruit moindre sur les mesures océaniques
- une description plus précise des manteaux neigeux et glaciaires
- une meilleure résolution des données.

Cependant, l'utilisation de la bande Ka présente un inconvénient, sa sensibilité à la présence d'eau dans la troposphère. Avant le lancement du satellite et grâce à des tests effectués par Topex/Poseidon, il a été estimé que de telles conditions surviennent essentiellement en zone tropicale et 10% du temps. Cela n'affecte donc pas la plupart des mesures, néanmoins on peut s'interroger sur de tels impacts dans notre zone d'étude, en Inde, particulièrement en période de mousson. Cependant, cette sensibilité peut trouver un débouché scientifique dans l'observation des perturbations océaniques qui demeurent peu connues (Vincent et al, 2006).



FIGURE 5 : L'UNITE DU MICRO-ONDES ALTIMETRIQUE DE L'ALTIMETRE ALTIKA (SOURCE : AVISO)

Un radiomètre bi-fréquence (23 et 37 GHz) mesure le contenu en vapeur d'eau et en eau liquide des nuages. Il permet de corriger les mesures altimétriques mais ne fonctionne pas pendant l'utilisation de l'altimètre pour des raisons d'interférence avec le 36 GHz.

La séparation entre les traces à l'équateur est de 75 km. La résolution spatiale du satellite est de l'ordre de 175 m. La déviation entre la trace théorique et la trace du passage réel peut être de l'ordre de 2 km (*Ghosh et al, 2014*).

1.2. L'altimétrie spatiale et l'hydrologie continentale

Un autre phénomène pouvant affecter la mesure radar (surtout sur les continents) est l'effet de pente (en particulier sur les berges) qui peut changer de façon significative la hauteur de la rivière (*Calmant et al, 2008*). De même, dans certains cours d'eau très méandriformes, les branches ont un effet parasite non négligeable. Des zones urbaines ou la présence de zones inondées temporaires peuvent aussi affecter la qualité de la mesure.

L'erreur de détermination de l'orbite du satellite peut rentrer en compte, néanmoins, la détermination de cette donnée a fait de nombreux progrès au cours des vingt dernières années.

Bien qu'elle soit difficile à mesurer (*Birkett et al, 2002*), on considère généralement que la précision de l'altimétrie radar pour l'hydrologie continentale est d'environ vingt centimètres (*Frappart et al, 2006*). Les altimètres radar sont capables de fournir l'altitude pour des fleuves dont la largeur est supérieure à 200 m (*Santos da Silva et al, 2010*).

Les applications de l'altimétrie spatiale utiles à l'hydrologie continentale sont nombreuses et variées (*Calmant et al, 2008*) :

- Nivellement altimétrique des stations in-situ, comme en Amazonie où il n'existe que peu de repères de nivellement terrestres
- Estimation des débits comme sur le Chari par des techniques de tarage (*Birkett et al, 2000*), ou sur l'Ob (*Kouraev et al, 2004*)

- Estimation des variations spatiales et temporelles des stocks d'eau dans les zones humides, cette application est souvent associée à l'imagerie spatiale (*Frappart et al, 2006*)
- Profil en long des rivières, utiles pour calculer les modèles de crues ou de transport des sédiments. En Inde, le fleuve Godavari a été étudiée dans cette optique (*Singh et al, 2006*)
- Détermination des hauteurs d'eau de rivières ne disposant pas de stations in-situ, à l'exemple du Rio Caqueta de Colombie (*Leon et al, 2006*)
- La gestion des réservoirs (*Maubant et al, 2013*) et des lacs qui subissent notamment l'effet du réchauffement climatique.

II. Zones d'études et contexte

II.1. Choix des zones d'études

Deux zones ont été choisies pour notre étude du SARAL/AltiKa. La première est le bassin du Gange-Brahmapoutre, ce dernier présente plusieurs caractéristiques intéressantes :

- Il est situé en Inde et SARAL est un satellite franco-indien, développé par l'ISRO, il est particulièrement intéressant pour l'un des pays développé dans le programme de connaître les résultats de son outil sur son propre territoire (ou sur un territoire proche). Ainsi, les premiers résultats, issus notamment de mes travaux ont été présentés en avril 2014 à Ahmedabad dans la Gujerat en Inde.
- Le bassin Gange Brahmapoutre est un bassin à fort enjeux sociaux, économiques et politiques.
- Des études (*Malbeteau et al, 2013 ; Papa et al, 2010*) ont été effectuées dans la même zone mais avec d'autres satellites (Envisat Topex-Poseidon ou Jason).
- La détermination des apports d'eau douce dans l'océan Indien présente un grand intérêt scientifique dans la compréhension notamment du climat régional.
- Les cours du Gange et du Brahmapoutre présentent une largeur suffisante pour la mesure satellitaire, de plus leurs régimes hydrologiques sont bien différenciés.

Le bassin de l'Irrawaddy a été choisi pour ses similitudes avec celui du Gange et pour l'intérêt de la comparaison avec des données Jason-2 et Envisat préparées par Yoan Malbeteau.

II.2. Le bassin Gange-Brahmapoutre

Le bassin du Gange Brahmapoutre concentre une part importante de la population mondiale avec 500 millions de riverains. La densité dans les plaines est partout supérieure à 200 habitants/km² et atteint parfois 1000 habitants/km². Le Gange est aussi un fleuve sacré de l'hindouisme et l'un des symboles de l'Inde. Le pèlerinage de la Kumbh Mela forme le plus grand rassemblement humain du monde et Vârânaśi est l'une des premières villes sacrées.



FIGURE 6 : LE BASSIN DU GANGE-BRAHMAPOUTRE (SOURCE : WIKIPEDIA)

II.2.1. Caractéristiques topographiques

Le Gange naît en Inde, dans les glaciers de l'Himalaya à près de 5000 mètres d'altitude, dans une imposante grotte calcaire, appelée localement « la bouche de la vache ». Il constitue pendant 700 km un torrent puis débouche, en amont de Hardwar, dans la vaste plaine Indo-Gangétique. Il reçoit son principal affluent, la Yamuna, à Allahabad. Cette rivière arrose Delhi, Agra et passe tout près du Taj Mahal. Avant cette confluence les deux rivières forment une presqu'île appelée Doab, qui constitue l'une des principales régions agricoles du pays. Le cours du fleuve se poursuit ensuite vers l'est avec une pente très faible. Enfin, à 400 kilomètres de l'Océan Indien, après avoir traversé le Bihâr, le cours d'eau rejoint le Bengale et commence à se diviser en environ 230 bras pour former son delta. Son delta, le plus grand du monde, a une superficie de 60 000 km² et constitue l'une des zones les plus peuplées au monde, partagée entre deux états, l'Inde et le Bangladesh. Les bras arrosent des mégapoles comme Calcutta. Certains d'entre eux sont sujets à des phénomènes d'envasement, à l'exemple de l'Hoogly. C'est vers cette ville que les eaux du Brahmapoutre se mêlent avec celles des bras orientaux du Gange. Le fleuve finit sa course dans une vaste mangrove où il mêle ses eaux à celles du Golfe du Bengale. La trait de côte est très peu lisible dans cette zone et est soumis à de fréquents changements dus aux cyclones, aux inondations, aux sécheresses...

Le Brahmapoutre (« fils de Brahma » en sanskrit) prend sa source dans la Région autonome du Tibet, à environ 5000m d'altitude dans la région du Kailas de la chaîne himalayenne. Il parcourt ensuite le plateau tibétain sur 1600 km, il est appelé localement Tsangpo. Il se dirige vers le sud, traverse la frontière sino-indienne par des gorges gigantesques puis arrose la vaste plaine de l'Assam. Vers la fin de son parcours, après un périple de 2900km l'ayant rendu large d'une dizaine de kilomètres, il se mêle aux eaux du Gange au centre du Bangladesh.

II.2.2. Caractéristiques hydrographiques

Le Gange a une longueur de 2645 kilomètres et dispose de sept affluents majeurs venant du Nord et prenant leur source dans l'Himalaya et de six venants depuis le sud. Ces derniers ont un impact moindre sur le régime hydrologique. Au niveau du delta, les débits diffèrent fortement en fonction de la saison, ils vont de 6000m³/s en période hivernale à plus de 160 000m³/s en période de crue. Les réserves accumulées dans les nappes phréatiques alimentent les rivières en période hivernale. Le système Gange-Brahmapoutre apporte 2400 millions de tonnes de sédiments dans la mer. C'est également le troisième bassin émissaire mondial pour la quantité d'eau douce dans l'océan. Cela entraîne la création d'une couche très chaude (28°C) d'eau douce à la surface du golfe du Bengale qui favorise une évaporation importante favorisant la création de la mousson d'été. 25% de l'eau douce en direction du Golfe du Bengale vient du bassin du Gange-Brahmapoutre.

II.2.3. Caractéristiques climatiques

Les précipitations en Inde varient considérablement en fonction du lieu ou de la saison, certaines zones sont très sèches et d'autres très arrosées. Par exemple, dans le bassin du Gange, les régions du Bihar et du Bengale sont très arrosées, en raison de début précoce et de la stagnation de la mousson après son arrêt dans le reste du pays ; alors que l'ouest l'est beaucoup moins.

Le principal évènement climatique de la région est la mousson d'été du sud-ouest (suivie de celle du nord-ouest) un épisode de fortes pluies gonflant les eaux du Gange et du Brahmapoutre de juin à octobre. La mousson provoque des crues catastrophiques et souvent meurtrières, néanmoins, elle permet l'épanouissement de l'agriculture dans cette zone située à la même latitude que l'Arabie. Ce phénomène se nomme la mousson d'été.

Cependant entre décembre et mars, le climat peut être assez frais et sec (mousson « d'hiver ») dans l'ouest du bassin et dans la région himalayenne en raison d'un anticyclone situé sur la mer d'Arabie. Les températures augmentent de mars à mai, dépassant localement les 40°C, mais le temps reste sec.

II.3. *L'irrawaddy*

L'Irrawaddy est un fleuve birman de 2170 km de longueur. C'est le principal fleuve du pays, le traversant du Nord au Sud. Il naît dans l'Himalaya oriental, traverse le pays dans une vaste plaine dans laquelle est cultivée le riz et se jette dans l'océan indien dans un immense delta très peuplé.

Il diffère principalement du Gange par son orientation exclusivement nord-sud et par le fait qu'il ne dépend pas des fontes de neiges de l'Himalaya pour son cours.



FIGURE 7 : LE BASSIN DE L'IRRAWADDY

III. Données utilisées

III.1. Les données altimétriques

L'objectif de mon stage de fin d'études est l'étalonnage et la validation des mesures de l'altimètre AltiKa à bord de SARAL sur les bassins du Gange-Brahmapoutre.

Pour cela, je vais effectuer des comparaisons entre les hauteurs altimétriques issues des mesures de ce satellite et représentant sur les fleuves le niveau d'eau par rapport à l'ellipsoïde de référence et :

- Des mesures *in-situ* de niveau d'eau et de débit
- Des hauteurs altimétriques provenant d'autres missions

III.1.1. Provenance des données

Les données altimétriques sont disponibles sur le site web du Centre de Topographie de l'Océan et de l'Hydrosphère, service d'observation de l'OMP basé au LEGOS, à l'adresse web suivante :

<http://ctoh.legos.obs-mip.fr>

III.1.2. Disposition des données

Les fichiers .net-cdf contenant les données altimétriques fournit pour chaque mission:

- La hauteur par rapport à l'ellipsoïde de référence (*alt_hf*)
- Les valeurs du géoïde (*geoid*)
- Des distances entre le satellite et la surface issues des algorithmes de ré-analyse des formes d'onde Ice-1, de Ice-2 (*ice1_range_hf* et *ice2_range_hf*)
- De la correction ionosphérique (*iono_corr_gim*)
- De la latitude (*lat_hf*)
- De la longitude (*lon_hf*)
- De modèles corrigeant :
 - Les erreurs de troposphère sèche (*model_dry_tropo_corr*)
 - Les erreurs de troposphère humide (*model_wet_tropo_corr*)
 - Les marées polaires (*pole_tide*)
 - Les marées solides (solid Earth tide)
- Des précisions associées à chaque mesure

Ainsi que des constantes et des données écrites en chaînes de caractères renseignant sur la source, les noms et les instruments.

Le sigle « hf » signifie « haute fréquence », « hf » vaut 20 Hz pour Jason-2 et Envisat soit 350 m entre deux points de mesure et 40 Hz pour SARAL (175 m).

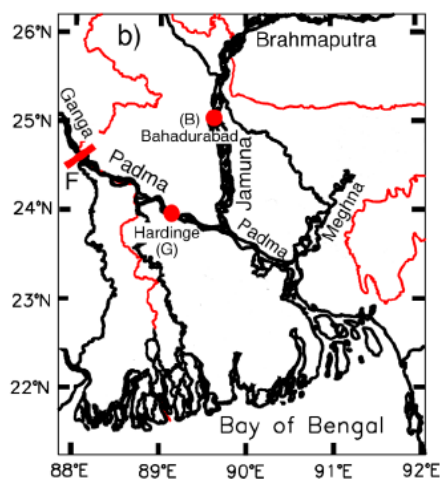
III.2. Les données in-situ

Il est utile d'avoir des mesures de hauteur d'eau in-situ car il s'agit d'une méthode indépendante du satellite et qui n'est pas soumise aux effets de perturbations atmosphériques.

La Bangladesh Water Development Board (BWDB) entretient de nombreuses stations hydrologiques sur les cours d'eau de son territoire, néanmoins les données de ces stations sont gardées confidentielles pour des raisons de conflit de ressource en eau entre l'Inde et le Bangladesh. Le barrage indien de Farrakka sur le Gange est accusé par le Bangladesh d'empêcher un écoulement suffisant de l'eau. Le problème d'accès aux données in situ est présent dans de nombreux pays car les stations sont soit inexistantes, soit mal entretenues soit les données mesurées restent confidentielles. Seulement deux stations ont pu être choisies pour l'étude, l'une sur le Gange, appelée Hardinge Bridge (24.07°N ; 89.03°E) et l'autre, Bahadurabad, sur le Brahmapoutre-Jamuna (25.12°N ; 89.70°E). Ces stations hydrologiques existent depuis les années 1940. On dispose des données pour de 2006 à 2011 pour Hardinge et de 2008 à 2011 pour Bahadurabad.

Les données issues des stations terrestres se présentent suivant un fichier .dat constitué de cinq colonnes. Les trois premières colonnes indiquent la date de la mesure, la quatrième, la hauteur d'eau par rapport à une référence locale et la cinquième colonne, les débits. L'analyse de ses derniers sera détaillée ultérieurement dans une partie consacrée.

Les débits ne sont pas mesurés directement dans les stations hydrologiques. Les débits sont calculés à partir des hauteurs d'eau grâce à des courbes de corrélation.



Les débits calculés par cette méthode n'ont pas une précision connue. On estime néanmoins à partir d'autres travaux (Fekete et al, 2000) que cette précision est de 10 à 20%.

FIGURE 8 : LOCALISATION DES STATIONS HYDROLOGIQUES

III.3. Les données pluviométriques TRMM

TRMM est un programme spatial nippo-américain étudiant les précipitations tropicales. Le satellite de ce programme a une orbite basse de 350 km d'altitude et un angle de 35° par rapport à l'équateur permettant une grande résolution sur les tropiques.

Il dispose de plusieurs instruments comme un radar des précipitations, un imageur micro-ondes, un capteur de foudre et un capteur de radiation terrestre (Huffman et al. 2007).

Ces données nous seront utiles pour comparer les précipitations avec le niveau d'eau mesuré par SARAL. Nous disposons des données pour le bassin du Gange et pour celui du Brahmapoutre.

IV. Méthodes

IV.1. Création des séries temporelles

IV.1.1. Définition des zones d'études

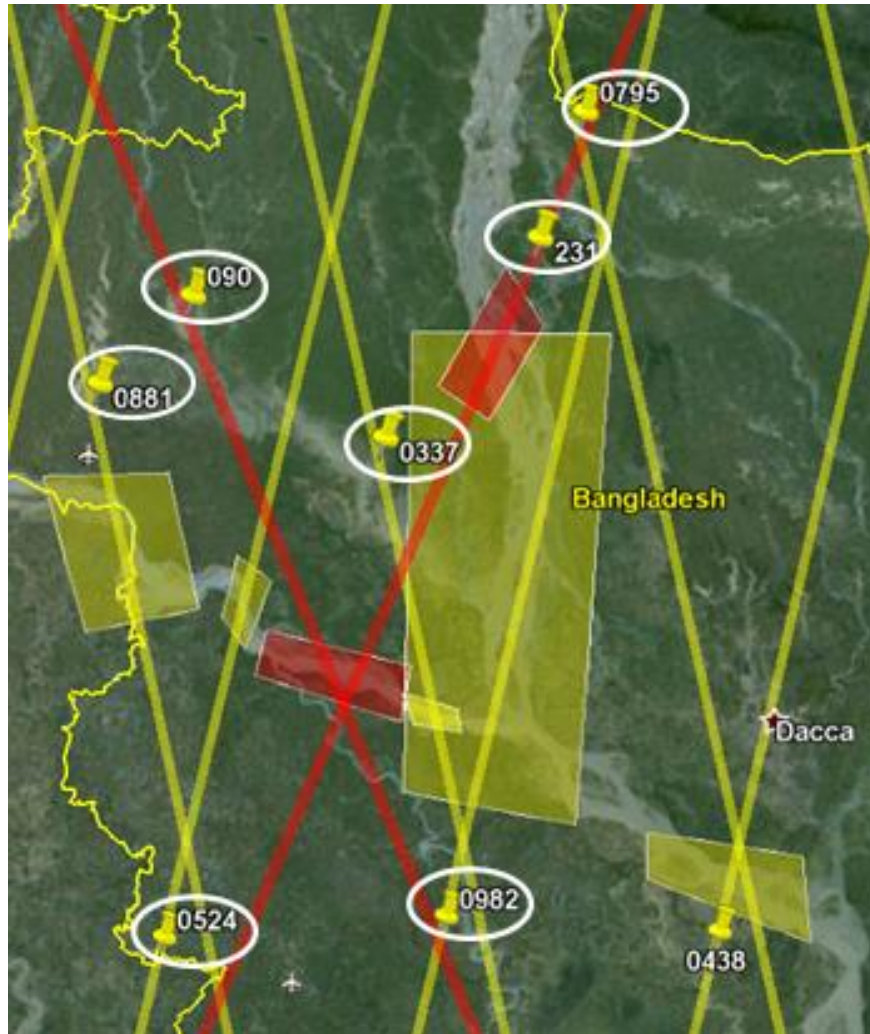


FIGURE 9 : LES TRACES DES SATELLITES SUR LE NORD-OUEST DU BANGLADESH AVEC LEURS NUMEROS ET LES STATIONS VIRTUELLES REPRESENTÉES PAR DES POLYGONES, ALTIKA/ENVISAT SONT EN JAUNE ET JASON 2 EN ROUGE (FOND D'IMAGE : GOOGLE EARTH).

Pour effectuer cette validation, plusieurs zones d'études ont été retenues.

Ces zones présentent les caractéristiques suivantes:

- Elles doivent être situées sur la trace de SARAL et éventuellement à proximité d'une autre trace altimétrique d'un autre satellite.
- Des données AltiKa doivent être disponibles dans cette zone (pas de pertes de données)

- Elles doivent croiser le fleuve (ou l'un de ses affluents principaux) et celui-ci doit être suffisamment large pour rendre les données exploitables.
- Si possible, la station virtuelle doit offrir la possibilité de croiser les données avec celles de Jason ou de stations terrestres.

Ces zones correspondent soit à une intersection de la trace et du fleuve, soit à un survol du fleuve sur une longue distance.

Dans le premier cas, on définira une station altimétrique ou virtuelle pour suivre l'évolution temporelle des niveaux d'eau. Dans le second, on étudiera le profil et la pente du fleuve.

Pour définir ces stations virtuelles, le logiciel Google Earth a été utilisé, les traces de Jason et d'Envisat/SARAL ont été préalablement chargées depuis le site internet du CTOH.

Les zones d'études ont été définies à proximité de la confluence du Gange-Brahmapoutre, zone pour laquelle nous disposons de mesures de niveau d'eau et d'estimation de débit provenant des stations hydrologiques et sur laquelle ont déjà été réalisées des études hydrologiques par altimétrie satellitaire (*Papa et al., 2010*). Il fallait repérer les potentielles stations virtuelles dans cette zone là où les traces SARAL croisaient les grands fleuves et tracer une couche géolocalisée kml d'une quinzaine de kilomètres de large matérialisant la station virtuelle. Une extraction des données de SARAL sur le Bangladesh a été ensuite effectuée. La plupart des stations virtuelles croisaient perpendiculairement le fleuve, car le Gange garde une orientation Nord-Ouest/Sud-Ouest alors que les traces satellitaires sont Nord-Est/Sud-Ouest, ceci a pour conséquence de favoriser l'étude des profils en travers. Néanmoins dans certains cas, l'étude de profils en long a été possible.

IV.1.2. Traitement des données

Grâce à la création des couches virtuelles, il a été possible d'utiliser le programme MAPS, développé par le GET-OMP, le LEGOS-OMP and l'EPOC-OASU pour visualiser et traiter (identification des mesures valides, correction des possibles effets d'accrochage) les mesures de chaque cycle le long des traces (Frappart et al, 2014). Chaque point d'acquisition de données est géoréférencé par sa latitude et sa longitude dans le système WGS84. Bien que le programme permette de visualiser les hauteurs altimétriques utilisant Ice-2, sea-ice ou ocean, nous avons choisi d'utiliser les hauteurs altimétriques obtenues avec l'algorithme sur les altitudes Ice-1 qui sont les plus précises pour l'hydrologie continentale (Frappart et al., 2006 ; Santos da Silva et al., 2010). Il est également possible d'observer d'autres données, comme les variations du géoïde, les valeurs des corrections atmosphériques, le temps ou l'orbite.

Un repérage des formes en « U », caractéristiques de la présence d'un fleuve sur les profils en travers a ensuite été fait. Grâce à l'outil de suppression des points, seul ceux matérialisant le niveau du fleuve ont été gardés puis exportés dans un fichier de données tabulaires .csv.

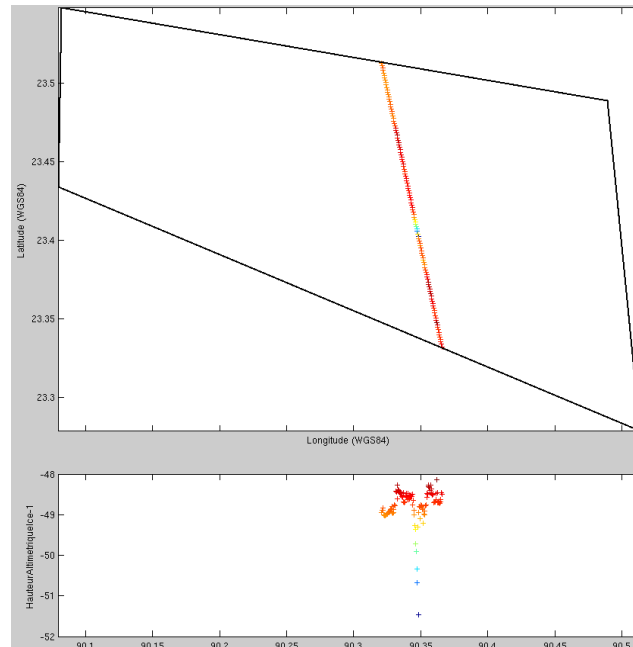


FIGURE 10 : EXEMPLE DE PROFIL EN « V »

Certains cas ont été difficile à traiter, comme les profils en « V », ils terminent en pointe et il est impossible de déterminer où se situe le niveau du fleuve. Dans d'autres cas, il n'y avait pas d'acquisition de la zone ou des mesures acquises visiblement fausses ou inexploitables, possiblement à cause de la présence de précipitations au moment de l'acquisition.

Le programme MAPS a testé intensivement au cours du TFE, permettant son amélioration, par exemple pour afficher plusieurs cycles ou de supprimer des points par zones. Une fenêtre annexe d'affichage des séries temporelles a également créée.

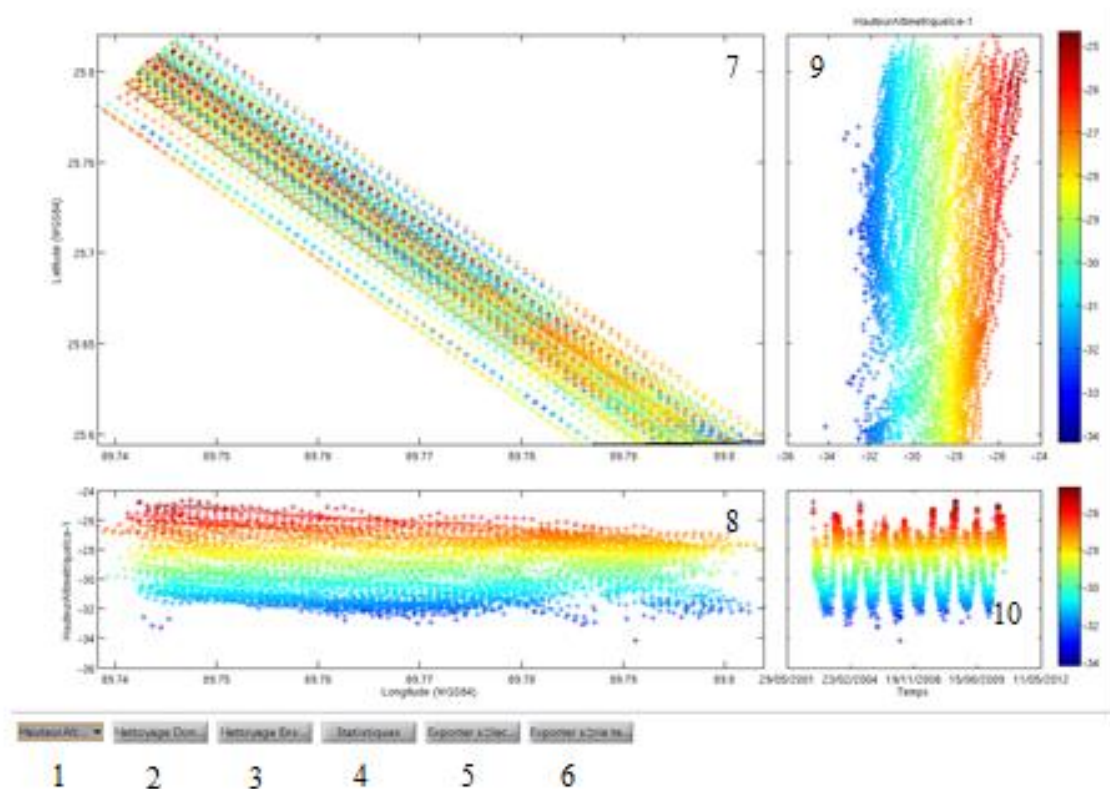


FIGURE 11 : CAPTURE D'ECRAN DU PROGRAMME « ANALYSES TRACES » DE MAPS UTILISANT LE LOGICIEL MATLAB.

Le bouton (1) permet de visualiser les corrections, le géoïde, les différentes hauteurs altimétriques, les numéros de traces et de cycles

Les boutons « Nettoyage données » (2) et « Nettoyage ensemble » (3) permettent de supprimer des points. Il peut s'agir des berges, des îles ou encore de points erronés.

Le bouton « statistiques » (4) permet de pré-visualiser les séries temporelles. Il y en a enfin deux boutons « d'exportation », le premier (5) pour exporter le nuage de points, le deuxième (6) pour les séries temporelles en csv. La fenêtre en haut à gauche (7) offre une vision du dessus des points issus des différents passages du satellite sur la zone. Les fenêtres en bas à gauche (8) et en haut à droite (9) offrent des vues en coupe respectivement par rapport à la longitude et à la latitude. La fenêtre (10) en bas à droite permet la visualisation de la série temporelle.

Une fenêtre annexe sélectionne l'affichage des cycles.

Ces données une fois exportées permettent le traitement et la comparaison des séries temporelles.

IV.1.3. Les séries temporelles

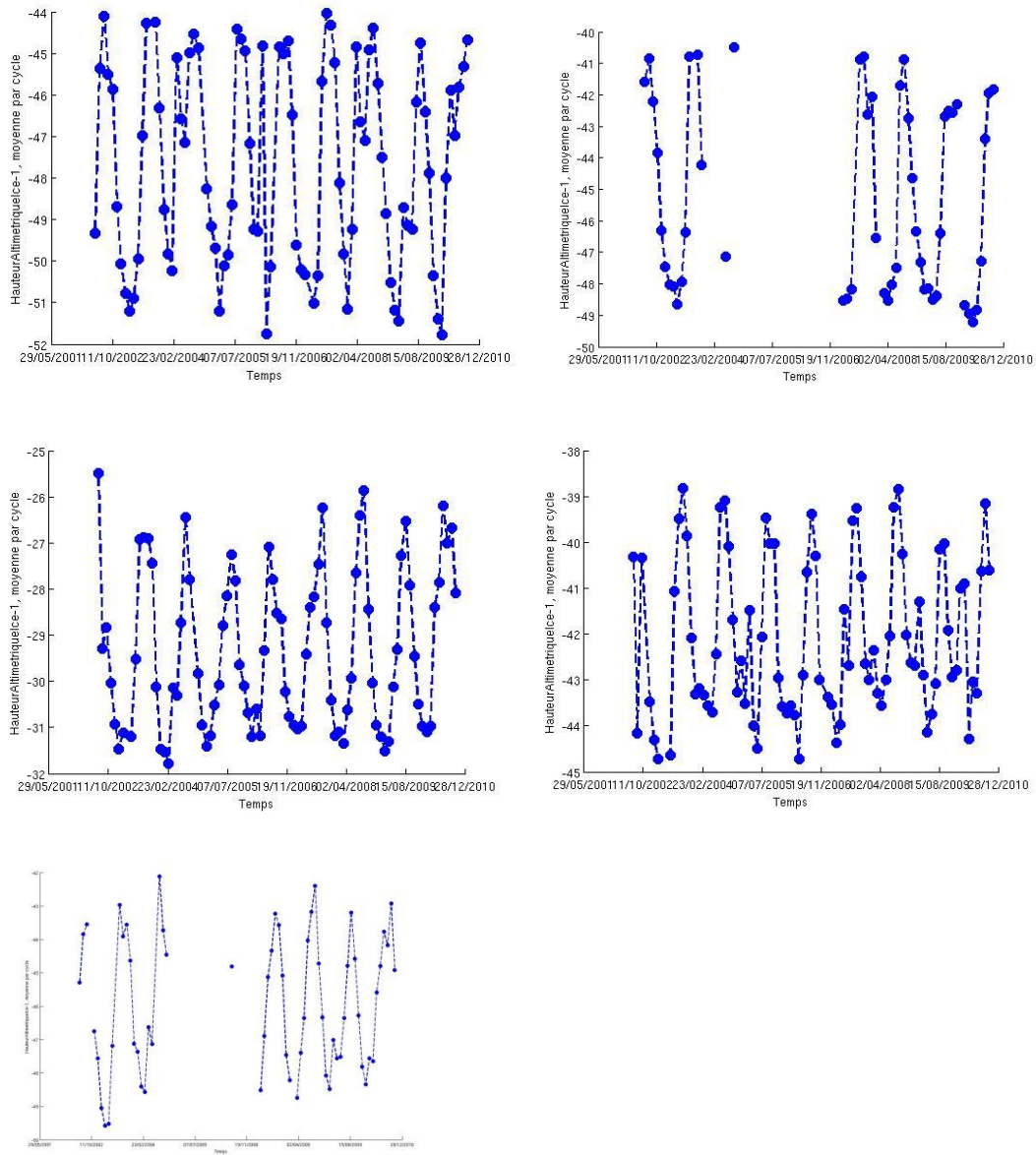


FIGURE 12 : SERIES TEMPORELLES D'ENVISAT DE 2002 A 2010 (SUR LES TRACES 337, 524, 795, 881, 982)

Envisat a acquis des données de 2002 à 2012, j'ai eu à ma disposition les données correspondant à l'orbite nominale jusqu'à fin 2010. Il est utile d'avoir les données sur plusieurs années car on perçoit une grande quantité de scénarios de mousson différents. On distingue nettement les phases de crue (en été pendant la mousson) et les phases d'étiage (en hiver). Le satellite n'a pas acquis de données sur les traces descendantes (en l'occurrence la 524 et la 982) de 2004 à 2007 à cause d'opérations techniques. Les traces 881, 337 et 524 sont situées sur la Gange, la 982 sur le Brahmapoutre et la 795 sur l'union des deux.

Le fichier .csv des séries temporelles comporte différents paramètres : le temps de passage au-dessus du fleuve (an, mois, jour, minute, seconde), les latitudes et longitudes moyennes, les valeurs de hauteurs moyennes et médianes et les dispersions associées à chaque algorithme de retracking.

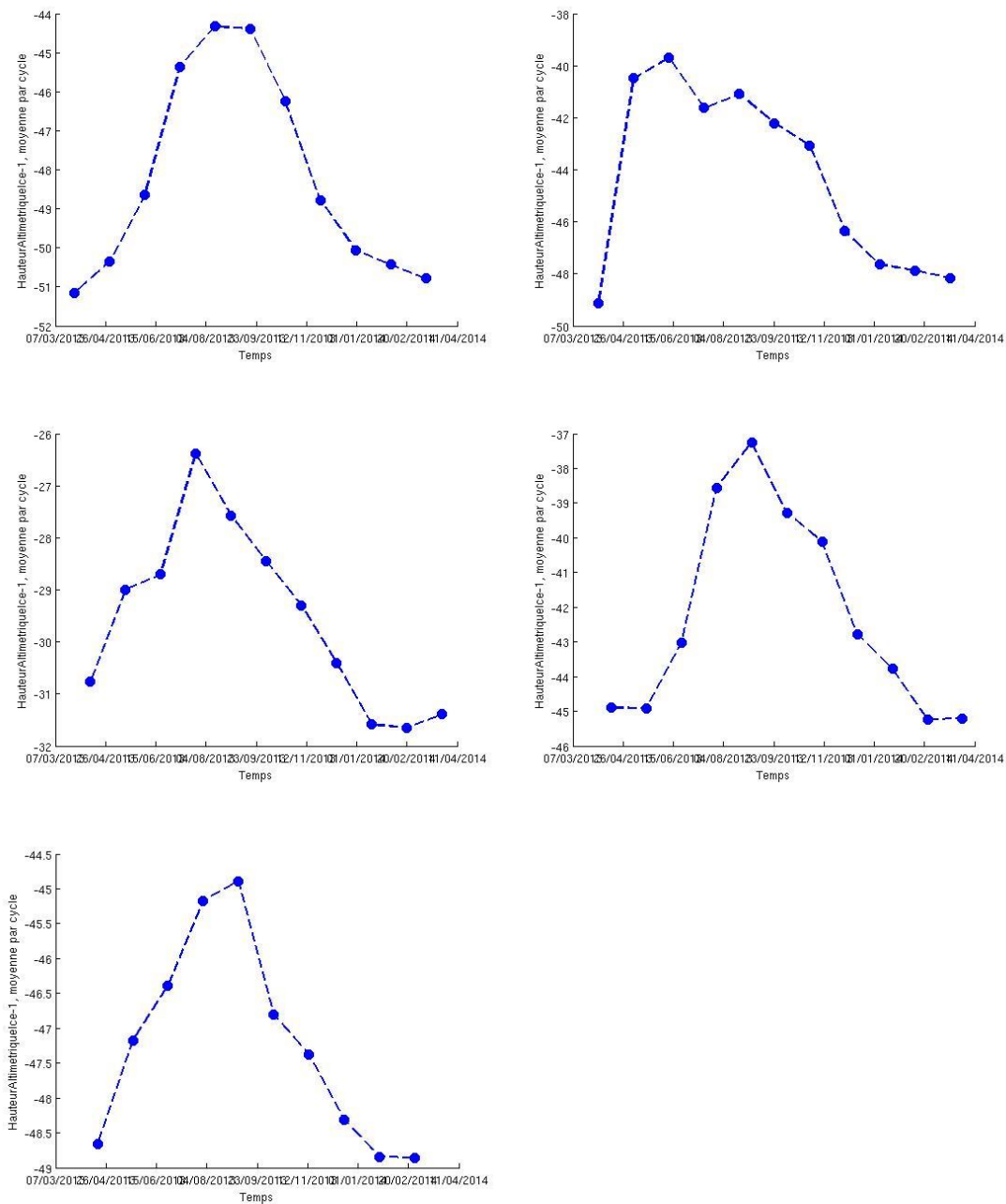


FIGURE 13 : SERIES TEMPORELLES D'ALTIKA DE 2013 A 2014 (SUR LES TRACES 337, 524, 795, 881, 982)

On ne dispose des données d'AltiKa que sur un an, d'avril 2013 à mars 2014. Un phénomène exceptionnel et incomparable avec les années précédentes peut avoir des incidences importantes. Il apparait clairement, notamment sur la 524, que la mousson de 2013 a été précoce sur le Nord-Ouest de l'Inde, ce qui a gonflé de Gange vers mai alors que cela a eu un impact quasiment nul sur le Brahmapoutre (trace 982). Cependant cet impact ne se retrouve pas sur les autres séries temporelles

du Gange (la 881 et la 337), il est donc possible qu'un évènement inconnu ou une perturbation météorologique ait perturbé les mesures.

IV.2. Estimateurs statistiques utilisées pour la validation

J'ai utilisé les estimateurs statistiques suivants pour évaluer la qualité des niveaux d'eau et débits issus de l'altimétrie satellitaire.

Le biais représente l'erreur systématique de décalage entre les séries temporelles, qui peut être due à la prise de références différentes. On constate qu'il reste assez faible vu qu'il est inférieur au mètre dans le cas présent.

Un coefficient de corrélation est le rapport entre la covariance σ_{xy} et le produit des variances $\sigma_x\sigma_y$ des deux séries temporelles, une corrélation permet d'indiquer la qualité de la liaison entre deux données et est généralement considérée comme bonne lorsque son coefficient de détermination est supérieur à 0.7 et excellente lorsqu'on dépasse 0.9. Le coefficient maximum est théoriquement parfait est de 1. La covariance est un nombre permettant d'évaluer le sens de variation de deux variables aléatoires et de qualifier la dépendance de ces variables.

La formule de corrélation linéaire est la suivante :

$$\text{Coefficient de corrélation} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x\sigma_y}$$

L'erreur maximale représente l'écart maximum entre deux altitudes prises le même mois, une valeur haute peut représenter un épisode exceptionnel ou particulièrement précoce..

Le test du coefficient de Nash-Sutcliffe, utilisé dans l'étude de la simulation des débits, montre l'ampleur relative de la variance résiduelle. Il est calculé selon la formule suivante :

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{iobs} - Y_{isim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{iobs} - Y_{imean})^2} \right]$$

Où **Y_i** correspond à la valeur observée (in-situ dans notre cas) de la variable étudiée, **Y_{sim}** est la valeur obtenue grâce à la simulation, dans notre cas ce sera le débit issu des observations satellitaires, et **Y_{mean}** est la moyenne des valeurs observées l'observation.

Les NSE est compris entre $-\infty$ et 1, ce dernier étant la valeur optimale. Un NSE entre 0 et 1 est généralement considéré comme acceptable alors qu'en dessous de 0 montre que la valeur moyenne observée offre une meilleure prédiction que les valeurs simulées, ce qui constitue une raison d'échec du test.

V. Comparaisons, Evaluations et validation : Analyse des mesures d'AltiKa sur le Bassin de Gange-Brahmapoutre

Les résultats des comparaisons entre AltiKa et d'autres mesures sont présentés ici. Tout d'abord, une comparaison entre AltiKa et Envisat sera faite, puis nous détaillerons la comparaison entre AltiKa et Jason et enfin nous confronterons AltiKa avec les mesures de stations hydrologiques in-situ.

Il faut signaler toutefois que les données diffèrent souvent par :

- Les sources. En effet, les techniques, les protocoles de traitement et les conditions de mesure peuvent fortement diverger.
- Les endroits, parfois éloignés de plusieurs dizaines de kilomètres, surtout dans le cas des comparaisons avec les stations hydrologiques in-situ.
- Les périodes de prise de mesure. Envisat et AltiKa n'ont par exemple jamais fonctionné en même temps.
- La fréquence d'échantillonnage liée à la période de retour pour un satellite ou à la fréquence des mesures pour une station in-situ. AltiKa ne peut détecter un épisode de pluie ponctuel.

V.1. Comparaison avec ENVISAT

Pour évaluer la qualité des données d'AltiKa, l'une des méthodes proposées est de comparer celle-ci avec son prédécesseur sur l'orbite, Envisat. Ce dernier a montré sa fiabilité depuis de nombreuses années.

V.1.1. Comparaison de profils du fleuve

Une des traces, la 982, longe le cours du Brahmapoutre au Bangladesh sur une soixantaine de kilomètres dans le sens nord/sud (figure 12). Une comparaison des pentes moyennes et des niveaux d'eau par périodes de l'année est donc possible dans cette zone.

A l'instar des profils en travers, un nettoyage de la trace est tout d'abord effectué. Il est alors nécessaire de repérer sur Google Earth la zone d'étude par un fichier KML, une fois définie, il est possible de commencer à nettoyer le profil, on cherche à trouver une pente au fleuve et ainsi à éliminer les zones hors fleuve comme les berges ou les îles. En période d'étiage, cette méthode est problématique car elle entraîne la perte d'un grand nombre de données du fait de la profusion d'îles. Néanmoins, la pente et le niveau global du fleuve sont conservés.



FIGURE 14 : ZONE RETENUE POUR LA DETERMINATION DU PROFIL DU BRAHMAPOUTRE LE LONG DE LA TRACE 982.

Après le nettoyage du profil, la création de graphiques montre d'une part le niveau d'AltiKa par cycles et les moyennes de niveau par mois pour Envisat (Figure 13 et 14). En ayant des données sur une seule année pour AltiKa, un cycle est associé au mois de passage, on remarque que tous les mois n'apparaissent pas en raison de la période de retour de 35 jours de SARAL. A l'inverse, Envisat nous fournit un suivi du fleuve pendant 10 ans, il est alors possible de faire la moyenne des données par mois. Ce profil moyen mensuel sur dix ans est représentatif de la courbure moyenne du fleuve au cours de cette période. Je vais donc comparer son évolution au cours du cycle hydrologique avec celle obtenue avec les données de SARAL.

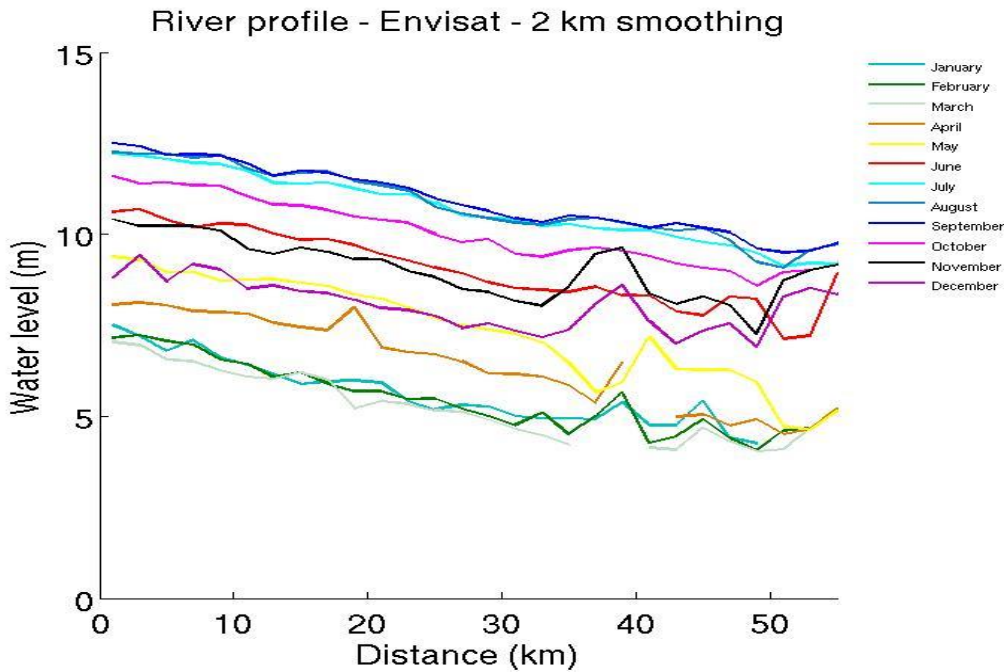


FIGURE 15 : PROFIL EN LONG DE LA TRACE 982 SUR LA BRAHMAPOUTRE REALISEE GRACE AUX DONNEES D'ENVISAT AVEC UN LISSAGE DE 2KM.

Les profils présentés sur la figure 15 présentent une bonne cohérence. La période d'étiage se situe en hiver et celle de crues de juillet à septembre. Le niveau de l'eau varie d'environ cinq mètres. Les creux et les bosses sur les courbes sont dus à des variations locales d'altitude. On retrouve la même disposition de données sur le graphique issu des données décennales d'Envisat (figure 13), l'étiage hivernal étant compris entre 7 à 5 mètres et le niveau maximal de la mousson en été allant de 12 à 10 mètres. Ces résultats sont cohérents avec certains travaux précédents (*Papa et al, 2010*) effectués avec des mesures provenant de Jason-2.

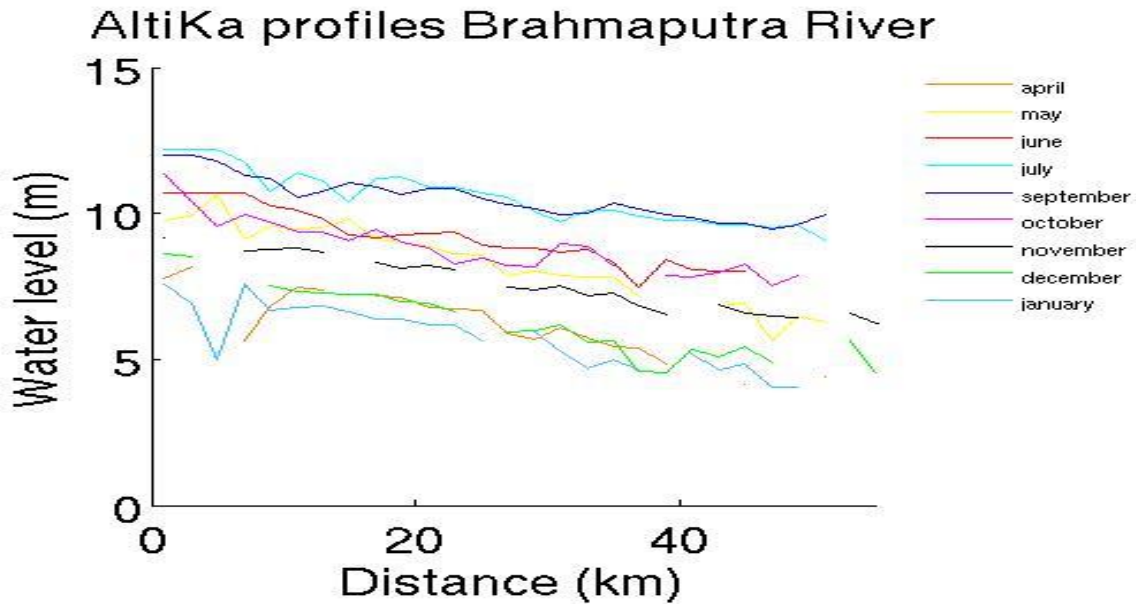


FIGURE 16 : PROFIL EN LONG DE LA TRACE 982 SUR LE BRAHMAPOUTRE REALISE GRACE AUX DONNEES D'ALTIKA.

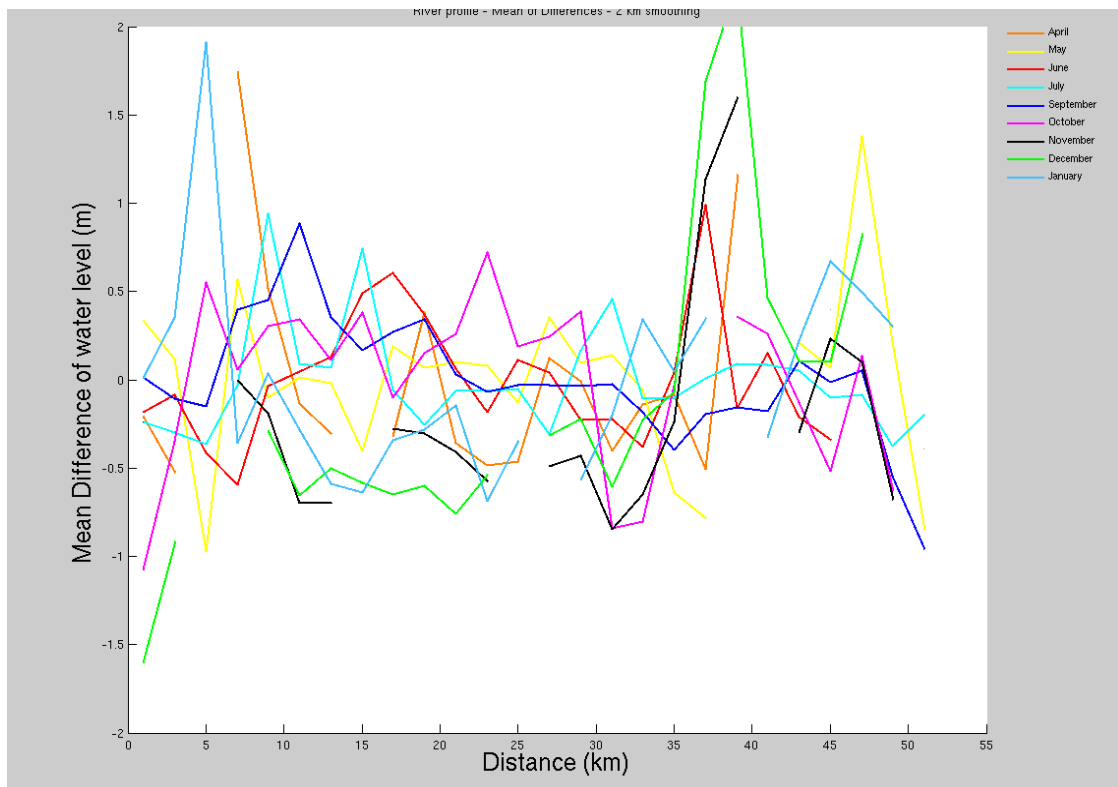
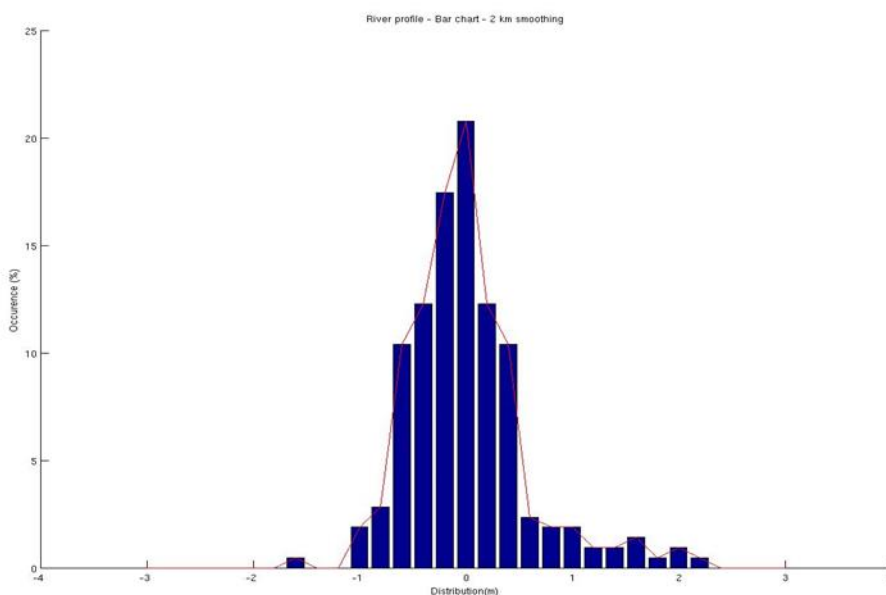


FIGURE 17 : GRAPHIQUE DES DIFFERENCES ENTRE LES MOYENNES D'ENVISAT ET LES DONNEES D'ALTIKA.

La différence entre les profils mensuels moyens d'Envisat et les profils 2013-2013 de SARAL montre des écarts relativement faibles entre les deux satellites, la plupart du temps inférieurs à 1m (figure 16). De plus on peut expliquer les différences par la spécificité de l'année d'acquisition d'AltiKa.

Ces différences ont été reportées sur un histogramme (Figure 16). Les écarts très faibles entre Envisat et AltiKa sont prédominants car l'écart-type de l'histogramme est de 0.56m. La valeur minimale est de -1.57m et la valeur maximale est de 2.27m, la moyenne est très proche de 0 tandis que la médiane est de -0.05m. On note donc une distribution homogène autour de la moyenne et l'absence de biais entre les hauteurs mesurées par les deux altimètres.

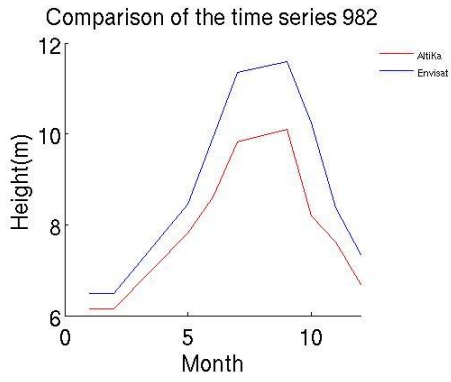
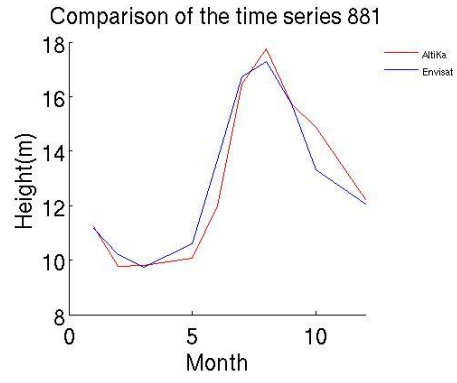
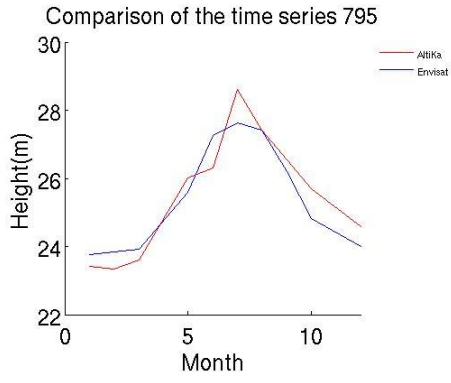
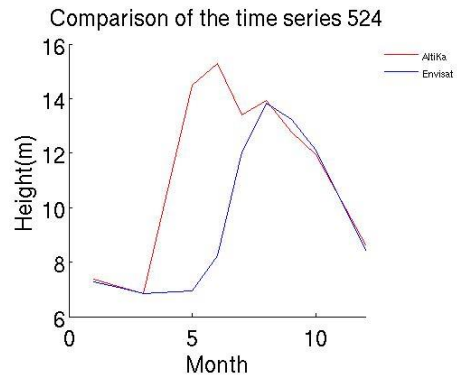
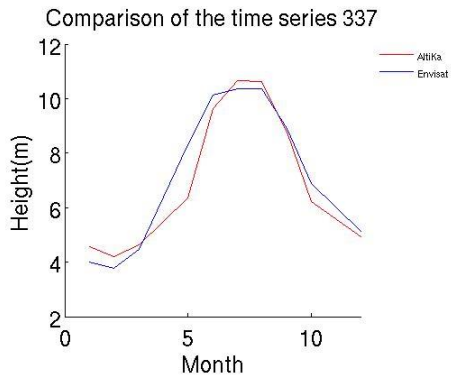
FIGURE 18 : HISTOGRAMME DES DIFFERENCES ENTRE LES MOYENNES ENTRE 2003 ET 2010 DES MESURES D'ENVISAT ET CELLES D'ALTIKA ENTRE AVRIL 2013 ET AVRIL 2014.



V.1.2. Comparaison des séries temporelles de niveau d'eau

A partir de la série temporelle d'Envisat, on a pu créer une autre série temporelle « standard » donnant les hauteurs d'eau moyennes à chaque station virtuelle pour chaque mois sur un an et la comparer aux séries temporelles d'AltiKa. En effet, AltiKa étant plus ou moins le successeur d'Envisat, il était impossible de procéder à une comparaison directe des séries temporelles car les données n'ont pas été prises sur la même période.

Sur les graphiques suivants, la courbe de SARAL est rouge alors que celle d'Envisat est bleue. Elles ont été mises sur la même référence altimétriques. Nous pouvons voir que les séries sont globalement très proches et semblent suivre les mêmes variations. Les mois d'été sont les mois de crues et les mois d'hiver les mois d'étiages. On observe néanmoins un décalage sur la station virtuelle de la 524.



FIGURES 19 : GRAPHIQUES DES SERIES TEMPORELLES D'ENVISAT EN BLEU ET D'ALTIKA EN ROUGE POUR CHAQUE STATION VIRTUELLE

Le tableau 3 donne les résultats des comparaisons entre les séries d'AltiKa et d'Envisat, les lignes bleus concernent le Gange, les roses le Brahmapoutre et les vertes l'Irrawaddy:

TABLEAU 3 : RESULTAT DES COMPARAISONS DE SERIES TEMPORELLES
ENVISAT/ALTIKA

Numéro virtuelle	Station	Coefficient de corrélation	Erreur maximale (m)	Ecart moyen quadratique (m)	Biais(m)
337		0.98	1.52	0.71	-0.57
524		0.50	7.78	3.13	1.71
524	(après décalage de la série de deux mois)	0.94	3.71	1.12	1.43
795		0.94	0.98	0.63	0.11
881		0.88	2.99	1.99	0.31
982		0.98	2.03	0.60	-1.01
079		0.97	4.73	0.99	-2.91
079		0.96	2.77	0.99	-1.74

Les opérations de corrélation montrent des résultats excellents ($R > 0,88$) pour la plupart des stations virtuelles testées, à l'exception de la 524 qui a un décalage de deux mois, possiblement dû à la mousson précoce sur le nord de l'Inde. Les résultats sont également assez moyens pour la 881, l'EQM étant assez mauvais.

V.2. *Comparaison avec Jason 2*

Des séries temporelles sur Jason 2 ont été extraites de la base de données de séries temporelles en ligne du LEGOS, Hydroweb. La trace 231 croise à la fois le Brahmapoutre et le Gange. La trace 90, située tout près, ne traverse que le Gange. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.

TABLEAU 4 : RESULTAT DES COMPARAISONS DE SERIES TEMPORELLES
JASON2/ALTIKA

Numéro Station virtuelle Jason	Numéro Station virtuelle AltiKa	Coefficient de corrélation	Erreur maximale (m)	Ecart moyen quadratique (m)	Biais(m)
231	881	0.97	7.27	0.92	5.78
231	337	0.98	1.39	0.46	-0.66
231	524	0.61	9.01	2.69	3.60
231	982	0.98	5.21	0.89	-4.10
090	337	0.97	1.96	0.63	-0.93
090	524	0.58	8.67	2.77	3.37
090	881	0.98	6.93	0.93	5.50
205	079	0.99	2.11	0.33	1.70
205 (Topex/Poseidon)	079	0.96	3.01	1.00	1.91

A part pour la 524, nous remarquons une excellente corrélation et des EQM acceptables avec AltiKa, néanmoins, les biais restent importants, dus peut-être à la présence de références altimétriques différentes ou de mesures prises à des endroits différents.

V.3. *Comparaison des hauteurs d'eau avec les stations in-situ*

De la même manière qu'avec AltiKa/Envisat, la comparaison entre les stations in-situ et AltiKa s'est opérée grâce à la création d'une série temporelle mensuelle « moyenne » sur un an à partir des données des stations hydrologiques.

Les résultats des comparaisons entre les mesures in-situ des stations et les stations virtuelles des différents satellites passant à proximité sont présentés dans le Tableau 5 pour Bahadurabad et dans le Tableau 6 pour Hardinge. L'intérêt de prendre les données d'autres satellites, souvent issus d'Hydroweb et donc indépendantes d'un travail personnel, est de comparer la fiabilité d'AltiKa par rapport à ses prédécesseurs via des comparaisons avec des mesures in-situ.

TABLEAU 5 : TABLEAU DE COMPARAISON DES SERIES TEMPORELLES ENTRE LA STATION BAHADURABAD SUR LA BRAHMAPOUTRE ET LES SATELLITES

Satellite	Trace	Distance station virtuelle/ station in-situ (km)	Coefficient de corrélation	Différence maximale (m)	Ecart moyen quadratique (m)	Biais(m)
AltiKa	982	88	0.98	9.16	0.70	-8.09
Envisat	982	88	0.99	7.63	0.26	-7.06
Jason (Hydroweb)	231	53	0.27	4.75	2.08	0.89

TABLEAU 6 : TABLEAU DE COMPARAISON DES SERIES TEMPORELLES ENTRE LA STATION HARDINGE SUR LA GANGE ET LES SATELLITES

Satellite	Trace	Distance station virtuelle/ station in-situ (km)	Coefficient de corrélation	Différence maximale (m)	Ecart moyen quadratique (m)	Biais(m)
AltiKa	337	60	0.98	2.87	0.63	-2.00
	524	2	0.52	8.53	3.08	2.35
	881	33	0.98	5.80	0.62	4.55
Envisat (Hydroweb)	377	60	0.93	2.72	1.01	-1.75
	524	2	0.99	1.14	0.25	0.81
	881	33	0.99	5.20	0.34	4.57
Jason (Hydroweb)	090	27	0.99	1.74	0.51	-0.97
	231	35	0.99	1.76	0.43	-1.24

Les corrélations entre les stations au sol et les données satellitales sont globalement excellentes, on dépasse largement 0.90 dans la plupart des cas, y compris dans le cas d'AltiKa alors que l'on a les données de ce satellite que sur un an.

Cependant deux mesures ne conviennent pas, la 524 d'AltiKa et la 231 de Jason sur le Brahmapoutre. Cette dernière, issue d'Hydroweb, présente en effet d'étranges épisodes de crues au printemps, en pleine période d'étiage du fleuve.

Les écarts quadratiques moyens sont bien meilleurs sur les stations virtuelles d'Envisat, étant de l'ordre d'une trentaine de centimètres, ils sont deux fois moins importants que ceux d'AltiKa. Ces résultats s'expliquent par deux raisons :

- Les données in-situ et Envisat ont globalement été acquises en même temps, ce qui n'est pas le cas de SARAL dont les données ont été acquises en 2013-2014. Il faut aussi mentionner que nous n'avons pas de données in-situ pour cette période.
- Les mesures de l'altimètre à bord d'Envisat ont été effectuées sur plusieurs années, ce qui permet de minimiser l'impact des phénomènes extrêmes (crues ou sécheresses).

V.4. Conclusion sur la comparaison des hauteurs d'eau

A l'exception notable de la trace 524 sur le Gange, les mesures d'AltiKa semblent correspondre quasi-parfaitement aux mesures des autres satellites et aux mesures in-situ. Nous pouvons en déduire pour ce qui concerne le suivi de la hauteur d'eau des rivières, AltiKa est fiable.

V.5. Applications : Estimations du débit du Gange-Brahmapoutre par altimétrie

V.5.1. Analyse et comparaison des débits

Les débits du système Gange-Brahmapoutre influencent la circulation des eaux dans le Golfe du Bengale et la Mer d'Arabie, car le bassin est le troisième apport d'eau douce dans l'océan mondial en apportant 25% de l'eau douce arrivant dans le Golfe du Bengale. Les apports d'eau douce influencent grandement la température des eaux de surface et le climat régional, notamment le système de mousson. Il est donc fondamental de connaître les apports d'eau douce dans cette partie du monde.

A partir des débits mesurés par les deux stations *in-situ*, il est possible de déterminer les débits au niveau des stations virtuelles.

Afin d'arriver à cet objectif, il a été fait une courbe de tendance représentant un polynôme au troisième degré entre les débits et les hauteurs d'eau observés à la station in-situ. Cette courbe de corrélation a ensuite été appliquée aux hauteurs d'eau moyennes mensuelles issues des satellites pour obtenir finalement les débits estimés par satellite.

$$Q = Ah^3 + Bh^2 + Ch + D$$

Où Q représente le débit, A, B, C et D sont les paramètres déterminés par la courbe de tendance issue des données in-situ et où h représente la hauteur d'eau déterminée par le satellite.

TABLEAU 7 : PARAMETRES POUR CHAQUE STATION HYDROLOGIQUE

Station hydrologique (Fleuve)	A (s ⁻¹)	B (m.s ⁻¹)	C (m ² .s ⁻¹)	D (m ³ .s ⁻¹)
Hardinge (Gange)	88	-1655	11135	-25185
Bahadurabad (Bahadurabad)	60	-2200	32640	-174970

Voici les graphiques présentant les débits mensuels moyens in-situ et les débits mensuels moyens simulés à partir des hauteurs d'eau d'AltiKa pour chaque station virtuelle. Ce sont des valeurs sans unités et spécifiques à chaque station virtuelle.

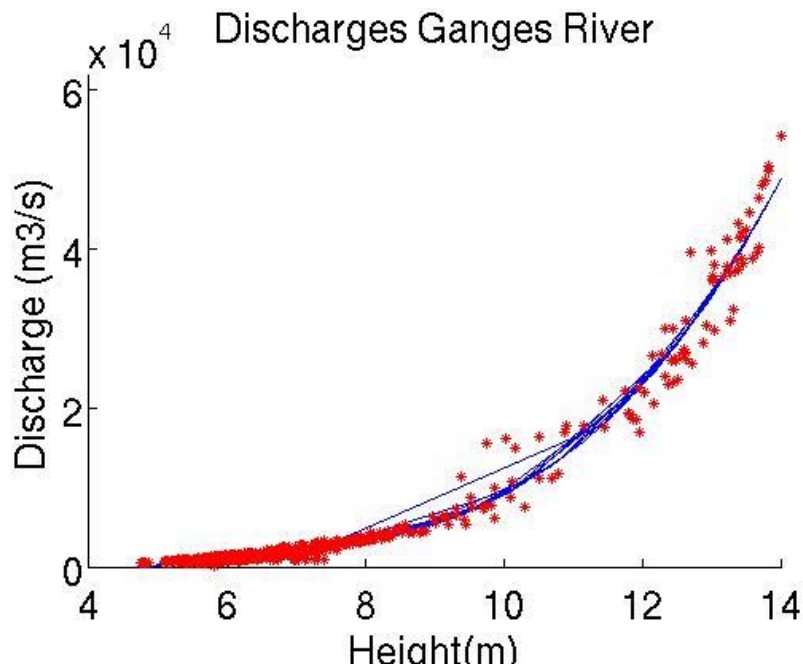


FIGURE 20 : EXEMPLE D'UNE COURBE DE TARAGE

Monthly variations of the two discharges Hardinge AltiKa 337

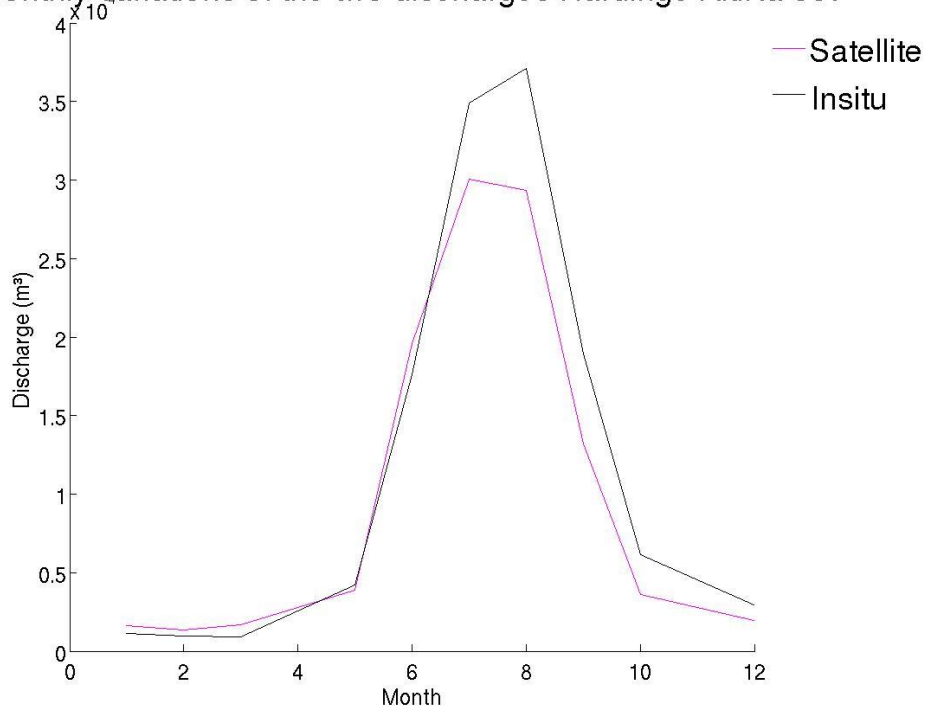


FIGURE 21 : DEBITS MENSUELS MOYENS ENTRE LA STATION D’HARDINGE ET LA STATION VIRTUELLE ALTIKA 337

Monthly variations of the two discharges Hardinge AltiKa 524

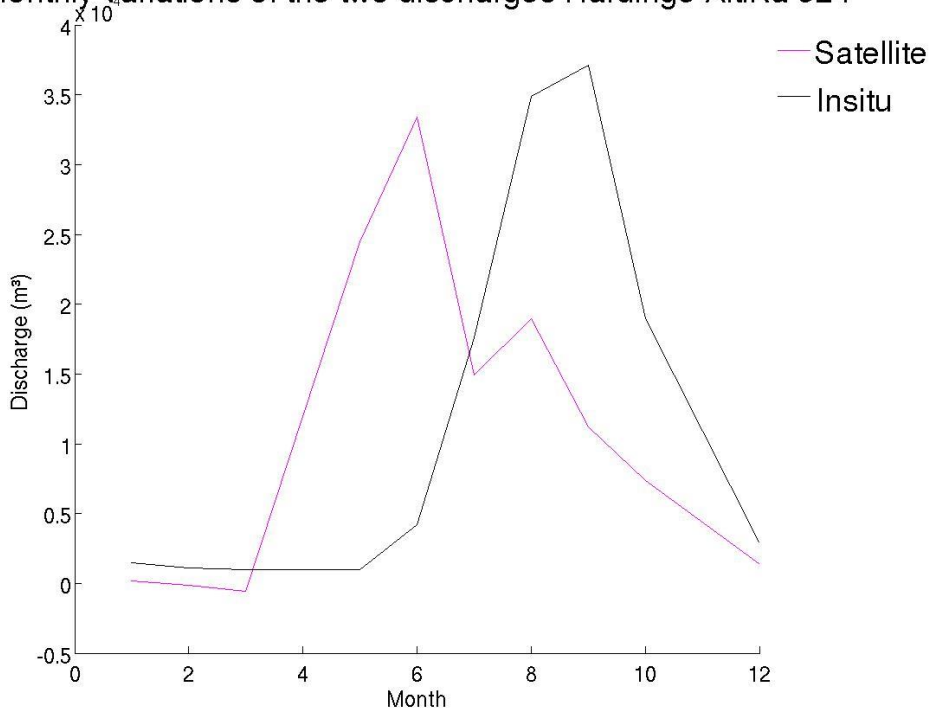


FIGURE 22 : DEBITS MENSUELS MOYENS ENTRE LA STATION D’HARDINGE ET LA STATION VIRTUELLE ALTIKA 524

Monthly variations of the two discharges Hardinge AltiKa 881

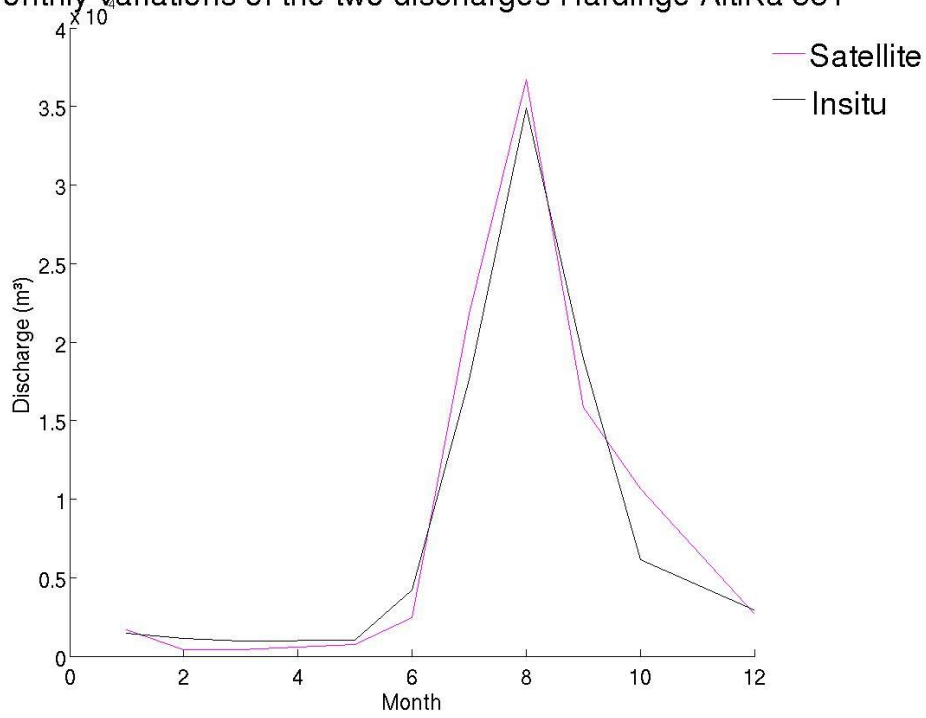


FIGURE 23 : DEBITS MENSUELS MOYENS ENTRE LA STATION D'HARDINGE ET LA STATION VIRTUELLE ALTIKA 881

Monthly variations of the two discharges Bahadurabab AltiKa 982

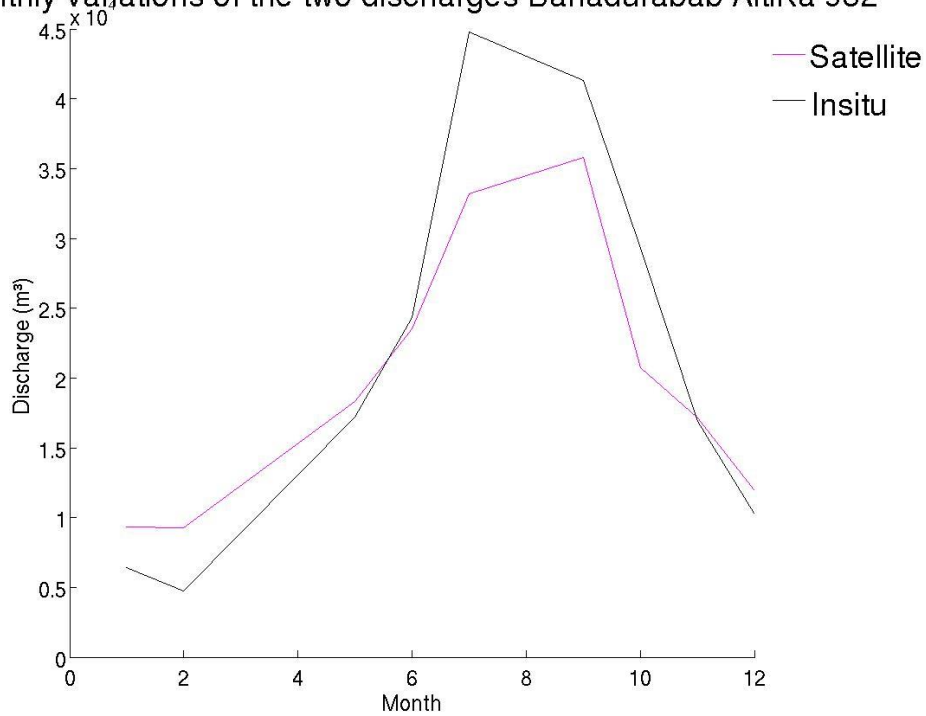


FIGURE 24 : DEBITS MENSUELS MOYENS ENTRE LA STATION DE BAHADURABAD ET LA STATION VIRTUELLE ALTIKA 982

Ces tableaux présentent les corrélations entre débits in-situ et ceux obtenus à partir des données des différents satellites.

Aucun NSE n'est inférieur à zéro, la plupart d'entre eux obtiennent des résultats très honorables, au-dessus de 0.8, certaines valeurs sont néanmoins nettement plus mauvaises. On retrouve les échecs des autres tests, on peut donc supposer que les données satellitales 524 d'AltiKa et 231 de Jason-2 sont fausses.

TABLEAU 8 : COMPARAISON ENTRE LES DEBITS D'HARDINGE ET LES DEBITS SIMULES PAR LES DIFFERENTS SATELLITES

Satellite	Trace	Distance station virtuelle/ station in-situ (km)	Coefficient de corrélation	Ecart moyen quadratique (m ³)	Coefficient de Nash-Sutcliffe
AltiKa	337	60	0.9847	3.2344e+03	0.9518
	524	2	0.2050	1.6567e+04	0.0720
	881	33	0.9811	2.4280e+03	0.9638
Envisat (Hydroweb)	337	60	0.9175	5.8742e+03	0.8063
	524	2	0.9734	3.1551e+03	0.9585
	881	33	0.8590	6.8742e+03	0.8063
Jason (Hydroweb)	090	27	0.9975	3.8437e+03	0.9193
	231	35	0.9913	3.6080e+03	0.9305

TABLEAU 9 : COMPARAISON ENTRE LES DEBITS DE BAHADURABAD ET LES DEBITS SIMULES PAR LES DIFFERENTS SATELLITES

Satellite	Trace	Coefficient de corrélation	Ecart moyen quadratique (m ³)	Coefficient de Nash-Sutcliffe
AltiKa	982	0.9754	1.1573e+04	0.9048
Envisat	982	0.9923	6.0663e+03	0.9827
Jason (Hydroweb)	231	0.3251	2.1857e+04	0.4118

Néanmoins, il faut signaler que les satellites n'ont pas pris leurs mesures en même temps que les stations terrestres. Les stations virtuelles situées sur le trajet des traces ne se trouvent pas non plus aux mêmes endroits que les stations d'Hardinge et de Bahadurabad. Il peut y avoir une distance de plusieurs dizaines de kilomètres entre la station virtuelle et la station hydrologique. Cela expliquerait donc des résultats relativement moyens bien que dans l'ensemble, largement corrects.

V.6. Applications : Comparaison avec les données TRMM

Le coefficient de corrélation entre une série temporelle mensuelle moyenne issue des données de précipitation par TRMM et la série temporelle d'AltiKa est de 0.66 dans le cas du Gange et de 0.87 dans le cas du Brahmapoutre.

Les résultats peuvent sembler moyens en considérant les corrélations issues des travaux précédents, néanmoins, il faut prendre en compte certains éléments liés à la particularité de cette comparaison :

- Il s'agit de données de natures différentes (précipitation dans le premiers cas et hauteur dans l'autre)
- Les données TRMM sont moyennées sur l'ensemble du bassin du Gange-Brahmapoutre alors que les stations virtuelles sont localisées précisément.
- Les données TRMM ont été prises entre 1998 et 2013, la période de mesure de SARAL (2013) est différente.
- Les comparaisons avec d'autres satellites donnent des résultats semblables.

Les résultats de comparaison avec Altika sont donc acceptables.

TRMM permet aussi de vérifier si l'année 2013 n'était pas exceptionnelle en termes de précipitations. Pour cela nous avons séparé puis comparé les données de 2013 à celle des autres années (1998-2012). Nous obtenons un coefficient de corrélation de 0.93 sur le Gange et de 0.95 sur le Brahmapoutre. Graphiquement, on remarque que l'été 2013 a été légèrement plus pluvieux que les années précédentes. 2013 n'était donc pas une année exceptionnelle en terme de précipitations dans la région.

Conclusion

Ce mémoire avait pour objectif d'évaluer la capacité de l'altimètre AltiKa à estimer précisément les niveaux d'eau sur les continents et les objectifs.

L'instrument de mesure AltiKa offre en cela d'excellents résultats tout à fait comparables à ses prédécesseurs en bande Ku bien que l'on ne dispose pour l'instant que d'un an de mesures. J'ai obtenu des corrélations élevées entre mesures altimétriques Saral et niveaux d'eau in situ, généralement supérieures à 0,85, et des écarts quadratiques moyens inférieurs à 70 cm. Ses premiers résultats sur un an de mesure sont tout à fait comparables à ceux obtenus en bande Ku avec les missions passées (Topex/Poseidon, ERS-2 et Envisat) et actuelles (Jason-2) sur une dizaine d'années. Des résultats similaires ont été obtenus avec les débits, permettant de continuer à estimer les transferts de masse d'eau vers le Golfe du Bengale.

La bande Ka montre ainsi sa fiabilité et les résultats sont très encourageants pour les prochaines missions d'altimétrie spatiales utilisant cette bande de fréquence Ka. La qualité des mesures en bande Ka est faiblement impactée par les fortes précipitations.

L'amélioration de la résolution spatiale de l'altimètre en bande Ka (tâche de diamètre réduit et densité de mesures augmentée) permet de détecter des cours d'eau de plus faible dimension et d'augmenter le nombre de mesures utilisées par calculer la hauteur moyenne lors d'un passage de l'altimètre.

L'altimètre à bord de Saral va permettre de continuer le suivi hydrologique des grands fleuves entrepris depuis une quinzaine et d'assurer la continuité sur l'orbite à 35 jours utilisée par ERS-1 & 2 puis Envisat. Ses mesures vont permettre d'améliorer notre compréhension du cycle hydrologique de surface sur les continents, en attendant le lancement de la future mission SWOT, altimètre imageur fonctionnant en bande Ka, qui sera lancé en 2020.

Bibliographie

Ouvrages imprimés

CHELTON, RIES J.C., HAINES B.J., FU L.-L. and CALLAHAN P.S... *Satellite altimetry. In Satellite Altimetry and the Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications*, 2001, eds. Fu, San Diego: Academic Press , 1-131p.

Travaux universitaires :

MALBETEAU Yoan. Analyse des variations des stocks d'eau continentaux d'eau dans les grands bassins tropicaux par observation multi-satellitaire. Mémoire, Toulouse : Université Paul Sabatier, 2013, 30 p.

MAUBANT Jérôme. Apport des données satellites radar (SAR-Altimètre) pour la gestion des stocks d'eau en zone agricole irrigué. Mémoire, Le Mans : CNAM ESGT, 2013, 56 p.

Articles de périodiques imprimés

BIRKETT CM . *Synergistic remote sensing of Lake Chad : variability of basin inundation*. Remote Sens Environ 72:218-236

CALMANT S., SEYLER F., CRETAUX J-F. *Monitoring continental surface waters by satellite altimetry*. Survey Géophysics, 2008, 29, p 247-269

DOUGLAS E.A., RODRIGUEZ E., LETTENMAIER D. *Measuring surface Water from space*. Reviews of Geophysics, 2007

ESPNOZA J., RONCHAIL J., FRAPPART F., LAVADO W. SANTINI W. *The major Floods in the Amazonas River and Tributaries (Western Amazon Basin) during the 1970-2012 Period : A Focus on the 2012 Flood*. Journal of Hydrometeorology, 2012, 14

FRAPPART F., CALMANT S., CAUHOPE M., SEYLER F., CAZENAVE A. *Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon basin*. Remote Sensing of Environment, 2006, 100, p. 252-264

FRAPPART F., PAPA F., SANTOS DA SILVA J., RAMILIEN G., PRIGENT C., SEYLER F., CALMANT S. *Surface freshwater storage and dynamics in the Amazon basin during the 2005 exceptional drought*. Environmental Research Letters, 2012, 7

HUFFMAN G. J., ADLER R.F., BOLVIN D.T., GU G., NELKIN E.J., BOWMAN K.P., YANG H., STOCKER E.F., WOLFF D.B. *The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) :*

Quasi-global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. Journal of hydrometeorology, 2007, 8, p. 38-54

KOURAEV A., ZAKHAROVA E., SAMAIN O., MOGNARD N., CAZENAVE A. *Ob river discharge from TOPEX/Poseidon satellite altimetry (1992-2002)*. Remote sensing of Environ.. 2004. Vol 93. p.238-245

MORIASI D.N., ARNOLD J.G., VAN LIEW M.W., BINGNER R.L., HARMEL R.D., VEITH T. L., *Model evaluation guidelines for systematics quantification of accuracy in watershed simulations*, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007, Vol 50, p.885-900

NASH J.E., SUTCLIFFE J.V., *River flow forecasting through conceptual models Part I – A discussion of principles*, Journal of Hydrology, 1970, p.282-290

PAPA F., PRIGENT C., DURAND F., ROSSOW W. *Wetland dynamics using a suite of satellite observations : A case study of application and evaluation for the Indian Subcontinent*. Geophysical Research Letters, 2006, 33

PAPA F., DURAND F., ROSSOW W. B., RAHMAN A., BALA S.K. *Satellite altimeter-derived monthly discharge of the Ganga-Brahmaputra River and its seasonal to interannual variations from 1993 to 2008*. Journal of Geophysical Research, 2010, VOL 115

PAPA F., BALA S.K., PANDEY R., DURAND F., GOPALAKRISHNA V., RAHMAN A., ROSSOW W. . *Ganga-Brahmaputra river discharge from Jason-2 radar altimetry : An update to the long-term satellite-derived estimates of continental freshwater forcing flux into the Bay of Bengal*. Journal of geophysical research, 2012, VOL 117

RAMILIEN G. L., SEOANE L., FRAPPART F., BIANCALE R., GRATTON S., VASSEUR X., BOURGOGNE S. *Constrained Regional Recovery of Continental Water Mass Time-variations from GRACE-based Geopotential Anomalies over South America*. Survey Geophys., 2012

SANTOS DA SILVA J., CALMANT S., SEYLER F., FILHO O., COCHONNEAU G., MANSUR W., . *Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry mission*. Remote Sensing of Environment, 2010, Volume 114.

VINCENT P., STENOUE N., CAUBET E., PHALIPPOU L., REY L., THOUVENOT E., VERRON J. *AltiKa: a Ka-band Altimetry Payload and System for Operational Altimetry during the GMES Period*. Sensors, 2006, 208-234

Sites web

Aviso., [en ligne]. Disponible sur : <www.aviso.altimetry.fr>. (consulté le 20/06/13)

Communication dans un congrès

FRAPPART F., PAPA F., JORDY F., MARIEU V., MALBETEAU Y., CALMANT S., BALAS. (2014). In situ validation and cross-calibration of SARAL/AltiKa measurements over the Ganges-Brahmaputra river basin. SARAL International Science and Applications Meeting, 22-24 April 2014, Ahmedabad, India.

Liste des figures¹

Figure 1 : Principe de l'altimétrie satellitaire (Source : CNES).....	9
Figure 2 : Schéma d'une forme commune d'onde (Source : CNES).....	11
Figure 3 : Les différents domaines des ondes électromagnétiques (source : Legos).....	13
Figure 4 : Les instruments sur SARAL (ceux à la charge utile AltiKa sont surlignés en rouge) (Source : Aviso.altimetry.fr, 2014).....	16
Figure 5 : L'unité du micro-onde altimétrique de l'altimètre AltiKa (source : Aviso).....	17
Figure 6 : Le bassin du Gange-Brahmapoutre (source : Wikipedia).....	19
Figure 7 : Le bassin de l'Irrawaddy.....	21
Figure 8 : Localisation des stations hydrologiques.....	23
Figure 9 : Les traces des satellites sur le Nord-Ouest du Bangladesh avec leurs numéros et les stations virtuelles représentées par des polygones, AltiKa/Envisat sont en jaune et Jason 2 en rouge (Fond d'image : Google Earth).....	25
Figure 10 : Exemple de profil en « v ».....	27
Figure 11 : Capture d'écran du programme « Analyses Traces » de MAPS utilisant le logiciel Matlab.....	28
Figure 12 : Séries temporelles d'Envisat de 2002 à 2010 (sur les traces 337, 524, 795, 881, 982)	29
Figure 13 : Séries temporelles d'AltiKa de 2013 à 2014 (sur les traces 337, 524, 795, 881, 982) ..	30
Figure 14 : Zone retenue pour la détermination du profil du Brahmapoutre le long de la trace 982.33	
Figure 15 : Profil en long de la trace 982 sur le Brahmapoutre réalisée grâce aux données d'Envisat avec un lissage de 2km.	34

Figure 16 : Profil en long de la trace 982 sur le Brahmapoutre réalisé grace aux données d'AltiKa.	35
Figure 17 : Graphique des différences entre les moyennes d'Envisat et les données d'AltiKa.	35
Figure 18 : Histogramme des différences entre les moyennes entre 2003 et 2010 des mesures d'envisat et celles d'altika entre avril 2013 et avril 2014.	36
Figures 19 : Graphiques des séries temporelles d'Envisat en bleu et d'AltiKa en rouge pour chaque station virtuelle	37
Figure 20 : Exemple d'une courbe de tarage.....	42
Figure 21 : Débits mensuels moyens entre la station d'Hardinge et la station virtuelle AltiKa 337	43
Figure 22 : Débits mensuels moyens entre la station d'Hardinge et la station virtuelle AltiKa 524	43
Figure 23 : Débits mensuels moyens entre la station d'Hardinge et la station virtuelle AltiKa 881	44
Figure 24 : Débits mensuels moyens entre la station de Bahadurabad et la station virtuelle AltiKa 982	44

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les anciennes missions altimétriques, D'après <i>Coastal Altimetry</i> , S. Vignudelli, A.G. Kostianov, P. Cipollini et J. Benveniste	14
Tableau 2 : Les missions actuelles et futures, D'après <i>Coastal Altimetry</i> , S. Vignudelli, A.G. Kostianov, P. Cipollini et J. Benveniste	15
Tableau 3 : Résultat des comparaisons de séries temporelles Envisat/AltiKa	38
Tableau 4 : Résultat des comparaisons de séries temporelles Jason2/AltiKa	39
Tableau 5 : Tableau de comparaison des séries temporelles entre la station Bahadurabad sur la Brahmapoutre et les satellites	40
Tableau 6 : Tableau de comparaison des séries temporelles entre la station Hardinge sur la Gange et les satellites.....	40
Tableau 7 : Paramètres pour chaque station hydrologique.....	42
Tableau 8 : Comparaison entre les débits d'Hardinge et les débits simulés par les différents satellites	45
Tableau 9 : Comparaison entre les débits de Bahadurabad et les débits simulés par les différents satellites	46

Validation des mesures de l'altimètre SARAL/AltiKa pour l'hydrologie continentale dans les bassins du Gange-Brahmapoutre et de l'Irrawaddy.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Paris 2014

RESUME

L'altimétrie radar a démontré sa capacité dans la mesure des niveaux d'eau des lacs, rivières ou zones humides au cours des 20 dernières années. La mission franco-indienne (CNES/ISRO) SARAL/AltiKa, lancée en février 2013, est le premier satellite à embarquer un altimètre fonctionnant sur la bande de fréquence micro-onde Ka. Notre objectif est de déterminer les performances de ce nouvel instrument pour l'hydrologie continentale grâce à des comparaisons entre des données de hauteur d'eau et de débits in-situ dans le bassin du Gange-Brahmapoutre et de l'Irrawaddy. Dans cette étude, des comparaisons avec d'autres missions ayant démontré leurs qualités, comme Jason ou Envisat, ont été effectuées avec succès.

Mots clés : Altimétrie, Radar, bande Ka, hydrologie, SARAL, AltiKa, Gange, Brahmapoutre, Irrawaddy, séries temporelles.

SUMMARY

Radar altimetry has demonstrated strong capabilities for the monitoring of water levels of lakes, rivers and wetlands over the last 20 years. The Indo-French (ISRO/CNES) SARAL/AltiKa mission, launched in February 2013, is the first satellite radar altimetry mission to carry onboard a Ka-band sensor. We propose here to estimate the performances of this new sensor for land hydrology through comparisons with *in situ* gauge records of levels and discharges in the Ganges-Brahmaputra and Irrawaddy river basin using its first year of functioning. In this study, comparison against Envisat or Jason-2 altimetry mission measurements was also performed with success.

Key words : Altimetry, Radar, Ka band, hydrology, SARAL, AltiKa, Ganges, Brahmaputra , Irrawaddy, time series.