

Résumé

Auteur : Laetitia CHEVALIER

Date et lieu de soutenance : 09/12/14 à Rouen

Titre : Caractérisation et modélisation de la variabilité hydrologique de l'estuaire de Seine dans le cadre de la future mission spatiale SWOT (Surface Water and Ocean Topography)

Directeurs de thèse : Benoit LAIGNEL et Florent LYARD

Financement : Région Haute Normandie et CNES (Centre National d'Études Spatiales)

Les estuaires sont des systèmes dynamiques complexes, où se produisent de nombreuses interactions dû notamment au mélange des différentes masses d'eau et des processus associés : la marée, la houle, les phénomènes de surcote, le débit des fleuves et rivières et les apports souterrains. De ce fait, l'estuaire macrotidal de la Seine est particulièrement bien suivis et dispose de nombreuses données : des relevés bathymétriques, des levés LIDAR, dix-huit marégraphes, des stations de jaugeage des débits à l'amont et sur les affluents. Ces données in-situ permettent une meilleure connaissance du système. Cependant ces observations restent ponctuelles dans le temps, mais également dans l'espace. La mission SWOT (Surface Water and Ocean Topography), dont le lancement aura lieu en 2020, fournira des cartes 2D de hauteurs et pente des eaux de surface avec une résolution encore jamais atteinte en altimétrie (1km sur les océans et 100m dans les zones continentales) et ceci pour une durée d'environ 4 ans.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la phase de préparation à la mission SWOT. Les objectifs de cette thèse sont doubles : (i) caractériser et modéliser la variabilité hydrologique de l'estuaire de Seine et ainsi essayer de mieux comprendre l'influence des masses d'eau fluviale et marine sur cette variabilité hydrologique et (ii) déterminer la qualité de la restitution de la variabilité hydrologique par SWOT, par différentes approches exploratoires.

Afin de caractériser la variabilité hydrologique temporelle et spatiale de l'estuaire de Seine, (i) des analyses descriptives et spectrales (lissage polynomial de type loess, analyses des valeurs minimum, maximum et moyennes annuelles, fonction de densité de probabilité (PDF) / fonction de distribution cumulée (CDF) et analyses en ondelettes) sont réalisées sur les données de hauteurs d'eau de l'estuaire de Seine, mais également sur des hauteurs d'eau de la mer de la Manche et les débits de la Seine (mais également de la Garonne, du Rhône et de la Loire à titre de comparaison), correspondant à l'influence des masses d'eau marine et fluviale respectivement et (ii) et une modélisation hydrodynamique de l'estuaire de Seine est effectuée avec le modèle T-UGOm (Toulouse Unstructured Grid Ocean). Ces analyses ont montré une variabilité commune aux trois environnements (estuarien, marin et fluvial) avec la présence de deux années charnières vers 1970 et 1990 et des modes de variabilité infra-annuels (22-45 jours, 1.5-3 mois et 3-6 mois), annuel et pluriannuels (2-4 ans, 4-8 ans, 8-16 ans et 16-32 ans) communs. La variabilité hydrologique commune à l'échelle pluriannuelle a été mise en relation avec la NAO : 64% à 72% de cohérence entre les données in-situ et la NAO pour la zone fluviale de la Seine et les trois autres bassins versant français, 65% à 68% pour les deux stations en mer de la Manche et 66% à 69% pour les cinq stations de l'estuaire. La variabilité hydrologique commune à l'échelle infra-annuelle a été mise en relation avec les phénomènes (i) de crues pour les débits, (ii) de surcotes pour les hauteurs d'eau marégraphiques en Manche et (iii) l'association des surcotes et des crues pour les hauteurs

d'eau estuariennes, avec probablement l'influence principalement des surcotes pour les stations près de l'embouchure, et l'influence essentiellement des crues pour les stations les plus en amont. Des caractéristiques propres aux environnements marin et fluvial (mode de variabilité 11-22 jours propre à la partie marine, lissages polynomiaux de type loess plus structurés pour la partie fluviale et PDF présentant un seul mode pour la partie fluviale et deux modes pour la partie marine) ont permis d'évaluer la limite d'influence de ces deux masses d'eau et de certains phénomènes associés dans l'estuaire, avec l'influence prédominante de la marée à l'aval, de l'embouchure à Caudebec et du débit en amont, de Caudebec à Poses. Concernant la modélisation hydrodynamique, un long travail préalable de mise en place de la bathymétrie (paramètre essentiel de la modélisation) a dû être réalisé, permettant d'obtenir une bathymétrie de résolution 10 mètres dans un premier temps, puis 3 mètres en fin de thèse. Les premières investigations et les comparaisons effectuées aux études antérieures ont permis de déterminer les paramètres d'entrées adéquates (forçage de la marée à partir des composantes de marée issues d'une modélisation de l'Atlantique Nord Est, non prises en compte des apports latéraux, coefficient de frottement par zone), pour enfin obtenir une modélisation de l'estuaire de Seine avec des erreurs quadratiques moyennes pour l'onde M2 (entre la modélisation et les données in-situ) de 5 cm et une bonne restitution des hauteurs d'eau et de leurs variations pour les premiers tests réalisés.

Afin de déterminer la qualité de la restitution de la variabilité hydrologique par SWOT, les données SWOT ont dû être simulées. Pour cela, trois méthodes ont été employées, (i) la première consiste à extraire les données SWOT des données in-situ, des trois environnements, en fonction des heures de passage du satellite, permettant de visualiser si le nombre de passage du satellite influence sa restitution de la variabilité hydrologique (« données SWOT simulées sans erreur »), (ii) la deuxième réside en un ajout de bruit blanc de moyenne zéro et d'écart type 21 cm, aux données SWOT simulées sans erreur de l'estuaire de Seine, afin de simuler l'erreur de la mesure de hauteur de SWOT et de visualiser si celle-ci a un impact sur la restitution de la variabilité hydrologique (« données SWOT simulées avec bruit blanc »), et (iii) la troisième repose sur l'utilisation des données issues de la modélisation estuarienne T-UGOm considérées comme données vérité et d'un simulateur de données SWOT, permettant de simuler un certain nombre d'erreurs du satellite (erreur de hauteur, erreur liée à la distance cible-antenne, erreur liée à la longueur du mât et erreur liée au roulis) à l'aide de bruit blanc de moyenne égale à zéro et d'écart type choisis pour chaque types d'erreurs simulées, dans le but de visualiser si ces erreurs ont un impact sur la restitution de la variabilité hydrologique par SWOT (« données SWOT issues du simulateur »).

Les analyses de la cohérence en ondelettes, entre les données in-situ et les données SWOT simulées sans erreur, ont permis de mettre en évidence la meilleure capacité de SWOT à restituer la variabilité hydrologique en environnement fluvial (cohérences supérieures à 90% pour les débits en Seine, Loire, Garonne et Rhône), qu'en environnement marin (cohérences comprises entre 50% et 75%) et estuarien (cohérences comprises entre 60% et 90% avec une perte de cohérence de l'amont vers l'aval, lorsque l'influence du débit diminue et que celle de la marée augmente). Les analyses en ondelettes de la zone fluviale et la zone amont de l'estuaire, vers la zone aval de l'estuaire et la mer de la Manche, indiquent la disparition progressive du cycle annuel et l'amplification dans le temps du mode de variabilité 1.5-3 mois liée à l'interférence entre la cyclicité de SWOT et l'effet déterministe de la marée, mais également à une sensibilité des mesures SWOT au temps initial d'échantillonnage, confirmant la meilleure capacité de SWOT à restituer la variabilité hydrologique en environnement fluvial, qu'en environnement marin. Les résultats obtenus, pour la zone estuarienne, à partir des données SWOT simulées avec bruit blanc, n'indiquent aucune influence de l'erreur de

mesure de hauteur sur la restitution de la variabilité hydrologique par SWOT, avec des résultats similaires à ceux des données SWOT simulées sans erreur (cohérences entre données SWOT simulées avec bruit blanc et données in-situ comprises entre 60% et 90%, avec une perte de cohérence de l'amont vers l'aval). Les résultats obtenus pour les données SWOT issues du simulateur indiquent des cohérences avec les hauteurs d'eau vérité T-UGOm comprises entre 63% et 77%. Contrairement aux autres données simulées (sans erreur et avec bruit blanc), aucune perte de cohérence n'est observée de l'amont vers l'aval. De plus, un déphasage a été observé entre les données SWOT issues du simulateur et les données vérité T-UGOm, contrairement à ce qui était observé entre les données SWOT simulées sans erreur ou avec bruit blanc et les données in-situ, indiquant une moins bonne restitution de la variabilité hydrologique dans le cas de données SWOT issues du simulateur, du fait de la prise en compte d'un certain nombre d'erreurs de mesure du satellite. La restitution des composantes harmoniques de la marée par SWOT n'a pas pu être étudiée, à cause du temps de simulation, d'un an, trop court ne permettant pas la séparation des ondes harmoniques. En effet, un temps minimal de 462 jours de simulation est nécessaire pour séparer les ondes harmoniques M2 et S2.

Mots clés : Variabilité hydrologique, Débits, Hauteurs d'eau, SWOT, Analyses en ondelette, Modélisation, Estuaire de Seine

Discipline : Hydrologie et Modélisation

Laboratoire :

Laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C)

UMR 6143 CNRS,

Université de Rouen,

Bât IRESE A,

Place Émile Blondel,

76821 Mont Saint Aignan