

**Université de Montréal**

**Quantification du mouvement vertical de la croûte  
terrestre et de sa contribution au changement du  
niveau de la mer : le cas de la Côte Est du Canada,  
golfe du Saint-Laurent**

par

**Mohsen Feizabadi**

Département de Géographie  
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures et postdoctorales  
en vue de l'obtention du grade de  
Maîtrise ès sciences (M.Sc.)  
en Discipline

Décembre, 2020



**Université de Montréal**

Faculté des études supérieures et postdoctorales

Ce mémoire intitulé

**Quantification du mouvement vertical de la croûte  
terrestre et de sa contribution au changement du  
niveau de la mer : le cas de la Côte Est du Canada,  
golfe du Saint-Laurent**

présenté par

**Mohsen Feizabadi**

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

*Daniel Fortier*

---

(président-rapporteur)

*François Cavayas*

---

(directeur de recherche)

*Yacine Bouroubi*

---

(membre du jury)



# Résumé

---

Les changements du niveau de la mer sont un des indicateurs des changements climatiques qui affectent le monde depuis les dernière décennies. Dans les zones côtières, ce phénomène est à l'origine de l'érosion côtière, l'intrusion d'eau salée dans la nappe phréatique et les inondations. Les côtes du Canada ne sont pas épargnées. En effet, le niveau de la mer dans ces régions augmente actuellement et suit les tendances mondiales. Parmi ces zones côtières, celles du golfe du Saint-Laurent nous ont intéressées. Elles sont caractérisées par des propriétés physiques spécifiques comme l'isolement relatif par rapport l'océan Atlantique, la couverture de glace en hiver et la coulée de l'eau douce au printemps qui leurs confèrent un comportement particulier en termes de changements du niveau de la mer.

Les changements du niveau de la mer peuvent être déterminés en intégrant les données des marégraphes et de l'altimétrie satellitaire que le résultat de cette procédure conduit à une détermination relative du niveau moyen de la mer. Cependant, parce que la structure de mesure de ces données est différente, certaines corrections doivent être appliquées. L'une des corrections parmi les plus essentielles est la longueur du Mouvement de Terrain Vertical (MTV) qui doit être prise en compte dans les données des marégraphes, car ces derniers sont connectés directement à la croûte terrestre. Différents phénomènes peuvent causer le MTV. À une échelle locale, la tectonique, l'affaissement et la sédimentation sont les facteurs qui créent le mouvement vertical et à une méso ou macro-échelle, la fonte des inlandsis qui entraîne une modification de la charge de masse de la surface de la terre, provoquent le mouvement des terres. Il existe divers modèles et méthodes de correction du MTV globaux et locaux, tels que l'Ajustement Isostatique Glaciaire (AIG), le Système Mondial de Navigation par Satellite (SMNS), l'Interférométrie par Radar Synthèse d'Ouverture (InRSO), Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) et le calcul de la différence entre données marégraphiques et altimétriques par satellite. Parmi ces méthodes, l'utilisation de la vitesse verticale des données GPS est la plus précise. Cependant, en raison du faible nombre de stations GPS dans ou proximité des stations marégraphiques, l'utilisation d'une approche plus globale est inévitable. En utilisant cette correction, le niveau moyen absolu de la mer sera obtenu.

Dans cette étude, l'évaluation du MTV se fait par un algorithme d'InRSO, appelé Diffuseurs Persistants InRSO (DPIInRSO en anglais PSInSAR). Les images du RSO du satellite

Sentinel-1 sont soumises à l'analyse DPInRSO. Afin d'évaluer la précision de cette approche, les résultats de DPInRSO (obtenus du logiciel Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS)) pour deux régions de l'est du Canada (Halifax et St. John's) sont comparés à la GPS vitesse verticale en analysant les séries temporelles de données. Également, en utilisant la même méthode, le mouvement vertical des terres dans 24 stations marégraphiques du golfe du Saint-Laurent sera corrigé. L'étude du niveau moyen de la mer est mise en œuvre en utilisant l'analyse spectrale (analyse harmonique et analyse spectrale des moindres carrés (ASMC)) afin de supprimer les effets à long terme des constituants de la marée (constituants annuels et semi-annuels). Aussi, pour évaluer le niveau moyen absolu de la mer (NMAM) dans la région considérée, le niveau moyen de la mer calculé est corrigé sur la base des résultats du MTV.

En conclusion, la comparaison des résultats de la technique DPInRSO avec les données GPS indique le comportement similaire des tendances au cours de la période d'étude. En d'autres termes, la méthode DPInRSO mesure le mouvement vertical des terres en précision millimétrique dans la région d'étude (à l'exception d'une station) et elle peut être appliquée pour les régions qu'elles ne se connectent pas sur le positionnement GPS continu des marégraphes. Dans le cas d'un changement du niveau de la mer, l'incompatibilité entre les données marégraphiques et altimétriques en termes de temps rend la conclusion plus difficile. Cependant, sur la base d'observations continues dans des séries temporelles de données altimétriques, nous avons obtenu une tendance plus homogène du niveau de la mer (niveau moyen de la mer) dans toutes les stations, mais pour évaluer le changement à long terme du niveau de la mer et en raison de l'emplacement exact de la station marégraphique, ces dernières données doivent être prises en compte (à la fois dans le calcul du niveau moyen de la mer et des constituants de la marée). Enfin, en raison du faible changement de MTV, les valeurs moyennes absolues du niveau de la mer sont très proches de celles relatives, ce qui indique que nous pouvons évaluer les changements du niveau de la mer dans le golfe du Saint-Laurent, en utilisant uniquement les données marégraphiques et altimétriques.

En plus de faire des corrections, des cartes de la tendance du niveau de la mer et des différences de phase entre les stations marégraphiques seront représentées. La qualité des données des marégraphes et de l'altimétrie satellitaire sera discutée et rapportée sur les résultats tirés de l'étude.

**Mots-clés** : Niveau de la mer, golfe du Saint-Laurent, marégraphe, altimétrie satellitaire, mouvement de terrain vertical, GPS, DPInRSO, analyse de séries temporelles

# Abstract

---

Sea level changes are one of the indicators of climate change that has affected the world in recent decades. In coastal areas, this phenomenon has caused coastal erosion, saltwater intrusion into the groundwater and floods. These environmental changes can also be seen in Canada's coasts. Indeed, the sea level in these regions is currently increasing and follows the global trends. Among these coastal areas, those of the Gulf of St. Lawrence interested us. This area is characterized by specific physical properties such as relative isolation from the Atlantic Ocean, winter ice cover and spring freshwater flow that confer particular behavior in terms of sea level changes.

Sea level changes can be determined by integrating the tide gauge and satellite altimetry data that the result of this procedure leads to a relative determination of mean sea level. However, because the measurement structures of these data are different, some corrections should be applied. One of the most essential corrections is the length of the Vertical Land Motion (VLM) which must be taken into account in tide gauge data, as these are connected directly to the Earth crust. Different phenomena can cause VLM. In the local scale, tectonics, subsidence and sedimentation are the factors that create vertical movement and in global scale, melting of ice sheets, which leads to change the mass loading of the earth's surface, cause the land motion. There are various global and local VLM correction models and methods such as, Glacial Isostatic Adjustment (GIA), Global Navigation Satellite Systems (GNSS), Interferometry Synthetic Aperture Radar (InSAR), Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) and calculation of difference between satellite altimetry and tide gauge data. Between these methods, using the vertical velocity of GPS data is the most accurate one. However, due to the low number of GPS stations in or near the tide gauge stations, using a more comprehensive approach is inevitable. By applying this correction, the absolute mean sea level will be obtained.

In this study, VLM is examined by one algorithm of InSAR which is called Persistent Scatterer InSAR (PSInSAR). The Sentinel-1 single-look SAR images are used for PSInSAR analysis. In order to accuracy assessment of this approach, the results of PSInSAR (obtained from Stanford Method for Persistent Scatterers software (StaMPS)) for two regions in east of Canada (Halifax and St. John's) are compared with GPS vertical velocity by analyzing

their time series data. Equally, by using the same method, vertical land movement in 24 tide gauge station in Gulf of St. Lawrence will be corrected. Investigation of mean sea level is implemented by using the spectral analysis (Harmonic analysis and Least Square Spectral Analysis) in order to remove the long-term effects of tidal constituent (annual and semiannual constituents). Also, to assess the Absolute Mean Sea Level (AMSL) in considered region, calculated mean sea level is corrected based on the results of VLM.

In conclusion, comparing of the results of PSInSAR technique with GPS data indicate the similar behavior of trends during the period of study. In other words, PSInSAR method measures vertical land motion in millimeter precision in study region (except of one station) and it can be applied for regions that they do not connect on continuous GPS positioning of tide gauges. In the case of sea level change, incompatibility between tide gauge and altimetry data in terms of time makes the conclusion harder. However, based on continues observations in time series of altimetry data, we obtained more homogeneous sea level trend (mean sea level) in all stations, but to evaluate the long-term sea level change and because of exact location of tide gauge station, this latter data must be considered (both in calculation of mean sea level and tidal constituents). Finally, because of small values of VLM, absolute mean sea level values are very close to relative one which indicate that, we can evaluate the sea level changes in Gulf of Saint Lawrence by using only the tide gauge and altimetry data.

In addition to making corrections, the maps of sea level trend and phase differences between tide gauge stations will be represented. The quality of the tide gauge and satellite altimetry records will be discussed and reported over the drawn results of the study.

**Keywords** : Sea level, Gulf of St-Lawrence, Tide-gauge, Satellite altimetry, Vertical land motion, GNSS, PSInSAR, Time series analysis



# Table des matières

---

Résumé .....	v
Abstract .....	vii
Liste des tableaux .....	xiii
Liste des figures .....	xv
Liste des sigles et des abréviations .....	xix
Remerciements .....	xxi
Introduction .....	1
I. Contexte de recherche .....	1
II. Objectifs et hypothèses .....	6
III. Structure du mémoire .....	7
<b>Chapitre 1. Estimation du mouvement vertical de l'écorce terrestre par interférométrie radar: la technique des diffuseurs persistants .</b>	<b>9</b>
1.1. Les radars à synthèse d'ouverture (RSO): aperçu .....	9
1.2. Interférométrie différentielle .....	14
1.2.1. Choix des images .....	14
1.2.2. Recalage et autres prétraitements .....	15
1.2.3. Génération de l'interférogramme et de l'image de cohérence .....	16
1.2.4. Amélioration de l'interférogramme .....	17
1.2.4.1. Élimination de la phase topographique ( $\Phi_{topo}$ ) .....	17
1.2.4.2. Élimination de la phase de la Terre plate ( $\Phi_{FE}$ ) .....	18
1.2.4.3. Élimination de la phase causée par l'atmosphère ( $\Phi_{atm}$ ) .....	18
1.2.4.4. Correction de phase causée par l'orbite ( $\Phi_{orb}$ ) .....	19
1.2.4.5. Correction de phase causée par le bruit ( $\Phi_{noise}$ ) .....	19
1.2.5. Déroulement de phase .....	19

1.2.6.	Conversion de la phase en mesure de déformation de surface.....	20
1.3.	Interférométrie sur diffuseurs persistants (DPInRSO).....	22
1.3.1.	Sélection de l'image de référence .....	23
1.3.2.	Sélection des diffuseurs persistants .....	23
1.3.3.	Estimation de la vitesse du mouvement vertical de l'écorce terrestre .....	25
<b>Chapitre 2.</b>	<b>Techniques géodésiques .....</b>	<b>27</b>
2.1.	Données disponibles pour cette recherche.....	28
2.1.1.	Données GPS.....	28
2.1.2.	Données des marégraphes .....	29
2.1.3.	Données altimétriques .....	30
2.2.	Analyse des séries temporelles.....	33
2.2.1.	Analyse harmonique .....	35
2.2.2.	Analyse spectrale des moindres carrés (ASMC).....	35
2.3.	Définition du MTV par combinaison des données marégraphiques et altimétriques .....	37
<b>Chapitre 3.</b>	<b>Méthodes, données et traitements.....</b>	<b>39</b>
3.1.	Approche méthodologique: aperçu .....	39
3.2.	Données .....	39
3.2.1.	Images RSO .....	39
3.2.2.	Données GPS.....	41
3.2.3.	Données des marégraphes .....	42
3.2.4.	Données altimétriques .....	44
3.3.	Traitements des données .....	45
3.3.1.	Traitements des images RSO.....	45
3.3.1.1.	Procédure DPInRSO.....	46
3.3.1.2.	Comparaison avec les données GPS .....	48
3.3.1.3.	Application dans les zones côtières aux alentours des marégraphes.....	49
3.3.2.	Traitements des données marégraphiques.....	52
3.3.3.	Traitements de données altimétriques .....	54
<b>Chapitre 4.</b>	<b>Application de la technique des diffuseurs persistants .....</b>	<b>57</b>

4.1.	Application de la DPInRSO et validation avec les données GPS .....	57
4.2.	Calcul de la MTV pour les stations marégraphiques .....	62
4.3.	Discussion et conclusions partielles .....	66
4.3.1.	Appréciation du logiciel StaMPS .....	66
4.3.2.	Comparaison avec les données GPS .....	68
4.3.3.	Marégraphes .....	68
<b>Chapitre 5.</b>	<b>Définition du NMM à partir des données marégraphiques et des données d'altimétrie satellitaire .....</b>	<b>71</b>
5.1.	Analyse des séries temporelles .....	71
5.2.	Estimation du niveau moyen de la mer: données marégraphiques .....	72
5.3.	Altimétrie satellitaire .....	75
5.4.	Comparaison des résultats des analyses spectrales marégraphes-altimétries....	80
5.4.1.	Périodes de marée .....	80
5.4.2.	Amplitudes et phases .....	83
5.4.3.	Niveau moyen de la mer .....	85
5.5.	Conclusions partielles .....	89
<b>Chapitre 6.</b>	<b>Définition du NMM absolu .....</b>	<b>91</b>
6.1.	NMAM intégrant le MTV des diffuseurs persistants .....	91
6.2.	Conclusions partielles .....	94
	<b>Conclusions et perspectives de recherche .....</b>	<b>97</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>99</b>
<b>Annexe A.</b>	<b>Séries temporelles de données marégraphiques.....</b>	<b>A-i</b>
A.1.	Séries temporelles originales .....	A-i
A.2.	Séries temporelles modifiées .....	A-viii
<b>Annexe B.</b>	<b>Séries temporelles de données altimétriques satellitaires.....</b>	<b>B-i</b>
<b>Annexe C.</b>	<b>Vitesse verticale moyenne calculée par le progiciel StaMPS ...</b>	<b>C-i</b>
<b>Annexe D.</b>	<b>Modification des points DP dans ArcGIS .....</b>	<b>D-i</b>

Annexe E.	Constituants de marée obtenus à partir des données marégraphiques.....	E-i
Annexe F.	Valeur NMM et résidus des données marégraphiques.....	F-i
Annexe G.	Valeur NMM et résidus des données altimétriques satellitaires	G-i

## Liste des tableaux

---

2.1	Produits de CMEMS en format le-long-de-la-trajectoire (along-track) et grille (grid) (Mertz et al., 2018).....	32
2.2	Constituants des marées diurnes et à longue période (Parker, 2007) .....	33
3.1	Vitesse distribuée en trois dimensions de SOPAC.....	42
3.2	Numéro d’orbite, direction, polarisation et sous-fauchés de chaque image Sentinel-1 sélectionnée pour la région à étudier .....	51
3.3	Valeur moyenne de la ligne de base perpendiculaire et cohérence entre l’image référence et les autres images pour chaque station avec leurs écarts-types.....	52
3.4	Durée et autres spécifications des stations marégraphes de la côte est du Canada	53
4.1	Quantité de mouvement de terrain vertical à chaque station marégraphe .....	65
5.1	Paramètres des constituants semi-annuels et annuels (tendance, amplitude, phase) établis par analyse spectral des séries temporelle des stations marégraphiques ...	74
5.2	Tendance, amplitude et phase des constituants semi-annuel et annuel à partir de séries temporelles d’altimétrie satellitaire.....	78
5.3	Comparaison des résultats des constituants de marée issus des séries temporelles marégraphiques et altimétriques .....	82
5.4	Relation entre le niveau de confiance et le nombre de données dans la série temporelle pour détecter les constituants de marée.....	84
6.1	Calcul du niveau moyen absolu de la mer (NMAM) partir du niveau moyen relatif de la mer (NMRM) et du MTV. La dernière colonne montre le résultat NMAM du NMM à partir des données altimétriques et marégraphiques.....	92
6.2	Calcul de la MTV par comparaison des données altimétriques et marégraphiques.	94



## Liste des figures

---

I	Niveau moyen global de la mer à partir de l’altimétrie satellitaire pour la période 1993-2019 (AVISO, 2019) .....	2
II	Le golfe du Saint-Laurent (adapté de GoogleEarth) .....	3
III	Situations côtières résultant de la hausse du niveau de la mer et de l’ajustement de l’écorce terrestre (source: Ministère de l’Environnement du Québec, 2014) ...	4
1.1	Formation d’une matrice de signaux par ligne de balayage: repérage des objets en portée et azimuth (adapté de Elachi et al., 1982) .....	10
1.2	Géométrie de radar à ouverture synthétique (Long et al., 2018) .....	10
1.3	Processus de création d’une image RSO en format SLC: focalisation des signaux en portée suivie de focalisation des signaux en azimuth (source: Moreira et al., 2013) .....	11
1.4	Géométrie d’acquisition d’une paire interférométrique pour le calcul de l’altitude du terrain (Richards, 2009) .....	12
1.5	Principe d’acquisition d’une paire interférométrique pour le calcul de la déformation du sol dans la direction des portées (TRE ALTAMIRA (CLS Group Company), dernière consultation août 2020) .....	13
1.6	Sensibilité de la technique DInRSO aux mouvements du terrain (Eineder and Bamler, 2019) .....	21
1.7	Mouvement mesuré en DInRSO (vecteur bleu) dans la direction de la portée (LOS = line of sight) et mouvement réel du sol (vecteur rouge) (source: Anonymous, 2010, consulté juin 2020) .....	22
1.8	Simulations de phase pour (a) un pixel diffuseur distribué et (b) un pixel diffuseur persistant. Les graphiques ci-dessous montrent la phase pour 100 itérations. (Hooper, 2006) .....	23
2.1	Techniques géodésiques utilisées dans cette recherche (Wöppelmann, 2020). .....	27

2.2	Réseau des stations GPS à travers le monde; la couleur représente la vitesse verticale estimée après réanalyse de 19 ans de données GPS de 1995 à 2014 (Santamaría-Gómez et al., 2017) .....	28
2.3	Corrections des séries temporelles marégraphiques par les mesures GPS à différentes zones côtières dans le monde (Wöppelmann, 2020).....	29
2.4	Termes utilisés en altimétrie (Mertz et al., 2018) .....	31
2.5	Séries temporelles qui incluent les lacunes (flèche rouge).....	34
3.1	Organigramme de l'approche méthodologique .....	40
3.2	Localisation de deux stations GPS (St. John's et Halifax) dans le golfe du Saint-Laurent.....	42
3.3	Série temporelle de GPS vitesse verticale (quotidien) à la station St. John's (STJO).....	43
3.4	Série temporelle de GPS vitesse verticale (quotidien) à la station Halifax (HLFX)	43
3.5	Les stations marégraphiques du golfe du Saint-Laurent .....	44
3.6	Données marégraphiques pour la station de Baie-comeau.....	44
3.7	Date d'acquisition de Sentinel-1 pour les régions de St. John's (marques rouges) et Halifax (marques bleues). .....	48
3.8	Paramètres de la pile d'images Sentinel-1 de la région de St. John's: a) l'image de référence encerclée; b) lignes de base perpendiculaires entre l'image de référence et les images dépendantes (axe vertical); c) dates d'acquisition (axe horizontal); d) valeurs de cohérence entre l'image de référence et les images dépendantes. ....	50
3.9	Paramètres de la pile d'images Sentinel-1 de la région d'Halifax: a) l'image de référence encerclée; b) lignes de base perpendiculaires entre l'image de référence et les images dépendantes (axe vertical); c) dates d'acquisition (axe horizontal); d) valeurs de cohérence entre l'image de référence et les images dépendantes. ....	50
3.10	Structure de NetCDF .....	54
4.1	Topographie des régions de St. John's (gauche) et Halifax (droite). Ces cartes sont préparées en utilisant l'altitude des points DP à partir de la fonction " <i>ps_plot</i> " de StaMPS.....	58
4.2	Vitesse verticale moyenne pour les régions de St. John's (gauche) et Halifax (droite).....	58



4.3	Vitesse verticale moyenne moins erreurs MNA pour les régions St. John's (gauche) et Halifax (droite) .....	59
4.4	Vitesse verticale moyenne moins erreurs MNA et erreurs de rampes orbitales pour les régions St. John's (gauche) et Halifax (droite) .....	59
4.5	Vitesse verticale saisonnière GPS de St. John's (STJO) et d'Halifax (HLFX) au cours de la période 2015-2019 .....	60
4.6	Séries temporelles de 5 points DP dans les régions de St. John's et Halifax exportées de StaMPS. Les points rouges sont très proches des stations GPS de STJO et HLFX. ....	60
4.7	Comparaison de séries temporelles de stations GPS et de points DP proches des stations GPS.....	61
4.8	Exemples des résultats de StaMPS aux points DP dans les régions incluant des marégraphes. ....	62
4.9	Exemples des DP retenus (en rouge) pour les analyses subséquentes (logiciel ArcGIS). ....	63
4.10	Mouvement de terrain vertical dans le golfe du Saint-Laurent .....	69
5.1	Exemple des résultats de l'analyse spectrale des séries temporelles des stations marégraphiques (annexe E): le cas de la station marégraphique de Baie-Comeau. ....	73
5.2	Exemple des tendances linéaires et des résiduels des séries temporelles des stations marégraphiques (annexe F): le cas de la station marégraphique de Baie-Comeau. ....	75
5.3	Niveau moyen de la mer (tendance linéaire) aux stations marégraphiques.....	75
5.4	Carte de l'amplitude-phase des périodes semi-annuelle ( $S_{sa}$ ) des stations marégraphiques.....	76
5.5	Carte de l'amplitude-phase des périodes annuelles ( $S_a$ ) des stations marégraphiques.....	76
5.6	Exemple des séries temporelles d'altimétrie satellitaire avec tendance linéaire et résidus (annexe G).....	77
5.7	Niveau moyen mensuel de la mer en mm (tendance linéaire) de l'altimétrie satellitaire dans le golfe du Saint-Laurent .....	79
5.8	Carte de l'amplitude-phase de la période semi-annuelle ( $S_{sa}$ ) obtenues à partir de séries temporelle altimétries satellitaires.....	79

5.9	Carte de l'amplitude-phase de la période annuelle ( $S_a$ ) obtenues à partir de séries temporelle altimétries satellitaires.....	80
5.10	Carte des tendances du niveau moyen de la mer à l'échelle planétaire à partir de données d'altimétrie satellitaire multi-missions, dérivées d'AVISO.....	81
5.11	Retard de phase du constituant semi-annuel selon les données altimétriques du golfe du Saint-Laurent .....	85
5.12	Retard de phase du constituant annuel dans les données marégraphiques du golfe du Saint-Laurent .....	86
5.13	Niveau moyen de la mer à partir de l'analyse des données marégraphiques (barres bleues) et altimétriques (barres rouges) .....	87
5.14	Niveau moyen de la mer de la première observation à la dernière sur les côtes du golfe du Saint-Laurent .....	87
6.1	Comparaison du niveau moyen relatif de la mer (NMRM) et du niveau moyen absolu de la mer (NMAM) dans le golfe du Saint-Laurent .....	91
6.2	Comparaison du mouvement de terrain vertical obtenu à partir de a) la technique DPIInRSO et b) la soustraction des données marégraphiques et altimétriques (altimétrie moins marégraphe) .....	93

## Liste des sigles et des abréviations

---

AGI	Ajustement Glacio-Isostatique
ANM	Anomalie du Niveau de la Mer, de l'anglais <i>SLA</i>
ASMC	Analyse Spectrale des Moindres Carrés, de l'anglais <i>LSSA</i>
AVISO	Archiving, Validation and Interpretation of the Satellite Oceanographic
CAD	Correction Atmosphérique Dynamique
CMEMS	Copernicus Marine Environment Monitoring Service
DPInRSO	Diffuseurs Persistants InRSO, de l'anglais <i>PSInSAR</i>
DUACS	Data Unification and Altimeter Combination System
ÉRNM	Élévation Relative du Niveau de la Mer
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, de l'anglais <i>IPCC</i>
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
HSM	Hauteur de la Surface de la Mer, de l'anglais <i>SSH</i>
IDA	Indice de Dispersion d'Amplitude
InDRSO	Interférométrie Différentielle par Radar à Synthèse d'Ouverture, de l'anglais <i>DInSAR</i>
InRSO	Interférométrie par Radar à Synthèse d'Ouverture, de l'anglais <i>InSAR</i>
MNA	Modèle Numérique d'Altitude
MTV	Mouvement de Terrain Vertical
NetCDF	Network Common Data Form
NMM	Niveau Moyen de la Mer
NMAM	Niveau Moyen Absolu de la Mer
NMRM	Niveau Moyen Relatif de la Mer
PSMSL	Permanent Service for Mean Sea Level
RLR	Référence Locale Révisée
ROR	Radar à Ouverture Réelle
SLTAC	Sea Level Thematic Center
SMM	Surface Moyenne de la Mer
SMNS	Système Mondial de Navigation par Satellite, de l'anglais <i>GNSS</i>
SONEL	Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales

SOPAC Scripps Orbit et Permanent Array Centre  
SSALTO Segment Sol multimissions d'ALTimétrie, d'Orbitographie et de localisation précise  
StaMPS Stanford Method for Persistent Scatterers  
TDA Topographie Dynamique Absolue, de l'anglais *ADT*  
TDM Topographie Dynamique Moyenne, de l'anglais *MDT*

## Remerciements

---

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur François Cavayas pour tous ses efforts et ses conseils pendant cette période. Il m'a non seulement aidé dans mon mémoire, mais aussi il ne m'a jamais laissé seul avec les problèmes auxquels je faisais face dans ma vie personnelle. De plus, ses cours productifs auxquels j'ai vraiment aimé assister ont beaucoup augmenté mes connaissances dans des domaines que je ne connaissais pas beaucoup.

Je remercie chaleureusement professeur Spiros Pagiatakis pour son excellent développement du programme LSSA, sa formation et son partage librement et professeur Andy Hooper pour la formation au programme StaMPS (analyse DPIInRSO). Leurs efforts m'ont aidé à apprendre complètement ces programmes qui ont été très utiles dans mes recherches.

Enfin, je remercie vivement mon épouse bien-aimée Negar, à qui j'ai dédié ce mémoire, qui grâce à son soutien et à sa patience sans fin, m'a aidé à mener à bien cette recherche. Elle a toujours créé un environnement calme et confortable plein d'amour et de gentillesse et a sacrifié son temps et son énergie pour m'aider à faire ma maîtrise et à travailler sur cette recherche et à gravir les marches du succès et à atteindre des niveaux d'éducation plus élevés sans aucun souci et loin de tout stress.



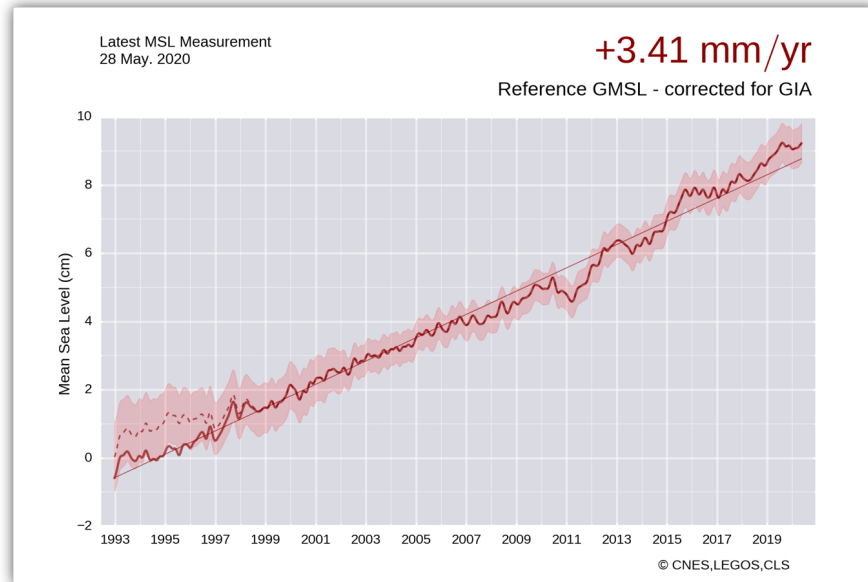
# Introduction

---

## I. Contexte de recherche

Plus de 200 millions de personnes dans le monde vivent actuellement dans les zones côtières et sur des îles océaniques à très basse altitude (Torres and Winter, 2018). Ces zones sont souvent densément urbanisées et recèlent des infrastructures importantes (McGrathan et al., 2007; Nicholls, 2010). Les zones côtières incluent aussi des écosystèmes marins de grande valeur écologique. Or, avec le réchauffement climatique, manifeste surtout depuis les deux dernières décennies du 20e siècle, et la hausse du niveau de la mer qui l'accompagne, des changements importants sont attendus dans l'environnement physique des zones côtières et insulaires jusqu'à la fin du 21e siècle. Selon Nicholls et Leatherman 1995, l'érosion des plages et des falaises, l'inondation des zones de faible altitude, l'intrusion de sel dans les eaux de surface et la hausse des nappes phréatiques sont parmi les conséquences de l'élévation du niveau de la mer. Particulièrement, les inondations affecteront des larges populations d'ici 2080 qui se chiffrent à des centaines de millions (Nicholls, 2010). Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) estime qu'une vingtaine de cm d'élévation du niveau moyen de la mer prévue d'ici 2060 serait suffisante pour affecter une population mondiale entre 300 et 400 millions (Oppenheimer et al., 2019). Les mesures par des altimètres radar satellitaires analysées de janvier 1993 à aujourd'hui montrent que le taux de la hausse de mer à une échelle globale est de l'ordre de +3.41 mm/année (figure I). Sur la figure I, la ligne droite montre l'élévation du niveau moyen de la mer (+3.41 mm/an) après suppression des signaux annuels et semi-annuels et application de la correction de rebond postglaciaire. La banse rose est l'estimation de la plage d'incertitude (niveau de confiance de 90%) des données mondiales sur le niveau moyen de la mer (incertitude de chaque correction altimétrique) (Ablain et al., 2018). De plus, la ligne en pointillés affichée sur la période 1993-1998 est une estimation de l'évolution du niveau moyen de la mer après une correction empirique dérivée en comparant les données d'altimètre et de marégraphe sur le niveau de la mer (Ablain et al., 2017).

Ainsi, si cette tendance se maintient une hausse beaucoup plus importante que la vingtaine de cm évoqué par le GIEC est envisageable. Il est donc important d'observer et



**Fig. I.** Niveau moyen global de la mer à partir de l’altimétrie satellitaire pour la période 1993-2019 (AVISO, 2019)

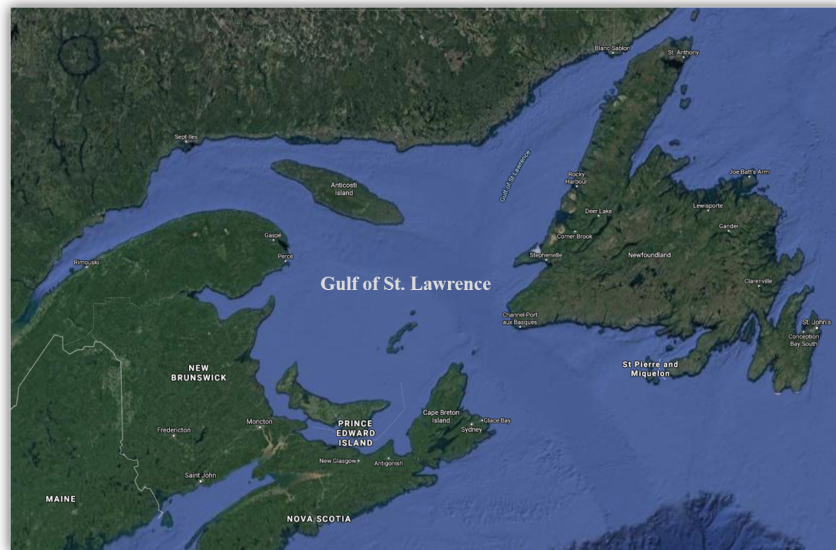
d’étudier les variations du niveau de la mer pour pouvoir évaluer ses changements à moyen et long termes (Woodworth et al., 2010).

Les facteurs qui contribuent aux changements du niveau de la mer sont nombreux. Certains de ces facteurs induisent des variations cycliques du niveau de mer. Ces variations peuvent être très lentes (changements dus à l’eustasie) ou rapides (marées). Ces facteurs s’ajoutent à ceux dus aux changements climatiques qui peuvent être résumés dans les processus océaniques (pression atmosphérique, température des eaux, stress du vent de surface, précipitations et évaporation de l’eau douce, ruissellement d’eau douce des terres), la fonte des glaciers et de la calotte glaciaire, la perte de glace du Groenland et de l’Antarctique, la fonte du pergélisol ainsi que mouvements terrestres tectoniques (Church et al., 2001; Douglas, 2001; Houghton et al., 1996; Vermeer and Rahmstorf, 2009; Woodworth et al., 2010). Cependant, la façon dont la hausse du niveau de mer se manifeste aux fils des ans à une échelle régionale ou locale peut être fort variable. Il faut donc évaluer ces changements non seulement à une échelle globale mais aussi à l’échelle régionale et locale pour pouvoir doter les organismes gouvernementaux avec des données nécessaires pour la planification des travaux de mitigation de l’impact de ces changements sur les populations côtières et insulaires (Zulkifli et al., 2018).

Les changements du niveau de mer à une échelle régionale nous ont intéressé dans cette recherche. Comme région à l’étude, nous avons opté pour les zones côtières du golfe du



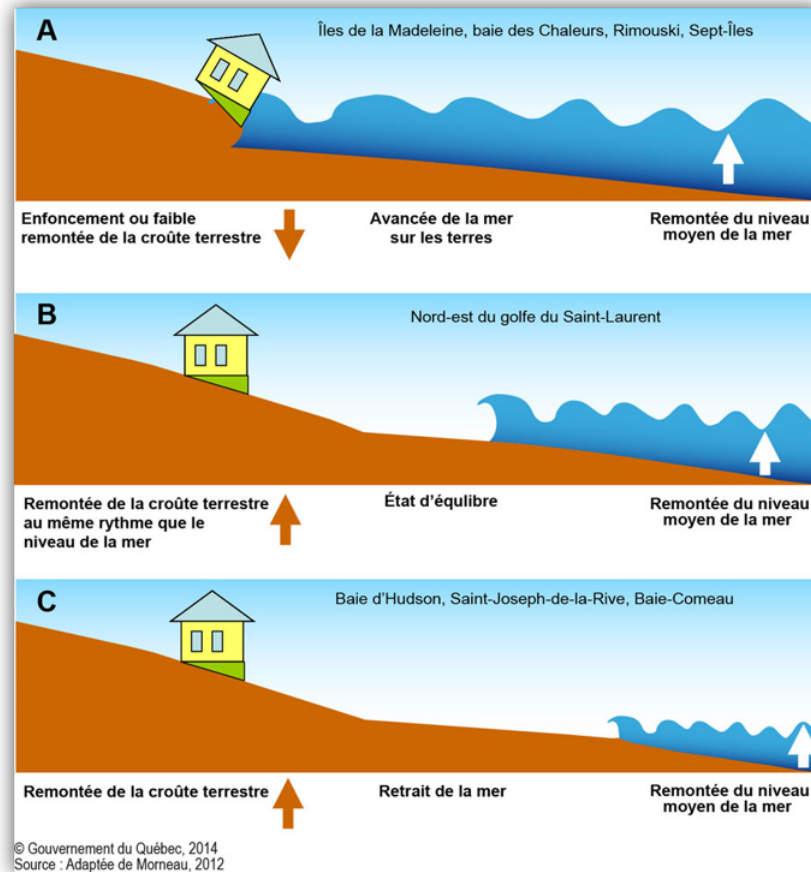
Saint-Laurent (figure II). C'est un bassin semi-fermé de l'océan Atlantique Nord-Ouest et c'est l'une des cinq grandes zones prioritaires de gestion des océans au Canada. Avec une superficie de plus de 240000  $km^2$ , le système de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent représente l'un des plus grands écosystèmes estuariens/marins au Canada et dans le monde (Benoît et al., 2012). Les changements du niveau de la mer dans cette région sont difficiles à prévoir à cause des conditions environnementales particulières du golfe de Saint-Laurent par, entre autres, l'isolement relatif de l'océan Atlantique, la réception d'une grande quantité d'eau douce du fleuve Saint-Laurent, la couverture de glace en hiver et la combinaison de zones peu profondes et profondes (Department of Fisheries and Oceans, 2005).



**Fig. II.** Le golfe du Saint-Laurent (adapté de GoogleEarth)

Un autre facteur qui vient complexifier les prévisions et le mouvement vertical de l'écorce terrestre est principalement dû au phénomène d'isostasie. Selon le Ministère de l'Environnement du Québec citant différentes études, depuis le retrait des glaciers continentaux il y a plus de 10000 ans de notre ère, l'écorce terrestre est en réajustement dans la région (Ministère de l'Environnement du Québec, 2014). La figure III schématise les situations dans le golfe du Saint-Laurent où mouvement de l'écorce terrestre et la hausse du niveau de la mer se combinent pour créer différentes situations des changements relatifs du niveau de la mer.

Certaines études tentent de prévoir les changements du niveau de la mer dans la région en utilisant différents scénarios concernant les impacts des changements climatiques à moyen et long termes (hausse de la température de des eaux océaniques, courants océaniques en Atlantique du Nord, diminution ou absence des glaces dans la zone étudiée, fonte des glaces



**Fig. III.** Situations côtières résultant de la hausse du niveau de la mer et de l'ajustement de l'écorce terrestre (source: Ministère de l'Environnement du Québec, 2014)

de l'Arctique, etc.). À titre d'exemple, Han (2016) prévoit une hausse du niveau de la mer qui serait au-dessus de la moyenne mondiale d'ici 2100. Pour leur part, James et al. 2014 prévoient une hausse moyenne du niveau de la mer d'ici à la fin du 21e siècle:

- (1) de 80 à 100 cm sur la côte Atlantique de la Nouvelle-Écosse et du Nouveau-Brunswick et sur le côté sud du golfe du Saint-Laurent
- (2) d'environ 20 à 40 cm supérieure de sa position actuelle sur la rive nord du golfe du Saint-Laurent au Québec et
- (3) de 60 à 80 cm pour Terre-Neuve

Cette variabilité régionale est expliquée en grande partie par l'impact du mouvement vertical de l'écorce terrestre. Certaines études situent ce mouvement de terrain vertical

(désormais MTV) de près de 2 mm/an d'affaissement pour certains sites de la Nouvelle-Écosse et près de 5 mm/an de soulèvement sur la rive nord du golfe du Saint-Laurent (Church et al., 2013; Savard et al., 2016). La figure III montre aussi les endroits dans le golfe qui subissent soit une avancée de la mer dans les terres, soit qui sont en état d'équilibre ou là où il y a retrait de la mer (Morneau, 2012).

L'instrument approprié pour suivre la variation du niveau de la mer sur plusieurs décennies est le marégraphe (Intergovernmental Oceanographic Commission, 1985; Pugh and Woodworth, 2014). Il mesure en continu le niveau de la mer par rapport à une surface de référence en hauteur (repère géodésique) (Colorado Center for Astrodynamics Research, 2011). L'analyse des données marégraphiques n'indique donc que les variations relatives du niveau de la mer dans la zone proche de la station marégraphique (Douglas, 1995). L'ajustement des mesures pour le mouvement vertical du terrain (MTV) sur lequel repose le marégraphe est nécessaire pour mieux évaluer les changements effectifs du niveau de la mer. La géodésie par satellite avec les mesures des altimètres radar et des stations permanentes de GNSS (Géolocalisation et Navigation par Système de Satellites: GPS, GLONAS, etc.) offre la possibilité d'atteindre des précisions sur la vitesse du MTV de l'ordre de quelques millimètres par an (Braitenberg et al., 2011; Fenoglio-Marc et al., 2004; Garcia et al., 2007; Nerem and Mitchum, 2002; Ray et al., 2010; Wöppelmann and Marcos, 2012; Zulkifli et al., 2018). Bien que les précisions atteintes répondent, en principe, aux exigences de l'évaluation de la hausse du niveau moyen de la mer, le nombre et la répartition géographique des stations marégraphiques et des stations GNSS, limitent les possibilités d'études détaillées des zones côtières. De l'autre côté la combinaison des données marégraphiques et altimétriques radar repose sur quelques hypothèses simplificatrices de la situation réelle, à savoir que, les variations du niveau de la mer enregistrées par les marégraphes près des côtes sont similaires à celles observées par les altimètres au large.

Des limitations sont présentes dans le cas d'autres approches utilisées pour estimer le MTV. À titre d'exemple le MTV peut être prédite par des modèles des processus à l'origine du MTV. La modélisation cependant n'est pas suffisamment élaboré que dans le cas des rebonds post-glaciaires (ajustement glacio-isostatique AGI) (Wöppelmann et al., 2011). Également, l'analyse des données sur le champ de gravitation terrestre provenant des satellites de la mission GRACE de la NASA ([https://www.nasa.gov/mission\\_pages/Grace/overview/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/Grace/overview/index.html)) est une autre approche pour évaluer le MTV (Zulkifli et al., 2018). Elle peut permettre le suivi des mouvements des masses terrestres, dont les mouvements verticaux, avec une précision

acceptable (Dunbar, 2013; Farrell, 1972; Levy, 2004; Wahr et al., 1998). Cependant, cette méthode souffre de la faible résolution temporelle des observations (1 mois).

Une méthode alternative pour calculer le mouvement de l'écorce terrestre dans le temps avec une portée régionale est l'interférométrie des images des radars à synthèse d'ouverture (InRSO). Certaines techniques interférométriques peuvent permettre le calcul du mouvement de l'écorce terrestre dans le temps. On les classe dans la catégorie des techniques d'interférométrie différentielle (DInRSO). Parmi celles-ci, celle qui nous a intéressé particulièrement dans cette recherche est la technique dite des diffuseurs permanents ou persistants (DPInRSO). Cette technique consiste à localiser sur une "*pile*" d'images RSO (une vingtaine d'images et même plus) des objets de réflectivité stable avec des phases qui présentent une forte cohérence dans le temps (Hooper et al., 2004). Basé sur ces diffuseurs persistants, il est possible d'atteindre une précision millimétrique dans l'estimation du mouvement vertical (Mei et al., 2008). De plus, l'indisponibilité de stations GPS dans ou à proximité de toutes les stations marégraphiques est une autre raison importante pour évaluer le potentiel de la méthode DPInRSO dans le cas du golfe du Saint-Laurent.

## II. Objectifs et hypothèses

L'objectif principal de notre recherche est de développer une procédure d'estimation du MTV faisant appel à la DPInRSO qui peut être appliquée au suivi des changements du niveau de la mer dans le golfe du Saint-Laurent. Pour ce faire, les objectifs spécifiques de notre recherche ont été fixés comme suit:

- (1) Expérimenter et valider la technique DPInRSO pour le calcul du MTV.
- (2) Élaborer une procédure intégrant le MTV, les données marégraphiques ainsi que les données des altimètres radar satellitaires pour le suivi du niveau moyen de la mer.

Pour atteindre cet objectif, premièrement, nous comparerons les résultats de l'analyse des séries temporelles d'images RSO (obtenues à partir de la méthode DPInRSO) avec les données de vitesse verticale GPS existantes pour deux régions de l'est du Canada : Halifax (Nouvelle-Écosse) et St. John's (Terre-Neuve). Si les résultats sont acceptables, nous généraliserons l'application de la DPInRSO à l'ensemble des stations marégraphiques du golfe du Saint-Laurent. Notre principale hypothèse est que la technique DPInRSO arrive à des résultats comparables à la technique impliquant le GPS. Cette hypothèse est réconfortée par les résultats de certaines études récentes à des régions autres que le golfe. Ainsi, l'étude de Hastaoglu (2016) conclut à une forte corrélation ( $r = 0.84$ ) entre les mesures GPS et celles

provenant de DPInRSO. Aussi, Biswas et al. (2019) concluent que la déformation dérivée du DPInRSO révèle une bonne corrélation avec des écarts minimes par rapport aux mesures GPS. Les avantages et inconvénients de chaque méthode du point de vue méthodologique (procédures de calcul) et pratique (accès et préparation des données initiales) seront évalués.

### **III. Structure du mémoire**

Notre mémoire comprend six chapitres. Les deux premiers chapitres présentent un aperçu respectivement de la méthode DPInRSO et des méthodes géodésiques qui sont utilisées dans cette recherche. Dans le troisième chapitre, la méthodologie de la recherche ainsi que les données utilisées sont discutées. L'application de la technique des diffuseurs persistants est présentée dans le chapitre quatre. Les définitions du NMM (à partir des données marégraphiques et des données d'altimétrie satellitaire) et du NMM absolu seront expliqués dans les chapitres cinq et six. Ce mémoire se terminera par des conclusions et perspectives de recherche.



# Chapitre 1

---

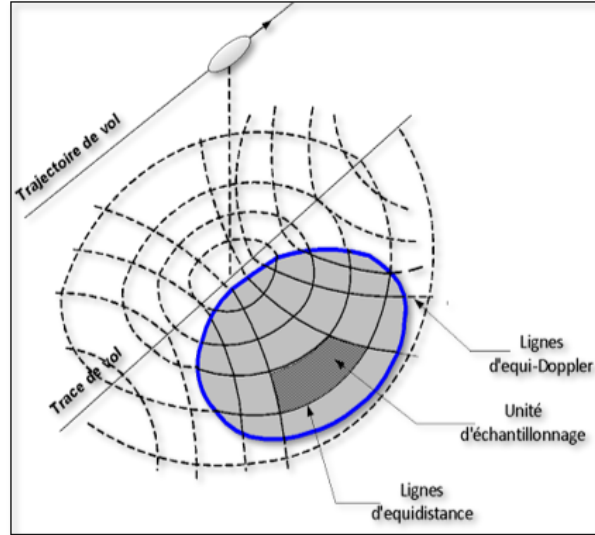
## Estimation du mouvement vertical de l'écorce terrestre par interférométrie radar: la technique des diffuseurs persistants

Le fonctionnement du radar à synthèse d'ouverture est amplement détaillé dans un grand nombre d'ouvrages (par ex., Henderson et Lewis, 1998; Moreira et al., 2013). Il en va de même pour l'interférométrie radar (par ex., Ferretti et al., 2007). Nous ne présenterons que certaines informations de base qui serviront par la suite comme référence. L'accent est mis sur les radars à bord des satellites ainsi que sur l'interférométrie sur diffuseurs persistants pour l'évaluation des mouvements de l'écorce terrestre, technique que nous utiliserons dans cette recherche.

### 1.1. Les radars à synthèse d'ouverture (RSO): aperçu

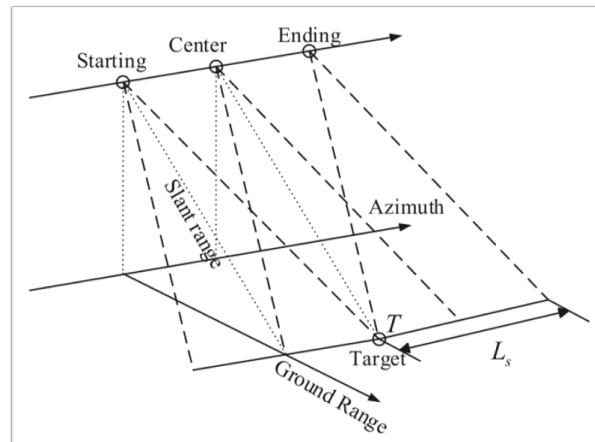
Le RSO est un radar à impulsions microondes. À chaque impulsion émise correspond une ligne de balayage brute du terrain dont la largeur est de plusieurs kilomètres et la longueur est de plusieurs dizaines de kilomètres. Toutes les deux dimensions dépendent de la longueur d'onde ainsi que des dimensions physiques de l'antenne. À l'intérieur de chaque ligne de balayage, les objets sont repérés selon leur distance (portée) du radar et la fréquence Doppler des signaux provenant de ces objets (azimut) (figure 1.1). Une matrice de signaux est ainsi générée par ligne de balayage. Il est à noter que dans la direction des portées, un vecteur des signaux est généré par élément de la matrice en utilisant une impulsion modulée en fréquence (*chirp*) afin de réduire l'exigence d'une puissance forte du signal tout en maintenant (après traitements) une résolution fine en portée.

Comme plusieurs lignes de balayage brutes consécutives se chevauchent, nous possédons plusieurs matrices où chaque objet est "*vu*" à la même distance du radar mais avec une fréquence Doppler différente (figure 1.2). Il est donc possible par traitement des signaux avec des processeurs spécialisés d'obtenir des lignes de balayage dont la résolution dans la direction azimutale est en principe la moitié de la longueur physique de l'antenne, indépendante donc



**Fig. 1.1.** Formation d'une matrice de signaux par ligne de balayage: repérage des objets en portée et azimuth (adapté de Elachi et al., 1982)

de la distance du radar et de la longueur d'onde. Dans la direction des portées, la résolution est:

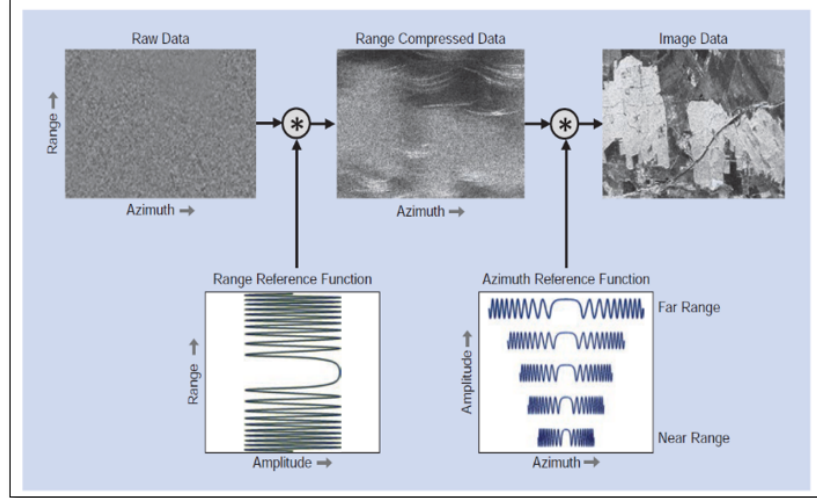


**Fig. 1.2.** Géométrie de radar à ouverture synthétique (Long et al., 2018)

$$\rho_r = \frac{c}{2B_d} \quad (1.1.1)$$

où  $c$  est la vitesse de la lumière et  $B_d$  est la largeur de bande de l'impulsion modulée en fréquence. La figure 1.3 illustre le processus des traitements pour l'obtention de l'image finale.





**Fig. 1.3.** Processus de création d'une image RSO en format SLC: focalisation des signaux en portée suivie de focalisation des signaux en azimuth (source: Moreira et al., 2013)

Les données brutes issues des processeurs spécialisés comprennent deux matrices, l'une contenant la composante en phase (**I**) et l'autre la composante en quadrature de phase (**Q**). Les objets sont repérés selon la portée (oblique) du radar et le zéro de Doppler. Nous parlons du format complexe une-vue (SLC pour Single Look Complex) qui est utilisé en interférométrie.

Grâce à la conservation des composantes  $I$  et  $Q$  des signaux de retour, il est possible de générer l'amplitude (ou la puissance) ainsi que la phase du signal:

$$\begin{aligned}
 \textit{Amplitude} &= \sqrt{I^2 + Q^2} \\
 \textit{Puissance} &= I^2 + Q^2 \\
 \textit{Phase} &= \arctan\left(\frac{I}{Q}\right)
 \end{aligned}
 \tag{1.1.2}$$

L'amplitude indique la capacité d'un objet de rétrodiffuser les micro-ondes et dépend des paramètres de fonctionnement du radar (longueur d'onde, polarisation, angle de visée) et des paramètres géométriques et électriques des objets visés. Elle est souvent exprimée en unités du coefficient de rétrodiffusion (sigma zéro). La phase pour sa part (mesurée modulo  $2\pi$ ) représente à la base une mesure fine de la distance qui sépare le radar de la cible (contribution géométrique) (Maghsoudi and Mahdavi, 2016):

$$\phi_{dis} = \frac{4\pi}{\lambda} R
 \tag{1.1.3}$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde du radar et  $R$  la portée.

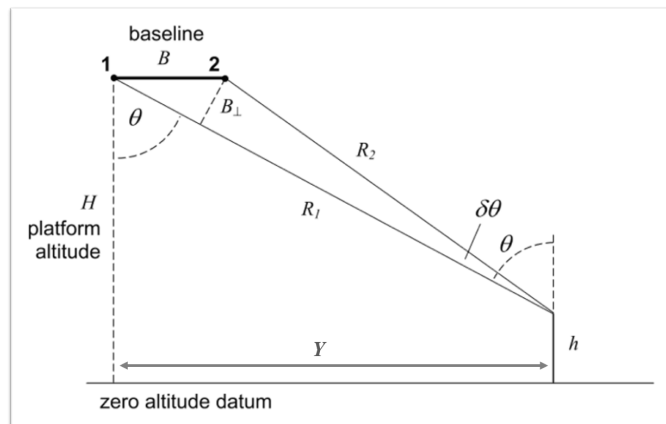
En effet, un changement de la phase de  $2\pi$  radians correspond selon l'équation 1.1.3 à un changement de  $\lambda/2$  de la portée. Ainsi, par exemple, pour un RSO fonctionnant en bande  $C$  avec une longueur d'onde aux alentours de 5.6 cm, un changement d'un cycle en phase correspondrait à environ 2.8 cm. Mais les objets selon leur mécanisme de diffusion causent un certain déphasage qui leur est propre (Maghsoudi and Mahdavi, 2016):

$$\phi = \phi_{dis} + \phi_{dif} \quad (1.1.4)$$

Ainsi la phase, à cause du caractère aléatoire de ce déphasage, est inutilisable comme source d'information. C'est grâce à la différence des phases des deux (ou plus) images acquises sur le même territoire que nous pouvons exploiter les phases via l'interférométrie RSO. Le terme interférométrie RSO (InRSO) englobe une série de techniques qui visent l'un ou l'autre des objectifs suivants:

- (a) estimer l'altitude du terrain dans la direction des portées;
- (b) estimer le déplacement du terrain entre les deux acquisitions dans la direction des portées; et
- (c) estimer la vitesse des objets mobiles dans la direction des portées.

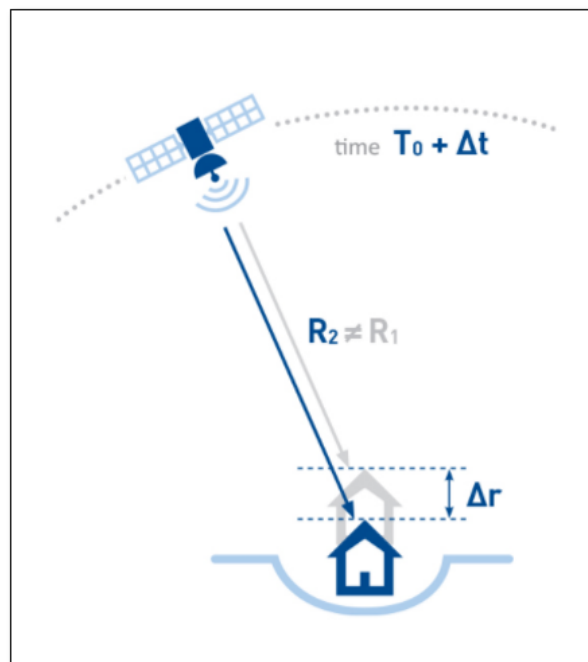
Dans le cas des satellites et pour atteindre les deux premiers objectifs nous avons besoin des images prises, idéalement, avec le capteur dans le même plan de visée tel que montré dans la figure 1.4.



**Fig. 1.4.** Géométrie d'acquisition d'une paire interférométrique pour le calcul de l'altitude du terrain (Richards, 2009)

En l'interférométrie transversale (*Across-Track Interferometry*), les satellites sont séparés d'une certaine distance appelée la ligne de base (baseline). Une ligne de base de plusieurs centaines de mètres est choisie lorsque nous voulons rendre l'interféromètre RSO sensible aux variations de la topographie. En revanche une courte ligne de base est choisie pour éliminer l'impact de la topographie sur la phase et rendre l'interféromètre RSO sensible au mouvement du sol. Dans ce dernier cas, nous parlons de l'interférométrie différentielle (DInSAR). L'intervalle de temps qui sépare les deux acquisitions est appelé la ligne de base temporelle (Ferretti et al., 2007). Finalement, le dernier objectif est réalisable avec le satellite à deux positions différentes sur la même orbite. On parle alors de l'interférométrie le long de la trajectoire (*Along-Track Interferometry*).

Comme mentionné, dans cette recherche nous nous intéressons à l'estimation du mouvement du sol par interférométrie (figure 1.5). Afin de mieux comprendre la technique appliquée dans cette recherche (l'interférométrie sur diffuseurs persistants (DPInRSO ou PSInSAR)), la méthode conventionnelle d'interférométrie est également expliquée (section 1.2). La section 1.3 présente cette technique et discute de son potentiel pour quantifier le mouvement du sol.



**Fig. 1.5.** Principe d'acquisition d'une paire interférométrique pour le calcul de la déformation du sol dans la direction des portées (TRE ALTAMIRA (CLS Group Company), dernière consultation août 2020)

## 1.2. Interférométrie différentielle

Dans l'approche conventionnelle de l'interférométrie différentielle, la procédure de formation d'une carte de déplacements suit les étapes suivantes:

- (1) Choix de la paire interférométrique
- (2) Recalage et autres prétraitements
- (3) Génération de l'interférogramme et de l'image de cohérence
- (4) Amélioration de l'interférogramme
- (5) Déroulement de phase
- (6) Conversion des phases en déplacements du sol
- (7) Création des cartes de déplacement géocodées

Plusieurs paires interférométriques sont souvent utilisées avec une ligne de base temporelle donnée. Ainsi plusieurs cartes de déformation sont générées et comparées entre elles. Deux produits finaux peuvent ainsi être générés:

- une carte de déformation cumulative ou
- une carte des vitesses de mouvement du sol

Les cartes des déplacements cumulatifs sont créées en intégrant les vitesses estimées pour l'intervalle de temps entre les acquisitions d'images de chaque paire interférométrique. Chaque étape requiert l'exécution d'algorithmes. Pour certaines étapes comme le filtrage ou le déroulement de phase, nombreux sont les algorithmes proposés faisant appel à une variété de méthodes et de techniques (Ferretti et al., 2007). Nous présenterons par la suite un aperçu de ces étapes en se référant sur les guides d'utilisateur des certains logiciels commerciaux (Gamma<sup>1</sup>, Geomatica<sup>2</sup>, SARscape<sup>3</sup>) ou à accès libre (SNAP<sup>4</sup>) ainsi que le guide de l'ESA (Ferretti et al., 2001).

### 1.2.1. Choix des images

Comme mentionné, les images doivent être séparées d'une ligne de base perpendiculaire d'une dizaine de mètres tout au plus afin de minimiser la composante de phase due à la topographie, comme il le sera question plus loin. Les logiciels incluent le plus souvent un module qui permet d'estimer la ligne de base d'une paire interférométrique et d'autres

---

<sup>1</sup>Gamma Remote Sensing (2007) Interferometric SAR Processing

<sup>2</sup>Geomatica-PCI Geomatics (2017) InSAR User Manual

<sup>3</sup>SARscape- Harris Geospatial Solutions (2017) SARscape User Guide

<sup>4</sup>ESA (2016), TOPS Interferometry Tutorial

informations utiles à partir des données orbitales contenues dans les métadonnées qui nous aident à arrêter notre choix.

Si notre intention est de produire des cartes de déformations cumulatives, il est préférable de choisir des intervalles de temps réguliers entre les acquisitions des images (p. ex. à tous les 3 mois) afin de ne pas biaiser le résultat final d'intégration des vitesses de déformations.

### 1.2.2. Recalage et autres prétraitements

Dans une paire interférométrique, une des images est considérée image de *référence* et la seconde image *dépendante*. Le recalage vise à rendre conforme la géométrie de l'image dépendante à celle de l'image de référence. Le but est d'arriver à recaler les images avec une exactitude d'une fraction de pixel (p. ex. 1/8 du pixel). Souvent, le recalage comprend un recalage grossier suivi d'un recalage fin (Li and Bethel, 2008). Le recalage grossier implique le calcul approximatif des décalages moyens à appliquer à l'image dépendante. Le recalage fin comprend la localisation précise des points homologues dans les deux images par des méthodes comme la corrélation croisée ou la méthode de la visibilité des franges (Li and Bethel, 2008). Grâce à ces points, les coefficients des fonctions polynomiales sont définis par moindres carrés permettant la mise en congruence précise de l'image dépendante et de l'image de référence. Un rééchantillonnage des valeurs complexes de l'image dépendante est alors appliqué afin de compléter le recalage. Des exemples de fonction de rééchantillonnage sont la bilinéaire, la convolution cubique ou la  $(\sin x/x)$  tronqué. Dans le cas d'un terrain avec un relief important l'utilisation d'un MNA est conseillée pour un recalage plus précis (Li and Bethel, 2008).

Avant de passer à l'étape de la création de l'interférogramme, l'application d'une autre opération est souvent conseillée, le filtrage dit de la bande passante commune visant à améliorer la cohérence des signaux, particulièrement dans le cas des diffuseurs distribués. Ferretti et al. (2007) donnent des détails sur cette opération et la marche à suivre pour la réaliser. Dans la direction des portées, le filtrage vise à corriger la décorrélation due au fait que les spectres en fréquence des signaux (*chirp*) reçus par le RSO à chacune de deux positions et provenant du même élément au sol ne sont pas tout à fait alignés en raison des angles de visée légèrement différents. Dans la direction azimutale, il y a aussi un décalage fréquentiel qui est dû à une légère différence dans l'inclinaison du faisceau. Il faut noter que cette opération de filtrage diminue la résolution spatiale de l'interférogramme et est ainsi déconseillé dans le cas de l'application de la technique des diffuseurs persistants comme il le sera question plus loin (Ferretti et al., 2007).

### 1.2.3. Génération de l'interférogramme et de l'image de cohérence

Une fois la paire d'images recalée, on procède au calcul de l'interférogramme. Il est obtenu par multiplication de l'image de référence par le conjugué complexe de l'image dépendante. Par conséquent, la phase de l'interférogramme est la différence de phase de la paire d'images et son amplitude est le produit de leurs amplitudes (Maghsoudi and Mahdavi, 2016):

$$\begin{aligned} S_1 &= A_1 e^{i\phi_1} \quad \text{et} \quad S_2 = A_2 e^{i\phi_2} \\ S_1 \cdot S_2^* &= A_1 A_2 e^{(\phi_1 - \phi_2)} = A e^{\Phi} \end{aligned} \quad (1.2.1)$$

où  $S_1$  et  $S_2$  sont les signaux enregistrés des deux images pour le même pixel,  $A_1$ ,  $A_2$  sont leurs amplitudes, et  $\phi_1$  et  $\phi_2$  leurs phases.  $\Phi$  est la différence des phases ou phase interférométrique. Dans l'équation 1.2.1, l'astérisque signifie le conjugué complexe.

Le coefficient de cohérence est un paramètre complexe dont l'amplitude détermine la qualité de l'interférogramme, et sa phase est la phase de l'interférogramme. Il est représenté par la formule suivante (Touzi et al., 1999):

$$\gamma = \frac{E\{S_1 \cdot S_2^*\}}{\sqrt{E\{|S_1|^2\} \cdot E\{|S_2|^2\}}} = |\gamma| e^{i\phi} \quad (1.2.2)$$

où  $E$  est la valeur escomptée,  $S_1$  et  $S_2$  sont les valeurs complexes d'un pixel dans deux images,  $\gamma$  est la cohérence du pixel entre deux images,  $|\gamma|$  est l'amplitude de la cohérence, et  $\phi$  est sa phase. L'astérisque signifie le conjugué complexe.

Si ce coefficient est proche de 1, cela indique que les deux images ont une très bonne corrélation. En revanche, un coefficient bas indiquerait une décorrélation des signaux donc une qualité inférieure de l'interférogramme. La nature de ces décorrélations et les possibilités des leurs corrections sont revues dans la section suivante.

L'image de cohérence est générée en tenant compte du voisinage de chaque pixel à l'intérieur d'une fenêtre mobile de  $N \times M$  éléments. Le calcul de la cohérence se fait alors par l'équation:

$$|\hat{\gamma}(i, j)| = \frac{|\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M S_{ref}(i, j) S_{dep}^*(j, i) e^{-j\phi(n, m)}|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |S_{ref}(i, j)|^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |S_{dep}(i, j)|^2}} \quad (1.2.3)$$

où  $e^{-j\phi(n, m)}$  est un terme d'ajustement selon la pente du terrain.

Différentes techniques sont proposées pour évaluer ce terme comme par exemple l'utilisation d'un MNA. La taille de la fenêtre doit permettre une estimation correcte de la cohérence tout en évitant une perte importante de la résolution de l'image de cohérence.

#### 1.2.4. Amélioration de l'interférogramme

La phase interférométrique,  $\Phi_{int}$ , est la somme des contributions de plusieurs facteurs (Dehghani et al., 2013):

$$\Phi_{int} = \Phi_{topo} + \Phi_{FE} + \Phi_{disp} + \Phi_{atm} + \Phi_{orb} + \Phi_{noise} \quad (1.2.4)$$

où

- $\Phi_{topo}$  est la composante due à la topographie
- $\Phi_{FE}$  est la contribution de la Terre plate due au changement de l'angle de visée dans la direction transversale
- $\Phi_{disp}$  est la composante due aux déformations de surface, d'intérêt dans cette recherche
- $\Phi_{atm}$  représente la composante due à l'atmosphère
- $\Phi_{orb}$  est la composante due à l'orbite de la plate-forme
- $\Phi_{noise}$  représente la composante due au bruit

Il est donc essentielle de trouver des techniques qui permettraient d'éliminer les différentes composantes de phase autres que celle due à la déformation de surface entre les deux acquisitions. Nous verrons par la suite comment ceci peut se faire.

##### 1.2.4.1. Élimination de la phase topographique ( $\Phi_{topo}$ )

On peut prouver que la composante de la phase interférométrique due à la topographie peut s'écrire (voir figure 1.4) (Maghsoudi and Mahdavi, 2016):

$$d\phi_{topo} = \frac{4\pi B \cos \theta}{\lambda R_0 \sin \theta} dh \quad (1.2.5)$$

Cette équation nous montre que si la ligne de base  $B$  est zéro, la topographie n'affectera pas la phase d'interférogramme. Ceci représente une situation idéale car dans la pratique il est difficile d'obtenir deux images avec le satellite exactement à la même position. Ainsi, afin de corriger cet effet, nous introduisons un MNA de la zone d'intérêt reprojété dans la géométrie RSO (portée oblique-azimut). Cependant, la qualité du MNA utilisé affectera directement la précision de la correction de phase (Maghsoudi and Mahdavi, 2016). Pour un

RSO opérant sous des conditions typiques (portée oblique de 1000 km et angle d'incidence de 35°), on évalue à 1 mm l'erreur dans le calcul du déplacement de surface pour une erreur d'une quarantaine de mètres en altitude. Il est ainsi conseillé d'utiliser un MNA d'une exactitude altimétrique de l'ordre de  $\pm 20$  m. Également, puisque le MNA est reprojété selon la géométrie du RSO, il est préférable que son espacement inter-pixel soit inférieur à celui de l'image RSO.

Une deuxième approche pour supprimer la phase topographique de l'interférogramme est l'utilisation d'une troisième image RSO (Richards, 2009). Deux des images RSO sont utilisées pour former un interférogramme correspondant à la topographie seule. La phase topographique est ensuite supprimée de la phase interférométrique dérivée de deux autres acquisitions qui maximisent l'effet du changement topographique. En fait, cette approche est à la base de la technique DPInRSO comme nous le verrons plus loin (Richards, 2009).

#### 1.2.4.2. *Élimination de la phase de la Terre plate ( $\Phi_{FE}$ )*

Le fait que l'angle de visée du RSO varie tout le long de la fauchée du RSO, des franges parallèles à la direction azimutale apparaissent sur l'interférogramme. La composante de phase due à cet effet de la Terre plate est donnée par l'équation suivante:

$$d\phi_{FE} = \frac{4\pi B \sin \theta}{\lambda} \quad (1.2.6)$$

Pour éliminer cette contribution et "aplatir" l'interférogramme, nous procédons dans un premier temps à la synthèse d'un interférogramme à l'aide d'un modèle de l'ellipsoïde terrestre, par ex. le *WGS84*, et les paramètres orbitaux connus du satellite. Cette interférogramme de synthèse est par la suite soustrait de l'interférogramme pour éliminer cette composante. Il est à noter que l'aplatissement de l'interférogramme peut se faire en synthétisant l'interférogramme à l'aide d'un MNA et inclure ainsi la contribution de la topographie.

#### 1.2.4.3. *Élimination de la phase causée par l'atmosphère ( $\Phi_{atm}$ )*

Les indices de réfraction entre les différentes couches de l'atmosphère (particulièrement l'ionosphère) affectent les signaux radar, ce qui entraîne un retard et modifie la phase du signal. L'erreur atmosphérique peut créer une erreur de 15 cm dans l'estimation du déplacement vertical (Zebker et al., 1997). La phase due à l'atmosphère ne peut être traitée lorsque nous ne disposons que d'une seule paire interférométrique. Dans ce cas, il faut rejeter les images acquises sous des conditions météorologiques adverses (pluies, neige) ou lors de journées très chaudes, lesquelles sont souvent accompagnées d'un haut taux d'humidité de l'air.



Selon Ferretti et al. (2007), les acquisitions effectuées le soir en orbite ascendante durant la même saison sont moins affectées par les effets atmosphériques. Comme nous le verrons plus loin, l'utilisation d'un grand nombre d'images, comme dans le cas de la méthode des diffuseurs persistants, permet de s'affranchir des problèmes liés à l'atmosphère.

#### 1.2.4.4. Correction de phase causée par l'orbite ( $\Phi_{orb}$ )

Dans les techniques d'interférométrie à deux ou à plusieurs passages, il est très important d'appliquer les coordonnées satellites précises pour estimer la ligne de base. L'erreur de cette estimation a deux composantes, horizontale et verticale. Pour leur correction, on suppose que ces erreurs sont représentées par des franges de basse fréquence. Une transformée de Fourier (*FFT*) est alors appliquée à l'interférogramme d'une façon itérative en filtrant les basses fréquences à la fois dans la dimension horizontale et verticale (Maghsoudi and Mahdavi, 2016).

#### 1.2.4.5. Correction de phase causée par le bruit ( $\Phi_{noise}$ )

La phase due au bruit est traitée lors de l'étape de filtrage de l'interférogramme souvent après avoir appliqué son aplatissage et après élimination de la contribution de la topographie. Il faut noter cependant que le filtrage réduit uniquement le bruit de phase aléatoire dû à la variation des conditions des cibles, Une revue exhaustive de l'opération de filtrage est donnée par Xu et al. (2020). Le filtre adaptatif de Lee et de ses collaborateurs et ses variantes ou le filtre de *Goldstein* et *Werner* (1998) et ses variantes sont souvent proposés par différents logiciels spécialisés en interférométrie.

### 1.2.5. Déroulement de phase

Comme mentionné précédemment, les capteurs mesurent la phase modulo  $2\pi$ :

$$\phi' = \phi_r - \phi_s = 2k\pi + \phi \quad (1.2.7)$$

où  $\phi_r$  est la phase reçue,  $\phi_s$  est la phase transmise,  $k$  est le nombre entier de phase,  $\phi'$  est la phase réelle et  $\phi$  est la phase enregistrée par le capteur.

Basé sur cette formule,  $2k$  est l'ambiguïté de phase pour chaque pixel. Maintenant, pour calculer la phase d'interférogramme pour chaque pixel dans deux images, la formule suivante est considérée:

$$\Phi' = \phi'_2 - \phi'_1 = 2(k_2 - k_1)\pi + (\phi_2 - \phi_1) = 2k'\pi + \Phi \quad (1.2.8)$$

où  $\phi'_1$  et  $\phi'_2$  sont la phase réelle du pixel dans deux images,  $\phi_1$  et  $\phi_2$  sont les phases enregistrées pour le pixel dans deux images,  $k_1$  et  $k_2$  sont les nombres entiers de phases pour le pixel dans deux images,  $k'$  est le nombre entier de phase d'interférogramme,  $\Phi'$  est la phase interférométrique réelle, et  $\Phi$  est la phase d'interférogramme obtenue (Maghsoudi and Mahdavi, 2016).

Le déroulement de phase est l'opération cruciale en interférométrie où l'on essaie, en explorant d'une manière ou d'une autre l'interférogramme, d'établir le nombre de cycles ( $k'$ ) à ajouter ou retrancher de la phase interférométrique de chaque pixel (Maghsoudi and Mahdavi, 2016; Richards, 2009).

Les algorithmes pour réaliser le déroulement de phase sont nombreux (voir la revue récente de Yu et al., 2019). Décrire tous ces algorithmes dépasse largement l'objectif de notre mémoire. Nous nous limiterons à la description sommaire de l'algorithme *SNAPHU* utilisé dans cette étude.

SNAPHU, proposé par Chen et Zebker (2000; 2001), est un algorithme faisant appel à la théorie des réseaux de flot et la notion des résidus (Statistical-cost Network-flow Algorithm for PHase Unwrapping). Les résidus sont des points où la somme des différences de phase dans une boucle fermée ( $2 \times 2$  pixel) normalisée par  $2\pi$  n'est pas, tel qu'attendu, égale à 0. Si cette somme est égale à +1 (résidu positif) ou -1 (résidu négatif), nous sommes en présence d'une anomalie. Les méthodes des réseaux de flot se basent sur l'hypothèse que les discontinuités dans les phases se situent le long des parcours qui relient des résidus de polarité opposée. La méthode quantifie les discontinuités explicitement pixel par pixel et les minimisent globalement dans l'interférogramme déroulé. SNAPHU, utilise un réseau de flot pour initier sa procédure itérative de la recherche d'une solution optimale avec une fonction de coût basée sur une modélisation statistique.

### 1.2.6. Conversion de la phase en mesure de déformation de surface

Cette étape comporte deux opérations:

- (1) Conversion des phases en déplacements du sol
- (2) Création des cartes de déplacement géocodées

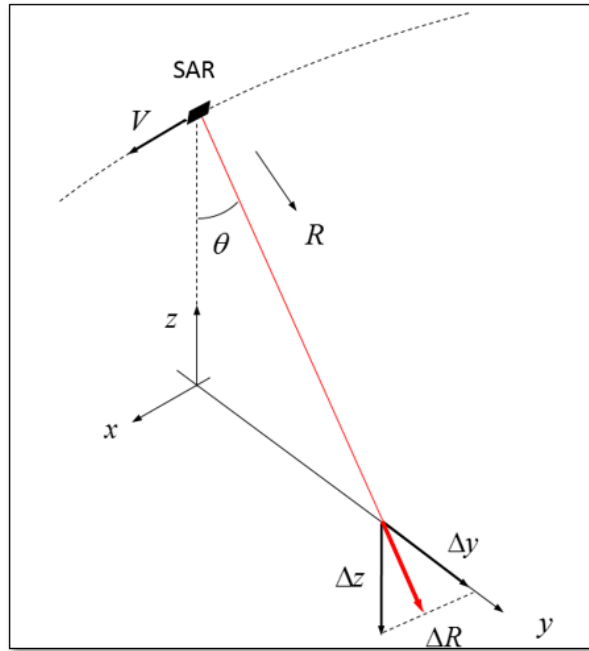
Pour convertir la phase déroulée en déplacement de surface, en supposant que les contributions des différents facteurs qui impactent sur la phase sont éliminés, nous pouvons utiliser l'équation suivante:

$$\Delta R = \frac{\lambda}{4\pi} \Phi'_{disp} \quad (1.2.9)$$

où  $\Delta R$  est le déplacement du terrain projeté sur la direction de la portée oblique (Ferretti et al., 2007).

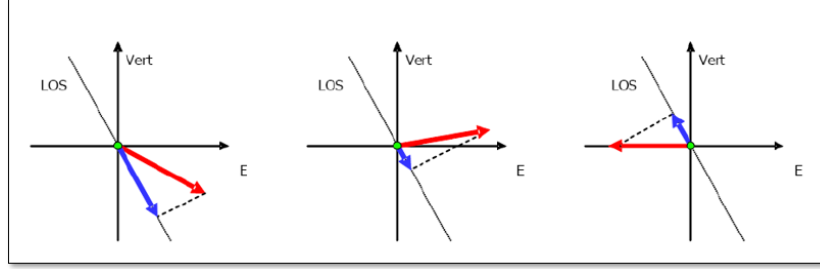
Cette équation nous permet aussi d'évaluer la sensibilité de la technique DInRSO aux déplacements du terrain. À titre d'exemple pour un RSO fonctionnant en bande C (environ 5.6 cm), une frange de l'interférogramme ( $2\pi$ ) correspond à 2.8 cm de déplacement en portée oblique. En supposant que l'angle de visée du radar est de  $35^\circ$ , alors les 2.8 cm correspondent à (figure 1.6):

- un mouvement vertical de  $\Delta z = \frac{\Delta R}{\cos \theta} \approx 3.4$  cm et
- un mouvement horizontal de  $\Delta y = \frac{\Delta R}{\sin \theta} \approx 4.9$  cm



**Fig. 1.6.** Sensibilité de la technique DInRSO aux mouvements du terrain (Eineder and Bamler, 2019)

La mesure de la composante du mouvement du sol dans la direction de la portée constitue la principale limitation de la DInRSO. Il est clair par la figure 1.6 que plus le mouvement du sol est proche de la direction de la portée plus la mesure est précise. Dans tous les autres cas, le mouvement mesuré peut différer significativement du mouvement réel. Une approche pour obtenir une mesure plus précise est d'observer le terrain selon les deux segments d'orbite (descendant et ascendant) (figure 1.7) (Bouroubi et al., 2016; Hanssen, 2001).



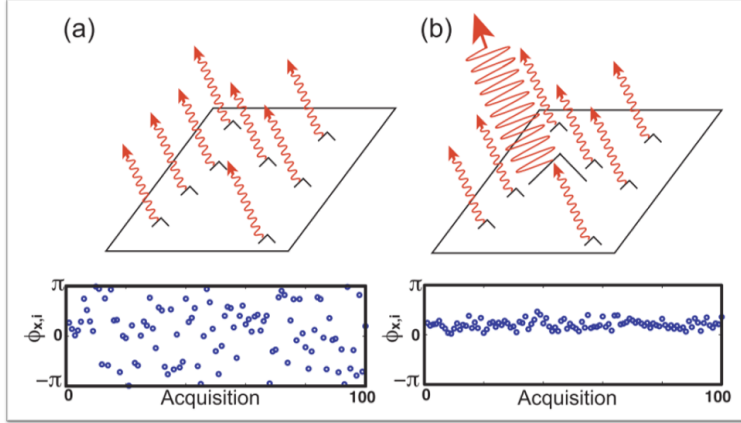
**Fig. 1.7.** Mouvement mesuré en DInRSO (vecteur bleu) dans la direction de la portée (LOS = line of sight) et mouvement réel du sol (vecteur rouge) (source: Anonymous, 2010, consulté juin 2020)

### 1.3. Interférométrie sur diffuseurs persistants (DPIInRSO)

Le terme interférométrie sur diffuseurs persistants (DPIInRSO) est utilisé pour distinguer entre l'interférométrie différentielle conventionnelle effectuée sur un seul interférogramme et une technique proposée vers la fin des années 1990 faisant appel à une multitude d'interférogrammes créés à partir d'une "pile" d'images RSO espacées dans le temps (Ferretti et al., 2001). La motivation principale pour développer une telle technique était de pouvoir évaluer et ainsi supprimer les effets atmosphériques sur la phase interférométrique. Ceci se fait en localisant des pixels qui se caractérisent par une stabilité des amplitudes et une cohérence de phase, les diffuseurs persistants. La figure 1.8 illustre la différence entre diffuseurs distribués et persistants. La phase d'un diffuseur distribué varie dans le temps d'une façon aléatoire dans l'intervalle  $\pm\pi$  radians. En revanche, si le signal d'un des diffuseurs domine à l'intérieur d'un pixel, sa phase demeure presque constante dans le temps, les interférences avec les signaux des autres diffuseurs à l'intérieur du pixel n'affectent que peu le signal du diffuseur dominant. En se servant des diffuseurs persistants, il est donc possible d'évaluer les erreurs introduites dans les phases interférométriques par les effets atmosphériques. Une fois ces erreurs éliminées, nous pouvons extraire les données sur le mouvement de la surface dans le temps dans la direction de visée du RSO (Hooper, 2006).

La mise en application de la technique DPIInRSO nécessite une série d'opérations dans un premier temps qui diffèrent passablement des opérations en DInRSO. Ces opérations sont:

- Sélection de l'image de référence
- Sélection des pixels avec des diffuseurs persistants



**Fig. 1.8.** Simulations de phase pour (a) un pixel diffuseur distribué et (b) un pixel diffuseur persistant. Les graphiques ci-dessous montrent la phase pour 100 itérations. (Hooper, 2006)

Elles seront décrites par la suite en se servant comme référence le guide du logiciel *StaMPS* qui sera utilisé dans cette recherche. *StaMPS* implémente la méthode de diffuseurs persistante InRSO. Il a été développé pour fonctionner même sur des terrains dépourvus de structures artificielles et/ou soumis à une déformation non constante.

### 1.3.1. Sélection de l'image de référence

Une pile d'images RSO est formée. Une quinzaine d'images est le minimum. Une de ces images est choisie comme image de référence. Les interférogrammes sont alors formés entre cette image et le reste de la pile. Si par exemple nous avons 20 images dans la pile, 19 interférogrammes seront créés (Hooper, 2006). L'image de référence est sélectionnée de sorte que la dispersion des lignes de base perpendiculaires entre cette image et les autres images de la pile soit aussi faible que possible. La raison en est de maintenir la cohérence entre les images. En d'autres termes, la réduction de la ligne de base perpendiculaire entre l'image référence et les autres augmentent leur corrélation spatiale et temporelle (Maghsoudi and Mahdavi, 2016).

### 1.3.2. Sélection des diffuseurs persistants

Selon la stratégie mise de l'avant par *StaMPS*, la sélection des pixels diffuseurs persistants est effectuée en deux étapes (Hooper et al., 2007):

- (1) Sélection des diffuseurs persistants potentiels en se basant sur l'indice de dispersion d'amplitude (IDA). Cet indice est un rapport entre l'écart type et la moyenne de

l'amplitude calculés par pixel pour l'ensemble de la pile d'images:

$$D_a = \frac{\sigma_a}{\mu_a} \quad (1.3.1)$$

où  $\sigma_a$  et  $\mu_a$  sont l'écart type et les valeurs moyennes de l'amplitude. Le seuil est maintenu haut (de l'ordre de 0.4) afin de détecter presque la totalité des diffuseurs persistants.

- (2) Estimation de la cohérence des phases pour l'ensemble des pixels retenus à la première étape. La cohérence pour une pile avec l'image de référence  $m$  est définie comme suit (Kampes, 2005):

$$\gamma^m = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k g(B_{\perp}^{k,m}, B_{\perp,max}) * g(T^{k,m}, T_{max}) * g(f_{dc}^{k,m}, f_{dc,max})$$

$$g(x, c) = \begin{cases} 1 - \frac{|x|}{c} & \text{if } |x| < c \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1.3.2)$$

où  $\gamma^m$  est la cohérence de l'image de référence  $m$ ,  $B_{\perp}$  représente la ligne de base perpendiculaire entre les images de référence  $m$  et dépendante  $k$  au centre de l'image,  $T$  est la ligne de base temporelle, et  $f_{dc}$  est la ligne de base Doppler (différence moyenne de fréquence centroïde Doppler). Le diviseur  $c$ , dans la deuxième équation, peut être considéré comme une ligne de base critique pour laquelle la décorrélation totale est attendue pour les diffusion distribuée. Les valeurs maximales pour la première équation ( $B_{\perp,max}$ ,  $T_{max}$  et  $f_{dc,max}$ ) sont respectivement de 1200 mètres, 5 ans et 1380 Hz pour ERS et Envisat (Kampes, 2005; Maghsoudi and Mahdavi, 2016).

L'application des deux critères de sélection des diffuseurs persistants, stabilité en amplitude et cohérence de phase, sont importants. Une cible peut avoir une amplitude stable mais une phase non cohérente. En outre, certaines cibles se comportent comme si elles étaient DP, mais seulement dans une partie des images dans la pile de données. Ces cibles ne sont pas des diffuseurs persistants. Avec cette approche, les points choisis comme DP peuvent être naturels ou artificiels. Des exemples des DP naturels sont les affleurements rocheux, les surfaces de terre dures non végétalisées et les rochers. Parmi les DP artificiels figurent des bâtiments, des lampadaires, des tours de transmission, des parapets de pont, des pipelines hors sol, ou toute structure rectiligne qui peut agir comme un réflecteur en coin.

### 1.3.3. Estimation de la vitesse du mouvement vertical de l'écorce terrestre

En supposant  $K + 1$  images RSO,  $K$  interférogrammes et  $H$  points diffuseurs persistants, le système d'équations pour estimer la différence de phase pour les diffuseurs persistants est décrit par la formule suivante. Dans cette équation, les pixels des images RSO sont décrits avec les coordonnées de  $\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix}$  en direction d'azimut et de la distance oblique (Maghsoudi and Mahdavi, 2016).

$$\Delta\Phi = \underbrace{a1^T + p_\xi\xi^T + p_\eta\eta^T}_{\text{phase atmosphérique}} + \underbrace{B\Delta q^T}_{\text{phase topographique}} + \underbrace{T\nu^T}_{\text{phase de déplacement}} + \underbrace{E}_{\text{vecteur résiduel}} \quad (1.3.3)$$

Selon cette formule, il est possible de déterminer la différence de phase de topographie ( $\Delta\Phi$ ) entre les points des diffuseurs persistants  $H$  et la phase d'interférogramme de  $K$  interférogramme produit sous la forme d'une matrice de taille  $K \times H$ . Dans cette équation, les paramètres sont (Maghsoudi and Mahdavi, 2016):

- $a[K \times 1] \Rightarrow$  vecteur de valeurs constantes de phase causée par l'atmosphère
- $p_\xi[K \times 1] \Rightarrow$  vecteur de gradient linéaire de changement de phase par l'atmosphère dans la direction d'azimut ( $\xi[H \times 1]$ )
- $p_\eta[K \times 1] \Rightarrow$  vecteur de gradient linéaire de changement de phase par l'atmosphère dans la direction distance oblique ( $\eta[H \times 1]$ )
- $B_\perp[K \times 1] \Rightarrow$  vecteur de ligne de base perpendiculaire ( $K \times H$ )
- $\Delta q[H \times 1] \Rightarrow$  vecteur de multiplication de la hauteur corrigée des points des diffuseurs persistants de  $4\pi/\lambda R \sin \theta$  (il est égal au vecteur d'erreur de topographie)
- $T[K \times 1] \Rightarrow$  vecteur de ligne de base temporel
- $\nu[H \times 1] \Rightarrow$  vecteur de vitesse de phase causé par déplacement en ligne de visée pour tous les points de diffuseur persistants
- $E[K \times H] \Rightarrow$  la valeur de phase résiduelle causée par l'atmosphère (qui est différent du valeurs constantes ( $a1^T$ ) et de valeur d'effets linéaires ( $p_\xi\xi^T + p_\eta\eta^T$ )), la phase de bruit provoquée par la décorrélation spatiale et temporelle, et les effets non uniformes de la phase de topographie.

La valeur de la vitesse de déplacement et la valeur de correction de hauteur dans les points de diffuseur persistants sont estimés par la solution de ce système d'équation non linéaire.

À la fin de cette section, il convient de noter qu'en utilisant la technique DPInRSO, il est possible d'obtenir une précision meilleure que le mètre pour l'extraction MNA et meilleure que le millimètre pour la mesure du déplacement du terrain (Ferretti et al., 2001; Maghsoudi and Mahdavi, 2016).

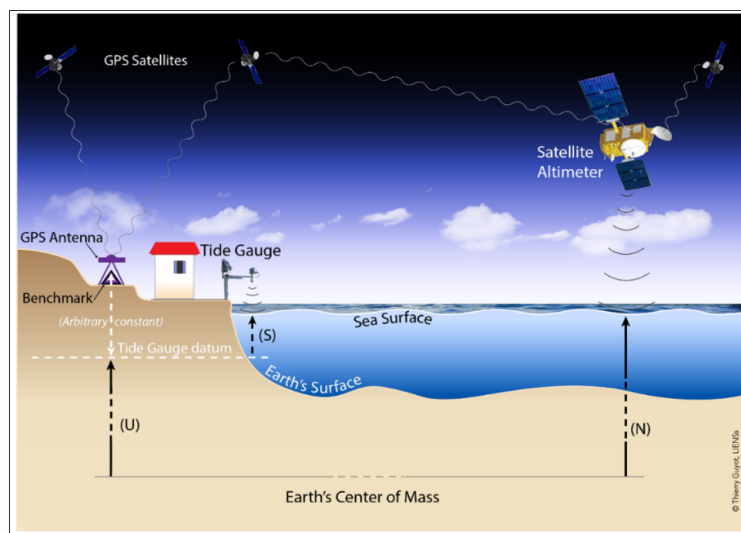


# Chapitre 2

## Techniques géodésiques

Le schéma de la figure 2.1 illustre les différentes techniques géodésiques qui seront utilisées dans notre recherche. Ainsi:

- (1) les données GPS enregistrées aux stations permanentes disponibles dans la région d'étude serviront à valider les résultats sur le déplacement du sol de la technique interférométrie des diffuseurs persistants; et
- (2) les données provenant des stations marégraphiques ainsi que les données provenant des altimètres radar serviront à étudier les changements du niveau de la mer dans la région d'étude.



**Fig. 2.1.** Techniques géodésiques utilisées dans cette recherche (Wöppelmann, 2020).

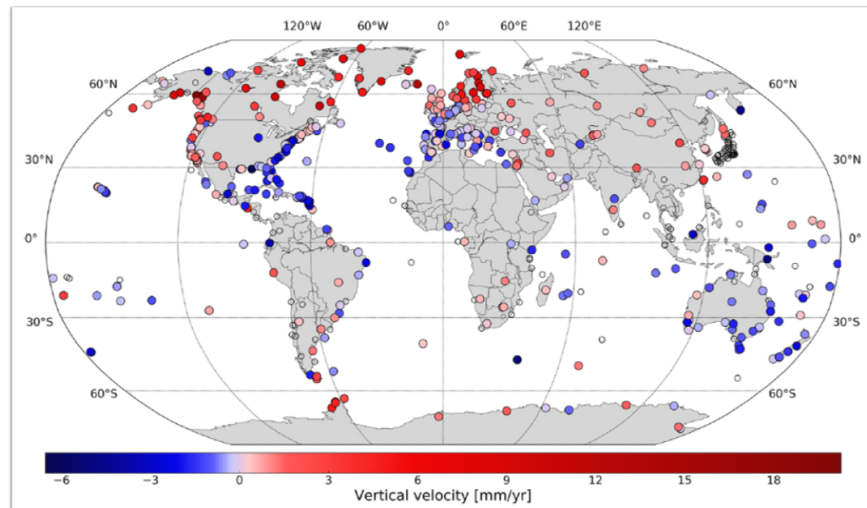
La combinaison des données marégraphiques et altimétriques est une méthode alternative pour calculer le mouvement vertical de l'écorce terrestre. Dans les sections qui suivent, nous présentons un aperçu des données disponibles de ces techniques géodésiques (section 2.1), un rappel des traitements de base des séries temporelles qui seront utilisées dans cette

étude (section 2.2), ainsi que les principes de combinaison des données marégraphiques et altimétriques (section 2.3).

## 2.1. Données disponibles pour cette recherche

### 2.1.1. Données GPS

Les GPS implantés à des stations permanentes permettent d'évaluer les trois composantes du mouvement de l'écorce terrestre: nord-sud, ouest-est et verticale. La précision avec laquelle nous pouvons mesurer le MTV est l'un des avantages principaux de l'application du GPS au problème qui nous occupe dans cette recherche. La figure 2.2 donne un exemple de l'estimation du MTV obtenue aux 757 stations GPS disséminées à travers le monde.



**Fig. 2.2.** Réseau des stations GPS à travers le monde; la couleur représente la vitesse verticale estimée après réanalyse de 19 ans de données GPS de 1995 à 2014 (Santamaría-Gómez et al., 2017)

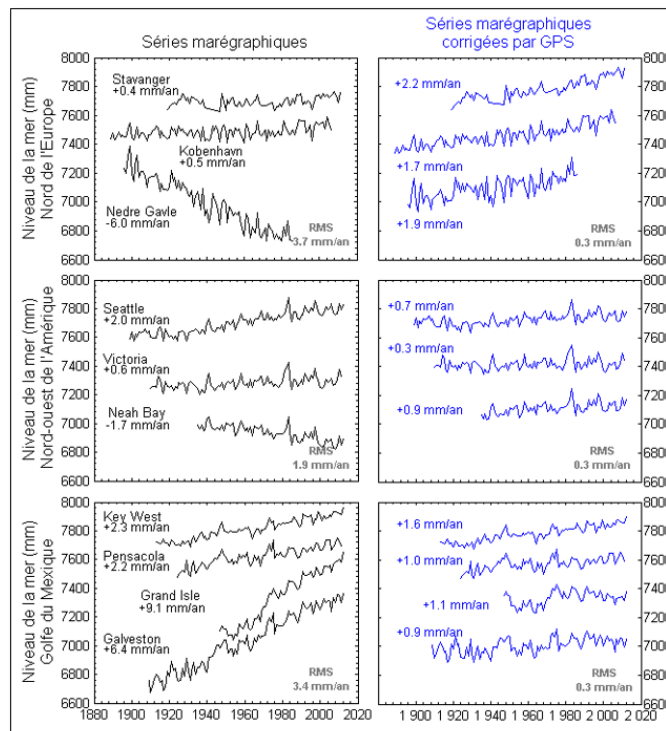
Cependant, en raison du faible nombre de stations GPS à une échelle régionale, l'application d'une approche plus globale comme celle proposée dans cette recherche est très utile. L'autre inconvénient de l'utilisation des données GPS dans le calcul du NMM absolu est la distance entre les stations GPS et les stations marégraphiques. En effet, il est suggéré que les stations GPS doivent être moins de 10 km des stations marégraphiques (Klos et al., 2019; Montillet et al., 2018; Wöppelmann et al., 2007) ou même à moins de 3 km (Feng et al., 2013). Cependant, dans la plupart des cas, cette condition n'est pas satisfaite.

Comme mentionné, les données GPS seront utilisées dans cette étude pour vérifier le MTV calculé par la méthode des diffuseurs persistants. Les données GPS par station sont disponibles sous forme de séries temporelles par des services spécialisés comme *SOPAC* (Scripps

Orbit and Permanent Array Center; SOPAC, 2019) et *SONEL* (Système d’Observation du Niveau des Eaux Littorales; SONEL, 2019). Le cadre de référence de ces services GPS est le ITRF2008 (International Terrestrial Reference Frame 2008).

### 2.1.2. Données des marégraphes

La méthode de base pour quantifier les changements du niveau de la mer est celle par analyse des données des marégraphes. Le marégraphe enregistre la hauteur du niveau d’eau en continu par rapport à une surface de référence en hauteur (figure 2.1). Ces mesures nous permettent de connaître les variations relatives du niveau de la mer dans la zone proche de la station marégraphique (Douglas, 1995). Il faut donc les corriger pour le MTV. La figure 2.3 montre l’importance de cette correction en introduisant le MTV provenant des mesures par GPS.



**Fig. 2.3.** Corrections des séries temporelles marégraphiques par les mesures GPS à différentes zones côtières dans le monde (Wöppelmann, 2020).

Plusieurs services collectent des données des marégraphes à travers le monde, les analysent, les interprètent et les rendent disponibles au public. Dépendant de la mission de ces services, les données peuvent être disponibles sur une base horaire, journalière (données

haute fréquence), mensuelle ou annuelle. Dans cette étude, les données des marégraphes ont été téléchargées à partir du service *PSMSL* (Permanent Service for Mean Sea Level). C'est la banque de données mondiale pour les informations à long terme sur le changement du niveau de la mer (mensuelle et annuelle). La responsabilité de ce Centre est la distribution des données traitées du niveau de la mer à partir du réseau mondial de marégraphes (PSMSL, 2016).

Afin de construire les séries temporelles de données de marégraphes, il est nécessaire de connaître le datum de référence (comme pour toute donnée géodésique). Le service PSMSL utilise la "*référence locale révisée (RLR)*" comme référence de marégraphe. Cette référence est définie à environ 7000 mm en dessous du niveau moyen de la mer à chaque station afin d'éviter des nombres négatifs dans les valeurs moyennes mensuelles et annuelles du RLR. Le niveau de référence RLR, les hauteurs de repère géodésique, le zéro des marégraphes, etc. sont disponibles pour la plupart des stations (PSMSL, 2019).

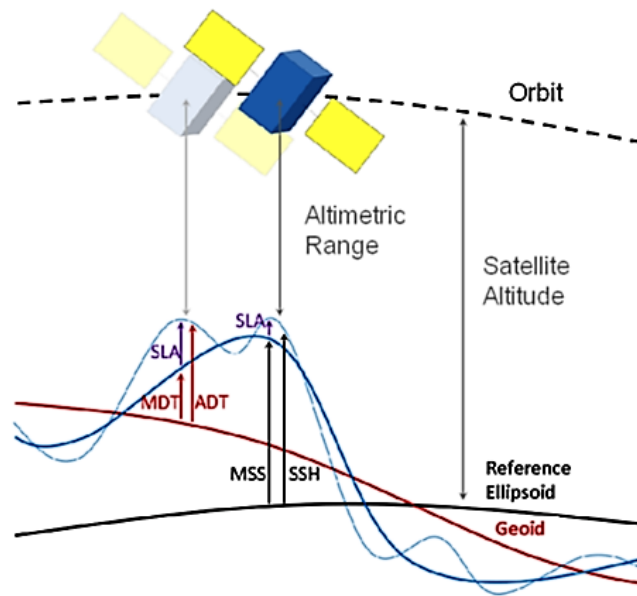
### 2.1.3. Données altimétriques

Les altimètres radar mesurent à la base la distance qui sépare l'appareil de la surface terrestre. Pour ce faire, des impulsions microondes sont émises par l'altimètre avec une fréquence de répétition donnée. Dans l'intervalle entre deux émissions, l'altimètre se met en mode réception du signal de retour de la surface (l'écho radar). Le temps émission - réception est alors mesuré. Cette mesure est transformée en hauteur de l'altimètre, la vitesse de propagation du rayonnement dans l'air étant connu. La connaissance de la position de l'altimètre dans un système géocentrique (GPS à bord, suivi de la trajectoire du satellite) permet de déduire différentes informations des mesures de l'altimètre telles que:

- la hauteur variable de la surface de la mer (topographie de l'océan)
- l'étendue latérale de la glace de mer
- la hauteur des grands icebergs au-dessus du niveau de la mer
- la topographie de la Terre et des inlandsis
- le fond de la mer
- la vitesse du vent, et
- l'anomalie du niveau de la mer

La figure 2.4 présente la terminologie spécifique utilisé en altimétrie satellitaire pour décrire les paramètres issus du traitement des mesures altimétriques (*Altimetric Range* de la figure 2.4) à l'aide des informations auxiliaires sur la hauteur du satellite par rapport à

l'ellipsoïde de référence (*Satellite Altitude*) et sur les anomalies du géoïde marin (différence entre ellipsoïde et géoïde). La connaissance de cette terminologie est nécessaire pour le téléchargement des données appropriées.



**Fig. 2.4.** Termes utilisés en altimétrie (Mertz et al., 2018)

Mesures par rapport à l'ellipsoïde de référence:

SSH: hauteur (instantanée) de la surface de la mer

MSS: moyenne temporelle de la hauteur de la surface de la mer (SSH) sur une période quelconque

SLA: anomalie (instantanée) du niveau de la mer par rapport à son niveau moyen de période quelconque ( $SSH - MSS$ )

Mesures par rapport au géoïde:

MDT: topographie dynamique moyenne; elle est la moyenne temporelle sur une période quelconque de MSS tenant compte de l'anomalie du géoïde

ADT: topographie dynamique absolue est l'altitude instantanée de la surface de la mer

Les mesures des différents altimètres radar qui ont opéré ou qui opèrent actuellement (Jason3, Sentinel-3A, HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, T/P, ENVISAT, GFO, ERS1/2) sont traitées et harmonisées par le système Ssalto/DUACS. *Ssalto* signifie "Segment Sol multimissions d'ALTimétrie, d'Orbitographie et de localisation précise" et *DUACS* signifie "Data Unification and Altimeter Combination System". Les produits

Ssalto/Duacs sont distribués par le *CMEMS* (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) qui a pris la relève de l'organisme *AVISO* (AVISO, 2019; CMEMS, 2019a). CMEMS distribue les produits altimétriques en temps quasi réel (NRT) et en temps différé (DT). Le produit NRT comprend l'acquisition, la validation et la correction des données altimétriques journalières de diverses missions altimétriques. Les données sont disponibles au bout de quelques jours tout au plus. Quant au produit DT, il comprend les données harmonisées (inter-calibrées) et extrêmement précises de l'ensemble des missions. Les produits DT sont plus précis que les produits NRT.

Les données altimétriques sont distribuées en format "le long de la trajectoire" (*along-track*) et grille (*grid*). Le tableau 2.1 indique l'étendue de la couverture ainsi que la résolution spatiale de ces deux formats. Le "Sea Level Thematic Center" (*SLTAC*) est responsable de la livraison des données sur le SSH (figure 2.4) de toutes les missions altimétriques (CMEMS, 2019b). Le format along-track représente les mesures d'origine des altimètres car les altimètres sont des profilomètres et non pas des imageurs. Le format grid provient de la combinaison des plusieurs données along-track. Pour utiliser ces données, il faut sélectionner le chemin le plus proche traversant la région à l'étude pendant le temps considéré.

**Tab. 2.1.** Produits de CMEMS en format le-long-de-la-trajectoire (along-track) et grille (grid) (Mertz et al., 2018)

Produit	Longitude (Degré est)		Latitude (Degré nord)		Along-tracks Résolution	Grid Résolution
	min	max	min	max		
<b>Global</b>	0.125	359.875	-89.875	89.875	7km (unfiltered) 14km (filtered)	0.25° ( $\sim 30km$ )

Pour de nombreuses applications et analyses de séries temporelles, il est plus facile d'utiliser les données altimétriques sous forme de grilles régulières. CMEMS distribue ce type de données avec des intervalles de temps quotidiens. Le format des données de grille est le *NetCDF* (Network Common Data Form<sup>1</sup>). Le format spécifique "Unidata-NetCDF" facilite le traitement et l'analyse de données. Les fichiers incluent toutes les données quotidiennes de la grille. Il a trois dimensions: deux dimensions pour les coordonnées géodésiques (latitude et longitude) et une dimension pour le temps. Il y a des programmes dans différents langages de programmation pour lire et écrire les fichiers NetCDF, tels que C/C++, Fortran, Java, MATLAB, Perl, Python, R, Ruby et Tcl/Tk.

<sup>1</sup><https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/docs/faq.html#ncFAQGeneral>

## 2.2. Analyse des séries temporelles

Les séries temporelles contiennent des variations périodiques dues aux mouvements de marée. La marée est la montée et la baisse du niveau de la mer causée par les effets gravitationnels, notamment la rotation de la Terre, la position de la Lune et du Soleil par rapport à la Terre, l'altitude de la Lune au-dessus de l'équateur et la bathymétrie. Les constituants des marées sont le résultat de ces effets pendant une certaine période. Généralement, les composants de marée sont divisés en "constituants harmoniques" (avec des périodes inférieures à une demi-journée) et en "constituants de longue période" (avec cycle de jours, mois ou années) (Parker, 2007). Dans le tableau 2.2, les constituants des marées hautes fréquences (diurnes) et longue période (mensuels, semi-annuel et annuels) sont indiqués. Il faut mentionner que, dans la science des marées, la fréquence a été appelée la vitesse angulaire et elle est exprimée en degrés par heure ( $^{\circ}/\text{heure}$ ) (la colonne de vitesse dans le tableau 2.2). Par exemple,  $360^{\circ}$  est égal un cycle complet de constituants de marée (Parker, 2007).

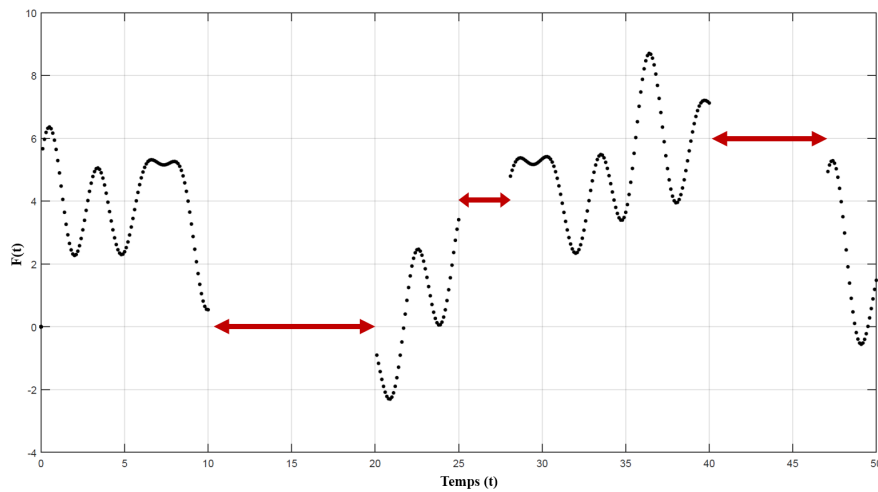
**Tab. 2.2.** Constituants des marées diurnes et à longue période (Parker, 2007)

<b>Diurne</b>	Symbole de Darwin	Période (hr)	Vitesse ( $^{\circ}/\text{hr}$ )
Lunar diurnal	$K_1$	23.9345	15.0411
Lunar diurnal	$O_1$	25.8193	13.9430
Lunar diurnal	$OO_1$	22.3061	16.1391
Solar diurnal	$S_1$	24.0000	15.0000
Smaller lunar elliptic diurnal	$M_1$	24.8412	14.4921
Smaller lunar elliptic diurnal	$J_1$	23.0985	15.5854
Larger lunar evectional diurnal	P	26.7231	13.4715
Larger lunar elliptic diurnal	$Q_1$	26.8684	13.3987
Larger elliptic diurnal	$2Q_1$	28.0062	12.8543
Solar diurnal	$P_1$	24.0659	14.9589
<b>Longue période</b>	Symbole de Darwin	Période (hr)	Vitesse ( $^{\circ}/\text{hr}$ )
Lunar monthly	$M_m$	661.3112	0.5444
Solar semiannual	$S_{sa}$	4383.0763	0.0821
Solar annual	$S_a$	8766.1527	0.0411
Lunisolar synodic fortnightly	$M_{sf}$	354.3671	1.0159
Lunisolar fortnightly	$M_f$	327.8599	1.0980

L'analyse de Fourier ou analyse harmonique ainsi que la méthode des moindres carrés sont souvent appliquées pour pouvoir estimer les caractéristiques des constituants des marées et ainsi dégager la tendance (linéaire) dans les changements du niveau de la mer.

Avant de présenter les fondements de ces deux méthodes dans les sections 2.2.1 et 2.2.2, il est nécessaire de définir quelques termes relatifs à ces méthodes.

**Séries temporelles:** est définie en fonction du temps ( $f(t_i)$ ), où  $i = 1, 2, \dots, n$ . Dans les séries temporelles, chaque donnée (ou enregistrement) est attribuée pour chaque  $t$  (figure 2.5).



**Fig. 2.5.** Séries temporelles qui incluent les lacunes (flèche rouge)

**Lacunes:** elles sont créées par l'absence de données (enregistrements) des moments spécifiques de la série temporelle. Sur la figure 2.5, les lacunes entre le temps de 10-20, 25-28 et 40-47 sont représentées par une flèche rouge. L'élimination des lacunes est l'un des problèmes les plus importants dans l'analyse des séries temporelles et la méthode d'interpolation est une approche courante pour combler les lacunes.

**Analyse spectrale:** les séries temporelles peuvent être évaluées dans deux espaces mathématiques: les domaines spatial et spectral. Certaines opérations mathématiques telles que la multiplication, la soustraction, etc. sont appliquées dans le domaine spatial. Cependant, dans le domaine spectral, en plus des opérations mathématiques, nous nous sommes confrontés aux propriétés de fréquence des séries temporelles qui sont communément exprimées en séries de Fourier (sous forme des termes sinusoïdaux et cosinusoidaux) (Wells et al., 1985):

$$f(x_i) = \sum_{j=0}^k (a_j \cos \omega_j x_i + b_j \sin \omega_j x_i); \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.2.1)$$



où  $\omega_j$  est la fréquence et  $a_j$  et  $b_j$  sont les amplitudes. En fait, le but de l'analyse spectrale est la détermination de  $a_j$  et  $b_j$  pour chaque fréquence ( $\omega_j$ ).

### 2.2.1. Analyse harmonique

L'analyse harmonique calcule l'amplitude et la phase des fréquences connues. Cela signifie qu'en important les fréquences constitutives des marées (voir tableau 2.2) dans la fonction de Fourier, leurs amplitudes et phases sont obtenues. La phase des constituants de la marée montre le retard de la fréquence observée dans la série temporelle des marées. Afin de calculer l'amplitude et la phase de la fréquence des marées, l'équation 2.2.1 s'écrit sous la forme suivante:

$$f(x_i) = \sum_{j=0}^k A_j \cos(\omega_j x_i - \psi_j), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.2.2)$$

où

$$\begin{aligned} A_j &= \sqrt{a_j^2 + b_j^2} \\ \psi_j &= 2 \arctan \frac{b_j}{A_j + a_j} \end{aligned} \quad (2.2.3)$$

Dans les équations 2.2.2 et 2.2.3,  $A_j$  est l'amplitude,  $\psi_j$  est la phase et  $\omega_j$  est la fréquence. Il convient de noter que, la fonction de Fourier ne peut pas trouver les fréquences d'une série temporelle et c'est la faiblesse de l'analyse harmonique. En d'autres termes, si nous ne connaissons pas la fréquence de la série temporelle, l'amplitude et la phase ne peuvent pas être évaluées. Pour notre recherche nous avons programmé en MATLAB l'analyse harmonique.

### 2.2.2. Analyse spectrale des moindres carrés (ASMC)

La ASMC a été proposé par Vaníček (1971) de l'Université du Nouveau Brunswick et révisé par la suite par Wells et al. (1985) comme une alternative à la méthode classique de Fourier pour l'analyse des séries temporelles. L'idée de base est de calculer le spectre de fréquence en ajustant des sinusoides aux séries temporelles (Wells et al., 1985).

Le plus grand avantage du LSSA est que cette méthode, contrairement à l'analyse harmonique, permet de trouver les fréquences des séries temporelles en calculant le spectre ou la valeur spectrale (Wells et al., 1985). La valeur spectrale est calculée par:

$$\mathbf{S}(\omega_i) = \frac{\mathbf{f}^T \mathbf{p}(\omega_i)}{\mathbf{f}^T \mathbf{f}}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (2.2.4)$$

où  $\mathbf{f}$  est la série temporelle et  $\mathbf{p}$  est une fonction basée sur les fréquences connues.  $T$  est la fonction de transposition.

Le programme d'analyse spectrale des moindres carrés est appelé LSSA est disponible en langage de *Fortran*. Ce programme peut analyser 10000 valeurs. Les constituants appliqués dans le programme LSSA peuvent être résumés par l'équation suivante:

$$x(t) = b_0 + b_1 t + \sum_{k=1}^N [A_k \cos(\omega t) + B_k \sin(\omega t)] \quad (2.2.5)$$

où

- $b_0$  est le biais de référence
- $b_1 t$  est la tendance linéaire et
- les constituants périodiques avec fréquences connues qui créent le dernier terme (fonction de Fourier).

Les étapes d'utilisation du LSSA sont:

- Importation de la série temporelle.
- Obtention de la fréquence des constituants de la marée et de leurs amplitudes.  
Remarque: si les fréquences sont connues (comme dans le cas de l'analyse harmonique), il n'est pas nécessaire d'effectuer cette étape.
- Suppression des effets des constituants de la marée des séries temporelles afin de définir le niveau moyen de la mer qui est le deuxième paramètre de l'équation 2.2.5 ( $b_1 t$ ). Dans cette étape, les fréquences de marée (obtenue à partir de l'étape précédente) doivent être importées dans le programme, ce qui s'appelle le *forçage*. En fait, importer (ou forcer) la fréquence de marée permet de calculer les coefficients  $b_0$ ,  $b_1$  et les amplitudes de marée dans une procédure d'itération d'estimation des moindres carrés.

Ce programme se compose de "*lssa.in*", d'un fichier de données (série temporelle) et d'un fichier d'exécution. Après analyse, "*lssa.out*", "*spectre.dat*", "*residuel.dat*" et "*hist.dat*" sont créés. Afin d'afficher les séries temporelles et les valeurs spectrales, un programme MATLAB a été écrit. Dans ce programme, tous les constituants appliqués tels que le biais de référence, la tendance, les périodes forcées sont affichées. En outre, des séries temporelles sans tendance sont représentées.

### **2.3. Définition du MTV par combinaison des données marégraphiques et altimétriques**

Il existe différentes approches pour estimer le MTV et minimiser sa contribution dans l'estimation des changements du niveau de la mer à l'échelle régionale. Nous avons déjà mentionné l'interférométrie différentielle ainsi que les mesures par GPS. Selon plusieurs études, la combinaison des mesures des marégraphes et des altimètres radar fournit des estimations de la vitesse du MTV avec une précision de l'ordre de 1 mm/année (Braitenberg et al., 2011; Fenoglio-Marc et al., 2004; Garcia et al., 2007; Nerem and Mitchum, 2002; Ray et al., 2010; Wöppelmann and Marcos, 2012). Cependant, en raison de la limitation de la répartition géographique des stations marégraphiques, le MTV n'est calculé que dans certaines stations (Zulkifli et al., 2018). Dans notre étude nous allons comparer directement les tendances calculées avec les séries temporelles marégraphiques et les séries temporelles altimétriques afin d'évaluer les vitesses de mouvement vertical de l'écorce terrestre comme nous le verrons au chapitre 5.



# Chapitre 3

---

## Méthodes, données et traitements

### 3.1. Approche méthodologique: aperçu

L'organigramme de la figure 3.1 présente les étapes de la méthodologie mise de l'avant pour atteindre nos objectifs. Dans un premier temps, il y a les études avec la technique interférométrique des diffuseurs persistants. Il y a deux applications de cette technique. La première vise à établir la sensibilité de la technique en confrontant ses résultats aux mesures GPS effectuées à des stations permanentes disponibles dans la région d'étude. La deuxième application vise à estimer le mouvement de l'écorce terrestre à proximité des stations marégraphiques disponibles dans la région d'étude. Ceci dans le but de calculer le niveau moyen de la mer absolu à partir des données marégraphiques. Dans un deuxième temps les séries temporelles des stations marégraphiques et des altimètres satellitaires de la région subiront des analyses spectrales afin d'éliminer les constituants des marées et ainsi évaluer le niveau moyen de la mer (relatif). La dernière étape de notre méthodologie est le calcul du niveau moyen de la mer absolu en tenant compte du mouvement de l'écorce terrestre. Ceci peut se faire à l'aide du MTV issu des diffuseurs persistants ou en comparant les niveaux de la mer obtenus par les données marégraphiques et les données altimétriques.

Des détails sur les données utilisées ainsi que leurs traitements préliminaires sont présentés par la suite.

### 3.2. Données

#### 3.2.1. Images RSO

Les images RSO utilisées dans cette recherche proviennent du satellite Sentinel-1 d'ESA. Elles ont été choisies pour les raisons suivantes:

- (1) Le mode principal d'acquisition d'images sur terres émergées dit "*Interferometric Wide Swath (IW)*" possède une large fauchée qui peut atteindre les 250 km avec une résolution spatiale plutôt modérée de 5 m sur 20 m (image à une seule vue). Il

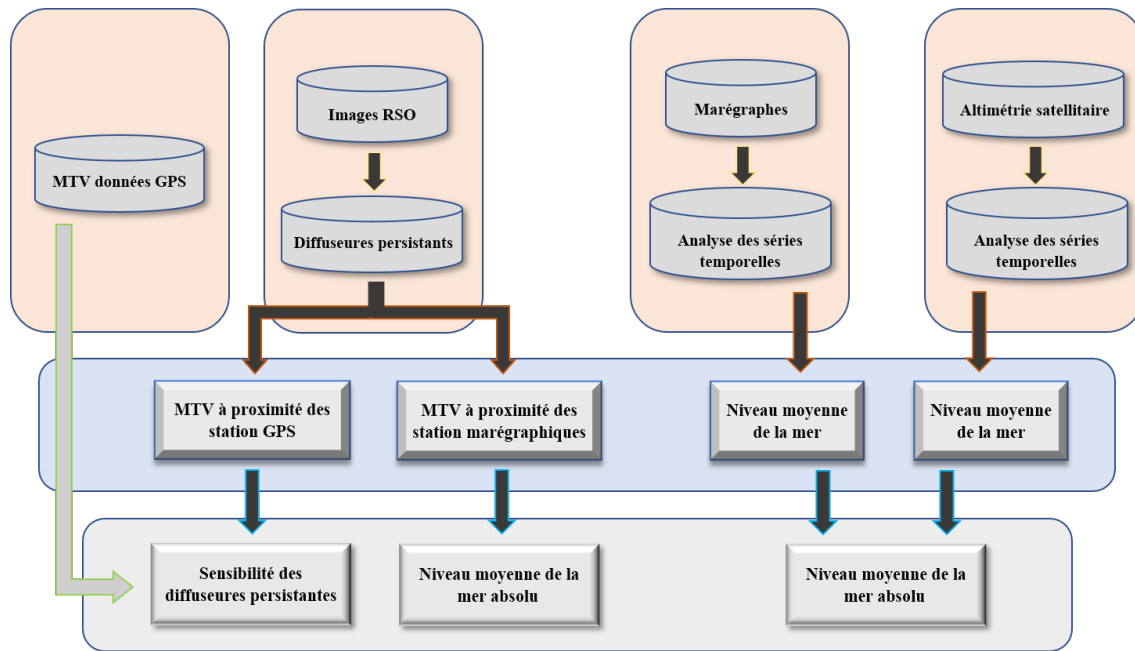


Fig. 3.1. Organigramme de l'approche méthodologique

- est ainsi possible avec peu d'images acquises à un court laps de temps de couvrir l'entièreté du Golfe du Saint-Laurent tout en ayant une résolution spatiale adéquate:
- (2) Le RSO de Sentinel-1 fonctionne en bande C (environ 5.5 cm). La longueur d'onde relativement petite permet d'espérer une sensibilité accrue aux mouvements de terrain. Selon des études effectuées avec des images RSO à une longueur d'onde similaire (p. ex. satellites ERS ou ENVISAT), la méthode des diffuseurs persistants a en effet une sensibilité à la vitesse du mouvement du sol qui se situerait aux alentours de 1 mm/année (Crosetto et al., 2016)
  - (3) Les images sont libres d'accès.

Les images de Sentinel-1 demandent des traitements spéciaux car pour garantir une telle fauchée avec la résolution spatiale de  $5 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ , la fauchée est subdivisée en trois sous-fauchées nommées *IW1*, *IW2* et *IW3*. Chaque sous-fauchée est à son tour subdivisée à plusieurs parties ("*bursts*"). C'est l'utilisation d'une technique spéciale d'acquisition des données appelée TOPSAR. Il y a déplacement électronique du faisceau radar à la fois dans la direction des portées (comme dans le cas de la technique standard SCANSAR) et dans la direction azimutale (European Space Agency, 2019c).

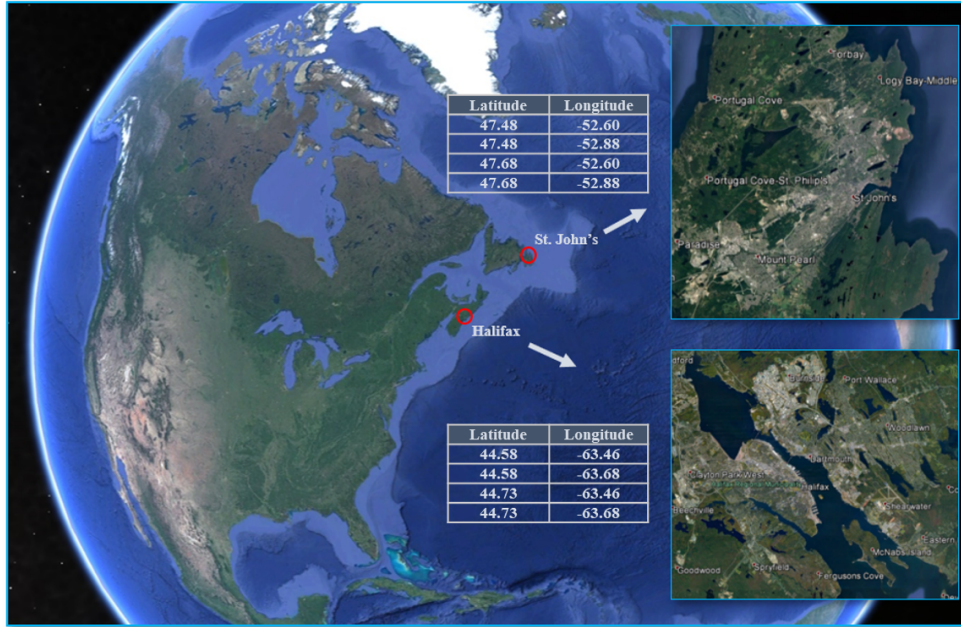
Les images Sentinel-1 ont été téléchargées à partir du site de *Copernicus* (European Union's Earth Observation Program) (European Space Agency, 2019a) et du site d'*Alaska Satellite Facility*, ce dernier offrant un téléchargement d'images plus rapide (Alaska Satellite Facility, 2019). Également l'Alaska Satellite Facility offre la possibilité de télécharger toutes les images souhaitées simultanément, contrairement à Copernicus où certaines images archivées doivent être demandées, mais ils ne sont pas toujours disponibles. Concernant la préparation et la préanalyse des images, nous nous sommes servis du *RSS Cloudtoolbox* service. Ce service fournit aux utilisateurs enregistrés des machines virtuelles personnalisées disponibles sur une infrastructure cloud (European Space Agency, 2019b). Ce service nous a attribué une machine Linux Mint avec 16Gb de RAM, 4 processeurs et 500Gb de disque local. Même avec cette configuration, il n'était possible de préparer et télécharger qu'une image à la fois.

Nous avons fixé un intervalle de trois mois entre les acquisitions d'images en commençant par 2015. Ainsi nous avons pu acquérir une douzaine d'images par zone côtière examinée, comme nous le verrons plus loin. Ce nombre d'images nous permettait de réduire le temps de calcul pour l'ensemble de la pile à un niveau raisonnable, compte tenu du volume de chaque image Sentinel-1 ( $\sim 7Gb$ ), tout en satisfaisant, minimalement, la condition d'application de l'algorithme DPInRSO. Il faut mentionner que dans notre région d'étude, il était impossible de trouver l'intervalle de temps exact (trois mois) et parfois les images d'un autre mois étaient téléchargées. Un autre facteur qui restreint aussi le nombre d'images est que l'application des techniques interférométriques, comme nous l'avons déjà signalé au chapitre 1, nécessite des images acquises sous les mêmes conditions (angle de visée, segment d'orbite et polarisation). Les détails sur le traitement des images sont donnés dans la section 3.3.1 tandis que résultats sont présentés au chapitre 4.

### 3.2.2. Données GPS

Comme mentionné, nous voulons évaluer la sensibilité des résultats des diffuseurs persistants à l'aide des données plus précises GPS. Dans notre site à l'étude, il y a deux stations permanentes GPS disponibles situées dans les côtes atlantiques de Terre-Neuve et de la Nouvelle Écosse (figure 3.2) :

- \* St. John's (STJO) à l'est de Terre-Neuve ( $47^{\circ} 35' N - 52^{\circ} 40' W$ )
- \* Halifax (HLFX) en Nouvelle-Écosse ( $44^{\circ} 40' N - 63^{\circ} 36' W$ )



**Fig. 3.2.** Localisation de deux stations GPS (St. John's et Halifax) dans le golfe du Saint-Laurent

Les données sur la vitesse horizontale et verticale du sol pour ces deux stations obtenues par le service SOPAC (voir chapitre 2) couvrent quelques 15 ans avec un intervalle de temps journalier. Le tableau 3.1 montre les spécifications de ces deux stations. À noter que la date de fin figurant dans ce tableau reflète la fin de notre propre collecte de données. Dans cette étude, seulement la vitesse verticale est utilisée. La série temporelle de GPS vitesse verticale de STJO et HLFX sont illustrées dans les figures 3.3 et 3.4. Ces informations sont observées chaque jour à partir de 1992 pour STJO (8437 données) et à partir de 2002 pour HLFX (5158 données).

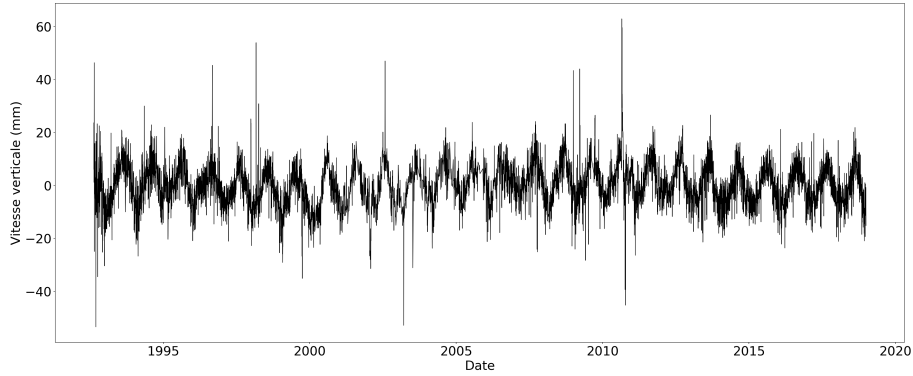
**Tab. 3.1.** Vitesse distribuée en trois dimensions de SOPAC

Site	Date de début	Date de fin	Vers le nord (mm/année)	Vers l'est (mm/année)	Vers le haut (mm/année)
<b>STJO</b>	1992-08-17	2018-12-31	$13.1 \pm 0.1$	$-14.7 \pm 0.1$	$-0.4 \pm 0.2$
<b>HLFX</b>	2002-12-22	2018-12-31	$8.7 \pm 0.1$	$-15.3 \pm 0.1$	$-1 \pm 0.2$

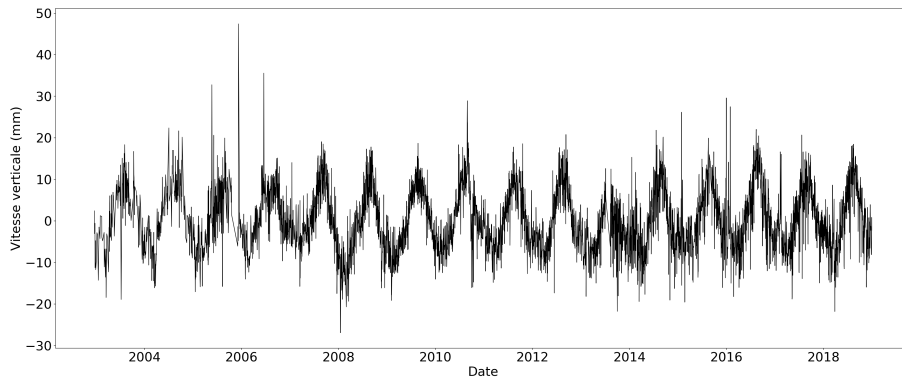
### 3.2.3. Données des marégraphes

Il y a 25 stations marégraphiques dans le golfe du Saint-Laurent. L'emplacement des stations marégraphiques est indiqué dans la figure 3.5. Il faut mentionner que les stations de





**Fig. 3.3.** Série temporelle de GPS vitesse verticale (quotidien) à la station St. John's (STJO)



**Fig. 3.4.** Série temporelle de GPS vitesse verticale (quotidien) à la station Halifax (HLFX)

*Shediac-Bay* et de *Pointe-du-Chêne* (New Brunswick) sont au même endroit et le traitement de leurs données sera expliqué plus loin.

Les données tabulaires mensuelles requises pour nos analyses, compte tenu de la fréquence d'acquisition des images RSO, sont disponibles en format ".rlrdata" par le service PSMSL (voir chapitre 2) et comprennent la valeur moyenne du niveau de la mer (mm) pour l'année et le mois demandés ainsi que le nombre de jours manquants dans le calcul de la moyenne mensuelle. Des indicateurs spéciaux sont inclus pour signaler l'absence de valeur moyenne du niveau de la mer pour un mois (-99999) ou si la valeur du niveau moyen de la mer pour un mois a été interpolée, etc. Il faut mentionner que les données annuelles contiennent également les mêmes informations. La figure 3.6 montre un exemple de la série temporelle pour la station de *Baie-comeau*. L'annexe A inclut les séries temporelles de l'ensemble de stations.

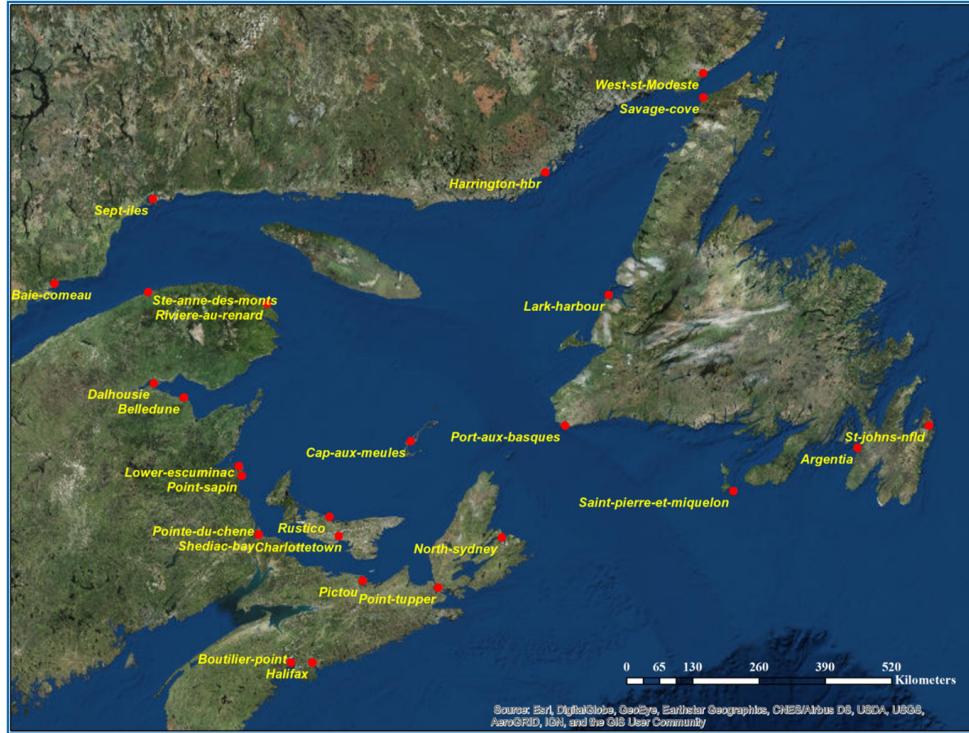


Fig. 3.5. Les stations marégraphiques du golfe du Saint-Laurent

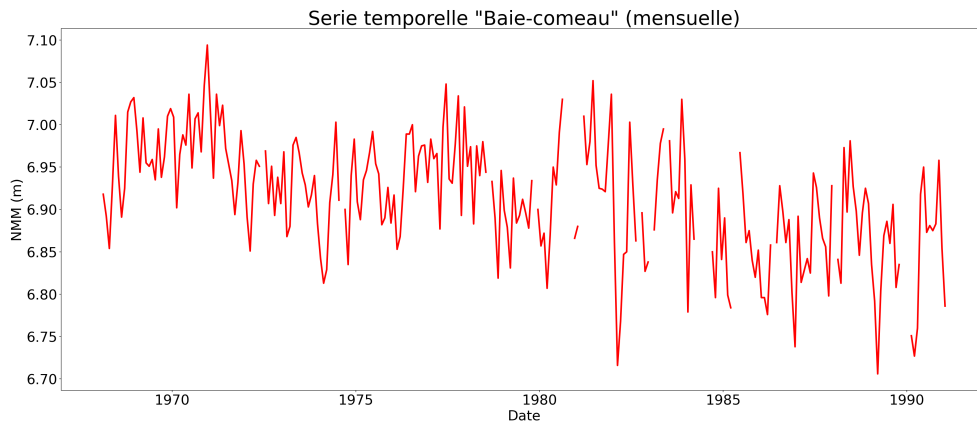


Fig. 3.6. Données marégraphiques pour la station de Baie-comeau

### 3.2.4. Données altimétriques

Dans cette étude nous avons opté pour les données altimétriques en grille régulière (chapitre 2). La raison est l'existence d'un nombre important de gradients de topographie qui modifient la surface moyenne de la mer et qui réduisent ainsi la précision des observations

le long de la trajectoire (along-track) près des côtes (CMEMS, 2019b). Comme mentionné, CMEMS distribue ce type de données avec des intervalles de temps quotidiens en format NetCDF (Network Common Data Form).

Dans cette étude, les données altimétriques satellitaires de la grille en temps différé (DT) ont été utilisées en raison de leur précision. La région d'étude a été choisie entre  $51^{\circ} 52' 30''$  -  $68^{\circ} 52' 30''$  O et  $43^{\circ} 7' 30''$  -  $52^{\circ} 7' 30''$  N. Le fichier NetCDF comprend les variables suivantes (voir chapitre 2):

- \* Hauteur de la surface de la mer au-dessus du niveau de la mer (SLA)
- \* Hauteur de la surface de la mer au-dessus du géoïde (ADT)
- \* Vitesse de l'eau de mer - géostrophique en surface vers l'est
- \* Vitesse de l'eau de mer - géostrophique en surface vers le nord
- \* Vitesse de l'eau de mer en supposant le niveau de la mer pour le géoïde - géostrophique en surface vers l'est
- \* Vitesse de l'eau de mer en supposant le niveau de la mer pour le géoïde - géostrophique en surface vers le nord

Pour notre étude, seulement les données des deux premières variables ont été utilisées. Considérant les limites de la zone d'étude et de la résolution de la grille, les données sont disposées selon une matrice de 37 lignes et 69 colonnes par date de mesure. La série temporelle par élément de la matrice comprend 9496 mesures entre le 01.01.1993 et le 31.12.2018.

### **3.3. Traitements des données**

#### **3.3.1. Traitements des images RSO**

Comme mentionné, les images RSO ont été analysées pour estimer le MTV dans deux applications distinctes. La première application visait l'évaluation de la sensibilité des calculs de la MTV par la technique des diffuseurs persistants en comparaison avec le MTV issu de l'analyse des données GPS. La deuxième application visait le calcul du MTV à proximité des stations marégraphiques à des fins d'évaluation du niveau moyen de mer absolu intégrant les résultats des analyses des données des marégraphes.

Les conditions générales de mise en œuvre de la technique DPInRSO sont présentées dans la section qui suit tandis que les conditions particulières de sa mise en application pour chacune des études sont décrites dans les sections 3.3.1.2 et 3.3.1.3, respectivement.

### 3.3.1.1. Procédure DPInRSO

Comme mentionné, le logiciel StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) (Hooper et al., 2010) a été utilisé afin de calculer la MTV par la méthode des diffuseurs persistants. Le logiciel fonctionne sur plate-forme Linux et utilise les codes MATLAB pour calculer différents paramètres. Cependant, avant de commencer, il faut une certaine préparation des images RSO (SLC), ce qui peut être fait avec différents logiciels comme *ISCE*, *SNAP*, *GAMMA*, *ROI\_PAC* et *DORIS*. Dans cette étude, nous nous sommes servis du logiciel SNAP dans RSS Cloudtoolbox. Les opérations hors environnement StaMPS effectuées dans SNAP comprennent:

- (1) Le recalage des  $N$  images RSO et la formation d'une pile d'images
- (2) Le choix de l'image de référence et la création de  $N-1$  interférogrammes et images de cohérence avec élimination des franges de la terre plate
- (3) Élimination de la phase topographique et filtrage des phases

Avant de procéder au recalage pour les produits "*Single Look Complex*" (SLC) de données Sentinel-1 en mode large bande interférométrique (IW), une préparation est nécessaire. Tout d'abord, une des sous-fauchés (IW1, IW2 ou IW3) doit être sélectionné. Après cela, l'orbite précise de Sentinel-1, qui inclut la localisation et les coordonnées précises du satellite, doit être calculée et enfin, pour supprimer la phase topographique de l'interférogramme, un modèle MNA de la région d'intérêt est appliqué. Dans SNAP, les modèles précis d'orbite et de MNA (SRTM 3sec) sont téléchargés automatiquement.

Les résultats des traitements avec SNAP sont exportés vers StaMPS où on procède à:

- (1) La localisation des diffuseurs persistants par analyse de la pile d'images et
- (2) Le déroulement de phases et la conversion des phases aux diffuseurs persistants en mouvement du sol

Pour simplifier cet ensemble d'étapes d'une grande lourdeur, nous avons utilisé le programme python "*snap2stamps*" (Delgado Blasco and Fomelis, 2018). Ce programme utilise le logiciel SNAP pour effectuer les opérations suivantes:

- (1) Préparation des images dépendantes: les images sont triées par temps.
- (2) Séparation: on détermine la sous-fauchée de l'image Sentinel-1 à considérer.
- (3) Recalage et création des interférogrammes: on produit les interférogrammes selon les coordonnées de la région d'intérêt dans chaque image.

(4) Transfert: on exporte les résultats vers StaMPS.

L'utilisation de "*snap2stamps*" pour les images Sentinel-1 présente un avantage important. Ainsi, nous n'avons pas besoin d'ouvrir les images dans SNAP et ceci nous aide à exécuter les programmes sans problèmes de processeur. Les sorties du paquet *snap2stamps* sont quatre répertoires : "*dem*", "*diff0*", "*geo*" et "*rslc*". StaMPS utilise tous ces répertoires pour calculer les DP et la vitesse verticale. Les sorties de *snap2stamps* ont été exportées de RSS Cloudtoolbox vers la plate-forme Linux Ubuntu pour la suite des traitements.

Après ces opérations, une série d'autres sont nécessaires pour arriver au résultat final dans l'environnement StaMPS ou avec recours à d'autres logiciels, surtout MATLAB. Ces opérations sont décrites par la suite:

- Chargement des données dans StaMPS et division des interférogrammes en patches avec recouvrement; les patches sont traités indépendamment.
- Sélection des candidats potentiels selon l'indice IDA par pixel de la pile d'images; dans notre cas nous avons fixé le IDA à 0.4.
- Calcul de la cohérence temporelle incluant: (a) l'estimation de la phase spatialement corrélée pour chaque candidat DP; (b) l'estimation de l'erreur MNA non-spatialement corrélée pour chaque pixel de la phase restante; et (c) l'estimation de la cohérence temporelle pour chaque pixel de la phase résiduelle.
- Sélection des DP en fonction de leurs caractéristiques de bruit et la densité par  $km^2$  peut être obtenue à partir d'une estimation du pourcentage de pixels aléatoires dans une scène.
- Triage des DP sélectionnés à l'étape précédente et suppression des certains DP en fonction de leur proximité les uns aux autres et afin de lisser leur déformation dans le temps.
- Correction de phase des pixels sélectionnés restants pour tenir compte d'une erreur MNA non-spatialement corrélée.
- Développement de phase: pendant le déroulement, les données sont temporairement rééchantillonnées dans une grille.
- Estimation des erreurs spatialement corrélées: estimation de l'erreur totale du MNA et des erreurs dues à l'atmosphère et d'orbite de l'image de référence. Après cette étape, la vitesse moyenne est obtenue. Les valeurs de vitesse sont relatives à la vitesse moyenne de l'ensemble de l'image.

- Séparation des signaux atmosphériques et des signaux de déformation; cette étape nécessite un autre paquet appelé "*Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise*" (TRAIN). Pour des raisons qui seront expliquées au chapitre 4, cette opération n'a pas été effectué.

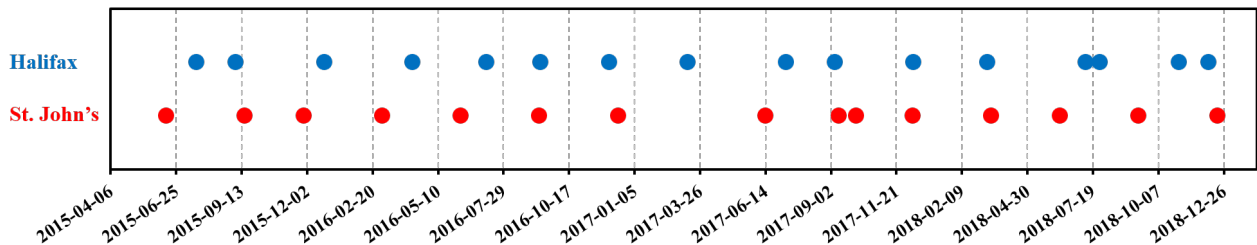
Les résultats de StaMPS peuvent être représentés avec les options suivantes:

- Utilisation de la fonction "*ps\_plot*" du code MATLAB: *ps\_plot* définit différentes variables pour la représentation graphique des résultats.
- Exporter les résultats au format ".*kml*" et les représenter sous "*Google Earth*".
- Exporter les résultats au format ".*csv*" et les représenter sur les plates-formes "*SIG*".
- Utilisation du paquet "*StaMPS\_Visualizer*" qui exécute les sorties dans le programme "*R*". En utilisant le programme R, il est également possible d'afficher la série temporelle de chaque DP (Höser, 2018).

### 3.3.1.2. Comparaison avec les données GPS

Compte tenu de la taille des images RSO et les limites de traitement des logiciels utilisés, nous étions obligés de les découper pour ne retenir qu'une zone suffisamment large autour de chaque station GPS (figures 3.3 et 3.4). Selon les images Sentinel-1 disponibles et la position des stations GPS, la sous-image comprenant la station de St. John's couvre une région de 23 km × 30 km tandis que celle de la station d'Halifax, une région de 18 km × 26 km.

Les séries temporelles d'images Sentinel-1 de ces deux régions sont présentées à la figure 3.7. Le nombre d'images dépasse les 12 qui est le nombre minimal d'images pour l'application de StaMPS. Comme mentionné, les images RSO couvrent la période de 2015 à 2019 sur une base trimestrielle. Tel que montré par la figure 3.7 un intervalle de temps de trois mois entre acquisitions n'a pas été tout à fait respecté faute d'images disponibles. Ainsi l'image disponible la plus proche a été sélectionnée.



**Fig. 3.7.** Date d'acquisition de Sentinel-1 pour les régions de St. John's (marques rouges) et Halifax (marques bleues).

Nous avons traité les séries temporelles GPS pour les rendre compatibles aux données RSO. Ainsi, seulement la période d'acquisition des images RSO de 2015 à 2019 a été retenue. Également, les moyennes mensuelles ont été calculées pour la correspondance avec les images acquises à tous les trois mois. La polarisation, la sous-fauchée et le segment d'orbite des images RSO sélectionnées pour les deux régions (Halifax et St. John's) sont HH-HV, IW2 et descendant.

L'application de l'algorithme du logiciel SNAP "*InSAR Stack Overview*" a permis de choisir parmi les images de la pile celle qui servira de référence. En fonction de l'image choisie, les paramètres suivants ont été calculés:

- ligne de base perpendiculaire
- ligne de base temporelle
- la cohérence et ligne de base Doppler

Les figures 3.8 et 3.9 montrent les résultats de sélection des images de référence. Nous pouvons constater que:

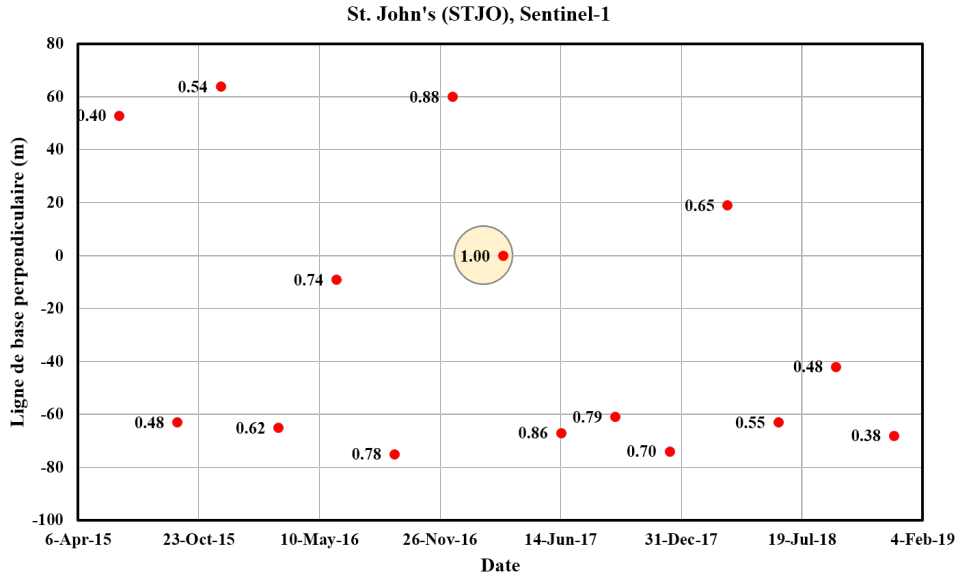
- (a) les lignes de base perpendiculaires sont inférieures ou à la limite égales à une centaine de mètres;
- (b) les données sont relativement homogènes en termes d'intervalle de temps entre image de référence et images dépendantes; et
- (c) les cohérences sont généralement supérieures à 0.40.

Il faut noter qu'en règle générale, dans les régions avec peu de cibles artificielles comme les nôtres et compte tenu des problèmes de décorrélation géométrique et temporelle qui affectent la ligne de base géométrique et temporelle, on ne peut pas obtenir les forts diffuseurs persistants (DP) dans l'étape de sélection DP. Cependant, dans notre cas avec des lignes de base et des cohérences appropriées, les résultats fiables sont attendus du logiciel StaMPS.

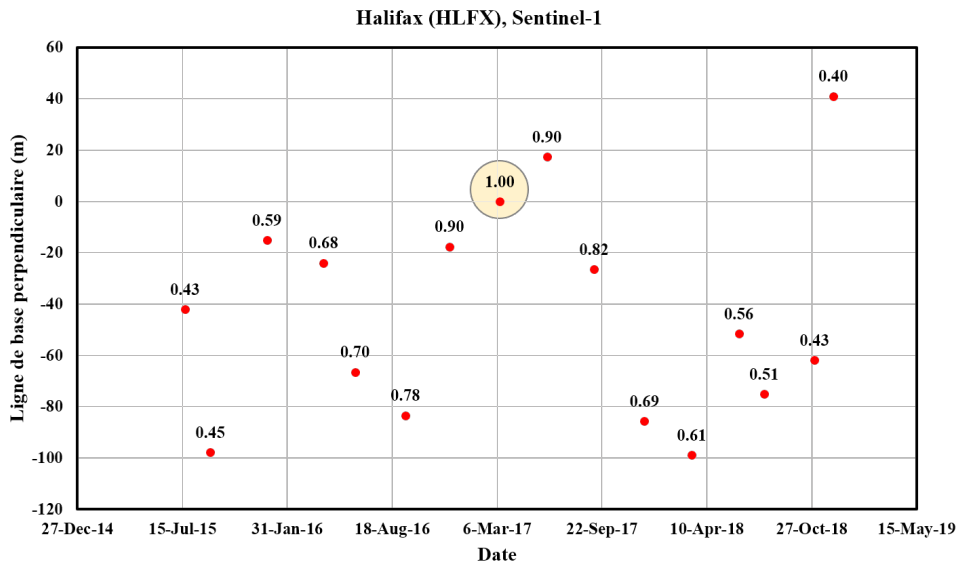
### 3.3.1.3. *Application dans les zones côtières aux alentours des marégraphes*

La spécification requise des données radar, la sélection de l'image de référence, la procédure d'interférométrie avant d'envoyer les résultats dans StaMPS et après cela, sont les mêmes que celles expliquées dans la section précédente. Cependant, certains détails méritent mention.

Les images Sentinel-1 (tableau 3.2) ont été découpées pour couvrir une région de  $0.08^\circ \times 0.08^\circ$  ( $\sim 9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$ ) autour de chaque station marégraphique. Avec ce découpage, nous



**Fig. 3.8.** Paramètres de la pile d'images Sentinel-1 de la région de St. John's: a) l'image de référence encerclée; b) lignes de base perpendiculaires entre l'image de référence et les images dépendantes (axe vertical); c) dates d'acquisition (axe horizontal); d) valeurs de cohérence entre l'image de référence et les images dépendantes.



**Fig. 3.9.** Paramètres de la pile d'images Sentinel-1 de la région d'Halifax: a) l'image de référence encerclée; b) lignes de base perpendiculaires entre l'image de référence et les images dépendantes (axe vertical); c) dates d'acquisition (axe horizontal); d) valeurs de cohérence entre l'image de référence et les images dépendantes.

respectons la taille limite des images à traiter par nos logiciels tout en suivant les conseils



quant à la distance limite qui doit séparer une station d'estimation du MTV et une station marégraphique.

**Tab. 3.2.** Numéro d'orbite, direction, polarisation et sous-fauchés de chaque image Sentinel-1 sélectionnée pour la région à étudier

<b>Stations</b>	<b>Numéro d'orbite</b>	<b>Direction</b>	<b>Polarisation</b>	<b>sous-fauchés</b>
<b>Argentina</b>	3	Ascending	VV-VH	IW3
<b>Baie-comeau</b>	164	Ascending	VV-VH	IW3
<b>Belledune</b>	69	Descending	HH-HV	IW3
<b>Boutilier-point</b>	18	Ascending	VV-VH	IW2
<b>Cap-aux-meules</b>	171	Descending	HH-HV	IW1
<b>Charlottetown</b>	171	Descending	HH-HV	IW2
<b>Dalhousie</b>	69	Descending	HH-HV	IW3
<b>Halifax</b>	171	Descending	HH-HV	IW2
<b>Harrington</b>	98	Descending	HH-HV	IW1
<b>Lark-harbour</b>	149	Ascending	VV-VH	IW3
<b>Lower-escuminac</b>	69	Descending	HH-HV	IW2
<b>North-sydney</b>	47	Ascending	VV-VH	IW2
<b>Pictou</b>	171	Descending	HH-HV	IW1
<b>Point-sapin</b>	69	Descending	HH-HV	IW1
<b>Point-tupper</b>	47	Ascending	VV-VH	IW1
<b>Port-aux-basques</b>	149	Ascending	VV-VH	IW2
<b>Riviere-au-renard</b>	18	Ascending	VV-VH	IW3
<b>Rustico</b>	171	Descending	HH-HV	IW2
<b>Saint-pierre</b>	3	Ascending	VV-VH	IW1
<b>Savage-cove</b>	25	Descending	HH-HV	IW1
<b>Sept-iles</b>	18	Ascending	VV-VH	IW1
<b>Shediac-bay</b>	69	Descending	HH-HV	IW1
<b>Ste-anne-des-monts</b>	18	Ascending	VV-VH	IW1
<b>St-Johns</b>	156	Descending	HH-HV	IW2
<b>West-st-Modeste</b>	25	Descending	HH-HV	IW1

Le tableau 3.3 montre les résultats de sélection de l'image de référence par station marégraphique, la valeur moyenne de la ligne de base perpendiculaire et la cohérence entre l'image de référence les images dépendantes. En fait, les lignes de base perpendiculaire ont des valeurs positives et négatives qui montrent la position du satellite dans les images dépendantes par rapport à la position de l'image de référence. Par conséquent, dans le tableau 3.3, les valeurs moyennes pour la ligne de base perpendiculaire sont positives et/ou négatives. Il faut noter que, la valeur moyenne de la ligne de base temporelle est un nombre proche de zéro car l'image de référence est souvent sélectionnée à la date du milieu entre la première et la dernière image (les figures 3.8 et 3.9 montrent ce fait).

**Tab. 3.3.** Valeur moyenne de la ligne de base perpendiculaire et cohérence entre l'image référence et les autres images pour chaque station avec leurs écarts-types

Stations	Ligne de base perpendiculaire(m)	cohérence
Argentia	42.3 ± 57.5	0.63 ± 0.19
Baie-comeau	28.3 ± 36.6	0.70 ± 0.12
Belledune	18.7 ± 49.9	0.68 ± 0.13
Boutilier-point	52.9 ± 52.5	0.65 ± 0.16
Cap-aux-meules	-49.4 ± 50.7	0.63 ± 0.16
Charlottetown	-44.3 ± 44.7	0.64 ± 0.16
Dalhousie	18.7 ± 49.9	0.68 ± 0.13
Halifax	-46.0 ± 41.9	0.63 ± 0.17
Harrington	35.5 ± 49.8	0.63 ± 0.18
Lark-harbour	17.3 ± 42.5	0.65 ± 0.20
Lower-escuminac	15.9 ± 55.3	0.63 ± 0.15
North-sydney	3.9 ± 60.4	0.64 ± 0.19
Pictou	-44.3 ± 44.7	0.64 ± 0.16
Point-sapin	15.9 ± 55.3	0.63 ± 0.15
Point-tupper	3.9 ± 60.4	0.64 ± 0.19
Port-aux-basques	17.1 ± 41.5	0.65 ± 0.20
Riviere-au-renard	-32.9 ± 58.2	0.63 ± 0.18
Rustico	-44.3 ± 44.7	0.64 ± 0.16
Saint-pierre	42.3 ± 57.5	0.63 ± 0.19
Savage-cove	30.4 ± 57.8	0.64 ± 0.17
Sept-iles	58.9 ± 58.4	0.62 ± 0.19
Shediac-bay	15.9 ± 55.3	0.63 ± 0.15
Ste-anne-des-monts	-32.9 ± 58.2	0.63 ± 0.18
St-Johns	-27.9 ± 54.0	0.63 ± 0.17
West-st-Modeste	30.4 ± 57.8	0.64 ± 0.17

### 3.3.2. Traitements des données marégraphiques

Comme mentionné, le niveau moyen de la mer correspond à la tendance linéaire estimée dans une série temporelle donnée, une fois les constituants de marée éliminés. Ces constituants sont établis par analyse spectrale (ASMC et analyse harmonique) des séries temporelles sur les hauteurs de la mer mesurées à des stations marégraphiques. Dans notre cas, comme il n'existe que les données de marégraphes mensuels, il convient de prendre en compte les constituants de marée sur une longue période semi-annuelle ( $S_{sa}$ ) et annuelle ( $S_a$ ).

Un utilitaire en python a été développé pour préparer les données en vue de leur analyse et pour la visualisation des résultats des analyses spectrales. Le tableau 3.4, compilé à

l'aide de l'utilitaire, montre la localisation des stations marégraphiques, l'étendue de séries temporelles ainsi que le nombre de données manquantes et des données valides. Le tableau a été organisé de la plus longue série temporelle à la plus courte.

**Tab. 3.4.** Durée et autres spécifications des stations marégraphes de la côte est du Canada

Stations	Coordonnées		Première date	Dernière date	Données manquantes	Données valides
	Longitude	Latitude				
Halifax	-63.583333	44.666667	17.11.1895	18.07.2014	293	1132
Harrington hbr	-59.483333	50.500000	17.08.1910	17.08.1989	354	595
Charlottetown	-63.116667	46.233333	17.04.1911	16.12.2016	235	1034
St. John's nfld.	-52.716667	47.566667	17.08.1935	16.12.2016	252	725
Port-aux-basques	-59.133333	47.566667	16.01.1959	16.12.2016	74	622
Lark-harbour	-58.366667	49.100000	17.09.1963	17.03.1988	87	208
Point-sapin	-64.833333	46.966667	16.01.1965	17.11.1974	19	100
Pictou	-62.700000	45.683333	17.06.1965	15.02.1996	43	326
Ste-anne-des-monts	-66.483333	49.133333	17.12.1967	17.12.1994	61	264
Riviere-au-renard	-64.383333	49.000000	15.02.1968	16.12.2016	48	539
Baie-comeau	-68.133300	49.233300	15.02.1968	16.01.1991	22	254
Boutilier-point	-63.966667	44.666667	16.01.1969	17.11.1979	6	125
North-sydney	-60.250000	46.216667	16.01.1970	16.12.2016	17	547
West-st.-Modeste	-56.700000	51.600000	16.01.1970	17.12.1989	46	194
Savage-cove	-56.700000	51.333333	16.01.1970	17.06.1982	29	121
Pointe-du-chene	-64.511719	46.521076	15.12.1971	16.12.1984	29	138
Argentia	-53.983333	47.300000	18.03.1971	16.12.2016	53	497
Point-tupper	-61.366667	45.600000	16.01.1972	17.03.1992	51	192
Sept-iles	-66.400000	50.200000	17.05.1972	16.12.2016	61	475
Lower-escuminac	-64.883333	47.083333	16.01.1973	16.12.2016	40	488
Rustico	-63.283333	46.466667	17.06.1973	15.02.1996	34	239
Dalhousie	-66.383333	48.066667	17.11.1973	17.03.1992	73	148
Belledune	-65.850000	47.900000	17.12.1999	16.12.2016	12	193
Shediac-bay	-64.511719	46.521076	17.09.2003	16.12.2016	33	127
Cap-aux-meules	-61.857306	47.378861	17.06.2007	16.12.2016	2	113
Saint-pierre-et-miquelon	-56.168306	46.778833	16.06.2012	16.12.2016	3	52

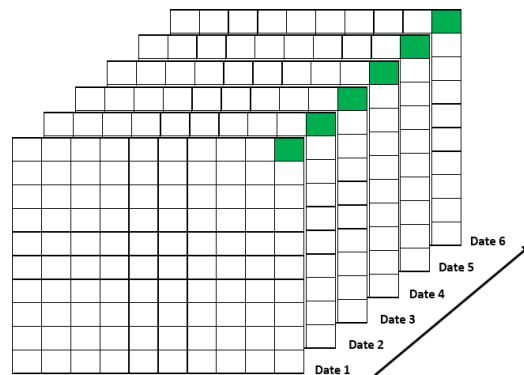
Pour certaines stations d'autres modifications ont été apportées considérant surtout les données manquantes. Ainsi:

- Les stations de Halifax, Harrington et St-John's ont un nombre important de données au début des séries temporelles (8<sup>e</sup>, 9<sup>e</sup> et 25<sup>e</sup> figures dans l'annexe A.1). Pour résoudre ce problème, la partie initiale de ces séries temporelles a été supprimée (annexe A.2). Bien que nous ayons supprimé certaines données, ces séries temporelles sont suffisamment longues pour que cette modification ait un impact significatif.

- Les stations de Shediac-Bay et de Pointe-du-Chêne sont au même endroit avec des intervalles de temps différents (tableau 3.4). Ces séries ont été fusionnées et le résultat est présenté dans l'annexe A.2. Il existe un manque important de données dans la partie centrale de cette nouvelle série temporelle modifiée.

### 3.3.3. Traitements de données altimétriques

Certains traitements étaient nécessaires pour préparer les données altimétriques en format NetCDF en vue de leur analyse. La structure tridimensionnelle d'un fichier NetCDF est illustrée par la figure 3.10. Dans notre cas, nous avons 2553 cellules ( $37 \text{ lignes} \times 69 \text{ colonnes}$ ). Les données disponibles par cellule couvrent une période des 26 ans avec une fréquence journalière. Il y a donc 9490 données par cellule ( $26 \text{ ans} \times 365 = 9490$ ) et en ajoutant 6 jours dus aux années bissextiles, il y a au total 9496 données quotidiennes.



**Fig. 3.10.** Structure de NetCDF

Nous avons développé une série des programmes en MATLAB pour pouvoir:

- (1) extraire de cette structure les séries temporelles quotidiennes par élément de la matrice;
- (2) créer des séries temporelles mensuelles pour rendre compatibles les données altimétriques aux données marégraphiques;
- (3) calculer les tendances et créer une nouvelle grille avec les tendances par cellule;
- (4) attribuer une localisation géographique par cellule;
- (5) trouver par interpolation la tendance à attribuer à chaque station marégraphique à des fins de comparaisons des tendances marégraphes et altimètres.

Concernant la création des séries temporelles mensuelles à partir des séries temporelles journalières, nous n'avons considéré que la valeur du milieu de chaque mois (15<sup>e</sup> de chaque mois) comme représentative de chaque mois. Par conséquent, 312 grilles (26 ans  $\times$  12) ont été sélectionnées pour évaluer la tendance mensuelle.

Après le calcul des tendances quotidienne et mensuelle pour chaque cellule, le programme MATLAB crée des nouvelles matrices de la même taille par date de  $37 \times 69$  cellules. La position géographique de chaque cellule est maintenant connue explicitement.

Le processus final consiste à définir la valeur du niveau de la mer et à créer les séries temporelles pour les stations. Pour cette raison, la méthode d'interpolation avec l'algorithme du "*plus proche voisin*" a été appliquée (parce que nous avons des données de grille et la valeur la plus proche de chaque station doit être sélectionnée). Ces séries temporelles ont été enregistrées aux formats ".txt" et ".xls" pour l'analyse suivante. L'annexe B montre la série temporelle mensuelle extraite pour chaque station à partir des données altimétries satellitaires.



# Chapitre 4

---

## Application de la technique des diffuseurs persistants

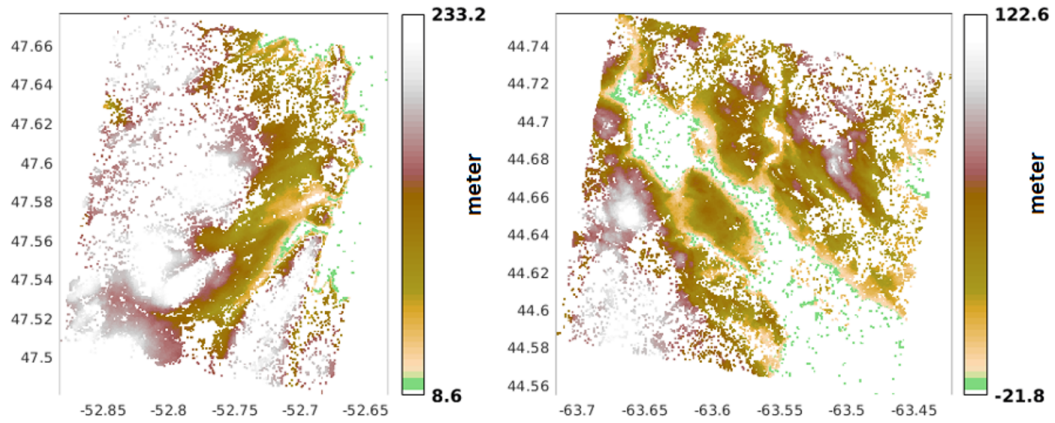
Ce chapitre présente les résultats de nos expériences avec la technique DPInRSO. La section 4.1 porte sur la comparaison entre le MTV calculé par DPInRSO et le MTV issu des mesures GPS. La section 4.2 présente les résultats de l'application de la technique dans les régions proches des stations marégraphiques. Une discussion et des conclusions partielles sont présentées à la section 4.3.

### 4.1. Application de la DPInRSO et validation avec les données GPS

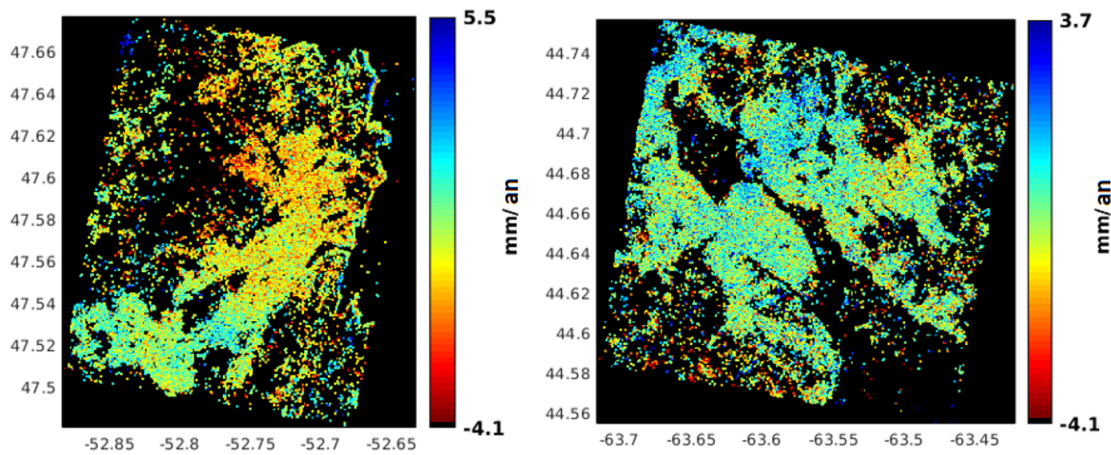
Le logiciel StaMPS a sélectionné 154439 diffuseurs persistants (DP) dans la région de Halifax (18 km  $\times$  26 km) et 72162 dans la région de St. John's (23 km  $\times$  30 km). Selon l'élévation les DP sélectionnés dans les régions de St. John's et de Halifax (figure 4.1), on peut voir qu'il n'y a pas de changements rapides de hauteur dans ces régions (de la hauteur minimale au maximum), puisque la topographie est l'un des paramètres importants qui peuvent fausser les résultats d'une analyse InRSO (Sadeghi et al., 2017). Comme nous pouvons le constater, certains points DP sont choisis dans les surfaces d'eau (points verts). Comme nous le verrons plus loin, ces points ne sont pas pris en considération.

La vitesse moyenne résultante de ces points est indiquée sur la figure 4.2. Comme on peut le constater, les taux de déplacement sont généralement constants pour les deux régions (de -4.1 mm/an à +3.7 et à +4.5 mm/an), cependant il y a plus des déplacements verticaux positifs dans la région de Halifax (couleur dominante bleuâtre des DP) que dans le cas de la région de St. John's (couleur dominante jaunâtre des DP).

La vitesse moyenne calculée par StaMPS peut présenter quelques erreurs qui sont principalement dues à des erreurs du MNA ainsi que des rampes orbitales (chapitre 1.3). La vitesse moyenne après soustraction de ces erreurs est indiquée dans les figures 4.3 et 4.4. Nous constatons par ces figures que l'impact de ces erreurs est minime sur la vitesse verticale moyenne et par conséquent il serait possible de les ignorer.



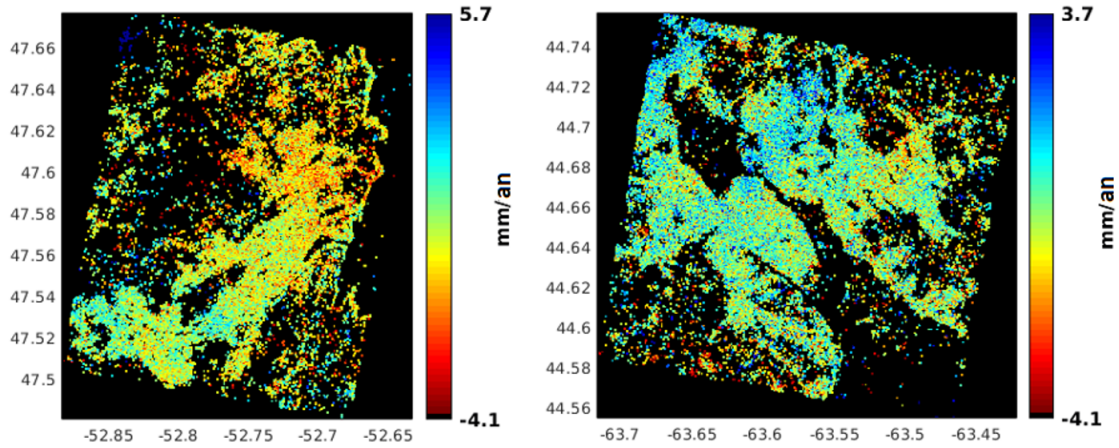
**Fig. 4.1.** Topographie des régions de St. John's (gauche) et Halifax (droite). Ces cartes sont préparées en utilisant l'altitude des points DP à partir de la fonction *"ps\_plot"* de StaMPS.



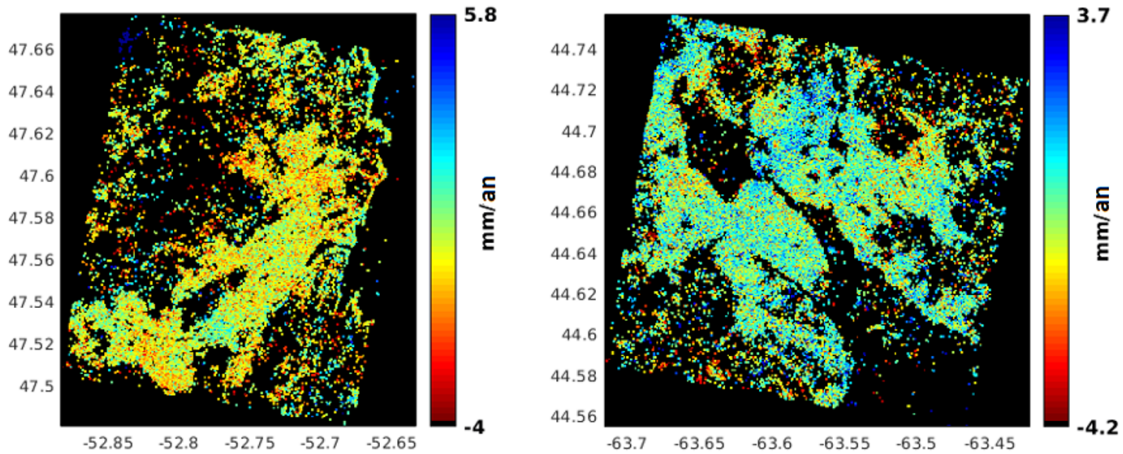
**Fig. 4.2.** Vitesse verticale moyenne pour les régions de St. John's (gauche) et Halifax (droite)

Afin de vérifier la sensibilité de la technique au MTV, nous avons voulu dans un premier temps examiner la similarité du mouvement des DP proche des stations GPS. La figure 4.5 montre les séries temporelles du MTV mesurées dans ces deux stations telles qu'ajustées pour être compatibles avec les séries temporelles du MTV issues de la technique des diffuseurs persistants. Comme nous pouvons le constater, le MTV-GPS suit presque les mêmes variations dans le temps aux deux stations. Le mouvement a une certaine périodicité avec une période annuelle et une amplitude d'environ 5 mm/an.





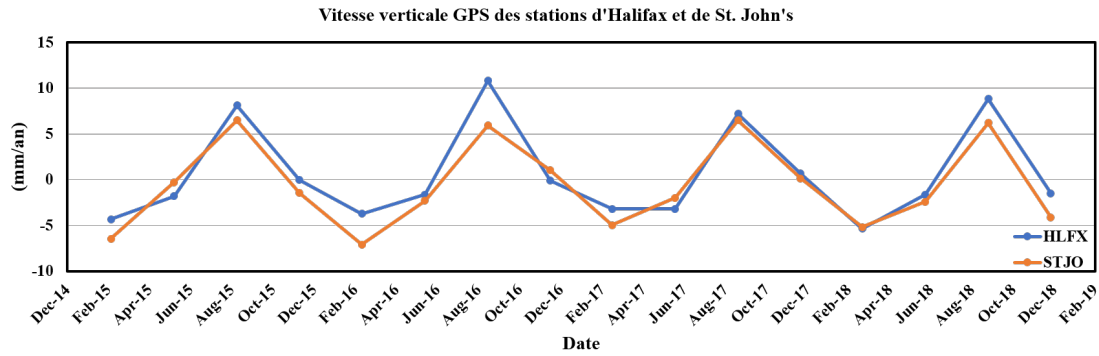
**Fig. 4.3.** Vitesse verticale moyenne moins erreurs MNA pour les régions St. John's (gauche) et Halifax (droite)



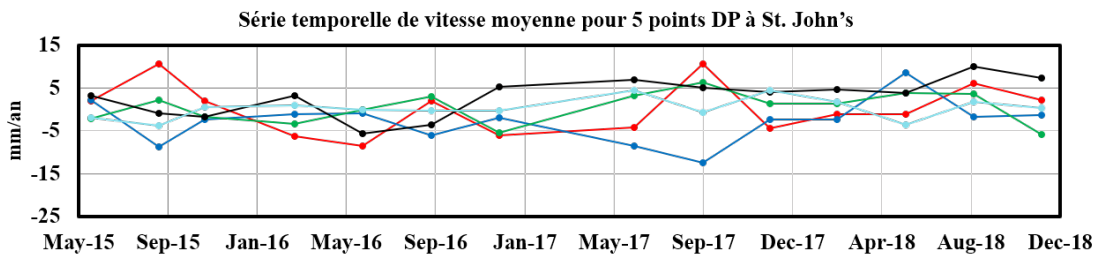
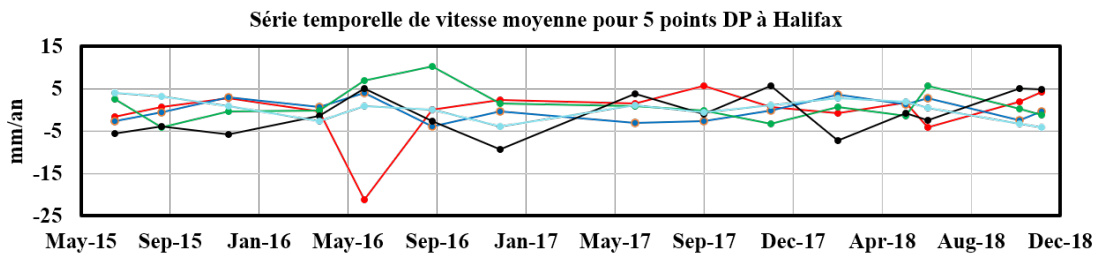
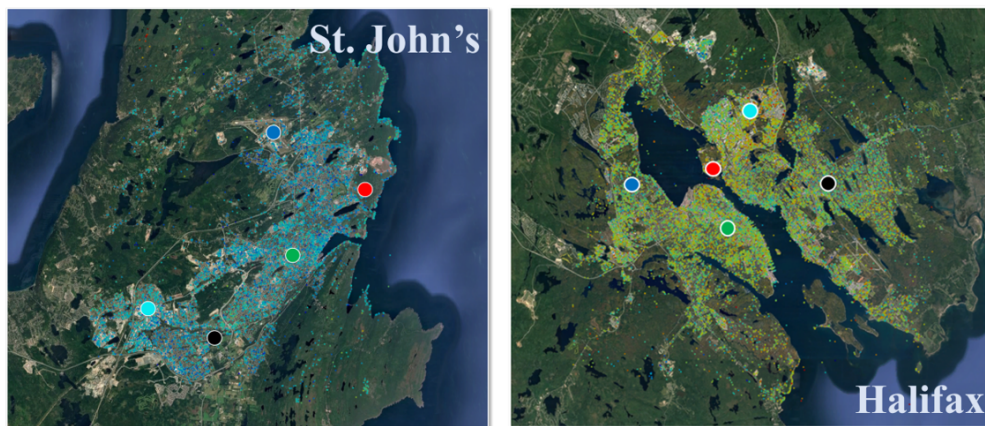
**Fig. 4.4.** Vitesse verticale moyenne moins erreurs MNA et erreurs de rampes orbitales pour les régions St. John's (gauche) et Halifax (droite)

La figure 4.6 montre les séries temporelles des 5 points DP les plus proches de chacune de station. Les séries temporelles montrent des tendances similaires, à l'exception de certaines dates (p. ex. juin 2016 à St. John's et septembre 2017 à Halifax).

Pour comparer les résultats du logiciel StaMPS et la vitesse verticale GPS, le point DP très proche des stations GPS de ces régions a été sélectionné (point rouge de la figure 4.6). Les valeurs moyennes à St. John's et à Halifax pour la période examinée (3 ans) sont respectivement de  $-0.11$  mm/an et  $+1.1$  mm/an. Généralement, ces mouvements verticaux sont relativement proches de la vitesse verticale moyenne extraite de la série temporelle



**Fig. 4.5.** Vitesse verticale saisonnière GPS de St. John's (STJO) et d'Halifax (HLFX) au cours de la période 2015-2019



**Fig. 4.6.** Séries temporelles de 5 points DP dans les régions de St. John's et Halifax exportées de StaMPS. Les points rouges sont très proches des stations GPS de STJO et HLFX.

enregistrées par le GPS pendant une période de 20 ans qui est de  $-0.4$  mm/an pour STJO

et -1 mm/an pour HLFX. Pour pouvoir mieux comparer les séries temporelles DPInRSO et GPS, nous n'avons retenus que les données GPS enregistrées pendant l'intervalle de temps des données de Sentinel-1 pour ces régions. La figure 4.7 montre les valeurs moyennes trimestrielles (valeurs saisonnières) de chaque série temporelle GPS entre 2015 et 2019 en comparaison aux séries temporelles des points DP proches des stations GPS. Nous pouvons faire les constats suivants pour les deux régions:

- Région de St-John's: visuellement, il y a une bonne correspondance entre les deux séries temporelles. Les différences observées pendant la période examinée sont dans la marge d'erreur de l'ordre de 3 mm pour le type données RSO utilisées (Crosetto et al., 2016).
- Région de Halifax: la similitude est moins évidente que dans le cas de St John's et même dans un cas (été 2016) la différence est importante.

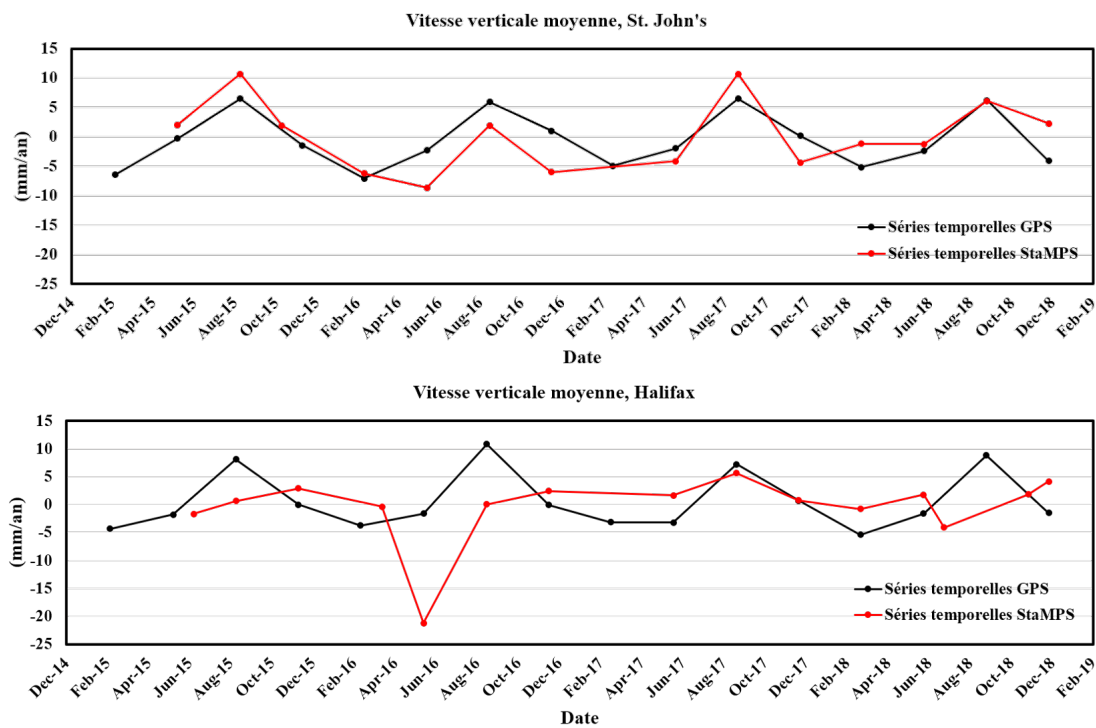


Fig. 4.7. Comparaison de séries temporelles de stations GPS et de points DP proches des stations GPS.

Un autre constat que nous pouvons faire est que le nombre d'images RSO utilisées est suffisant pour capter les mouvements du sol pendant une période de trois ans tout en assurant un temps de calcul raisonnable.

## 4.2. Calcul de la MTV pour les stations marégraphiques

La figure 4.8 montre deux exemples des vitesses moyennes calculées des points DP dans les différentes régions où il y a des stations marégraphiques. L'annexe C présente les résultats de StaMPS pour l'ensemble des stations marégraphiques de la région.

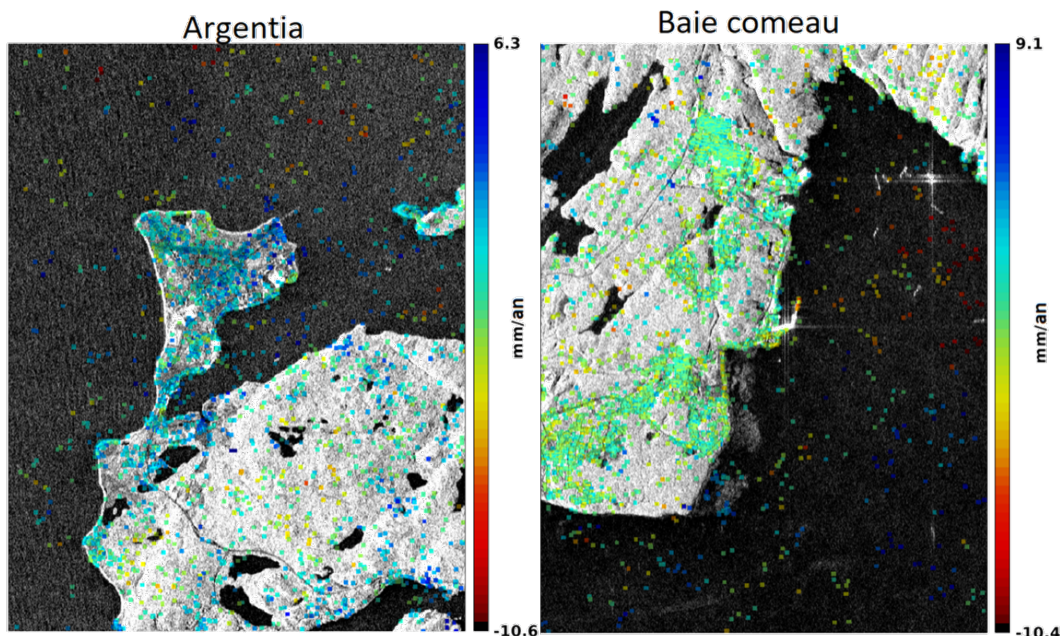


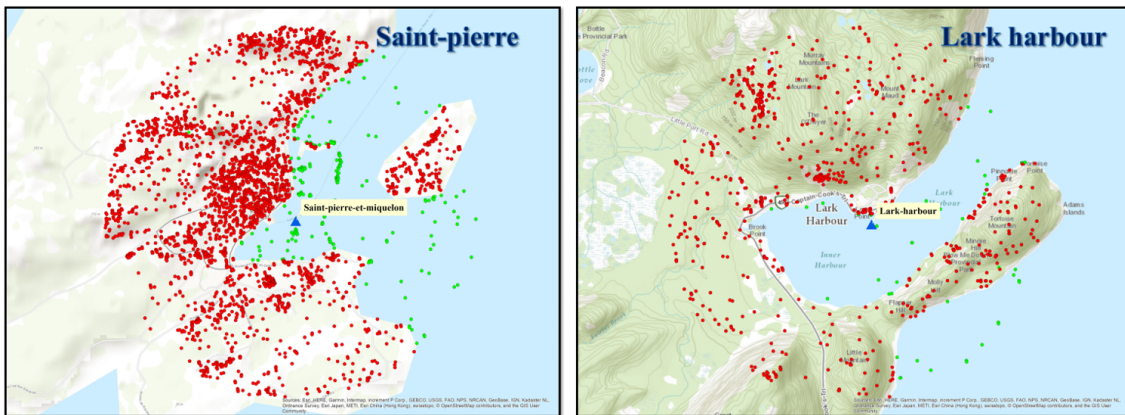
Fig. 4.8. Exemples des résultats de StaMPS aux points DP dans les régions incluant des marégraphes.

Pour le calcul du MTV à attribuer à chaque station marégraphique, l'ensemble des DP définis dans la zone couverte pour chaque station ( $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$ ) n'a pas été pris en compte. Selon Feng et al. (2013), la distance séparant une station GPS, servant au calcul du MTV, d'une station marégraphique doit être inférieure à 3 km afin que le MTV estimé soit représentatif du mouvement du terrain à proximité du marégraphe. De plus, une telle zone n'est pas trop grande pour que les points DP ayant des caractéristiques topographiques différentes soient inclus dans les calculs. Ainsi, seulement les DP se situant dans un cercle centré à une station marégraphique de rayon de 2 km ont été considérés pour le calcul de la moyenne du MTV.

Cependant, comme il est clair par l'exemple de la figure 4.8 (voir aussi annexe C) que certains DP se trouvent dans l'océan ou des lacs. L'élimination des points dans les plans d'eau est essentielle, car ces points DP ne peuvent pas servir à détecter le mouvement de l'écorce terrestre. Pour ce faire, les données sur les DP ont été transférées de StaMPS à ArcGIS pour faciliter le triage des points DP. La figure 4.9 montre un exemple avec les point

DP finalement retenus pour deux stations marégraphiques. Sur cette figure, le triangle bleu indique la position des stations marégraphiques donnée par PSMSL. L'annexe D montre les points DP retenus pour l'ensemble des stations marégraphiques. En règle générale, dans la majorité des 25 régions examinées le nombre de diffuseurs persistants retenus est amplement suffisant pour continuer nos analyses. En effet:

- Dans 19 zones, plus de 85% des DPs sont sur les terres émergées
- Dans 2 stations, entre 80 à 85% des DPs sont sur les terres émergées
- Dans 3 stations, entre 70 à 80% des DPs sont sur les terres émergées
- Dans 1 station ("*Rustico*"), 40% des DPs sont sur la terre



**Fig. 4.9.** Exemples des DP retenus (en rouge) pour les analyses subséquentes (logiciel ArcGIS).

Il faut aussi noter que le centre du cercle de 2 km pour la sélection des DPs n'est pas tout à fait à la position de la station marégraphique. La raison est que dans StaMPS, il n'y a aucune option pour localiser le centre du cercle en spécifiant les coordonnées d'une station marégraphique. Il a donc fallu le spécifier à main levée.

À la fin de cette étape, la valeur moyenne de la vitesse verticale a été calculée à partir des points DP retenus. En pratique, cette valeur indique la quantité de mouvement vertical du terrain à chaque station marégraphique. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 4.1. Ce tableau comprend:

- Le nombre d'images Sentinel-1 pour chaque station
- La date d'acquisition des images (première et dernière date) avec la date de l'image de référence
- Le nombre de points DP pour chaque station dans une zone de  $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$
- Le nombre de points DP à l'intérieur du cercle dans un rayon de 2 km

- Le nombre de points DP après avoir supprimé les points d'erreur (à l'intérieur de l'océan ou de la mer)
- La gamme de déplacement vertical (minimum et maximum) dans chaque station, qui est représentée l'annexe C
- Le mouvement vertical du terrain pour chaque station

Tab. 4.1. Quantité de mouvement de terrain vertical à chaque station marégraphique

Stations	Nombre d'image	Date des images				Nombre de DP		Gamme de vitesse verticale		Vitesse verticale moyenne calculée (mm/an)
		Première	Dernière	Référence	Totale (km <sup>2</sup> )	Totale Valide (2km)	Minimum	Maximum		
Argentina	14	10.03.2015	19.12.2018	15.06.2017	3393	1490	1273	-10.60	6.30	0.4
Baie-comeau	13	08.04.2016	18.12.2018	14.06.2017	7963	1483	1287	-10.40	9.10	-0.1
Belledune	13	16.12.2015	12.12.2018	14.06.2017	2276	1383	1176	-13.70	12.80	-0.1
Boutillier-point	14	26.08.2015	20.12.2018	16.06.2017	2848	737	674	-7.60	7.30	-0.1
Cap-aux-meules	15	20.07.2015	19.12.2018	11.03.2017	2397	857	729	-9.30	6.40	0.2
Charlottetown	15	17.11.2015	31.12.2018	11.03.2017	15787	4738	4612	-4.40	4.70	-0.2
Dalhousie	13	16.12.2015	12.12.2018	14.06.2017	1846	821	736	-14.10	10.70	-0.5
Halifax	16	20.07.2015	07.12.2018	11.03.2017	154438	13885	13510	-4.20	3.70	-0.1
Harrington	15	09.06.2015	14.12.2018	16.06.2017	2872	998	731	-7.30	8.70	0.0
Lark-harbour	14	20.03.2015	17.12.2018	13.06.2017	5659	832	790	-6.70	5.80	-0.6
Lower-escuminac	16	06.08.2015	12.12.2018	14.06.2017	1087	316	254	-10.30	14.00	0.6
North-sydney	14	13.03.2015	10.12.2018	14.03.2017	6808	2822	2744	-6.50	7.00	-0.4
Pictou	15	17.11.2015	31.12.2018	11.03.2017	3237	1316	1252	-12.80	9.90	0.0
Point-sapin	16	06.08.2015	12.12.2018	14.06.2017	640	303	252	-7.50	7.10	0.2
Point-tupper	14	13.03.2015	10.12.2018	14.03.2017	6467	2258	2202	-16.60	7.70	0.3
Port-aux-basques	14	20.05.2015	17.12.2018	13.06.2017	7271	2531	1918	-8.90	6.70	0.1
Riviere-au-renard	14	11.03.2015	20.12.2018	12.03.2017	1179	717	662	-11.10	14.70	0.0
Rustico	15	17.11.2015	31.12.2018	11.03.2017	1153	341	134	-10.10	12.00	-0.3
Saint-pierre	14	10.03.2015	19.12.2018	15.06.2017	8999	3445	3214	-6.90	7.70	-0.1
Savage-cove	15	28.06.2015	15.12.2018	01.03.2017	1096	344	309	-15.60	14.40	0.9
Sept-iles	13	11.03.2015	20.12.2018	16.06.2017	4967	1197	1039	-9.00	15.70	0.7
Shediac-bay	16	06.08.2015	12.12.2018	14.06.2017	3585	779	607	-7.90	7.00	-0.3
Ste-anne-des-monts	14	11.03.2015	20.12.2018	12.03.2017	2272	1029	951	-13.30	11.40	0.0
St-Johns	15	13.06.2015	18.12.2018	10.03.2017	72162	11669	11557	-4.00	5.80	0.1
West-st-Modeste	15	28.06.2015	15.12.2018	01.03.2017	1873	351	306	-32.30	30.70	-7.1

### 4.3. Discussion et conclusions partielles

La première étape de notre étude comprenait l'estimation du mouvement de terrain vertical (MTV) dans les régions côtières du Golfe du Saint-Laurent à partir de la technique interférométrique RSO des diffuseurs persistants. Le but principal était de calculer le MTV autour des stations marégraphiques. En éliminant ce mouvement des tendances observées des changements du niveau de la mer obtenus par traitement des données marégraphiques (chapitre 5), il était ainsi possible d'établir le niveau moyen absolu de la mer à plusieurs localités dans les zones côtières du Golfe. Mais avant de procéder à ce calcul, il aurait fallu procéder à une vérification de la sensibilité de cette technique aux mouvements verticaux de l'écorce dans le temps. Cette vérification s'est effectuée en utilisant les mesures du MTV à deux stations permanentes GPS. Dans les paragraphes qui suivent, nous présenterons notre appréciation du logiciel StaMPS (section 4.3.1) et nous discuterons des résultats des deux études effectuées avec les diffuseurs persistants (sections 4.3.2 et 4.3.3).

#### 4.3.1. Appréciation du logiciel StaMPS

Les résultats de la technique standard d'interférométrie différentielle sont souvent affectés par les décorrélations temporelle et spatiale des phases interférométriques. Pour corriger ces problèmes, la technique DPInRSO fait appel à des points avec des propriétés de diffusion constante dans le temps et une réflexion dominante dans un pixel, les diffuseurs persistants. Un avantage indéniable du logiciel StaMPS est qu'il est capable de localiser un nombre suffisant des diffuseurs persistants même dans le cas des milieux terrestres avec une faible densité des cibles artificielles qui sont a priori d'excellents diffuseurs persistants. Le programme StaMPS applique la technique des DP:

- En utilisant la série d'images prises à des moments différents (minimalement 12 à 13 images) pour estimer et éliminer les composantes de phase autres que celles dues au mouvement du terrain.
- En déterminant une image comme image de référence qui minimise la dispersion des lignes de base perpendiculaires avec les images dépendantes tout en maintenant des lignes de base courtes entre paires interférométriques.

La dernière étape du programme StaMPS est le filtrage du bruit atmosphérique. Selon plusieurs auteurs, cette étape est nécessaire pour améliorer les résultats (Bekaert et al., 2015a; Hooper, 2015; Hooper et al., 2010). Hélas, dans le manuel StaMPS cette procédure n'est pas expliquée et il est seulement indiqué que le programme *TRAIN* est appliqué pour cette correction (Bekaert et al., 2015b). Par conséquent, cette correction n'a pas été appliquée dans cette étude, mais les résultats montrent qu'il n'y a pas de grandes différences entre la



vitesse moyenne avant et après les corrections des erreurs du MNA et des rampes orbitales. Cependant, si la mise en œuvre de cette correction est essentielle ou non, il faut le vérifier.

Il faut également signaler que la technique DPInRSO peut atteindre une précision millimétrique dans la mesure du déplacement vertical, mais le calcul se fait seulement pendant la première et la dernière date d’acquisition des images RSO. Cette façon d’opérer peut empêcher de capter un certain déplacement vertical haut débit.

Les principaux problèmes d’ordre technique que nous avons rencontré en appliquant le logiciel StaMPS sont:

- (1) Il n’inclut pas tous les algorithmes nécessaires pour l’application de cette technique interférométrique, par exemple le recalage de la pile d’images, et le recours à d’autres logiciels (p. ex. SNAP) est nécessaire;
- (2) Il manque de convivialité étant donné qu’il fonctionne uniquement sur plate-forme Linux et Il n’existe que très peu de ressources et de manuels de support nécessaires à la compréhension de son fonctionnement;
- (3) À part une connaissance des plates-formes Linux, l’utilisateur doit être familier avec des plates-formes MATLAB, RStudio et SIG.
- (4) En règle générale, le logiciel StaMPS ainsi que le logiciel SNAP présentent des problèmes avec des images de grande taille comme les images de Sentinel-1. Dans notre cas, malgré l’utilisation d’une portion des images, chaque étape du processus d’interférométrie a pris beaucoup de temps. Également la répétition d’une seule étape a parfois pris plus de 12 heures car des erreurs ont été reconnues une fois que l’interférogramme ait été créé.
- (5) Afin d’obtenir les résultats sous forme de série temporelle, certaines modifications doivent être appliquées. Par exemple, si nous voulons tracer la série temporelles, la sortie StaMPS ne spécifie pas la date. Par conséquent, pour chaque station, la date doit y être ajoutée.

Un dernier problème qui mérite mention est le nombre des diffuseurs persistants sélectionnées dans les plans d’eau. Dans le cas de la deuxième étude avec les régions autour des stations marégraphiques, il y avait un pourcentage de 15% environ des diffuseurs persistants localisés dans les plans d’eau (voir section 4.3.3). La source de ce problème reste à investiguer plus à fond. Est-ce une question des seuils utilisés pour admettre la candidature d’un pixel comme un diffuseur persistant ou de la défaillance des critères mêmes de sélection. La question reste donc ouverte.

### 4.3.2. Comparaison avec les données GPS

Dans notre région d'étude, il n'y avait que deux stations permanentes GPS dont les mesures ont servi à la vérification des résultats des diffuseurs persistants, l'une à St. John's (Terre-Neuve) et l'autre à Halifax (Nouvelle-Écosse). La comparaison des séries temporelles GPS et DP (figure 4.7) a montré qu'au moins pour la station de St-John's il y a une bonne correspondance entre ces deux types de données. La différence absolue avec les mesures GPS était le plus souvent dans la marge d'erreur attendue de l'évaluation du MTV à partir des diffuseurs persistants (Crosetto et al., 2009). Pour la station d'Halifax, nous pouvons faire le même constat sauf dans un cas (juillet 2016) où la différence est très grande. Cette différence pourrait s'expliquer par la grande base perpendiculaire entre l'image de juillet 2016 et l'image de référence qui était de l'ordre de 100 m tandis que la cohérence était plutôt basse (0.4) (figure 3.9).

En guise de conclusion de cette première étude, nous pouvons dire que:

- (1) La technique des DP est plutôt précise comparée aux mesures GPS. Il est essentiel de savoir qu'il existe des différences entre les valeurs de vitesse verticale issues des analyses GPS et DPInRSO. Comme il est présenté dans la figure 4.7, la principale raison de cet écart concerne l'analyse MTV dans différents délais dans les techniques GPS et DPInRSO. Évidemment, l'évaluation du MTV pendant une courte période dans la méthode DPInRSO (2015-2019) ne sera pas la même chose que les résultats GPS à long terme, mais les résultats obtenus, ne sont pas très différents et incohérents;
- (2) Cette précision est adéquate pour connaître le MTV dans des régions côtières étendues ce qui est impossible à partir des mesures ponctuelles de GPS compte tenu de leur faible densité. En effet, pour l'ensemble de la région d'étude il n'y a que deux stations distantes de quelques 800 km et par surcroît à l'extérieur du Golfe du Saint-Laurent;
- (3) Comme mentionné, les valeurs moyennes du MTV calculées selon la technique des diffuseurs persistants à St. John's et à Halifax pour la période examinée (3 ans) sont respectivement de -0.11 mm/an et +1.1 mm/an. Il y a une différence avec les valeurs calculées par GPS qui est de -0.4 mm/an pour STJO et -1 mm/an pour HLFX. Ces différences peuvent s'expliquer par la période couverte par la série temporelle GPS (20 ans) et celle de la série temporelle DP (3 ans).

### 4.3.3. Marégraphes

Les moyennes de la vitesse verticale calculée par station marégraphique (tableau 4.1) sont indiquées dans la figure 4.10 pour faciliter la discussion des résultats:

- (1) À l'exception de la station marégraphique "*West St. Modeste*" au nord-est de la région d'étude, les vitesses verticales moyennes de toutes les stations sont proches.

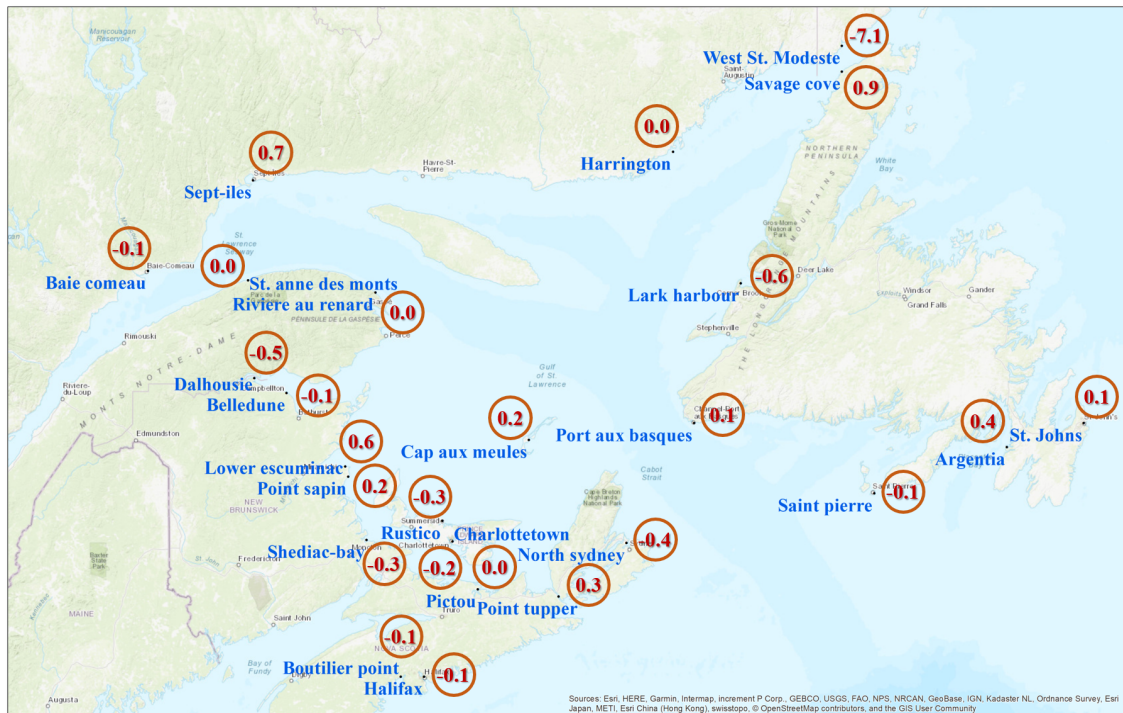


Fig. 4.10. Mouvement de terrain vertical dans le golfe du Saint-Laurent

- (2) Les déplacements verticaux des stations marégraphiques rapprochées, sont similaires avec quelques exceptions comme "West St. Modest" et "Savage Cove" au nord-est de la région d'étude.
- (3) Il est évident par les figures de l'annexe C que les zones côtières examinées sont, dans la majorité des cas, d'une topographie uniforme et sans différences extrêmes en hauteur. Par conséquent, nous pouvons conclure que les MTV calculés sont acceptables et que le déplacement de la croûte terrestre dans le Golfe du Saint-Laurent de 2015 à 2019 a été faible.
- (4) Comme mentionné en Introduction (page 5), certaines études concluent sur un affaissement de près de 2 mm/an pour certains sites de la Nouvelle-Écosse et d'un soulèvement de près de 5 mm/an sur la rive nord du golfe du Saint-Laurent (Church et al., 2013; Savard et al., 2016). Les moyennes (absolues) calculées dans notre étude sont inférieures à valeurs indiquées dans ces études et il n'y a pas une tendance aussi claire entre affaissement (signe négatif) et soulèvement (signe positif) dans la figure 4.10.



# Chapitre 5

---

## Définition du NMM à partir des données marégraphiques et des données d'altimétrie satellitaire

Ce chapitre présente les résultats de l'analyse des séries temporelles marégraphiques et altimétriques. La section 5.1 présente une explication des procédures utilisées pour l'analyse des séries temporelles. L'estimation du niveau moyen de la mer à partir des données marégraphiques est le sujet de la section 5.2. L'estimation du niveau moyen de la mer en servant des données de l'altimétrie satellitaire est traitée dans la section 5.3. La comparaison des résultats des analyses spectrales des deux types de données est présentée dans la section 5.4. Finalement, la section 5.5 conclut ce chapitre.

### 5.1. Analyse des séries temporelles

Le niveau moyen relatif de la mer est estimé en éliminant les constituants de marée de la série temporelle. Cependant, les séries temporelles évaluées doivent avoir suffisamment de données et pas de nombreuses lacunes. Selon les données mensuelles des marégraphes du service PSMSL (annexe A.1), les 25 stations marégraphiques du Golfe du Saint-Laurent ont des spécifications différentes en termes de nombre de données et de temps d'observation. Certaines séries temporelles présentent plusieurs lacunes (annexe A.2). Les données d'altimétrie (grille) obtenues auprès du centre AVISO n'ont pas ces problèmes, mais la résolution de la grille ( $\sim 30$  km) peut créer des résultats disharmoniques lorsque nous cherchons à estimer les données représentatives à l'emplacement des stations marégraphiques.

Dans cette étape, tout d'abord les fréquences de marée à chaque station marégraphique sont calculées par le programme LSSA. Comme il a été mentionné au chapitre 2, l'utilisation du LSSA pour obtenir la valeur spectrale (ou la fréquence) n'exige pas de remplir des lacunes. Cependant, l'augmentation du nombre de lacunes dans les séries temporelles conduit à calculer des fréquences inexactes. Nous en discuterons dans les sections suivantes.

À la deuxième étape, l'analyse harmonique sera appliquée afin de:

- (1) comparer les fréquences calculées de LSSA avec les valeurs réelles (tableau 2.2); et

(2) comparer les résultats d'amplitude et de phase de LSSA avec l'analyse harmonique.

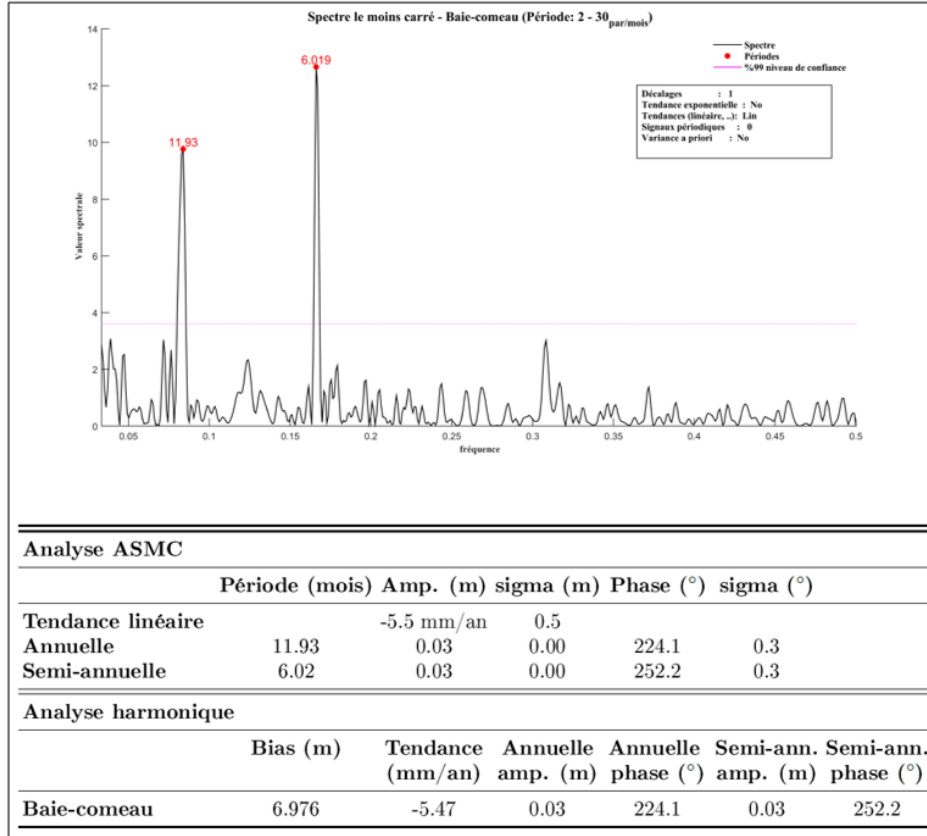
Cependant, les différentes caractéristiques des séries temporelles de marégraphes et d'al-timétrie (en termes d'intervalle de temps, de nombre de lacunes et de précision spatiale) peuvent entraîner des résultats différents.

## 5.2. Estimation du niveau moyen de la mer: données marégra- phiques

Les résultats des analyses spectrales pour l'ensemble des stations marégraphiques sont montrés dans l'annexe E. La figure 5.1 montre un exemple des résultats avec la station de Baie-Comeau. Quelques explications s'imposent:

- Le graphe de la figure 5.1 illustre les variations des valeurs spectrales (en pourcentage) calculées en fonction des fréquences ainsi que les constituants des marrées calculés (points en rouge) avec leurs périodes (nombres en rouge). On retrouve également le niveau de confiance de 99% (ligne violette);
- La première partie du tableau associé à ce graphe montre les résultats de la méthode ASMC (programme LSSA) incluant:
  - la tendance linéaire (mm/an)
  - l'amplitude et sa précision (m) ainsi que la phase et sa précision (degrés) obtenues pour les périodes semi-annuelles et annuelles, c.-à-d. les constituants de marée les plus importants de la série temporelle mensuelle des marégraphes.
- La deuxième partie du tableau de la figure 5.1 présente les résultats de l'analyse harmonique:
  - le biais de référence (m)
  - la tendance linéaire (mm/an)
  - ainsi que l'amplitude (m) et la phase (degrés) pour les périodes semi-annuelle et annuelle.

Le tableau 5.1 présente une synthèse des résultats de l'annexe E. Dans ce tableau, toutes les séries temporelles avec la tendance linéaire estimée et les constituants de marée annuel et semi-annuel sont représentées. Comme nous pouvons le constater pour certaines stations, il n'y pas de constituant de marée semi-annuel pour des raisons qui seront expliquées dans la section 5.3. Ainsi, seulement ce constituant est indiqué dans le tableau.



**Fig. 5.1.** Exemple des résultats de l'analyse spectrale des séries temporelles des stations marégraphiques (annexe E): le cas de la station marégraphique de Baie-Comeau.

Il faut mentionner que la tendance indiquée dans le tableau 5.1 est le résultat de la correction et de la suppression des effets des constituants de marée des séries temporelles. Comme indiqué au chapitre 2, le "résiduel" des séries temporelles est un autre résultat du programme LSSA. Cette valeur se calcule comme:

$$\text{Résiduel} = \text{Série temporelle} - (\text{décalage de données}, \text{tendance}, \text{périodes forcées}) \quad (5.2.1)$$

L'annexe F présente les tendances ainsi que les résiduels des séries temporelles de l'ensemble des stations marégraphiques. La figure 5.2 en est un exemple.

En général, les périodes estimées (en mois) des constituants solaires annuels et semi-annuels calculées par la méthode ASMC diffèrent quelque peu des valeurs réels des constituants de marée de longues périodes (tableau 2.2). Il existe de nombreuses raisons qui expliqueraient ces différences, telles que les eaux peu profondes, les rivières, les effets secondaires des profondeurs océaniques, les bruits, etc. Il faut mentionner qu'il existe d'autres

**Tab. 5.1.** Paramètres des constituants semi-annuels et annuels (tendance, amplitude, phase) établis par analyse spectral des séries temporelle des stations marégraphiques

Stations	Tendance mm/an	Solaire Semi-annuel		Solaire annuel	
		Amp.(mm)	Phase(°)	Amp.(mm)	Phase(°)
Argentia	2.4	-	-	77	255
Baie-comeau	-5.5	29	252	26	224
Belledune	4.2	27	50	25	324
Boutilier-point	-0.6	-	-	52	6
Cap-aux-meules	1.9	-	-	32	192
Charlottetown	3.2	14	206	29	156
Dalhousie	2.5	-	-	26	254
Halifax	3.3	-	-	30	18
Harrington	-0.7	15	130	42	105
Lark-harbour	0.5	25	301	33	113
Lower-escuminac	3.1	21	303	26	242
North-sydney	3.7	14	343	62	28
Pictou	2.5	-	-	56	240
Point-sapin	4.1	-	-	37	333
Point-tupper	1.5	-	-	49	5
Port-aux-basques	2.7	-	-	26	56
Riviere-au-renard	0.9	29	331	24	197
Rustico	3.2	23	68	62	199
Saint-pierre	-1.9	-	-	57	201
Savage-cove	-5.6	-	-	56	349
Sept-iles	0.8	21	58	32	82
Shediac & du-Chene	2.2	-	-	24	271
Ste-anne-des-monts	-2.5	27	34	24	295
St-Johns	2.0	-	-	80	34
West-st-Modeste	0.7	-	-	87	357

longues périodes telles que la marée nodale (18.6 ans), mais comme ces périodes ne peuvent pas être détectées dans des séries temporelles courtes, elles ne sont pas prises en compte.

Pour obtenir une vue d'ensemble, les résultats de l'analyse des séries temporelles des stations marégraphiques sont indiqués sur les cartes des figures 5.3 à 5.5. Sur la carte des tendances (niveau moyen de la mer) de la figure 5.3, les tendances positives et négatives sont affichées avec une direction et une couleur différentes. Les cartes des figures 5.4 et 5.5 présentent les amplitudes et les phases des périodes solaires semi-annuelles et annuelles. L'amplitude (en mm) est indiquée par la taille de la flèche tandis que la phase (en degrés) par la direction de la flèche (direction anti-horaire). Dans la figure 5.4, les stations sans valeur semi-annuelle (tableau 5.1) ne portent aucune indication.



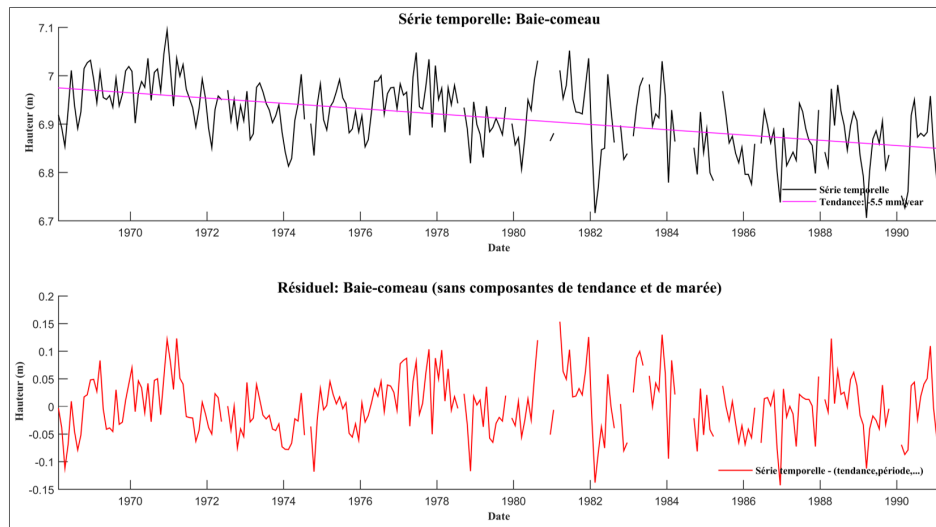


Fig. 5.2. Exemple des tendances linéaires et des résiduels des séries temporelles des stations marégraphiques (annexe F): le cas de la station marégraphique de Baie-Comeau.

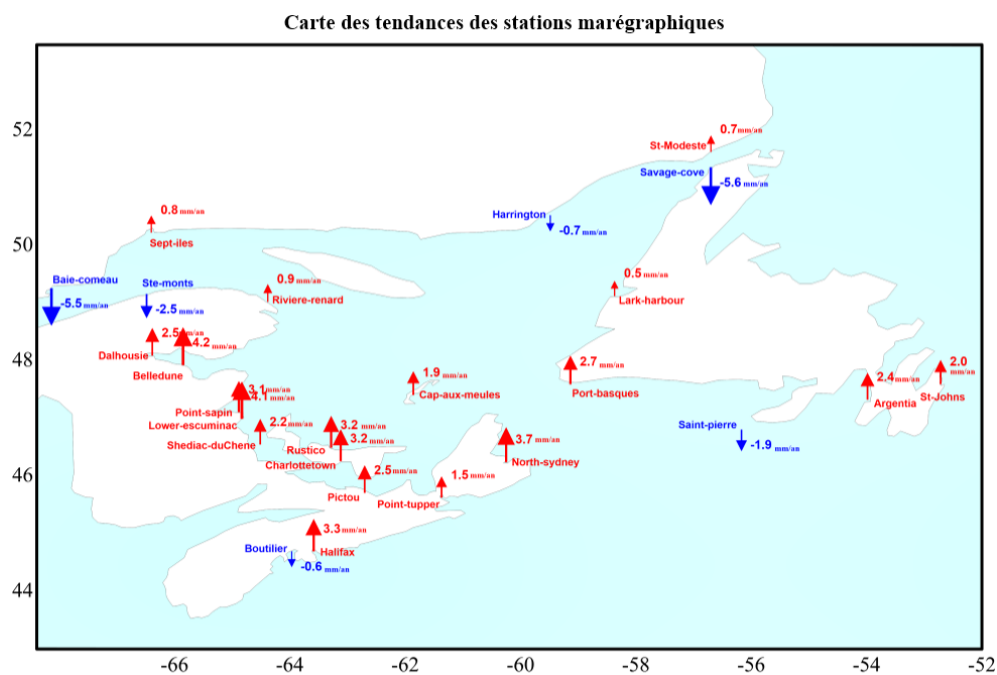


Fig. 5.3. Niveau moyen de la mer (tendance linéaire) aux stations marégraphiques

### 5.3. Altimétrie satellitaire

Les étapes de l'analyse de l'altimétrie satellitaire sont les mêmes que précédemment. Les séries temporelles mensuelles avec les tendances linéaires et leurs résidus sont montrées

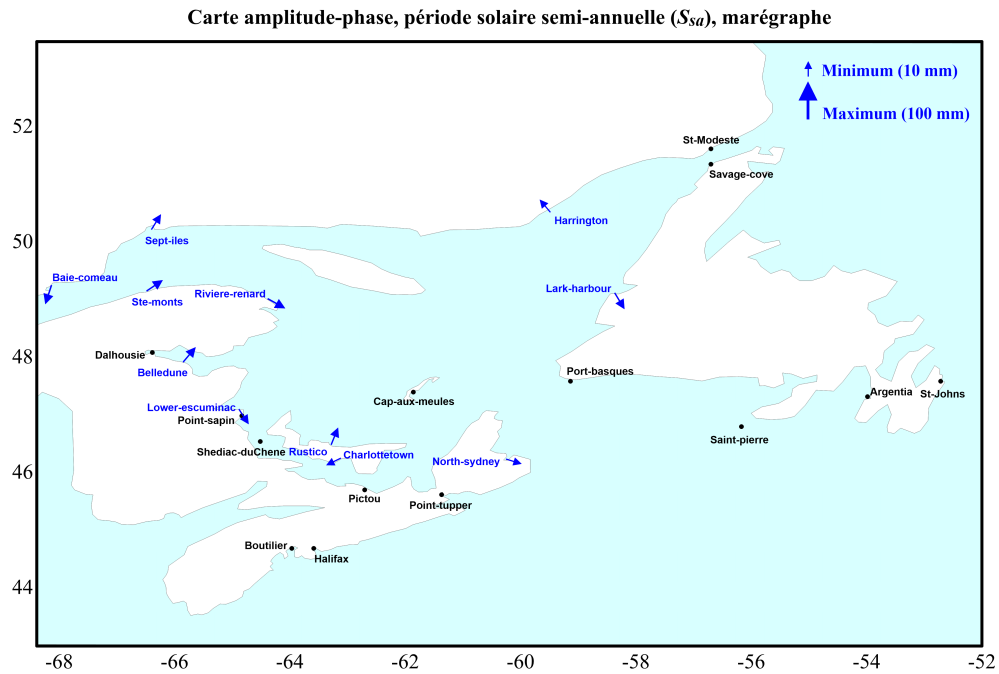


Fig. 5.4. Carte de l'amplitude-phase des périodes semi-annuelle ( $S_{sa}$ ) des stations marégraphiques

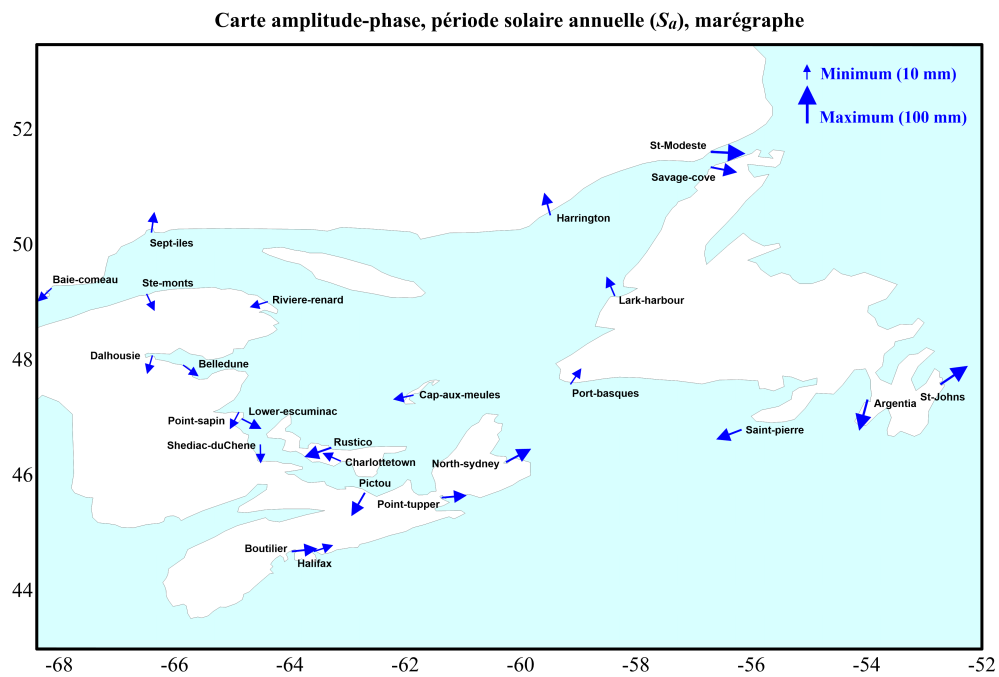
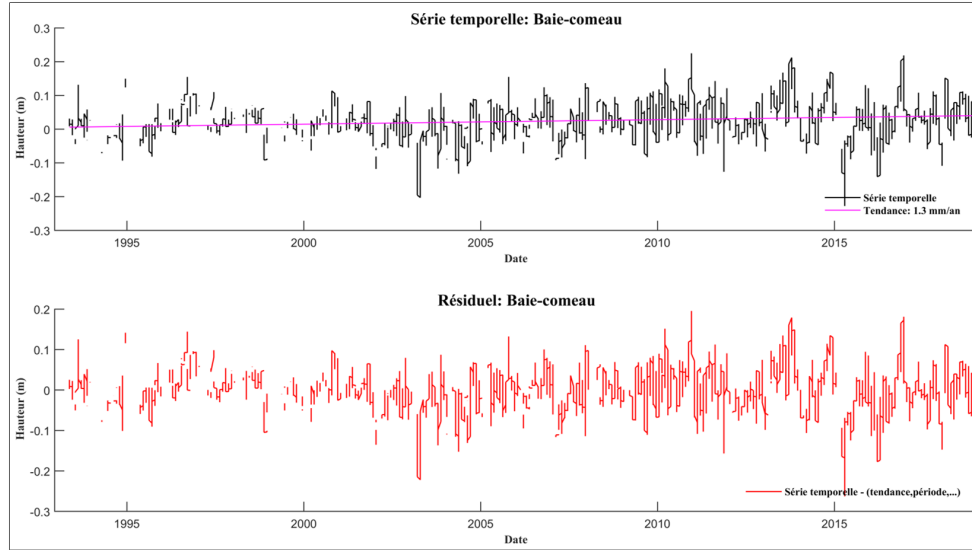


Fig. 5.5. Carte de l'amplitude-phase des périodes annuelles ( $S_a$ ) des stations marégraphiques

l'annexe G. La figure 5.6 en montre un exemple pour la station de Baie-Comeau présenté précédemment à la figure 5.2.



**Fig. 5.6.** Exemple des séries temporelles d’altimétrie satellitaire avec tendance linéaire et résidus (annexe G).

Pour cette recherche et pour des questions de compatibilité avec les données marégraphiques, nous nous sommes limitées à l’extraction des constituants de marée semi-annuels et annuels. Le tableau 5.2 présente les résultats pour l’ensemble des stations marégraphiques. Il convient de noter que la tendance de chaque station a été calculée en fonction de la série temporelle du nœud le plus proche de la station marégraphe. La dernière colonne de ce tableau donne la distance entre les points interpolés (stations) et les nœuds de la grille.

Pour obtenir une vue d’ensemble, comme dans le cas des données marégraphiques, les résultats de l’analyse des séries temporelles altimétriques sont transcrits sur les cartes des figures 5.7 à 5.9. Cependant, en raison du format de données de l’altimétrie satellitaire (donnée de grille), la tendance linéaire de la série temporelle (c.-à-d. le NMM) a été affichée sous forme d’une carte isoplèthe comme illustré par la figure 5.7. Pour arriver à cette représentation, nous avons eu recours à divers logiciels (*ArcGIS*, *Global Mapper* et *Golden Surfer*). Dans cette figure, le tracé du trait de côte est passablement simplifié en raison de la faible résolution de la grille ( $0^{\circ}15' \sim 30$  km). Les deux autres figures présentent comme précédemment l’amplitude-phase des périodes semi-annuelle et annuelle issues de l’analyse spectrale des données altimétriques sous forme des vecteurs localisés sur chaque station marégraphiques.

Au vu du tableau 5.2 et des figures 5.7 à 5.9, nous pouvons remarquer que:

- Les tendances dans l’ensemble des stations sont positives.

**Tab. 5.2.** Tendance, amplitude et phase des constituants semi-annuel et annuel à partir de séries temporelles d'altimétrie satellitaire

Stations	Tendance	Semi-annuelle		Annuelle		Distance des nœuds de la grille(km)
	mm/an	Amp.(mm)	Phase(°)	Amp.(mm)	Phase(°)	
Argentia	3.2	4	77	59	315	11.7
Baie-comeau	1.3	8	115	23	251	12.1
Belledune	2.8	3	157	32	291	3.3
Boutilier-point	3.3	7	201	47	303	8.6
Cap-aux-meules	3.4	8	126	40	288	1.4
Charlottetown	3.2	5	184	46	291	12.1
Dalhousie	2.6	3	159	31	291	6.5
Halifax	3.4	7	198	47	305	5.7
Harrington	3.0	9	157	43	300	15.9
Lark-harbour	3.4	6	115	35	309	2.8
Lower-escuminac	2.6	6	161	33	308	4.7
North-sydney	3.3	5	97	60	300	14.0
Pictou	3.5	4	140	47	297	8.7
Point-sapin	2.6	7	177	34	311	10.7
Point-tupper	3.9	4	155	52	300	2.9
Port-aux-basques	3.5	4	123	23	322	6.6
Riviere-au-renard	3.3	3	85	37	265	13.9
Rustico	2.9	6	211	47	291	12.4
Saint-pierre	3.6	6	105	42	328	11.2
Savage-cove	3.0	1	146	42	310	7.0
Sept-iles	2.7	10	259	29	252	8.5
Shediac & du-Chene	2.7	8	197	40	286	18.4
Ste-anne-des-monts	0.4	3	67	24	272	8.0
St-Johns	3.1	4	49	56	319	9.5
West-st-Modeste	2.8	1	159	43	314	5.9

- L'amplitude du constituant semi-annuel est très faible et cela montre que ce constituant ne peut pas être décelé facilement dans les séries temporelles (figure 5.8).
- Les phases du constituant annuel sont proches les unes des autres ce qui montre un comportement uniforme de la composante annuelle des marées dans cette zone.

Il est possible de confronter les résultats du niveau moyen de la mer issu de nos analyses à ceux provenant d'un modèle planétaire fourni par AVISO tel que calculé à partir des données altimétriques multi-missions (format NetCDF; AVISO 2019). La figure 5.10 montre les résultats de ce modèle pour notre zone d'étude. Comparativement à la figure 5.7, nous pouvons conclure qu'au large, dans l'océan atlantique au sud de la région, il y a une bonne

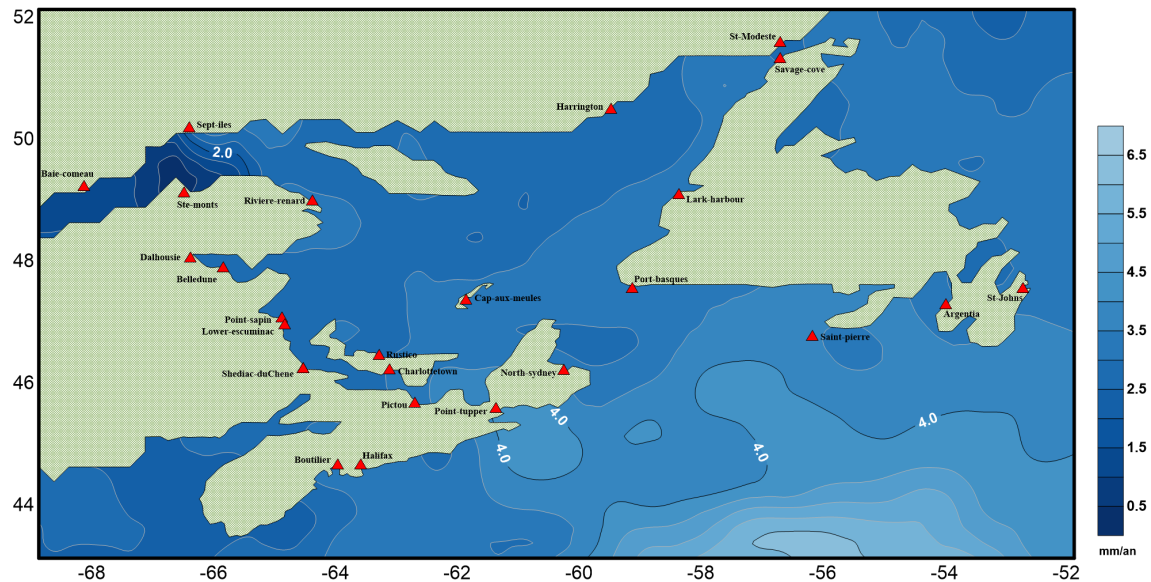


Fig. 5.7. Niveau moyen mensuel de la mer en mm (tendance linéaire) de l'altimétrie satellitaire dans le golfe du Saint-Laurent

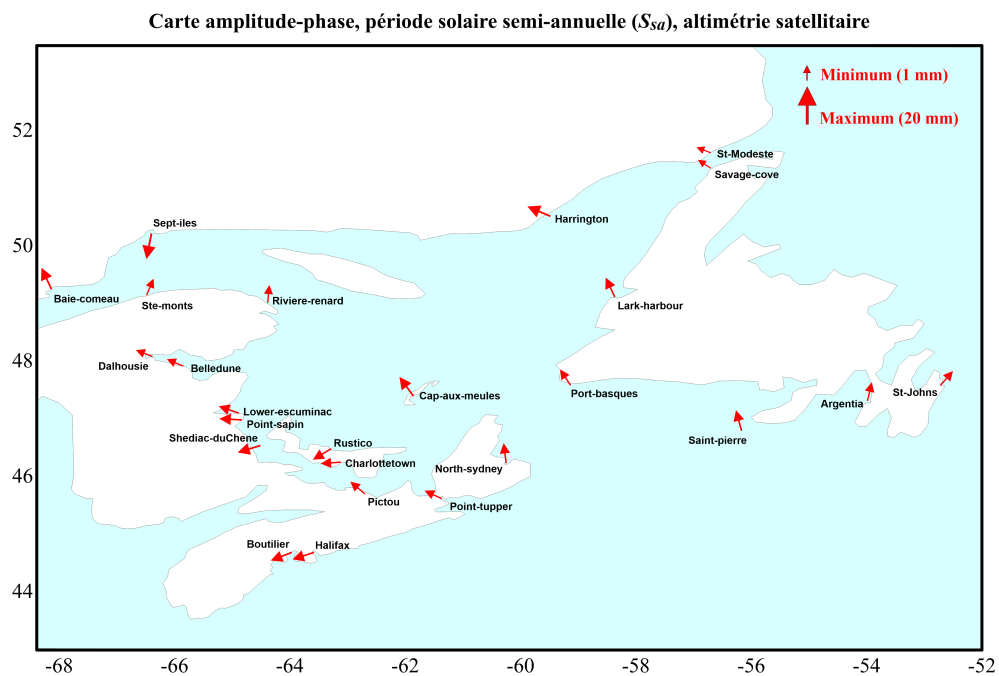
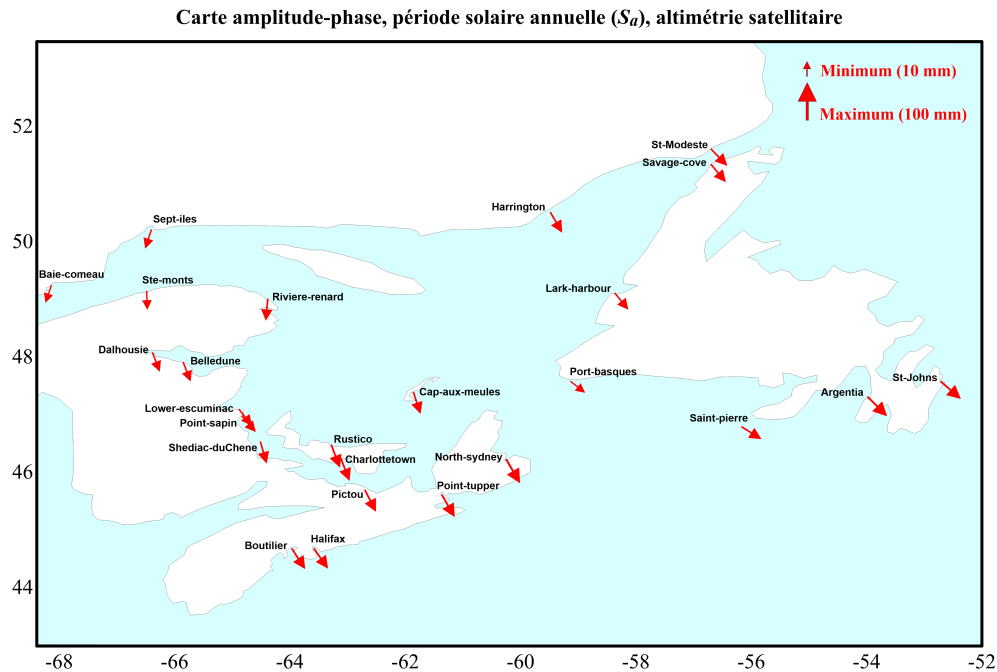


Fig. 5.8. Carte de l'amplitude-phase de la période semi-annuelle ( $S_{sa}$ ) obtenues à partir de séries temporelle altimétries satellitaires

correspondance. En revanche, si nous nous approchons des côtes, on constate que le NMM issu de nos analyse est systématiquement plus haut de 0.5 mm/an par rapport au modèle



**Fig. 5.9.** Carte de l'amplitude-phase de la période annuelle ( $S_a$ ) obtenues à partir de séries temporelle altimétries satellitaires

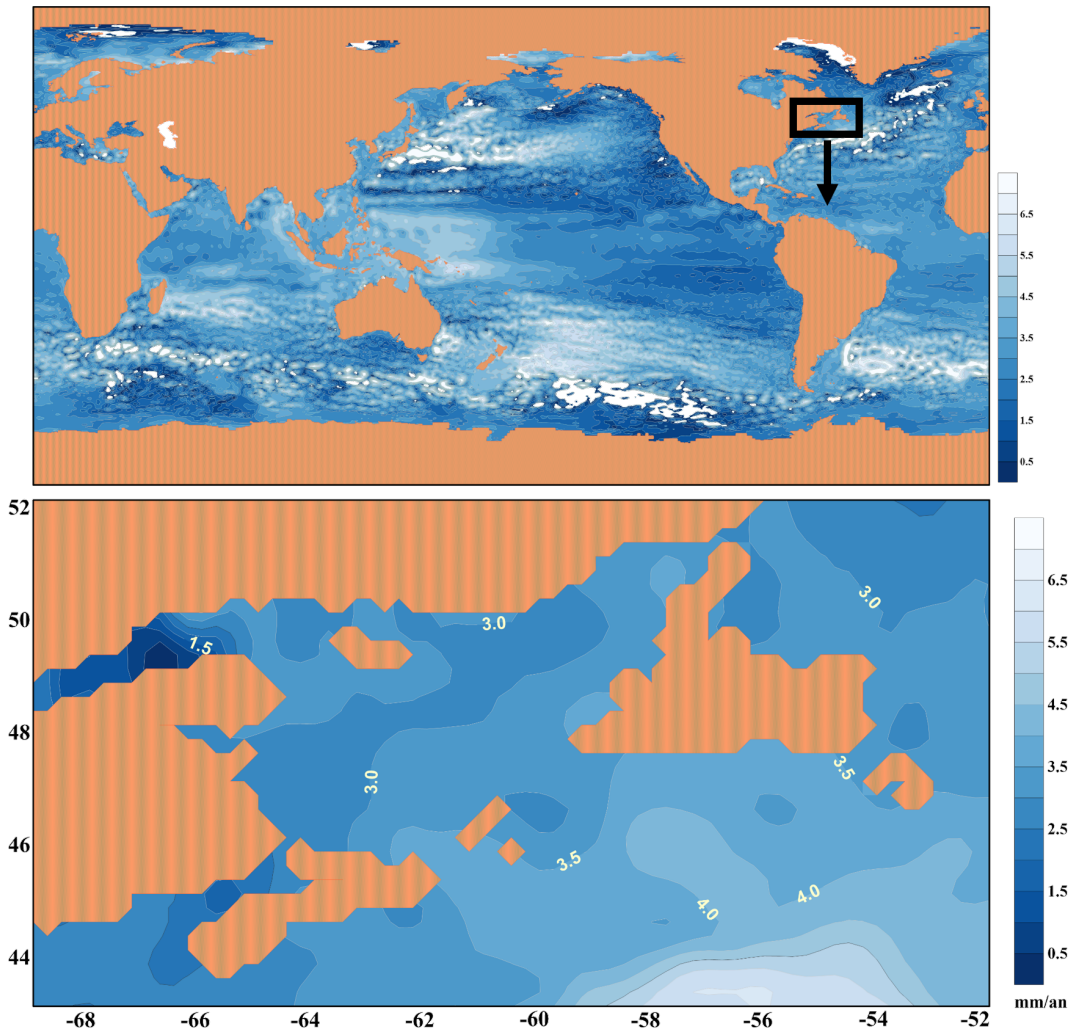
global. Cette petite différence peut être liée à l'algorithme d'interpolation utilisé (le voisin le plus proche) dans le logiciel "Golden Surfer" pour réaliser les courbes.

## 5.4. Comparaison des résultats des analyses spectrales marégraphes-altimétries

Comme mentionné, l'analyse spectrale est appliquée pour calculer les constituants de marée à partir des séries temporelles des stations marégraphiques ainsi que des données altimétriques. Dans cette section nous allons comparer et discuter des résultats obtenus selon plusieurs aspects.

### 5.4.1. Périodes de marée

Les périodes de marée semi-annuelle et annuelle estimées par les deux séries temporelles sont montrés au tableau 5.3. Nous constatons que les valeurs calculées sont proches des valeurs réelles de 4383.0763 heures (182.63 jours ou 6.00 mois) et de 8766.1527 heures (365.27 jours ou 12.001 mois) respectivement (dernière ligne du tableau et tableau 2.2). En règle générale, les résultats de l'altimétrie satellitaire sont plus homogènes. Il y a différentes raisons pour expliquer ces incompatibilités:



**Fig. 5.10.** Carte des tendances du niveau moyen de la mer à l'échelle planétaire à partir de données d'altimétrie satellitaire multi-missions, dérivées d'AVISO.

- (1) les données marégraphiques sont très sensibles à la variation du niveau de la mer, contrairement aux données altimétriques;
- (2) les données de marégraphes ont souvent beaucoup de données manquantes; et
- (3) les données altimétriques satellitaires sont plus représentatives des zones loin des côtes. Quelques explications s'imposent concernant le constituant semi-annuel.

L'autre point important est le discordance entre les valeurs réelles des constituants de marée et les résultats du programme LSSA (la dernière ligne du tableau 5.3). Selon le manuel du programme LSSA et son principe, les sélections de la "taille de la bande de

**Tab. 5.3.** Comparaison des résultats des constituants de marée issus des séries temporelles marégraphiques et altimétriques

Stations	Marégraphe				Altimétrie satellitaire			
	Semi-annuelle		Annuelle		Semi-annuelle		Annuelle	
	Période (mois)	Spect. (%)	Période (mois)	Spect. (%)	Période (jour)	Spect. (%)	Période (jour)	Spect. (%)
Argentia	-	-	12.06	44.53	184.42	<b>0.42</b>	365.79	57.63
Boutilier-point	-	-	12.06	34.40	183.01	<b>1.07</b>	365.79	53.42
Cap-aux-meules	-	-	11.93	25.37	183.29	<b>1.54</b>	365.79	39.77
Dalhousie	-	-	12.06	10.45	183.57	<b>0.84</b>	365.79	35.99
Halifax	-	-	12.06	13.18	183.01	<b>1.33</b>	365.79	53.44
Pictou	-	-	11.93	27.78	184.13	<b>0.54</b>	365.79	57.68
Point-sapin	-	-	11.93	14.81	183.29	<b>1.15</b>	364.68	26.96
Point-tupper	-	-	11.93	30.95	183.57	<b>0.49</b>	365.79	63.23
Port-aux-basques	-	-	11.93	12.09	183.85	<b>0.77</b>	364.68	22.16
Saint-pierre	-	-	11.93	59.74	184.13	<b>1.04</b>	364.68	50.04
Savage-cove	-	-	11.80	29.65	183.01	<b>0.47</b>	364.68	55.73
Shediac & du-Chene	-	-	12.06	5.80	183.01	<b>1.93</b>	365.79	41.14
St-Johns	-	-	11.93	34.11	184.70	<b>0.42</b>	365.79	58.84
West-st-Modeste	-	-	11.93	35.67	183.29	<b>0.52</b>	364.68	62.08
Baie-comeau	6.02	<b>12.66</b>	11.93	9.76	180.25	<b>1.32</b>	366.91	9.23
Belledune	6.02	<b>11.50</b>	11.93	9.87	183.57	<b>0.93</b>	365.79	37.10
Charlottetown	5.99	<b>1.18</b>	12.06	10.21	182.73	<b>0.57</b>	365.79	58.86
Harrington	6.02	<b>3.46</b>	11.93	24.03	183.57	<b>2.50</b>	365.79	40.90
Lark-harbour	5.99	<b>10.13</b>	11.93	17.16	183.29	<b>1.24</b>	364.68	37.66
Lower-escuminac	6.02	<b>7.08</b>	12.06	11.07	183.57	<b>0.84</b>	364.68	26.43
North-sydney	6.02	<b>1.69</b>	11.93	35.55	183.57	<b>0.53</b>	365.79	66.77
Riviere-au-renard	5.99	<b>9.96</b>	12.06	7.68	181.07	<b>0.43</b>	365.79	31.17
Rustico	5.99	<b>4.30</b>	11.93	34.05	181.90	<b>0.82</b>	365.79	55.07
Sept-iles	6.02	<b>5.75</b>	12.06	12.33	183.01	<b>0.35</b>	365.79	12.69
Ste-anne-des-monts	6.02	<b>13.28</b>	11.93	10.55	181.34	<b>0.41</b>	365.79	12.98
<b>Valeur actuelle</b>	<b>6.00</b>		<b>12.00</b>		<b>182.63</b>		<b>365.27</b>	

période" et du "nombre de valeurs spectrales" dans la bande (résolution de fréquence) sont très importantes. Cela signifie qu'en changeant la bande de période et le nombre de valeurs spectrales, les résultats seraient différents. Bien sûr, le nombre d'observations dans chaque série temporelle et le nombre de dates sans observation (données manquantes) affectent directement les résultats (University of Brunswick, 2002). Cependant, dans le cas des séries temporelles altimétriques de longue durée, le même problème se pose également. Ceci peut être attribué aux caractéristiques des données ainsi que leurs emplacements. En effet, les



données d'altimétrie de la grille sont créées partir de l'interpolation des données le long de la trajectoire (along-track) et les points de grille (nœuds) ne sont pas exactement au même point que les stations marégraphiques. Par conséquent, ces valeurs de grille ne peuvent pas détecter les périodes de marée avec précision et les autres effets peuvent modifier le comportement du point de grille pendant le temps.

Comme nous pouvons le constater au tableau 5.3, les séries temporelles marégraphiques ont permis d'évaluer le constituant semi-annuel seulement dans 11 cas sur 25. En revanche, toutes les stations ont le constituant semi-annuel en utilisant des données altimétriques (nœuds de la grille les plus proches aux stations). Cette situation peut s'expliquer par le niveau de confiance calculé par la méthode ASMC (ligne violette sur la figure 5.1 et sur les figures de l'annexe E). Le niveau de confiance est principalement lié au degré de liberté qui à son tour dépend directement du nombre de données dans les séries temporelles. Cela signifie que plus les séries temporelles sont courtes plus le degré de liberté est faible et donc le niveau de confiance de 99% aura une valeur élevée. Ainsi, il est probable que les constituants dont la valeur spectrale est faible puissent être considérés non significatifs. En effet, comme il est indiqué par le tableau 5.4, le grand nombre d'observations et le faible intervalle de confiance mène à la détection du constituant semi-annuel pour toutes les stations marégraphiques par les données altimétriques. Cependant, les valeurs spectrales de ce constituant (nombres en rouge du tableau 5.3) calculées par les données altimétriques demeurent faibles. Il est possible de comparer ces valeurs spectrales avec les valeurs spectrales du même constituant dans les données marégraphiques qui ont le constituant semi-annuel (nombres en bleu du tableau 5.3). En d'autres termes, les valeurs spectrales du constituant semi-annuel détecté dans les séries temporelles marégraphiques sont dans la majorité des cas puissantes et significatives.

L'absence de constituant semi-annuel dans certains stations marégraphiques pourrait être expliquée autrement. En effet, comme nous pouvons observer à la figure 5.4, la plupart des stations sans constituant semi-annuel avec des données à long terme sont situées l'extérieur du golfe ("Argentia", "Halifax", "Port aux Basque", "St. John's"). Ceci signifierait que pour ces stations il n'y aurait essentiellement aucune période inter annuelle de changement du niveau de la mer.

#### **5.4.2. Amplitudes et phases**

La figure 5.4 montre que les phases du constituant semi-annuel obtenu à partir des données marégraphiques ne suivent pas un pattern logique et, comme nous l'avons mentionné, certaines stations ne détectent pas cette période de marée. En revanche, la situation est

**Tab. 5.4.** Relation entre le niveau de confiance et le nombre de données dans la série temporelle pour détecter les constituants de marée

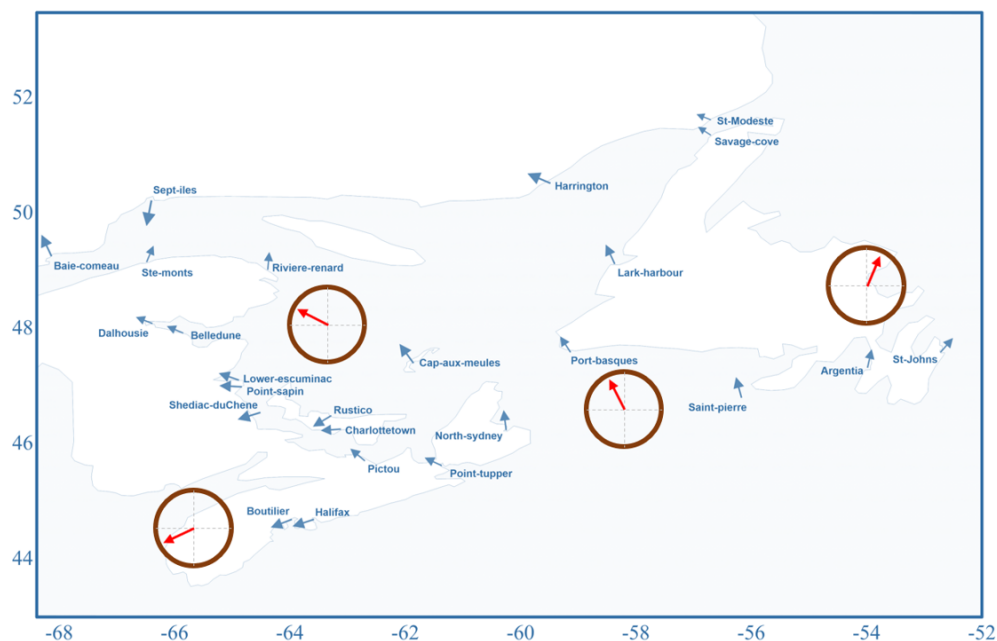
Stations	Marégraphe		Altimétrie satellitaire	
	Niveau de confiance (99%)	Données valide	Niveau de confiance (99%)	Données valide
Argentia	1.9	497	0.1	9496
Boutilier-point	7.7	125	0.1	9496
Cap-aux-meules	8.6	113	0.1	9490
Dalhousie	6.5	148	0.1	8578
Halifax	0.8	1107	0.1	9496
Pictou	2.8	326	0.1	9496
Point-sapin	9.8	100	0.1	9472
Point-tupper	4.8	192	0.1	9496
Port-aux-basques	1.5	622	0.1	9478
Saint-pierre	19.5	52	0.1	9496
Savage-cove	8.0	121	0.1	8840
Shediac & du-Chene	3.5	265	0.1	9496
St-Johns	1.3	694	0.1	9496
West-st-Modeste	4.7	194	0.1	8446
Baie-comeau	3.6	254	0.1	6835
Belledune	4.8	193	0.1	8578
Charlottetown	0.9	1034	0.1	9496
Harrington	1.6	592	0.1	9004
Lark-harbour	4.4	208	0.1	9472
Lower-escuminac	1.9	488	0.1	9472
North-sydney	1.7	547	0.1	9496
Riviere-au-renard	1.7	539	0.1	8881
Rustico	3.8	239	0.1	9406
Sept-iles	1.9	475	0.1	8442
Ste-anne-des-monts	3.5	264	0.1	8450

différente avec les phases du constituant semi-annuel calculé par les données altimétriques (figure 5.8). Si nous supposons que le retard de phase pour chaque mois est égal à 30 degrés ( $12 \times 30^\circ = 360^\circ$ ), le constituant semi-annuel de l'est du golfe du Saint-Laurent est transféré à l'ouest avec des retards mensuels. Sur cette figure, on peut voir que la différence entre "St. John's" et "Halifax" est d'environ 120 degrés ou 4 mois (ce retard peut se produire dans les 3 mois ou une saison). Ces changements sont illustrés dans la figure 5.11. Il y a cependant des exceptions avec des stations qui ne suivent pas ce pattern (p. ex. "St. Anne", "Sept-Îles", "Baie Comeau" et "Rivière au renard"). En outre, basé sur le tableau 5.2, nous constatons que l'amplitude de ce constituant est principalement constante le long des côtes.

Concernant les amplitudes et les phases du constituant annuel calculées à partir des données altimétriques selon la figure 5.9, nous pouvons certainement dire que ce constituant de marée est observable presque en même temps dans cette région et son amplitude est très similaire (tableau 5.2). Le pattern de la période annuelle est cependant différent en analysant la série temporelle des marégraphes (figure 5.5). Selon cette figure, la phase annuelle des stations extérieures (p. ex. "St. John's", "Halifax", "Boutilier" et quelque peu "West St. Modeste" et "Savage Cove") est d'environ zéro ou près de zéro, mais le retard de phase augmente de droite gauche des stations intérieures. Cette condition est représentée sur la figure suivante (figure 5.12). Basé sur ce pattern, nous observons que, par exemple, les stations "Cap aux Meules" ou "Rustico" ont un retard de phase de  $180^\circ$  (six mois) pour le constituant de marée annuelle. Un autre point important est les valeurs d'amplitude de ce constituant. D'après le tableau 5.1, le constituant annuel des stations extérieures est plus puissant que les stations intérieures du golfe du Saint-Laurent.

### 5.4.3. Niveau moyen de la mer

L'estimation du niveau moyen de la mer est le dernier paramètre obtenu dans cette analyse. Ce niveau, qui est représenté comme une tendance linéaire dans les tableaux 5.1 et 5.2 et les annexes F et G, prend des valeurs différentes selon les séries temporelles analysées.



**Fig. 5.11.** Retard de phase du constituant semi-annuel selon les données altimétriques du golfe du Saint-Laurent



**Fig. 5.12.** Retard de phase du constituant annuel dans les données marégraphiques du golfe du Saint-Laurent

La figure 5.13 donne un aperçu global des résultats obtenus avec les deux types de données. Selon les tableaux spectraux de l'annexe E, la valeur du NMM calculée à partir des données marégraphiques n'est pas significative pour certaines stations: "Boutillier", "Cap aux Meules", "Lark Harbour", "Saint Pierre" et "West St. Modeste" (barres bleues sur la figure 5.13). Ces stations ont une série temporelle courte en regardant leur nombre d'observations dans le tableau 5.4. Deux d'entre elles ont une tendance négative ("Boutillier" et "St. Pierre"). En revanche, les données altimétriques ont un comportement généralement uniforme (barres rouges sur la figure 5.13). Le NMM obtenu partir de séries temporelles altimétriques montre l'avantage d'utiliser des données à long terme (comme cela a été mentionné dans les résultats de phase et d'amplitude). La seule différence évidente est dans la partie ouest avec les stations de "St. Anne des Monts" et "Baie Comeau" où le NMM est négatif contrairement aux autres stations proches.

Afin de mieux évaluer les résultats des marégraphes et des données altimétriques, nous devons comparer la durée et les dates des séries temporelles. Les variations du NMM pour chaque type de donnée sont affichées dans la figure 5.14. Cette figure indique les stations de séries temporelles des plus courtes aux plus longues (axe vertical) pendant le temps (axe horizontal). Nous pouvons constater qu'il y a trois types des stations:

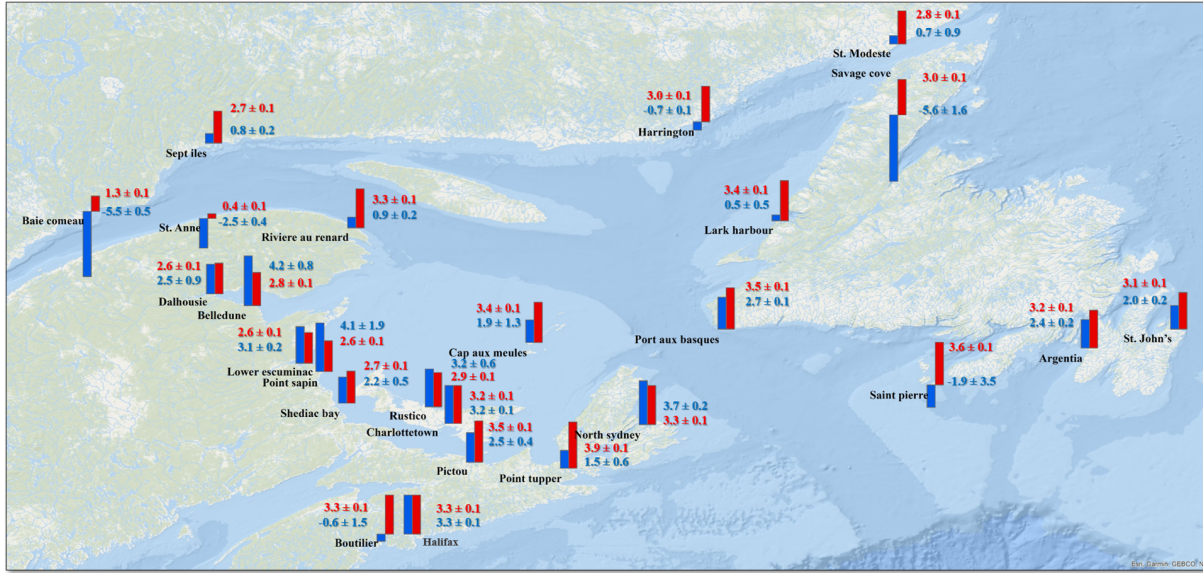


Fig. 5.13. Niveau moyen de la mer à partir de l'analyse des données marégraphiques (barres bleues) et altimétriques (barres rouges)

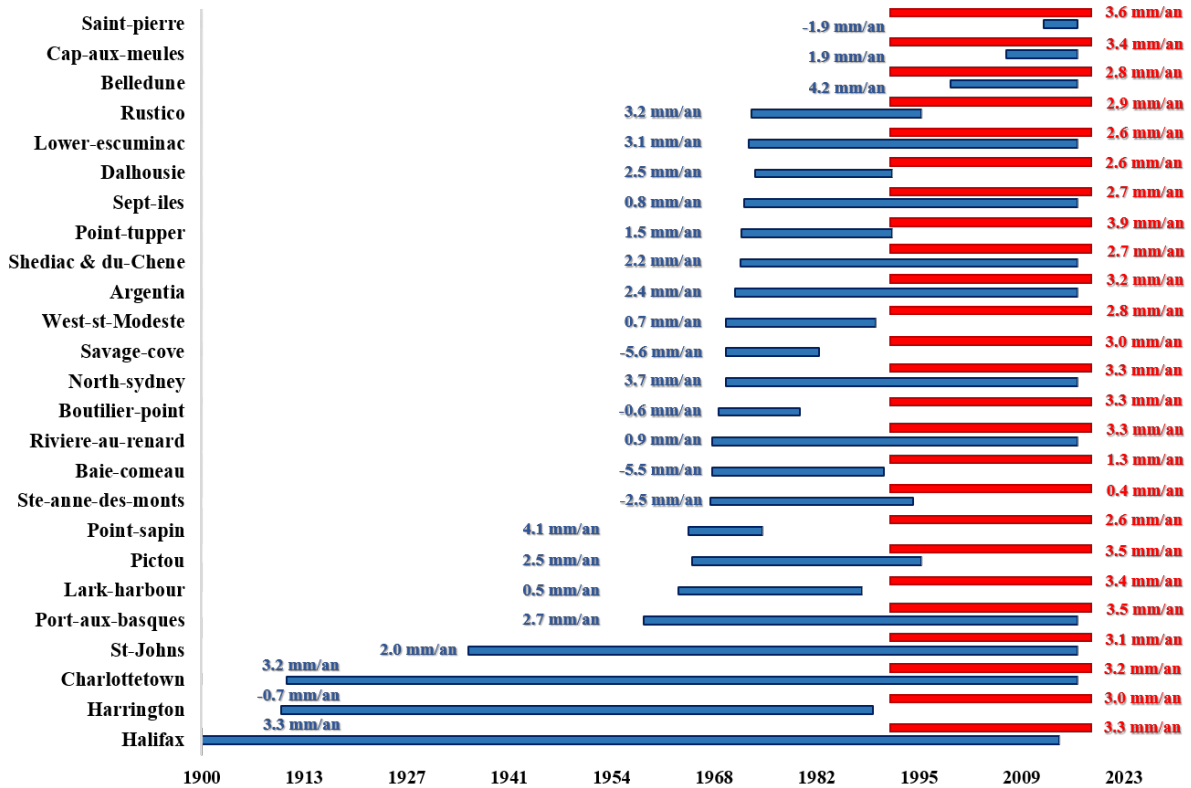


Fig. 5.14. Niveau moyen de la mer de la première observation à la dernière sur les côtes du golfe du Saint-Laurent

- (a) Les stations dont les séries altimétriques sont plus longues que les séries marégraphiques et les deux séries se chevauchent ("St. Pierre", "Cap aux Meules" et "Belle-dune"). Comme les séries temporelles altimétriques sont plus longues, il semble que les NMM obtenus par altimétrie soient plus fiables que les données marégraphiques.
- (b) Les stations dont les séries marégraphiques sont plus longues que les séries altimétriques et les deux séries se chevauchent ("Lower escuminac", "Sept Îles", "Shediac & du Chene", "Argentia", "North Sydney", "Rivière au renard", "Port aux Basque", "St. John's", "Charlottetown" et "Halifax"). Notons que les données de "Shediac & du Chene" (qui résultent de la fusion des stations "Shediac bay" et "Pointe du Chene") n'est pas continue et elle a une grande lacune (entre 1984-2003). De plus, l'observation du niveau de la mer la station d'"Halifax" a commencé partir de 1885 alors que dans la figure 5.14, elle est montrée partir de 1900.
- (c) Deux stations ont la même valeur NMM calculée à partir de deux séries ("Halifax" et "Charlottetown"), ce qui montre que les changements de NMM ont été constants pendant la longue période dans ces stations. Pour les huit autres stations, il peut être possible de détecter les changements de NMM en comparant le NMM obtenu partir des données marégraphiques et altimétriques. Entre eux, la NMM obtenue partir des données marégraphiques des stations de "Lower escuminac" et de "North Sydney" est réduite de 3.1 et 3.7 mm/an à 2.6 et 3.3 mm/an par analyse des données altimétriques (entre 1993-2019). Alors que dans d'autres cas (6 stations), les changements du NMM sont différents. Il est à noter que pour deux stations, "Rivière au renard" et "Sept Îles", ce changement de NMM est plus prononcé (de 0.9 et 0.8 mm/an du marégraphe 3.3 et 2.7 mm/an des données altimétriques).
- (d) Les stations dont les données marégraphiques ne se chevauchent pas avec les données altimétriques ou dont le chevauchement est faible ("Rustico", "Dalhousie", "Point Tupper", "West St. Modeste", "Savage Cove", "Boutilier", "Baie comeau", "St. Anne des Monts", "Point Sapin", "Pictou", "Lark Harbour" et "Harrington"). À ces stations, nous pouvons discuter séparément des changements de NMM par marégraphe et données altimétriques. Dans certaines stations, la valeur du NMM:
- a augmenté lentement ("Dalhousie" et "Pictou")
  - a augmenté rapidement ("Point tupper", "West St. Modeste", "Savage Cove", "Boutilier", "Baie comeau", "St. Anne des Monts", "Lark Harbour" et "Harrington") ou

- a diminué ("Point Sapin", "Rustico"). Il faut mentionner que le NMM de certaines stations est changé de valeurs négatives à positives.

## 5.5. Conclusions partielles

En comparant les résultats de l'analyse harmonique à ceux de LSSA (annexe E), le programme d'analyse harmonique (qui a été développé dans cette recherche), permet de calculer la tendance, la phase et l'amplitude des constituants de marée aussi précisément que le programme LSSA. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est son incapacité de calculer les valeurs significatives (dans notre cas ce sont les constituants des marées) ainsi que les valeurs spectrales.

Le problème important est que le golfe du Saint-Laurent est un bassin semi-fermé. Cela signifie que les côtes intérieures reçoivent sans aucun doute des impulsions océaniques, telles que des constituants de marée, avec retard (Shaw et al., 2010). Cependant, le fait est que sans données fiables et continues, le résultat exact ne peut pas être obtenu. Cette condition peut être vue dans les résultats des données de marégraphe. Bien sûr, les données d'altimétrie de la grille couvrent principalement cette déficience, mais en raison de sa résolution spatiale et de la distance entre ses nœuds par rapport aux stations, nous ne pouvons obtenir qu'un certain comportement dans cette région.

Un autre point important est les changements brusques observés du niveau de la mer dans les stations marégraphiques, en raison possiblement de différents paramètres locaux qui peuvent avoir un effet direct sur les observations du NMM. En considérant toutes les conditions mentionnées dans le calcul du NMM, en général, nous pouvons constater l'augmentation du NMM dans le golfe du Saint-Laurent ce qui correspond aux modèles et aux résultats d'élévation du niveau de la mer dans diverses études (voir Introduction (page 5)).





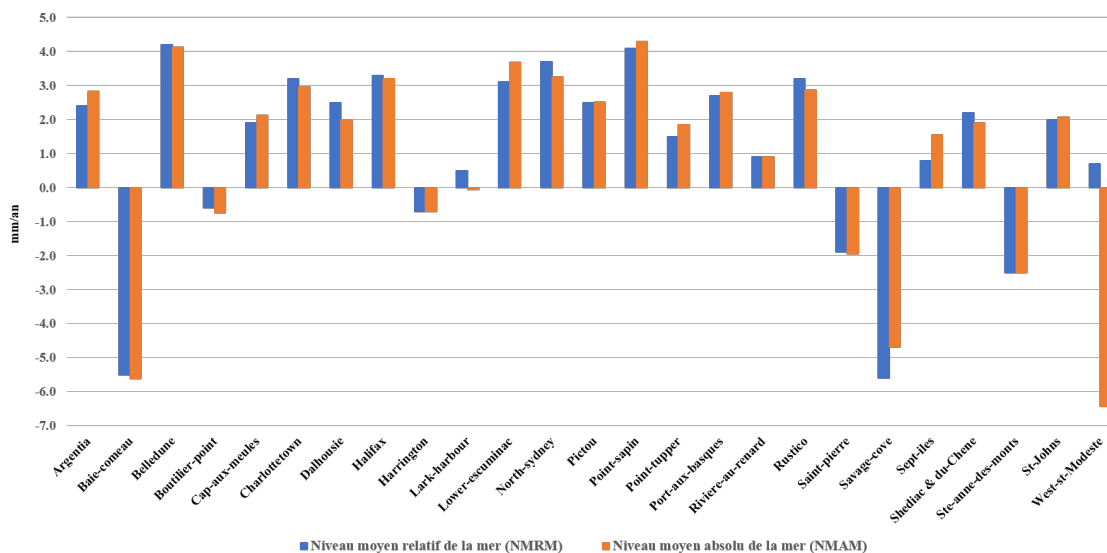
# Chapitre 6

## Définition du NMM absolu

Afin d'obtenir le niveau moyen absolu de la mer, nous devons introduire le mouvement terrestre vertical calculé à partir des diffuseurs persistants (chapitre 4). La section 6.1 présente et discute des résultats de cette opération. La section 6.2 conclut ce chapitre.

### 6.1. NMAM intégrant le MTV des diffuseurs persistants

Le tableau 6.1 montre NMAM estimé en intégrant les tendances calculées par station marégraphiques et le mouvement de l'écorce terrestre calculé dans une zone centrée à chaque station marégraphique à l'aide de la méthode des diffuseurs persistants. Le NMAM dans la plupart des cas est très proche du NMRM (chiffres en gras). En effet, à l'exception de la station "West St. Modeste", les MTV estimés sont faibles. La figure 6.1 montre la relation entre NMRM et NMAM.



**Fig. 6.1.** Comparaison du niveau moyen relatif de la mer (NMRM) et du niveau moyen absolu de la mer (NMAM) dans le golfe du Saint-Laurent

**Tab. 6.1.** Calcul du niveau moyen absolu de la mer (NMAM) partir du niveau moyen relatif de la mer (NMRM) et du MTV. La dernière colonne montre le résultat NMAM du NMM à partir des données altimétriques et marégraphiques

Stations	Tendance Marégraphe (mm/an)	MTV (mm/an)	NMAM (mm/an)
Argentia	2.4	0.4	2.8
Baie-comeau	-5.5	-0.1	-5.6
Belledune	4.2	-0.1	4.1
Boutilier-point	-0.6	-0.1	-0.7
Cap-aux-meules	1.9	0.2	2.1
Charlottetown	3.2	-0.2	3.0
Dalhousie	2.5	-0.5	2.0
Halifax	3.3	-0.1	3.2
Harrington	-0.7	0.0	-0.7
Lark-harbour	0.5	-0.6	-0.1
Lower-escuminac	3.1	0.6	3.7
North-sydney	3.7	-0.4	3.3
Pictou	2.5	0.0	2.5
Point-sapin	4.1	0.2	4.3
Point-tupper	1.5	0.3	1.8
Port-aux-basques	2.7	0.1	2.8
Riviere-au-renard	0.9	0.0	0.9
Rustico	3.2	-0.3	2.9
Saint-pierre	-1.9	-0.1	-2.0
Savage-cove	-5.6	0.9	-4.7
Sept-iles	0.8	0.7	1.5
Shediac & du-Chene	2.2	-0.3	1.9
Ste-anne-des-monts	-2.5	0.0	-2.5
St-Johns	2.0	0.1	2.1
West-st-Modeste	0.7	-7.1	-6.4

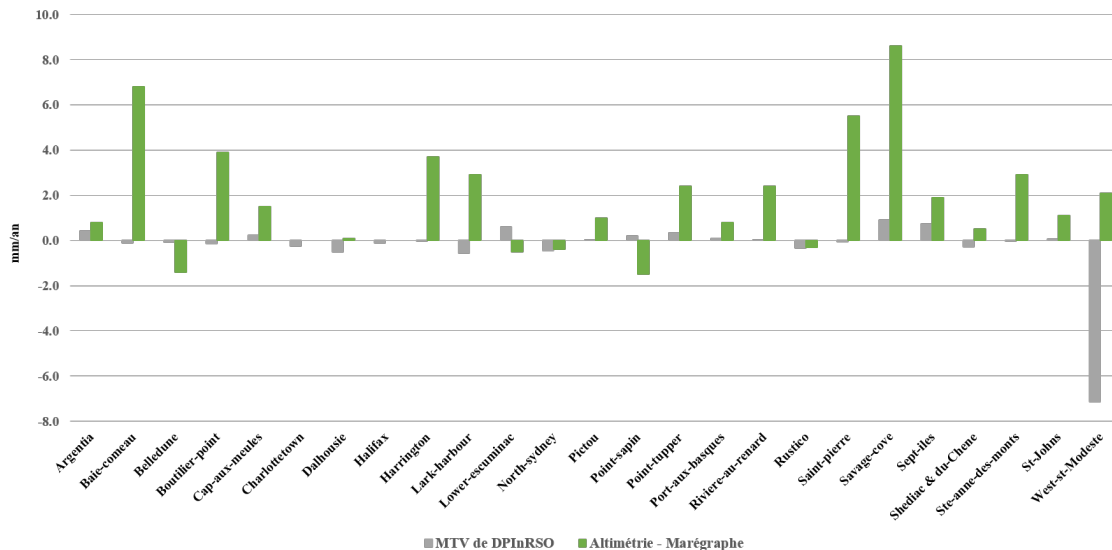
Les deux points suivants doivent être pris en considération:

- (1) La simultanéité entre les résultats est très importante. Comme le montre la figure 5.14, dans 12 stations, le niveau moyen de la mer n'a pas été observé en même temps que l'observation du déplacement vertical ("Rustico", "Dalhousie", "Point tupper", "West St. Modeste", "Savage Cove", "Boutilier", "Baie comeau", "St. Anne des Monts", "Point Sapin", "Pictou", "Lark Harbour" et "Harrington"). En d'autres termes, la moitié des résultats du niveau moyen absolu de la mer sont incertains.
- (2) Dans 13 autres stations, les dernières observations marégraphiques (dans cette étude) sont le 16-12-2016, tandis que le mouvement vertical a été calculé entre

2015-2019. Cela signifie que, dans cette moitié des stations, NMM et MTV ne sont pas également simultanés ("Saint Pierre", "Cap aux Meules", "Belledune", "Lower escuminac", "Sept iles", "Shediac & du Chene", "Argentia", "North Sydney", "Rivière au renard", "Port aux Basques", "St. John's", "Charlottetown" et "Halifax").

Une autre façon (indirecte) d'évaluer les incertitudes associées avec ces calculs est de comparer le MTV avec celui calculé en soustrayant les tendances aux stations marégraphiques de celles calculées avec les données altimétriques. Selon des études, cette comparaison marégraphes-altimétrie permet d'évaluer le MTV (Braitenberg et al., 2011; Fenoglio-Marc et al., 2004; Ray et al., 2010; Wöppelmann and Marcos, 2016; Zulkifli et al., 2018). Le tableau 6.2 montre les résultats de cette approche.

La figure 6.2 compare le MTV calculé selon la méthode des diffuseurs persistants (tableau 6.1) et celui de la comparaison entre données altimétriques et données marégraphiques (tableau 6.2). D'après cette figure, aucun comportement constant ne peut être observé entre ces deux approches. Bien sûr, toutes les restrictions envisagées sur les données de marégraphe et d'altimétrie et leur analyse (p. ex. simultanéité et longueur des données) doivent être notées (chapitre 5).



**Fig. 6.2.** Comparaison du mouvement de terrain vertical obtenu à partir de a) la technique DPInRSO et b) la soustraction des données marégraphiques et altimétriques (altimétrie moins marégraphe)

Tab. 6.2. Calcul de la MTV par comparaison des données altimétriques et marégraphiques.

Stations	Tendance (mm/an)		MTV (mm/an)
	Marégraphe	Altimétrie	Altimétrie-Marégraphes
Argentia	2.4	3.2	0.8
Baie-comeau	-5.5	1.3	6.8
Belledune	4.2	2.8	-1.4
Boutilier-point	-0.6	3.3	3.9
Cap-aux-meules	1.9	3.4	1.5
Charlottetown	3.2	3.2	0.0
Dalhousie	2.5	2.6	0.1
Halifax	3.3	3.3	0.0
Harrington	-0.7	3.0	3.7
Lark-harbour	0.5	3.4	2.9
Lower-escuminac	3.1	2.6	-0.5
North-sydney	3.7	3.3	-0.4
Pictou	2.5	3.5	1.0
Point-sapin	4.1	2.6	-1.5
Point-tupper	1.5	3.9	2.4
Port-aux-basques	2.7	3.5	0.8
Riviere-au-renard	0.9	3.3	2.4
Rustico	3.2	2.9	-0.3
Saint-pierre	-1.9	3.6	5.5
Savage-cove	-5.6	3.0	8.6
Sept-iles	0.8	2.7	1.9
Shediac & du-Chene	2.2	2.7	0.5
Ste-anne-des-monts	-2.5	0.4	2.9
St-Johns	2.0	3.1	1.1
West-st-Modeste	0.7	2.8	2.1

## 6.2. Conclusions partielles

En considérant tous les résultats des différentes parties de cette étude, on peut conclure que le MTV aurait peu de contribution au niveau moyen de la mer dans le Golfe du Saint-Laurent. Cette condition est bien visible sur la figure 6.1. En d'autres termes, sur la base des résultats du MTV dans cette étude, bien que le mouvement vertical des terres soit observable dans les changements du niveau de la mer, son impact n'est pas grand comme, par ailleurs, il est mentionné par d'autres (Denys et al., 2020; Klos et al., 2019; Wöppelmann and Marcos, 2016). Bien sûr, il faut mentionner que, ce résultat est limité à une période spécifique et nous ne pouvons pas tirer des conclusions pour une plus longue période de temps.

Concernant l'autre approche de comparaison données marégraphiques et données altimétriques, les résultats semblent incertains particulièrement à cause de l'incertitude des données altimétriques proche des côtes.



## Conclusions et perspectives de recherche

---

L'objectif principal de notre recherche était de développer une procédure d'estimation du mouvement vertical de l'écorce terrestre qui peut être appliquée au suivi des changements du niveau moyen de la mer dans le Golfe du Saint-Laurent. Dans notre recherche, nous avons mis l'accent sur la technique interférométrique des diffuseurs persistants (DP) qui est la plus susceptible de nous fournir des résultats qui touchent l'ensemble des zones côtières dans la région d'étude. Compte tenu du nombre d'images RSO nécessaires pour appliquer cette technique (au moins une douzaine), nous avons opté pour des images libres d'accès du satellite Sentinel-1.

Notre expérience avec les images Sentinel-1 acquise à tous les mois (presque) de 2015 à 2019 nous permet de conclure ce qui suit:

- La technique donne des résultats encourageants en comparaison avec les mesures du mouvement vertical du terrain (MTV) obtenues par une méthode plus précise faisant appel aux données de stations permanentes GPS. Cependant, pour obtenir des résultats plus définitifs quant à la sensibilité de la technique DP aux mouvements de l'écorce terrestre, il faut répéter les analyses avec une plus longue série temporelle d'images RSO.
- La technique appliquée dans des sous-images incluant les 25 stations marégraphiques du Golfe du Saint-Laurent montre des MTV inférieurs à 1 mm/an. Cette vitesse a été calculée en tenant compte des séries temporelles extraites des DP se situant en deçà des 2 km de la station marégraphique. En comparant les résultats obtenus à des stations marégraphiques voisines, à quelques exceptions près, les valeurs évaluées de la vitesse du MTV semblent cohérentes. Ici aussi il faut envisager des études avec des plus longues séries temporelles. D'autres questions qu'il faut étudier dans ce domaine sont le nombre et la disposition des DP à utiliser pour évaluer correctement le mouvement de l'écorce terrestre dans la zone contenant un marégraphe.
- Concernant le logiciel StaMPS, nous avons présenté dans la section 4.3.1 notre appréciation à la lumière de notre expérience. À part les problèmes d'ordre plutôt technique qui se présentent lors de son application, la question concernant la méthode de localisation des pixels avec des diffuseurs persistants mérite un examen

plus approfondi. En effet, plusieurs pixels DP ont été localisés dans les surfaces d'eau. Dans notre cas, nous avons contourné ce problème en éliminant manuellement ces pixels des analyses subséquentes. Il faut donc étudier plus à fond les critères de sélection des DP employés par le logiciel.

Pour suivre les mouvements du niveau moyen de la mer, l'analyse de séries temporelles des mesures des marégraphes est importante. L'élimination ou la correction de certains effets périodiques de la série temporelle est l'une des questions les plus importantes pour étudier la NMM. En d'autres termes, nous devons étudier la tendance pure de la série temporelle (c.-à-d. le niveau moyen de la mer), sans aucun changement intempestif (c.-à-d. les constituants de la marée). En raison de l'utilisation de la résolution temporelle mensuelle dans cette étude, seuls les effets à long terme des constituants de la marée (constituants solaires semi-annuelles et annuels) ont été évalués et supprimés des séries temporelles originales. L'évaluation a été faite par les deux méthodes standards appliquées à l'analyse des séries temporelles, à savoir, la méthode des moindres carrés ainsi que l'analyse harmonique. Il est à noter que pour un certain nombre de stations, il a été impossible de calculer le constituant semi-annuel. En règle générale la vitesse du NMM se situe entre 2 et 4 mm/an. Il y a quelques stations où le résultat est négatif. L'obtention des séries temporelles continues (sans lacunes) par station marégraphique est un problème important comme notre expérience nous a clairement montré.

Nous avons également introduit les séries temporelles avec les données altimétriques pour évaluer le NMM. La comparaison des résultats des marégraphes et des données altimétriques montre que l'analyse des données homogènes sans lacunes (altimétrie) offre des résultats concernant le NMM plus cohérents, malgré les problèmes de résolution spatiale proche des côtes que l'analyse des données spatiales précises, mais non homogènes avec des lacunes abondantes (marégraphe). Les données marégraphiques peuvent être utilisées localement pour déterminer la marée, mais dans une grande région, comme le golfe du Saint-Laurent, l'analyse de ces données ne montre pas de tendance ou de caractéristique particulière.

La détermination du niveau moyen absolu de la mer nécessite l'observation du MTV sur une longue période. En d'autres termes, même si nous supposons que les observations du marégraphe sont effectuées en continu et sans lacunes, quatre ans d'étude du mouvement des terres dans cette zone ne suffisent pas pour arriver une conclusion définitive sur le niveau moyen absolu de la mer.



## Bibliographie

---

- Ablain, M., Jugier, R., and Picot, N. (2018). Estimation of any altimeter mean sea level drifts between 1993 and 2017 by comparison with tide -gauges measurements.
- Ablain, M., Legeais, J., Prandi, P., Marcos, M., Fenoglio-Marc, L., Dieng, H., Benveniste, J., and Cazenave, A. (2017). Satellite altimetry-based sea level at global and regional scales. *Surveys in Geophysics*, 38(1):7–31.
- Alaska Satellite Facility (2019). Alaska satellite facility data search vertex.
- Anonymous (2010). Interferometric synthetic aperture radar an introduction for users of insar data.
- AVISO (2019). Archiving validation and interpretation of the satellite oceanographic: Mean sea level rise.
- Bekaert, D., Hooper, A., and Wright, T. (2015a). A spatially variable power law tropospheric correction technique for insar data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(2):1345–1356.
- Bekaert, D., Walters, R., Wright, T., Hooper, A., and Parker, D. (2015b). Statistical comparison of insar tropospheric correction techniques. *Remote Sensing of Environment*, 170:40–47.
- Benoît, H. P., Gagné, J. A., Savenkoff, C., Ouellet, P., and Bourassa, M.-N. (2012). State of the ocean report for the gulf of st. lawrence integrated management (goslim). Report.
- Biswas, K., Chakravarty, D., Mitra, P., and Misra, A. (2019). Investigation of ground deformation with psinsar approach in an unstable urban area naples, italy using x-band sar images. In *Active and Passive Microwave Remote Sensing for Environmental Monitoring III*, volume 11154, page 111540J. International Society for Optics and Photonics.
- Bouroubi, Y., Sarago, V., Benoit, M., and Gosselin, C. (2016). 2d dam displacement measurements from space using sar interferometry. *Proceedings of Canadian Dam Association Annual Conference, Halifax, Nova Scotia, October 15-20*.
- Braitenberg, C., Mariani, P., Tunini, L., Grillo, B., and Nagy, I. (2011). Vertical crustal motions from differential tide gauge observations and satellite altimetry in southern italy. *Journal of Geodynamics*, 51(4):233–244.

- Chen, C. W. and Zebker, H. A. (2000). Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms. *JOSA A*, 17(3):401–414.
- Chen, C. W. and Zebker, H. A. (2001). Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization. *JOSA A*, 18(2):338–351.
- Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M. A., Milne, G. A., Nerem, R. S., Nunn, P. D., Payne, A. J., Pfeffer, W. T., Stammer, D., and Unnikrishnan, A. S. (2013). *Sea level change*, pages 1137–1216. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom New York, NY, USA.
- Church, J. A., Gregory, J. M., Huybrechts, P., Kuhn, M., Lambeck, K., Nhuan, M., Qin, D., and Woodworth, P. (2001). *Changes in sea level*, pages 639–694. Cambridge University Press, Cambridge.
- CMEMS (2019a). Copernicus marine environment monitoring service.
- CMEMS (2019b). Copernicus marine environment monitoring service.
- Colorado Center for Astrodynamics Research (2011). Tide gauge sea level.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., and Crippa, B. (2016). Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115:78–89.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Jungner, A., and Crippa, B. (2009). Persistent scatterer interferometry: Potential and limits. In *Proceedings of the 2009 ISPRS Workshop on High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, Hannover, Germany*, volume 25.
- Dehghani, M., Valadan Zoej, M. J., Hooper, A., Hanssen, R. F., Entezam, I., and Saatchi, S. (2013). Hybrid conventional and persistent scatterer sar interferometry for land subsidence monitoring in the tehran basin, iran. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 79:157–170.
- Delgado Blasco, J. M. and Foumelis, M. (2018). Using snap as insar processor for stamps. Microgeodesia Jaen Research Group-University of Jaen (Spain), BRGM-French Geological Survey.
- Denys, P. H., Beavan, R. J., Hannah, J., Pearson, C. F., Palmer, N., Denham, M., and Hreinsdottir, S. (2020). Sea level rise in new zealand: The effect of vertical land motion on century-long tide gauge records in a tectonically active region. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(1):e2019JB018055. e2019JB018055 2019JB018055.

- Department of Fisheries and Oceans (2005). The gulf of st. lawrence - a unique ecosystem : the stage for the gulf of st. lawrence integrated management (goslim).
- Douglas, B. C. (1995). Global sea level change: determination and interpretation. *Reviews of Geophysics*, 33(S2):1425–1432.
- Douglas, B. C. (2001). An introduction to sea level. *Sea level rise: history and consequences*, pages 1–10.
- Dunbar, B. (2013). Grace launch.
- Eineder, M. and Bamler, R. (2019). Module 2201: Sar interferometry basics. In *SAR-EDU – SAR Remote Sensing Educational Initiative*, Germany.
- Elachi, C., Bicknell, T., Jordan, R. L., and Wu, C. (1982). Spaceborne synthetic-aperture imaging radars: Applications, techniques, and technology. *Proceedings of the IEEE*, 70(10):1174–1209.
- European Space Agency (2019a). Copernicus open access hub.
- European Space Agency (2019b). Rss cloudtoolbox service.
- European Space Agency (2019c). Sentinel-1.
- Farrell, W. (1972). Deformation of the earth by surface loads. *Reviews of Geophysics*, 10(3):761–797.
- Feng, G., Jin, S., and Zhang, T. (2013). Coastal sea level changes in europe from gps, tide gauge, satellite altimetry and grace, 1993–2011. *Advances in Space Research*, 51(6):1019–1028.
- Fenoglio-Marc, L., Dietz, C., and Groten, E. (2004). Vertical land motion in the mediterranean sea from altimetry and tide gauge stations. *Marine Geodesy*, 27(3-4):683–701.
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., and Massonet, D. (2007). Insar principles-guidelines for sar interferometry processing and interpretation, tm-19. *The Netherlands: ESA Publications*.
- Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in sar interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1):8–20.
- Garcia, D., Vigo, I., Chao, B., and Martinez, M. (2007). Vertical crustal motion along the mediterranean and black sea coast derived from ocean altimetry and tide gauge data. *Pure and Applied Geophysics*, 164(4):851–863.
- Goldstein, R. M. and Werner, C. L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical research letters*, 25(21):4035–4038.
- Han, G. (2016). *Twenty-first century mean sea level rise scenarios for Canada*. Fisheries and Oceans Canada= Pêches et océans Canada.

- Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*, volume 2. Springer Science & Business Media.
- Hastaoglu, K. O. (2016). Comparing the results of psinsar and gnss on slow motion landslides, koyulhisar, turkey. *Geomatics, natural hazards and risk*, 7(2):786–803.
- Henderson, F. M. and Lewis, A. J. (1998). Principles and applications of imaging radar. manual of remote sensing: Volume 2.
- Hooper (2006). *Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation*. PhD thesis, Stanford University.
- Hooper (2015). Stamps persistent scatterer exercise.
- Hooper, Bekaert, D., and Spaans, K. (2010). StaMPS/MTI manual. *Delft Institute of Earth Observation and Space Systems Delft University of Technology, Kluyverweg*, 1:2629.
- Hooper, Segall, P., and Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to volcán alcedo, galápagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7).
- Hooper, Zebker, H., Segall, P., and Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using insar persistent scatterers. *Geophysical research letters*, 31(23).
- Houghton, J. T., Meiro Filho, L., Callander, B. A., Harris, N., Kattenburg, A., and Maskell, K. (1996). Climate change 1995: the science of climate change. *Climatic Change*, page 584.
- Höser, T. (2018). Analysing the capabilities and limitations of InSAR using Sentinel-1 data for landslide detection and monitoring. Master’s thesis, Department of Geography, Bonn University, Bonn.
- Intergovernmental Oceanographic Commission (1985). Manual on sea level measurement and interpretation. volume i-basic procedures.
- James, T. S., Henton, J. A., Leonard, L. J., Darlington, A., Forbes, D. L., and Craymer, M. (2014). Relative sea level projections in canada and the adjacent mainland united states. Report.
- Kampes, B. (2005). *Displacement parameter estimation using permanent scatterer interferometry*. PhD thesis, Dutch: Delft University of Technology.
- Klos, A., Kusche, J., Fenoglio-Marc, L., Bos, M. S., and Bogusz, J. (2019). Introducing a vertical land motion model for improving estimates of sea level rates derived from tide gauge records affected by earthquakes. *GPS Solutions*, 23(4):102.
- Levy, R. (2004). Gravity recovery and climate experiment.

- Li, Z. and Bethel, J. (2008). Image coregistration in sar interferometry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37:433–438.
- Long, T., Hu, C., Ding, Z., Dong, X., Tian, W., and Zeng, T. (2018). *Geosynchronous SAR: System and Signal Processing*. Springer.
- Maghsoudi, Y. and Mahdavi, S. (2016). *the principles of Radar Remote Sensing*. Khajeh Nasir University, Tehran.
- McGranahan, G., Balk, D., and Anderson, B. (2007). The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment urbanization*, 19(1):17–37.
- Mei, S., Poncos, V., and Froese, C. (2008). Mapping millimetre-scale ground deformation over the underground coal mines in the frank slide area, alberta, canada, using space-borne insar technology. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34(2):113–134.
- Mertz, F., Pujol, M. I., and Faugère, Y. (2018). Product user manual for sea level SLA products.
- Ministère de l’Environnement du Québec (2014). Rapport sur l’état de l’eau et des écosystèmes aquatiques au québec.
- Montillet, J.-P., Melbourne, T., and Szeliga, W. (2018). Gps vertical land motion corrections to sea-level rise estimates in the pacific northwest. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(2):1196–1212.
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., and Papathanassiou, K. P. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, 1(1):6–43.
- Morneau, F. (2012). Enjeux environnementaux associés aux incidences appréhendées des changements climatiques sur le littoral en milieu marin.
- Nerem and Mitchum, G. (2002). Estimates of vertical crustal motion derived from differences of topex/poseidon and tide gauge sea level measurements. *Geophysical Research Letters*, 29(19).
- Nicholls, R. J. (2010). *Impacts of and responses to sea-level rise*, pages 17–51. Wiley-Blackwell Ltd.
- Nicholls, R. J. and Leatherman, S. P. (1995). Global sea-level rise. *As Climate Changes: International Impacts and Implication*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, pages 92–123.

- Oppenheimer, M., Glavovic, B., Hinkel, J., van de Wal, R., Magnan, A., Abd-Elgawad, Cai, A., Cifuentes-Jara, M., DeConto, R., Ghosh, T., Hay, J., Isla, F., Marzeion, B., Meyssignac, B., and Sebesvari, Z. (2019). *Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities*, book section 4, pages 321–445. press.
- Parker (2007). Tidal analysis and prediction, NOAA special publication NOS CO-OPS3. silver spring, maryland. In *Library of Congress Control*, number 2007925298.
- PSMSL (2016). Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) Annual report 2016. [https://www.psmsl.org/about\\_us/annual\\_reports/](https://www.psmsl.org/about_us/annual_reports/).
- PSMSL (2019). Permanent Service for Mean Sea Level.
- Pugh, D. and Woodworth, P. (2014). *Sea-level science: understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes*. Cambridge University Press.
- Ray, R., Beckley, B., and Lemoine, F. (2010). Vertical crustal motion derived from satellite altimetry and tide gauges, and comparisons with doris measurements. *Advances in Space Research*, 45(12):1510–1522.
- Richards, J. A. (2009). *Remote sensing with imaging radar*, volume 1. Springer.
- Sadeghi, Z., Zoej, M. J. V., and Muller, J.-P. (2017). Combination of persistent scatterer interferometry and single-baseline polarimetric coherence optimisation to estimate deformation rates with application to tehran basin. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 85(5):327–340.
- Santamaría-Gómez, A., Gravelle, M., Dangendorf, S., Marcos, M., Spada, G., and Wöppelmann, G. (2017). Uncertainty of the 20th century sea-level rise due to vertical land motion errors. *Earth and Planetary Science Letters*, 473:24–32.
- Savard, J.-P., van Proosdij, D., and O’Carroll, S. (2016). *Perspectives on Canada’s East Coast region*, pages 99–152. Government of Canada, Ottawa, ON.
- Shaw, J., Amos, C. L., Greenberg, D. A., O’Reilly, C. T., Parrott, D. R., and Patton, E. (2010). Catastrophic tidal expansion in the bay of fundy, canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 47(8):1079–1091.
- SONEL (2019). Système d’observation du niveau des eaux littorales.
- SOPAC (2019). Scripps orbit and permanent array center.
- Torres, K. d. S. and Winter, O. C. (2018). The when and where of water in the history of the universe. *arXiv preprint arXiv:1803.01452*.
- Touzi, R., Lopes, A., Bruniquel, J., and Vachon, P. W. (1999). Coherence estimation for sar imagery. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 37(1):135–149.
- TRE ALTAMIRA - A CLS Group Company (2020). Insar at a glance.

- University of Brunswick (2002). *LSSA.in File description*. Geodesy and Geomatics Engineering, University of Brunswick, Canada.
- Vaniček, P. (1971). Further development and properties of the spectral analysis by least-squares. *Astrophysics and Space Science*, 12(1):10–33.
- Vermeer, M. and Rahmstorf, S. (2009). Global sea level linked to global temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(51):21527–21532.
- Wahr, J., Molenaar, M., and Bryan, F. (1998). Time variability of the earth’s gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using grace. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B12):30205–30229.
- Wells, D. E., Vaniček, P., and Pagiatakis, S. D. (1985). *Least squares spectral analysis revisited*. Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick Fredericton, Canada.
- Woodworth, P., Church, J., Aarup, T., and Wilson, S. (2010). *Introduction*, pages 1–16. Wiley-Blackwell Ltd.
- Wöppelmann, G. and Marcos, M. (2012). Coastal sea level rise in southern europe and the nonclimate contribution of vertical land motion. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C1).
- Wöppelmann, G. and Marcos, M. (2016). Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. *Reviews of Geophysics*, 54(1):64–92.
- Wöppelmann, G., Miguez, B. M., Bouin, M.-N., and Altamimi, Z. (2007). Geocentric sea-level trend estimates from gps analyses at relevant tide gauges world-wide. *Global and Planetary Change*, 57(3-4):396–406.
- Wöppelmann, G., Testut, L., and Créach, R. (2011). La montée du niveau des océans par marégraphie et géodésie spatiale: contributions françaises à une problématique mondiale. *Annales Hydrographiques 6ème Série*, 8(777):11–14.
- Wöppelmann, G. (2020). Littoral environnement et sociétés (liens) - umr 7266.
- Xu, G., Gao, Y., Li, J., and Xing, M. (2020). A review on insar phase denoising. *arXiv preprint arXiv:2001.00769*.
- Yu, H., Lan, Y., Yuan, Z., Xu, J., and Lee, H. (2019). Phase unwrapping in insar: A review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 7(1):40–58.
- Zebker, H. A., Rosen, P. A., and Hensley, S. (1997). Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of geophysical research: solid earth*, 102(B4):7547–7563.

Zulkifli, N. A., Din, A. H. M., and Som, Z. A. M. (2018). Vertical land motion quantification using space-based geodetic methods: a review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, volume 169, page 012024. IOP Publishing.

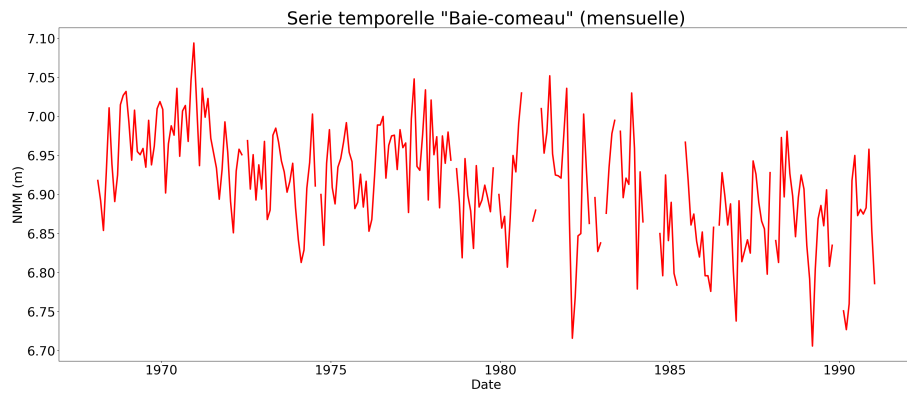
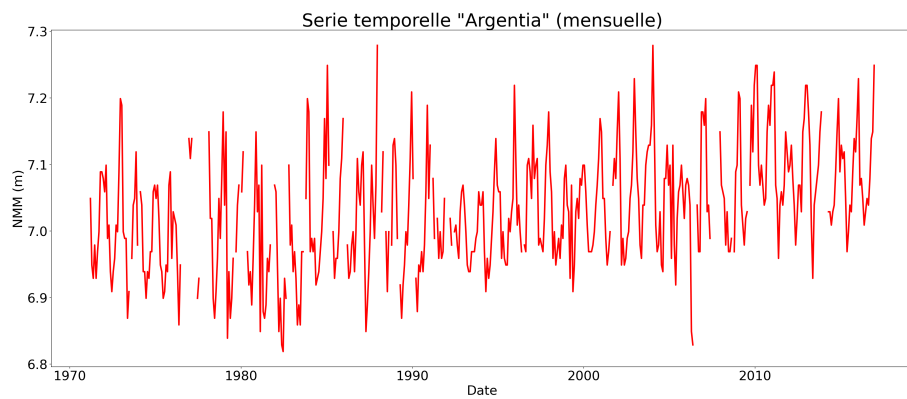


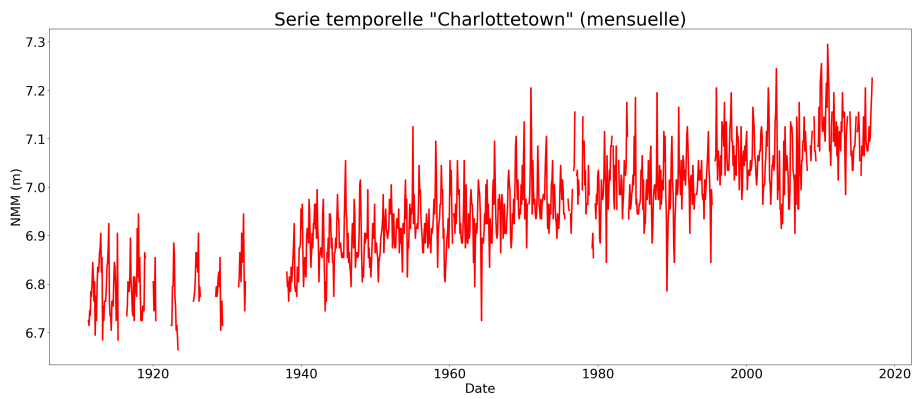
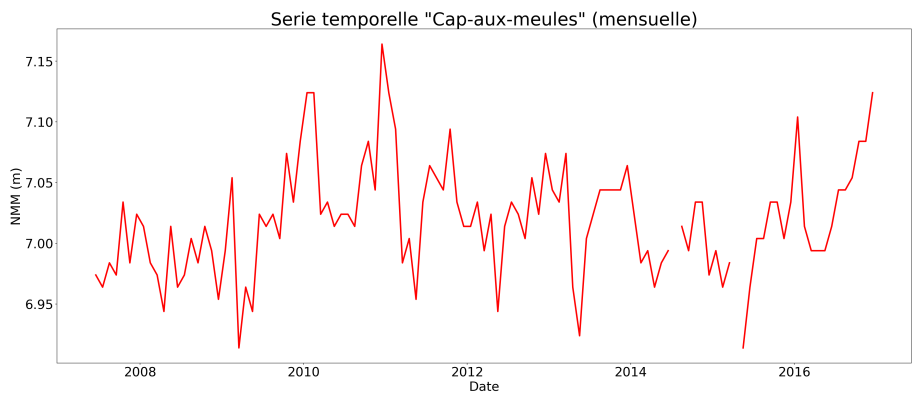
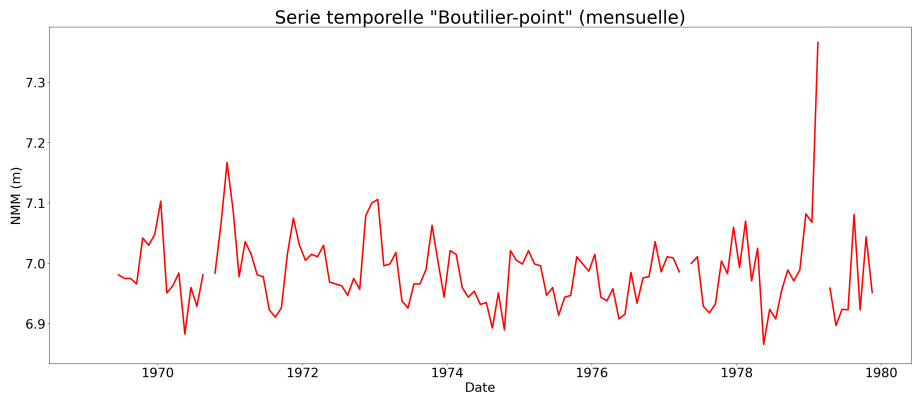
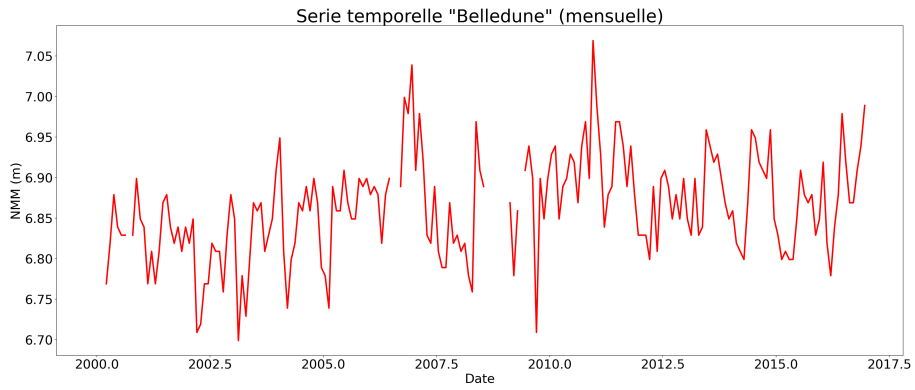
# Annexe A

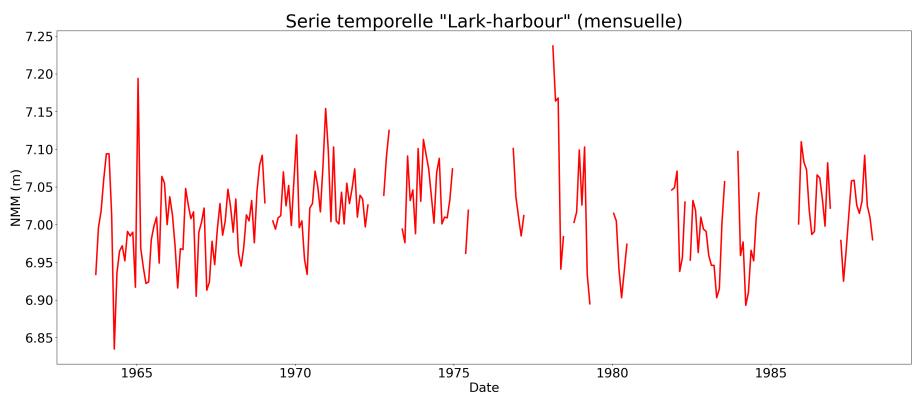
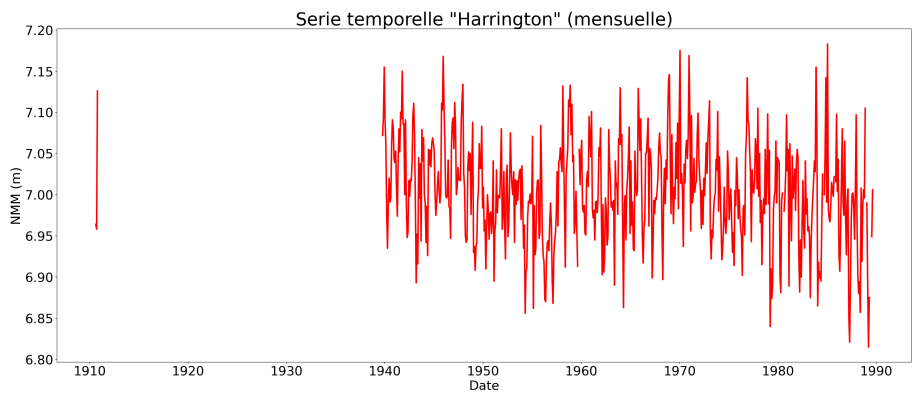
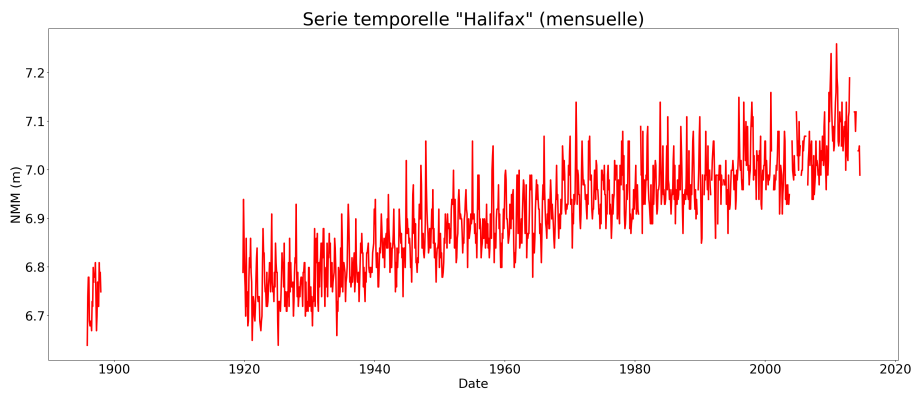
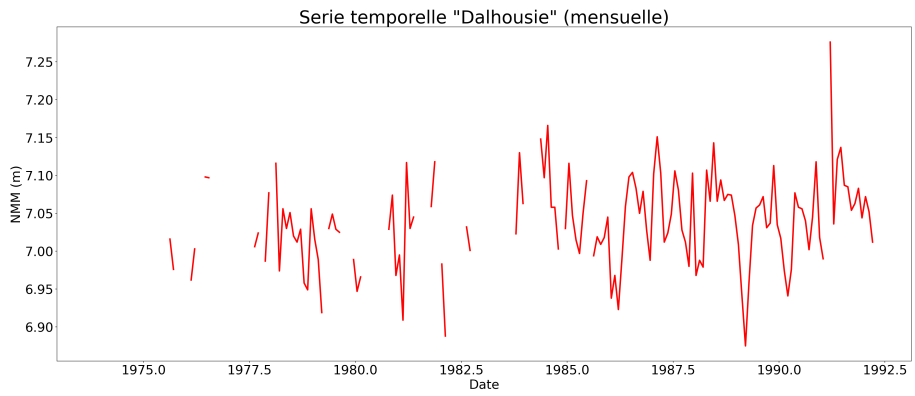
---

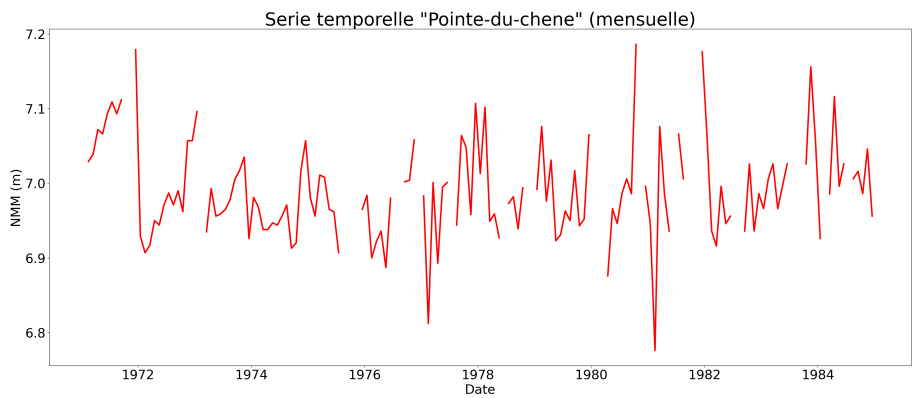
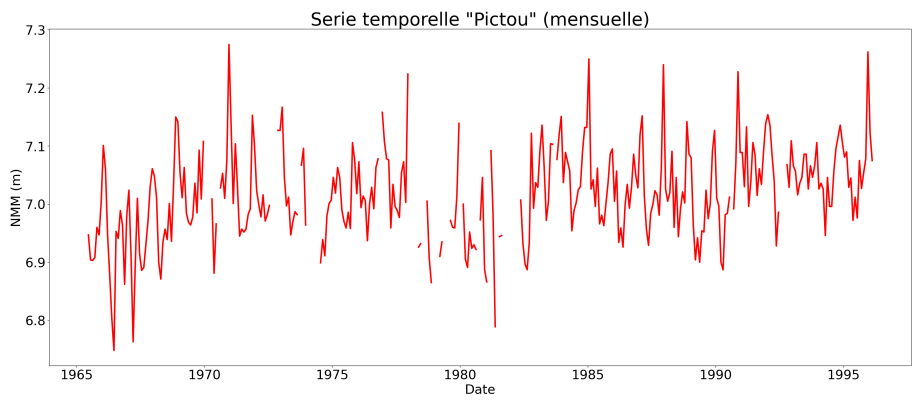
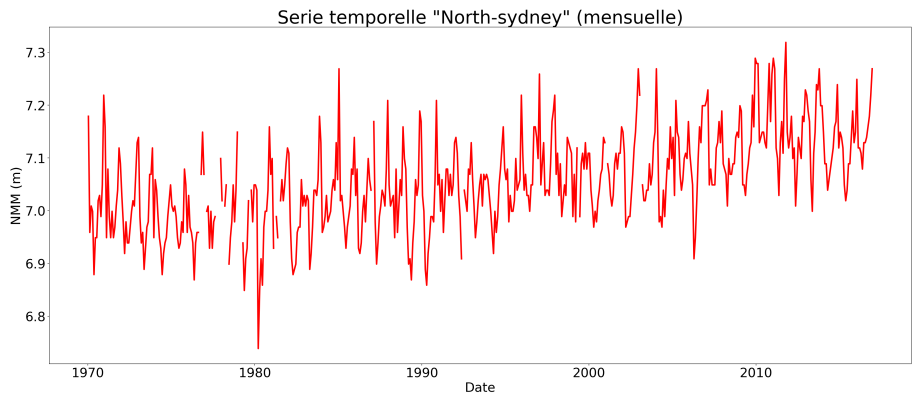
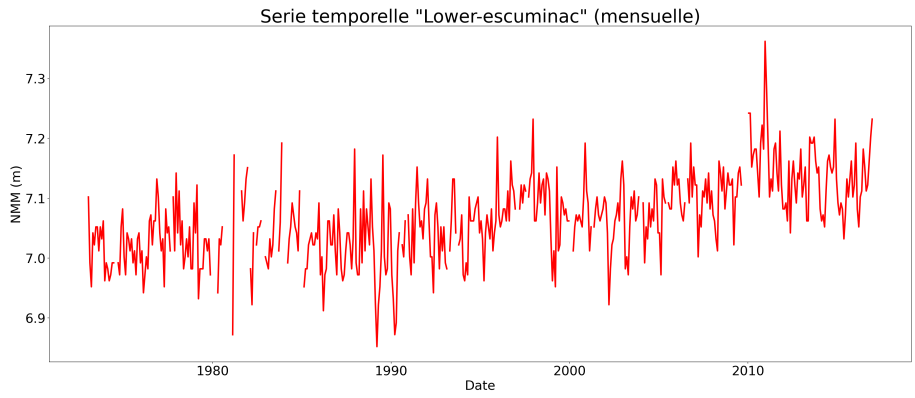
## Séries temporelles de données marégraphiques

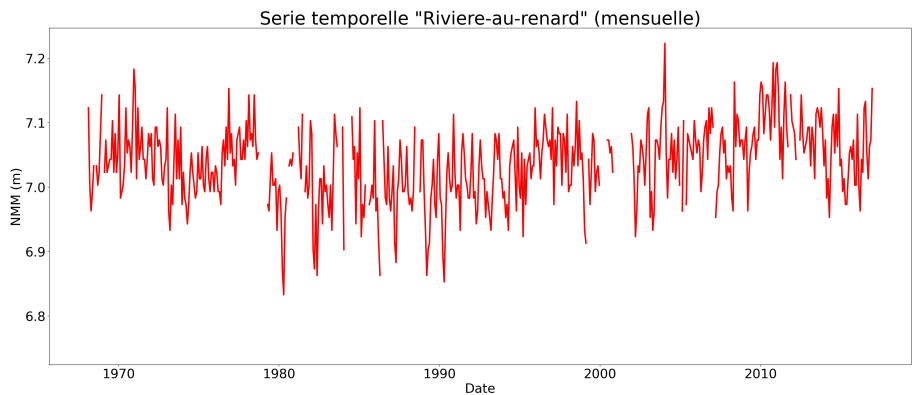
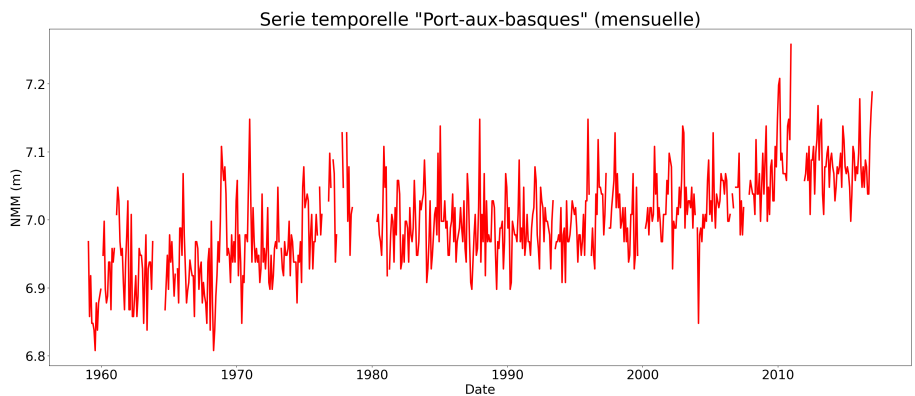
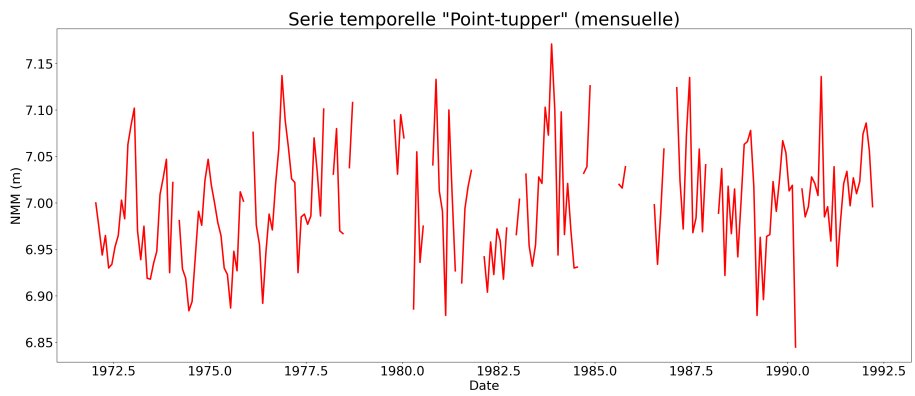
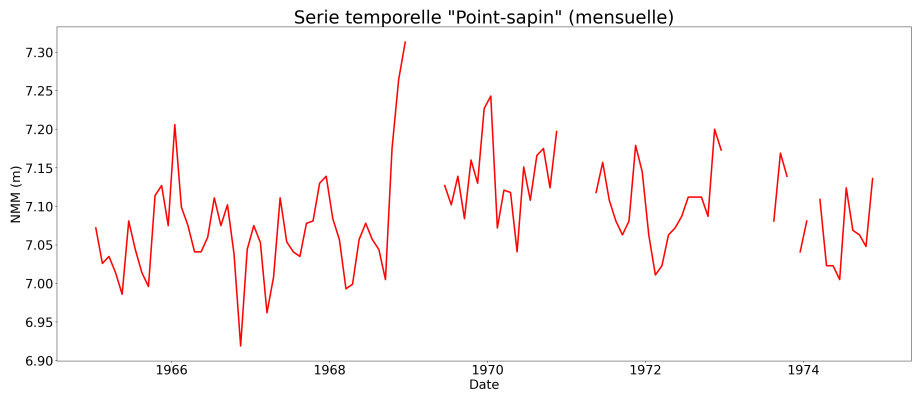
### A.1. Séries temporelles originales

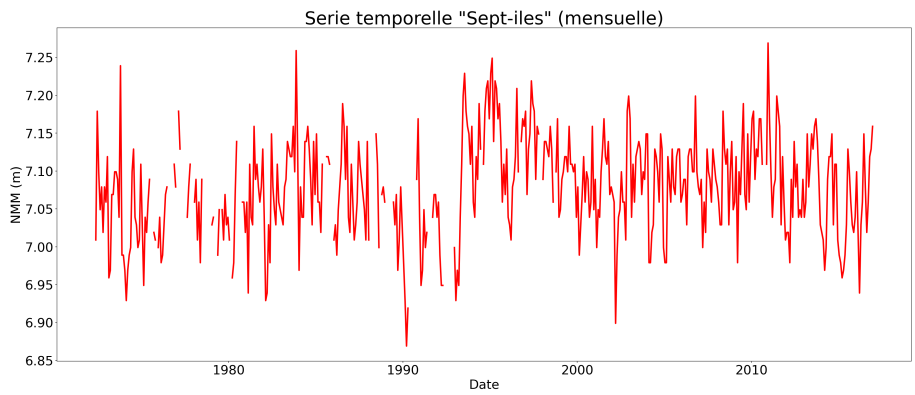
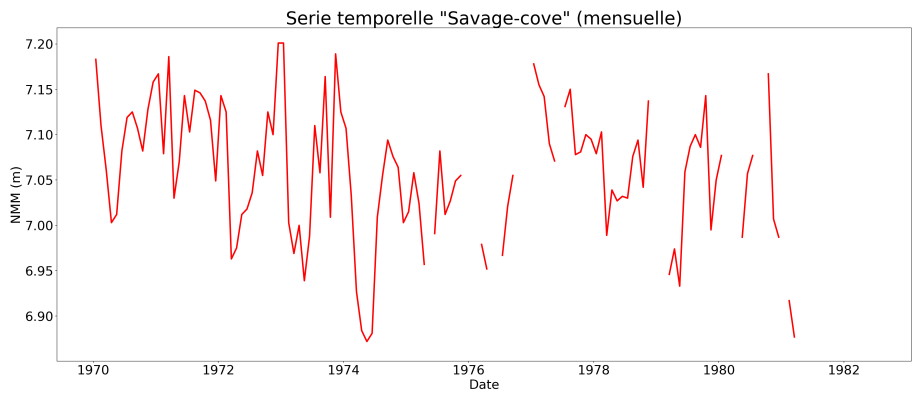
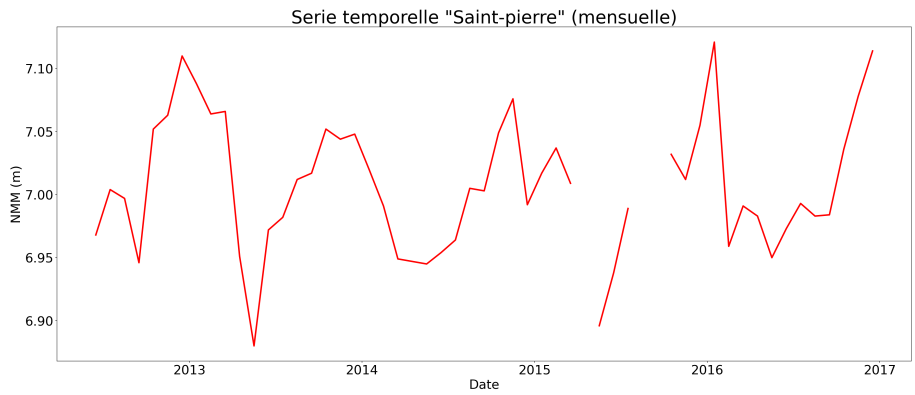
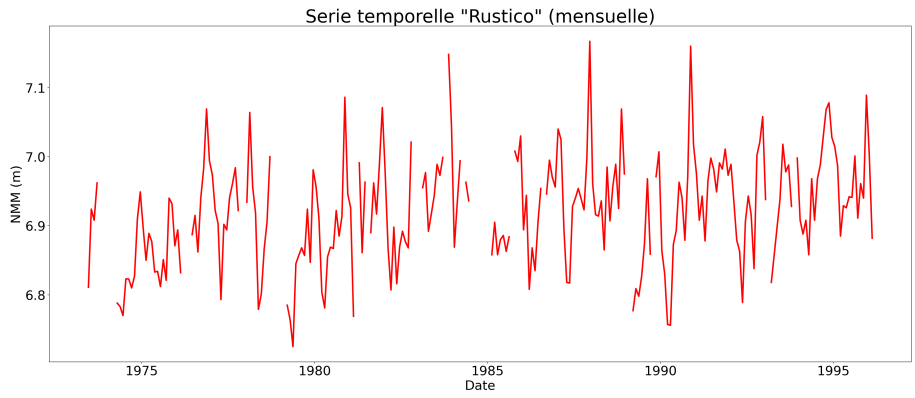


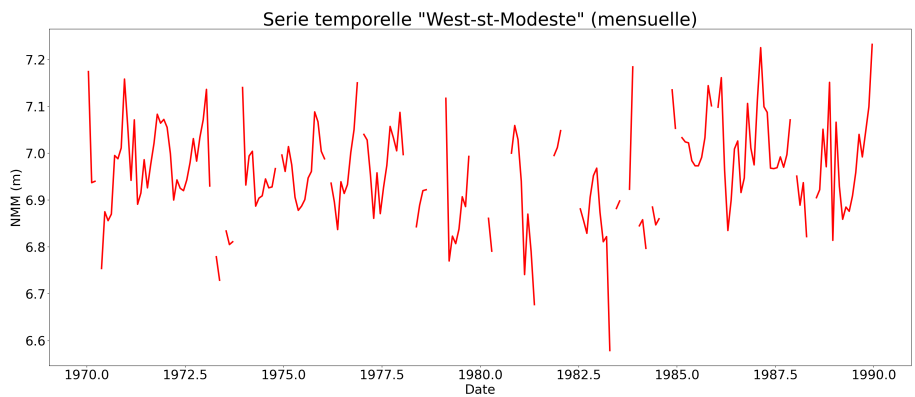
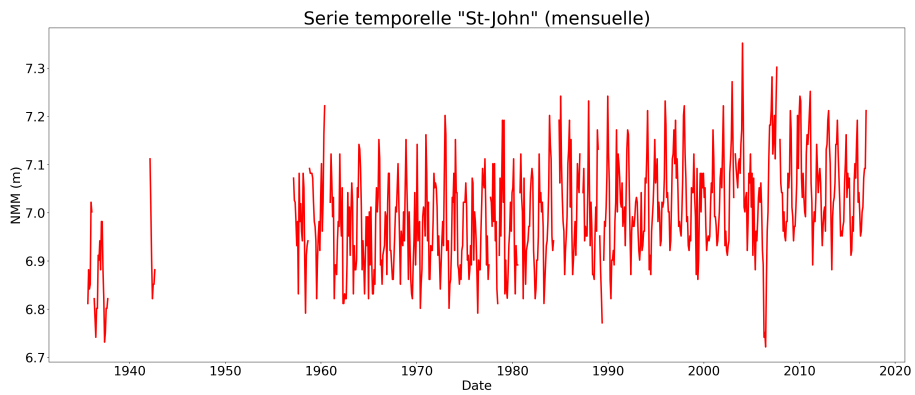
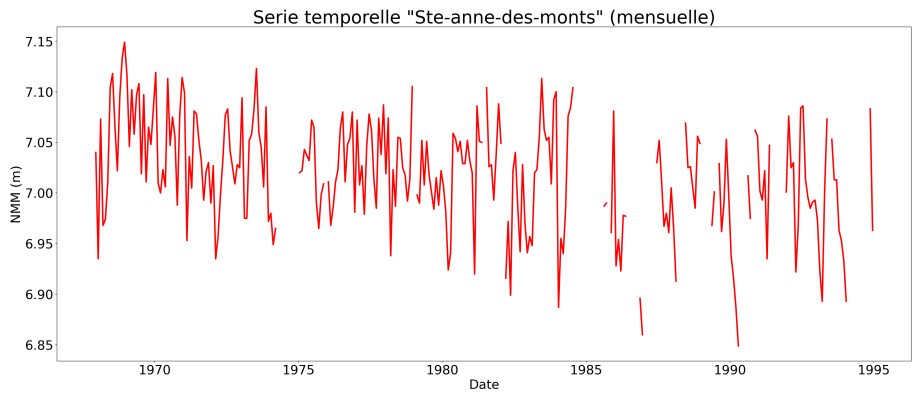
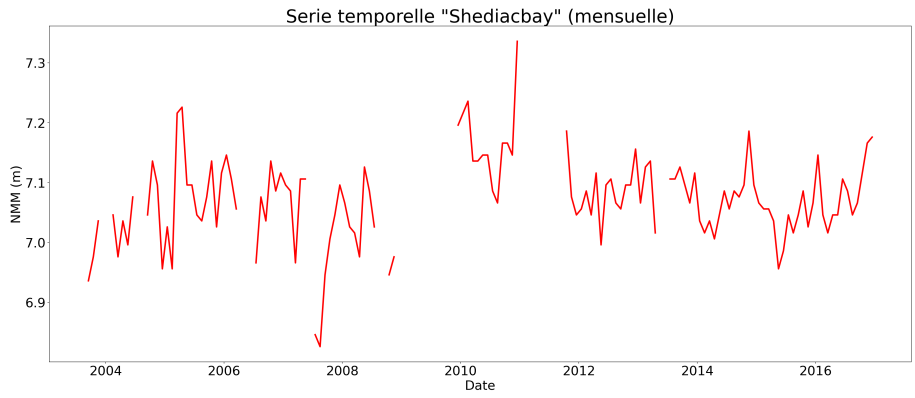




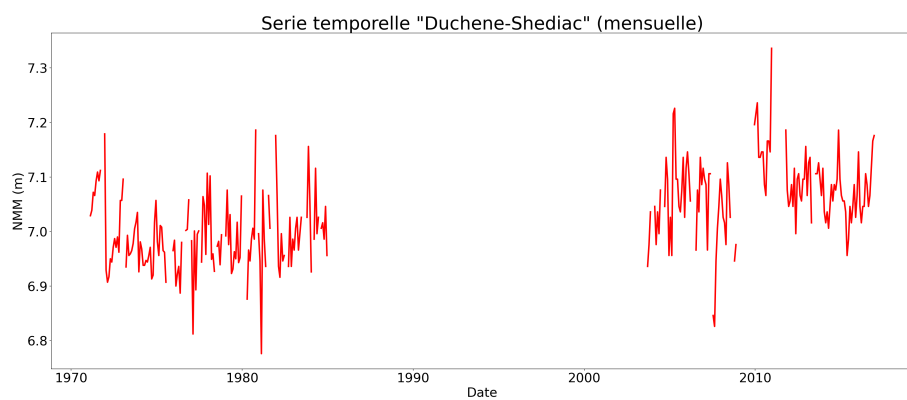
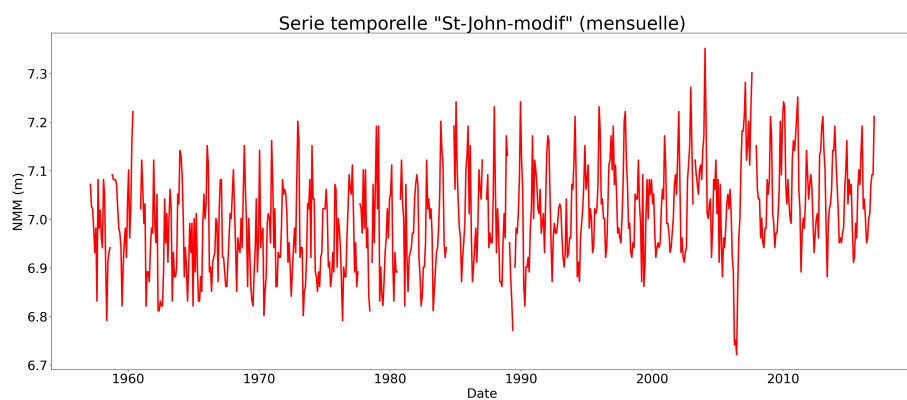
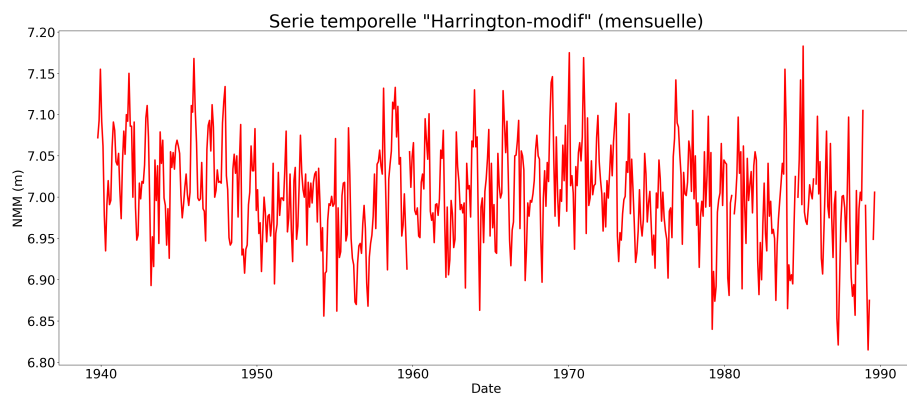
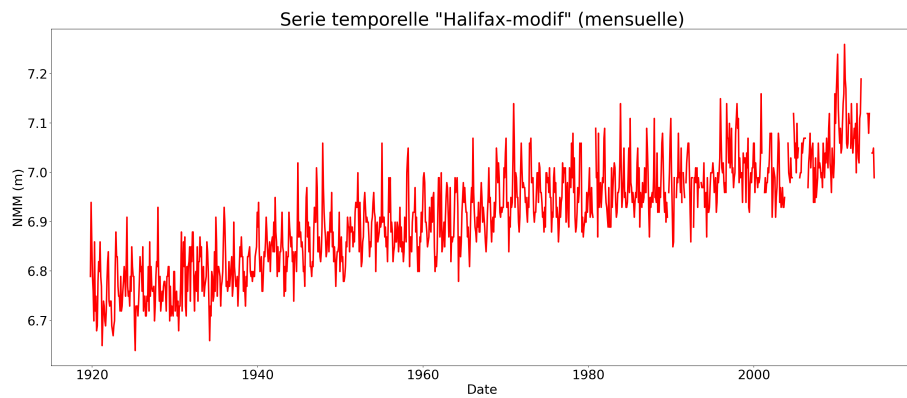








## A.2. Séries temporelles modifiées

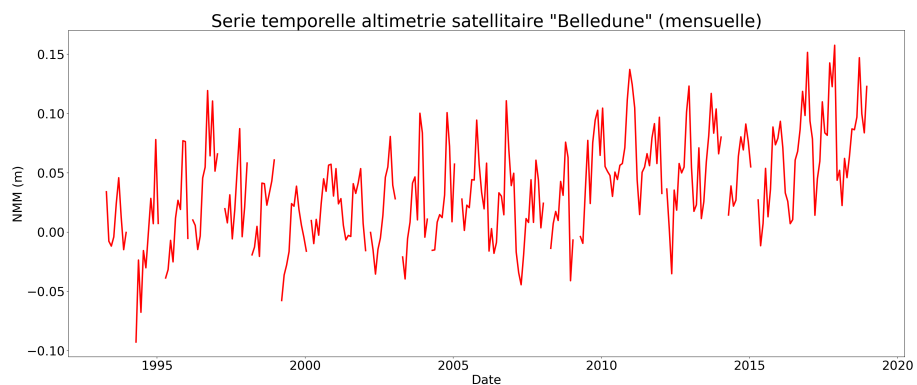
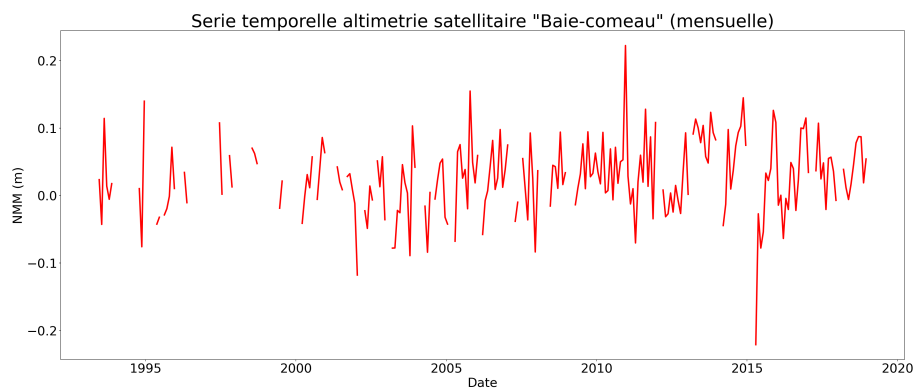
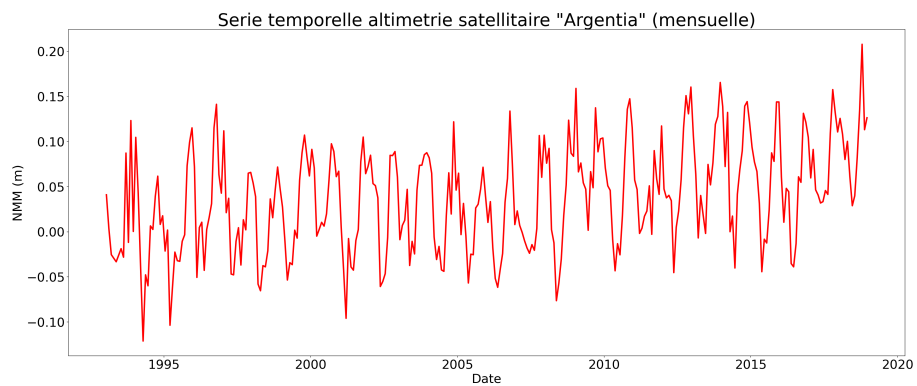


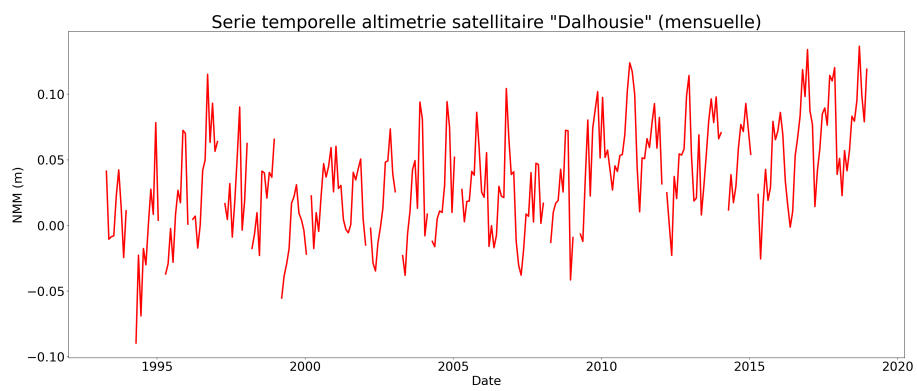
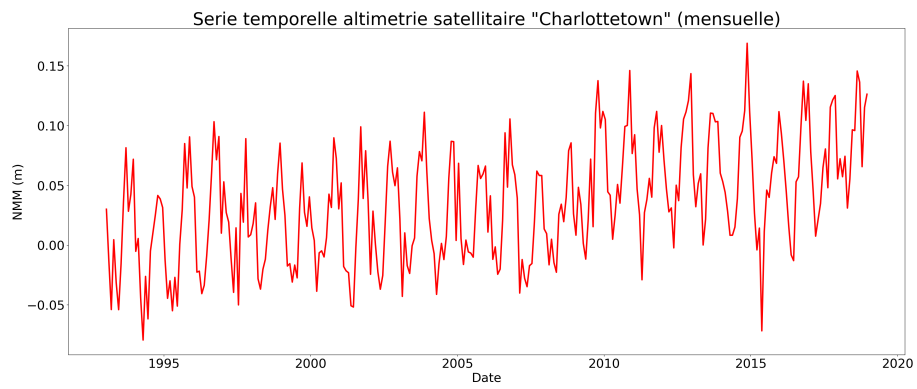
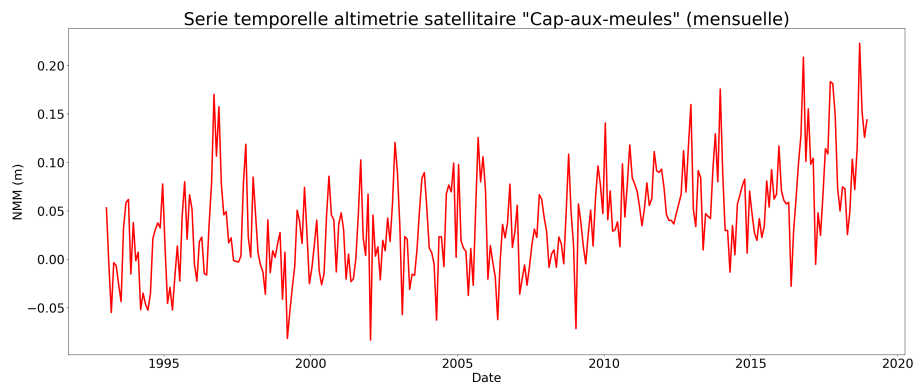
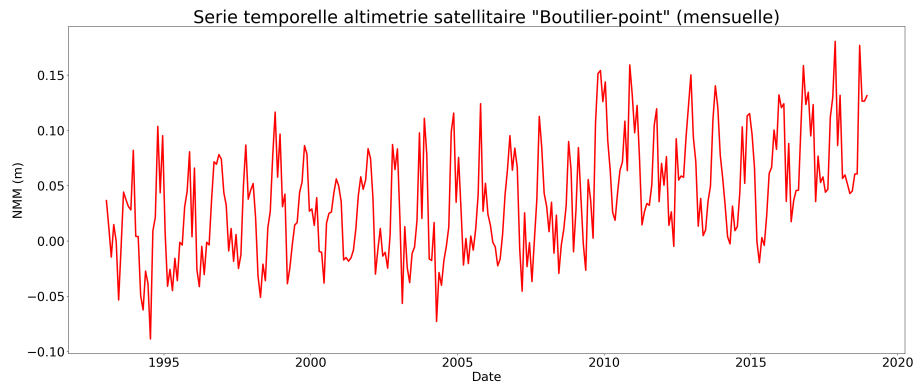


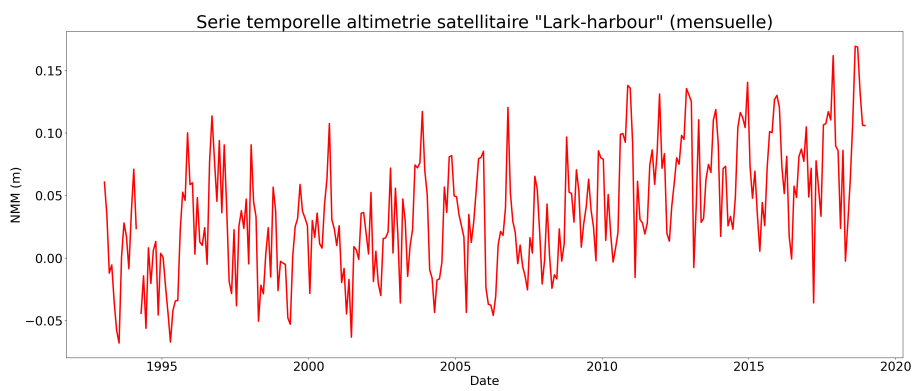
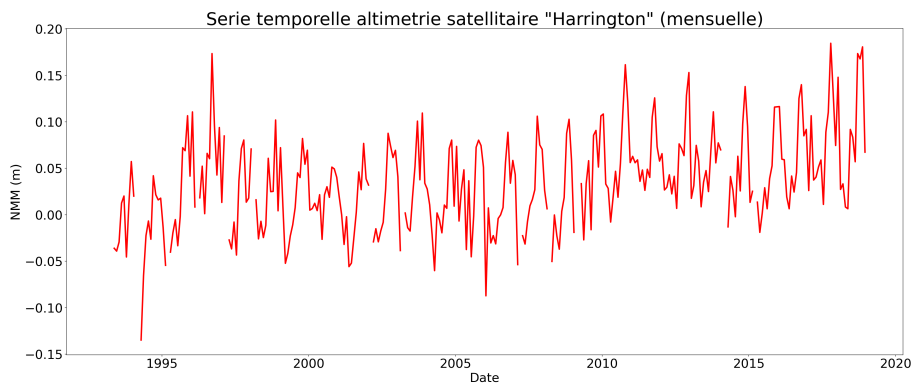
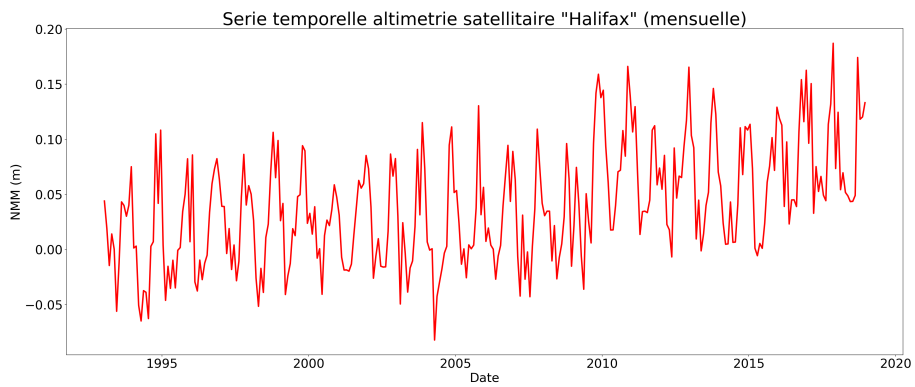
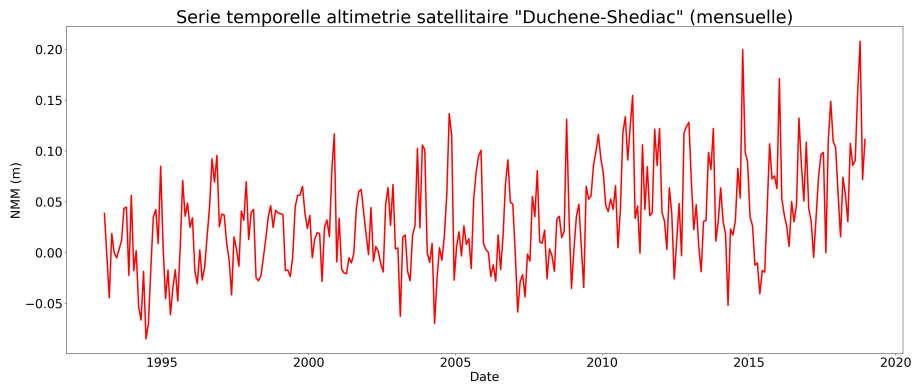
# Annexe B

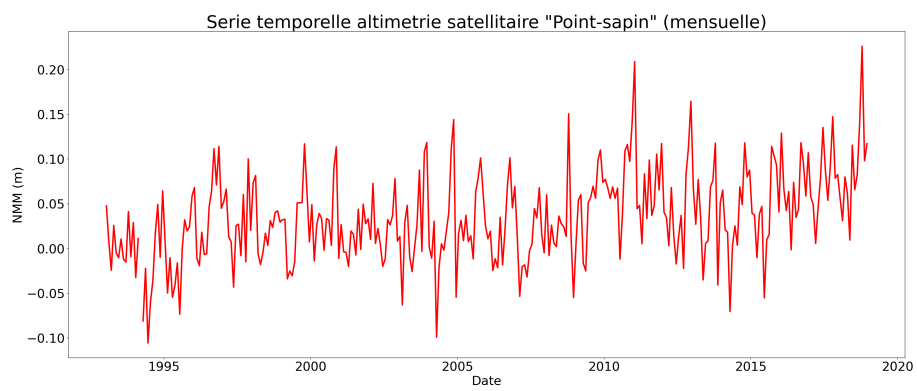
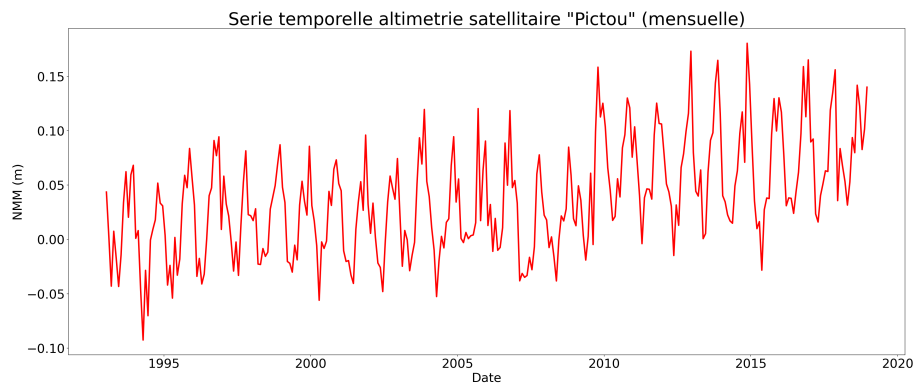
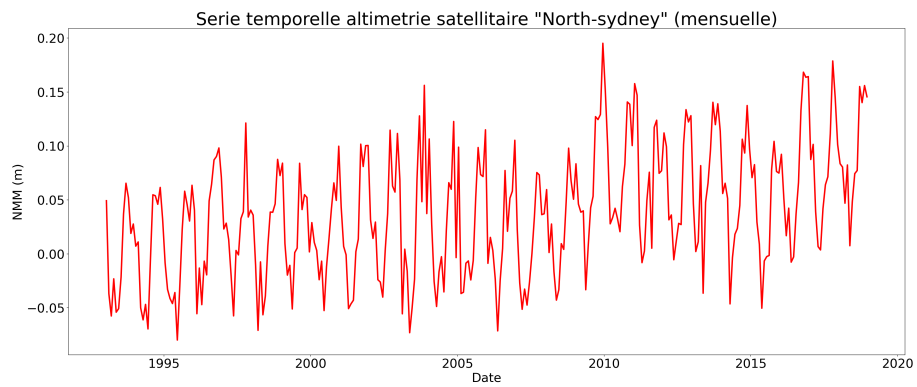
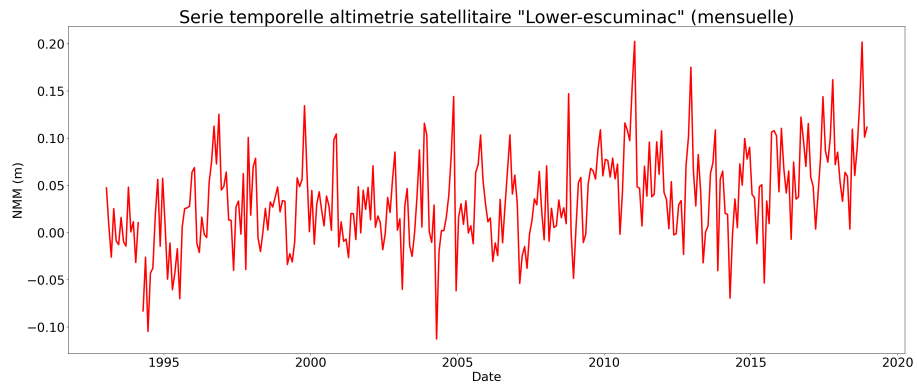
---

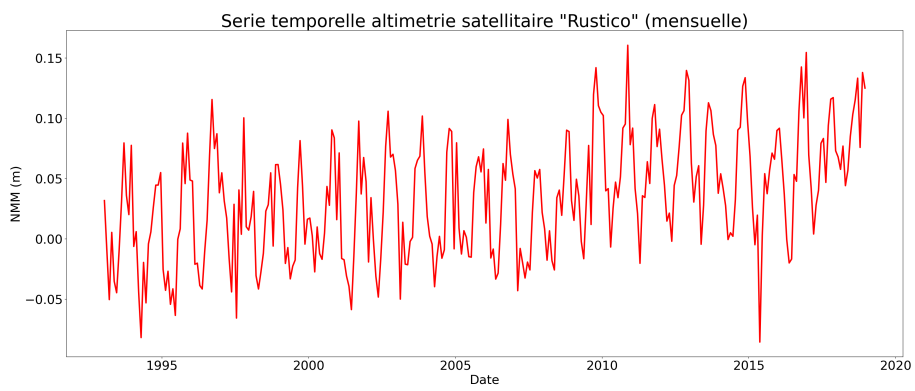
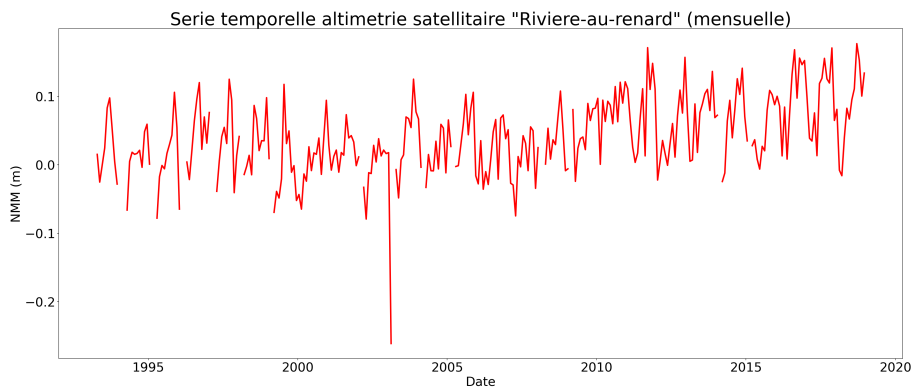
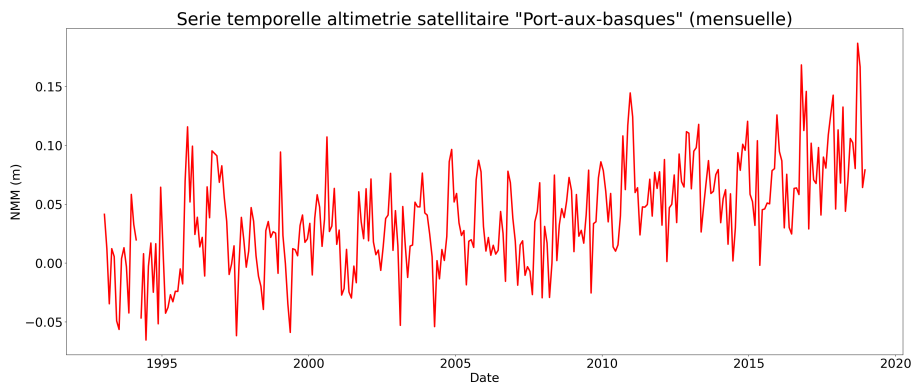
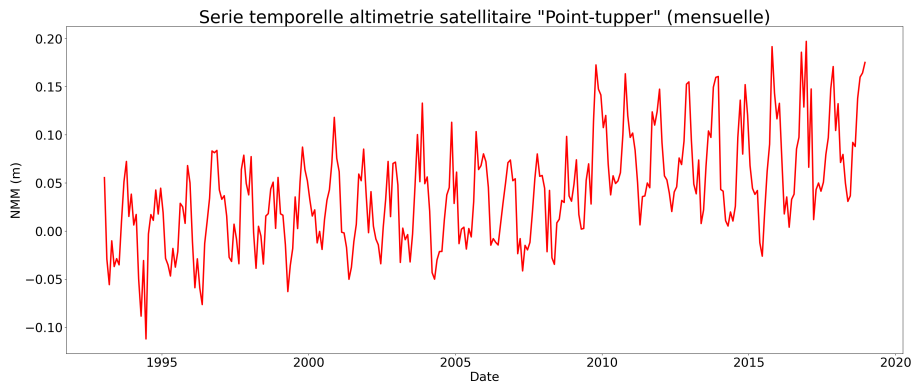
## Séries temporelles de données altimétriques satellitaires

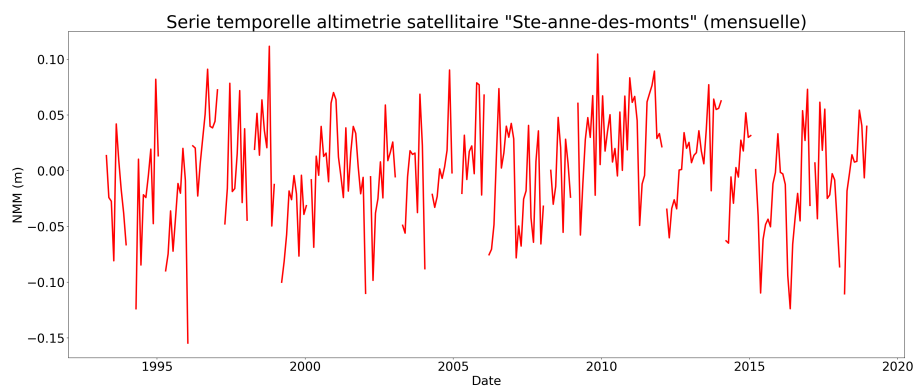
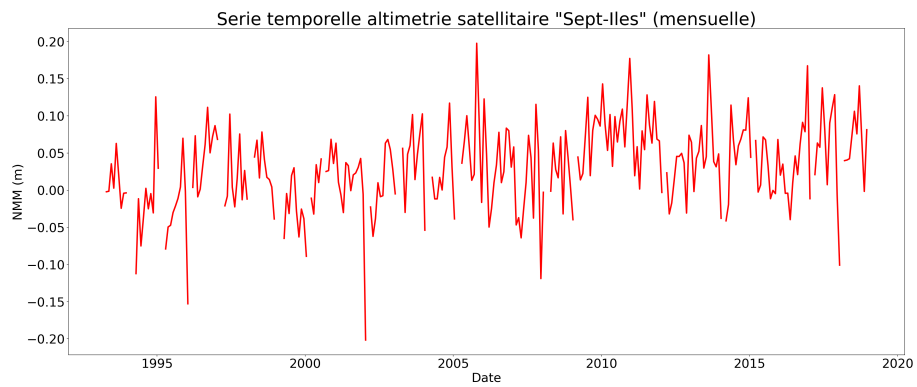
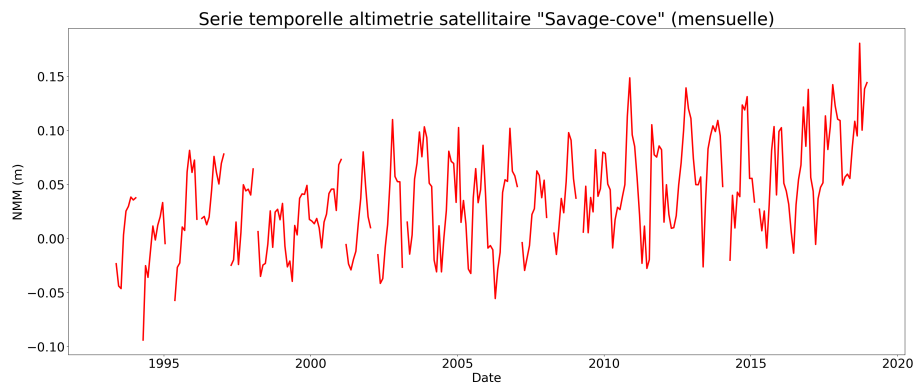
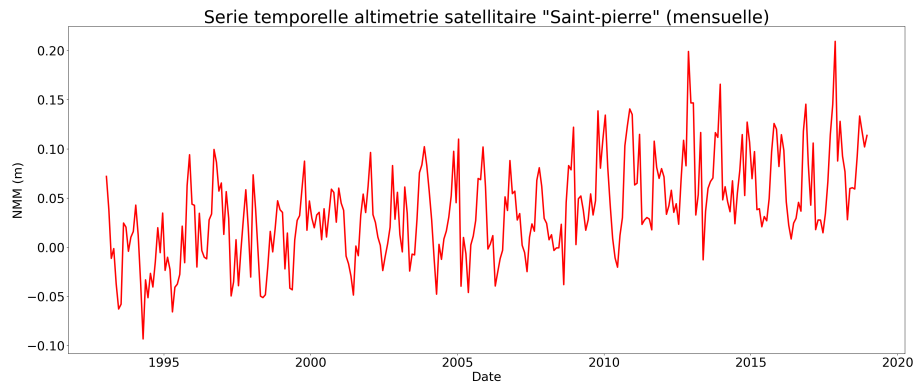


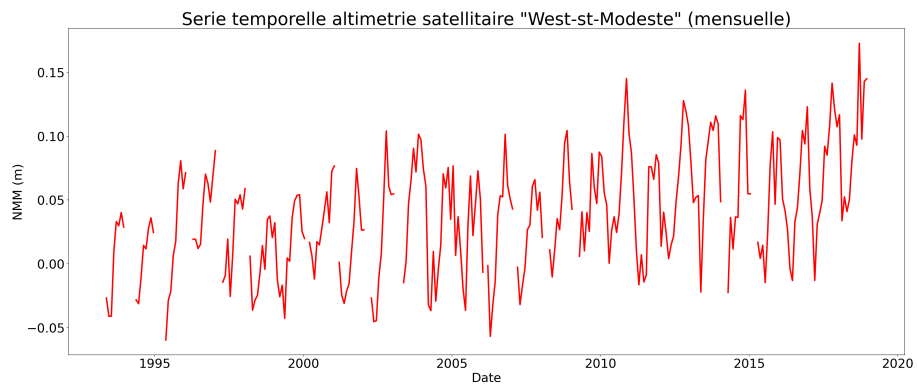
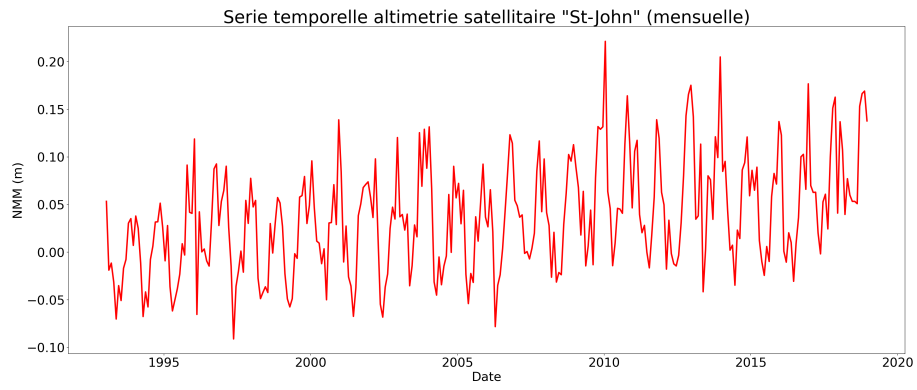












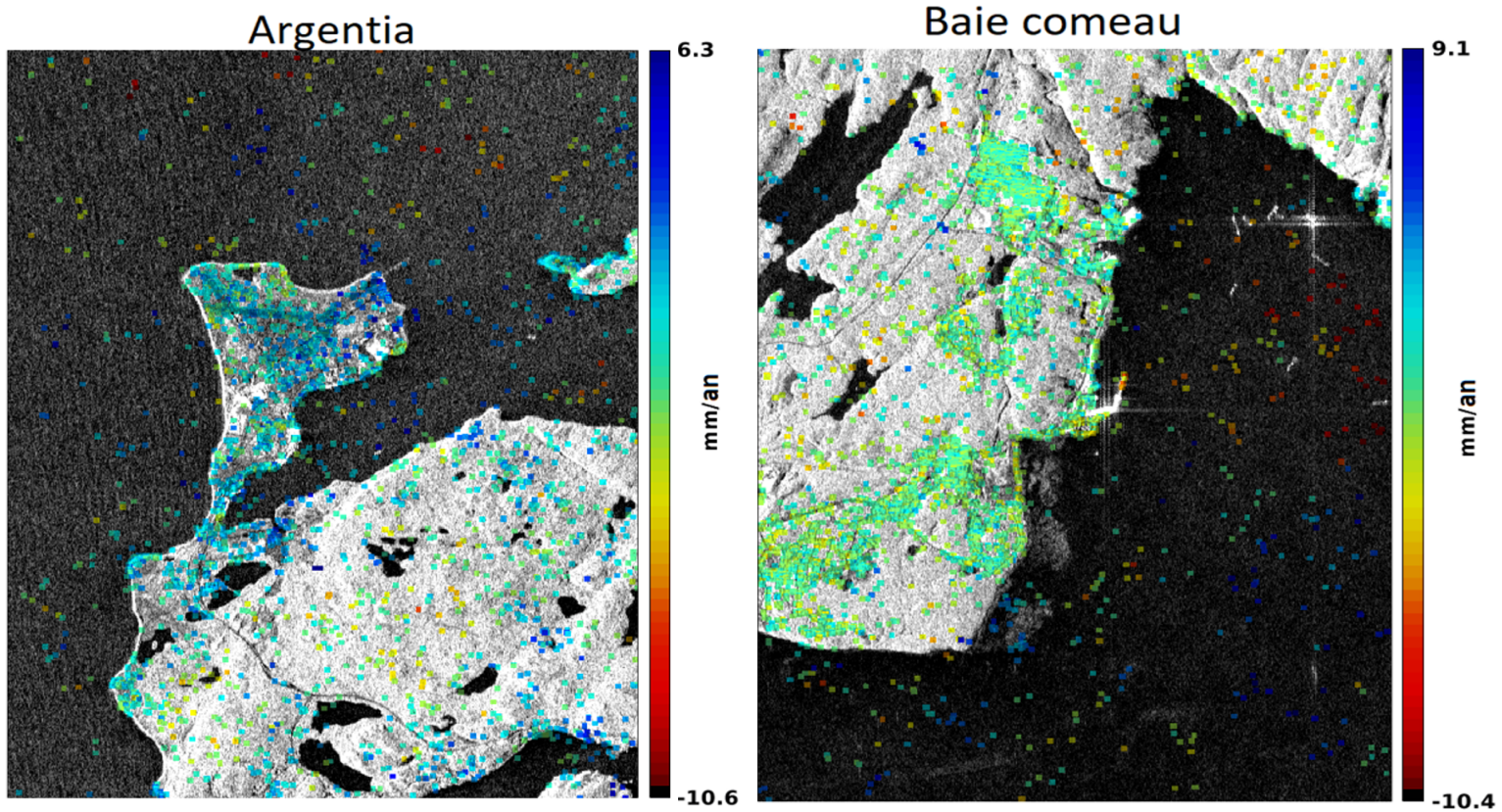




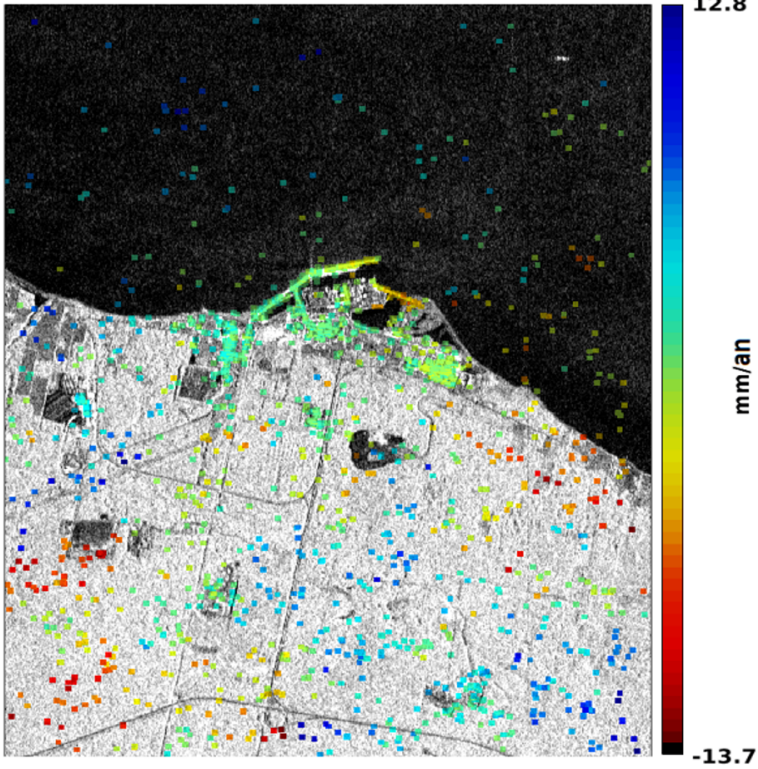
# Annexe C

---

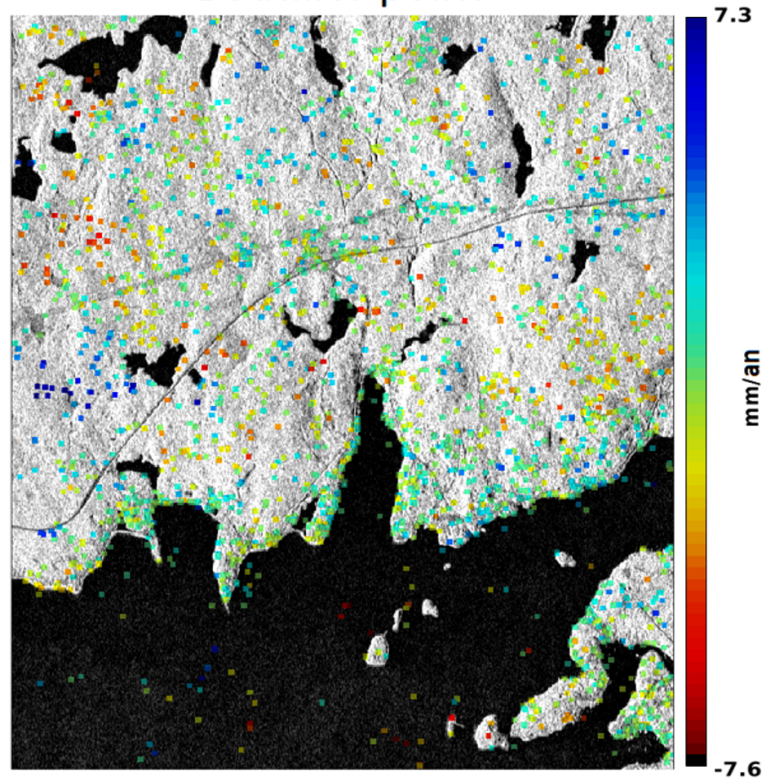
## Vitesse verticale moyenne calculée par le progiciel StaMPS



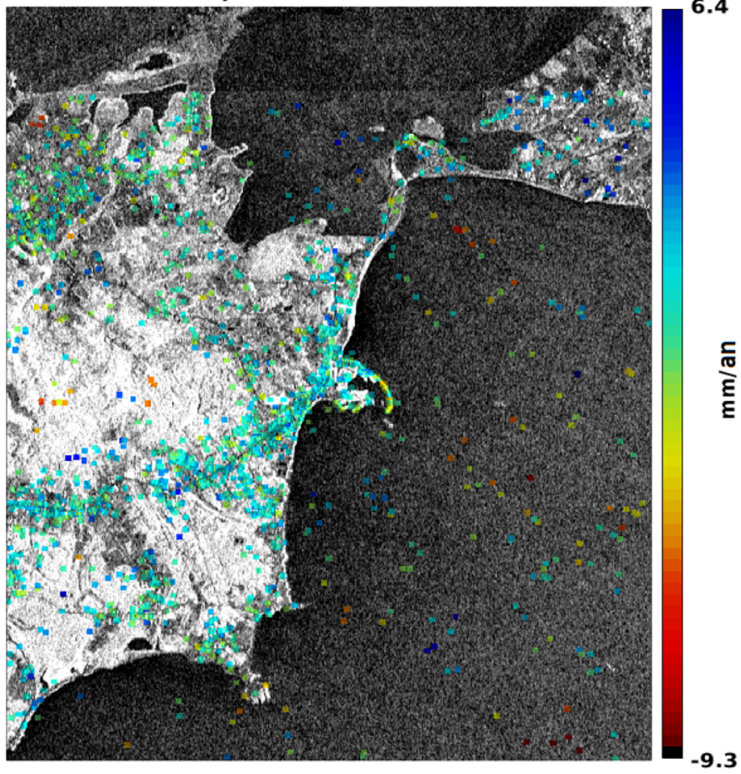
Belledune



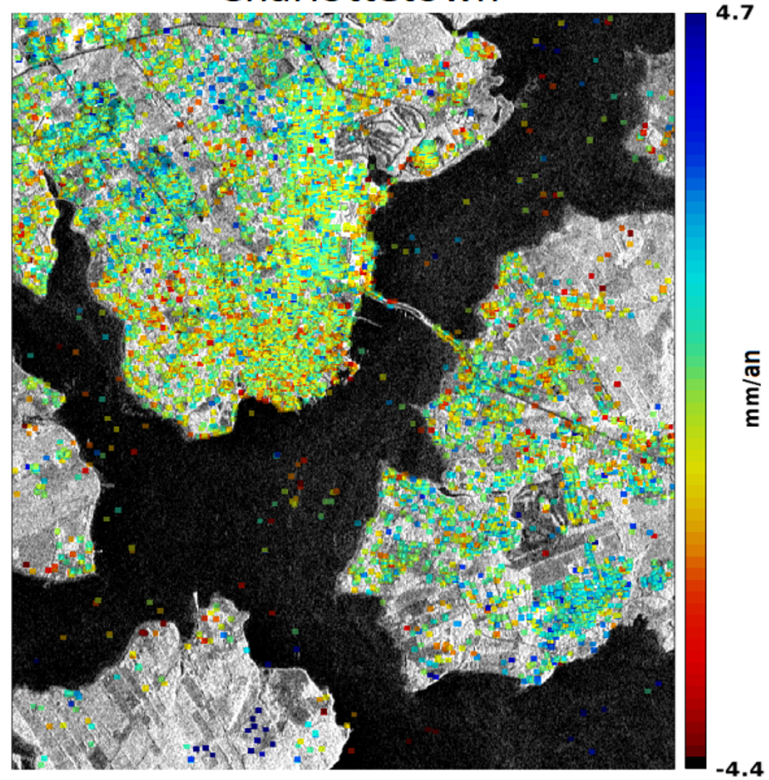
Boutilier point



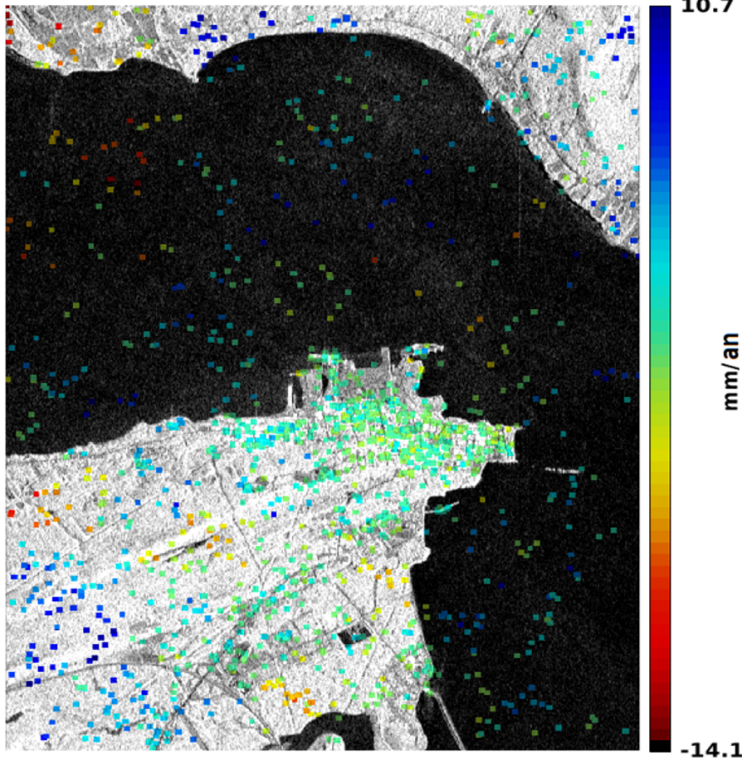
Cap aux meules



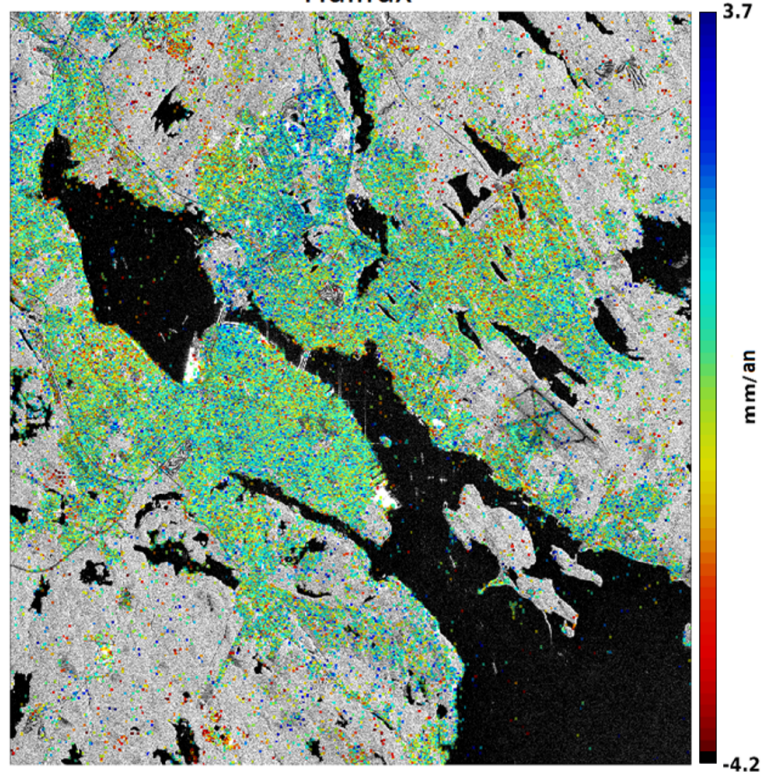
Charlottetown



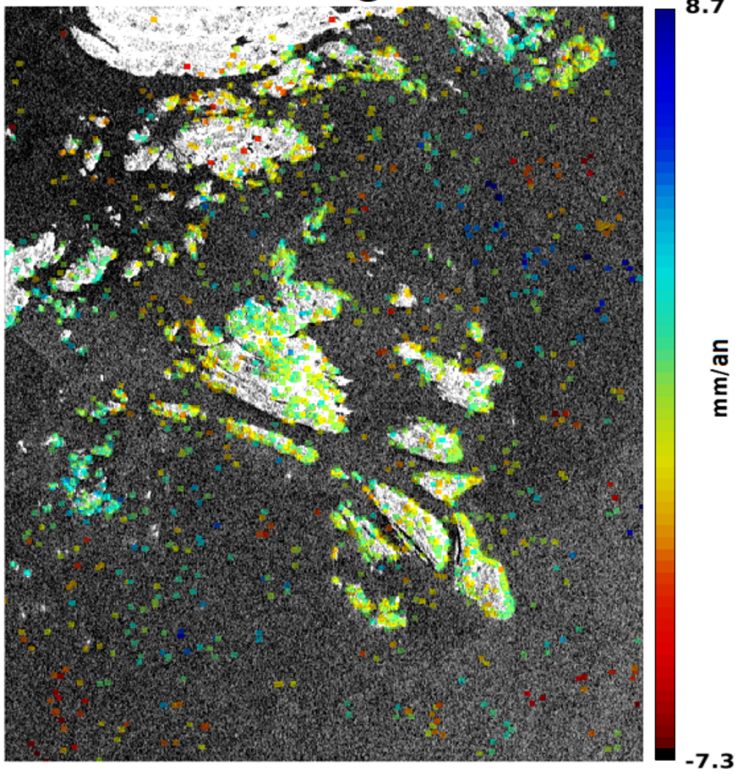
Dalhousie



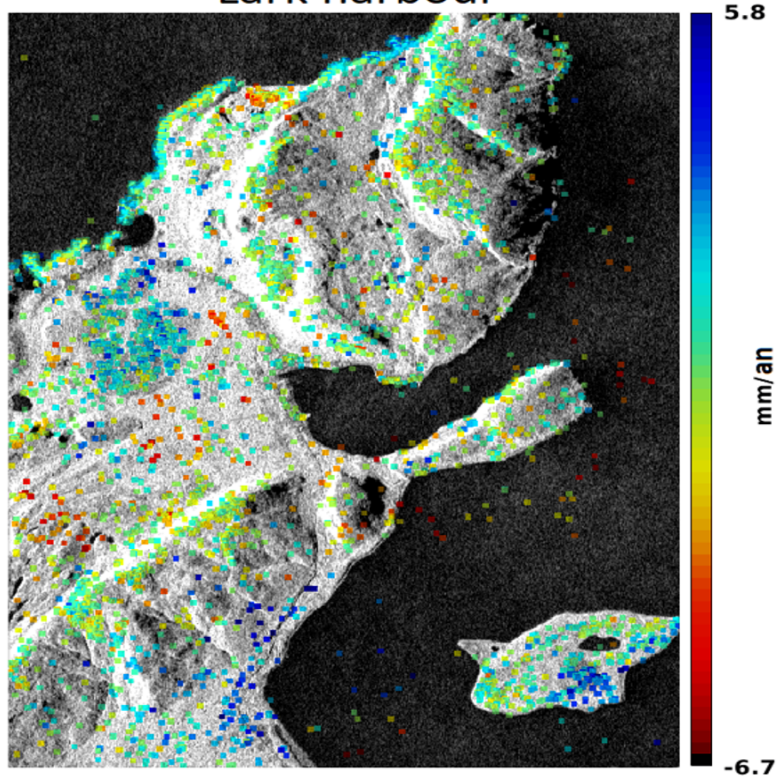
Halifax



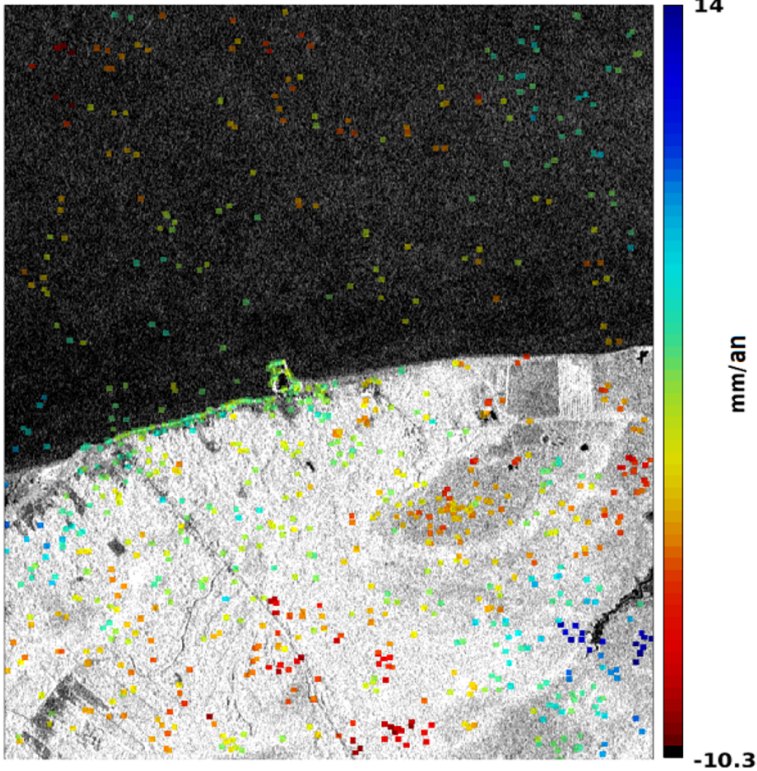
Harrington



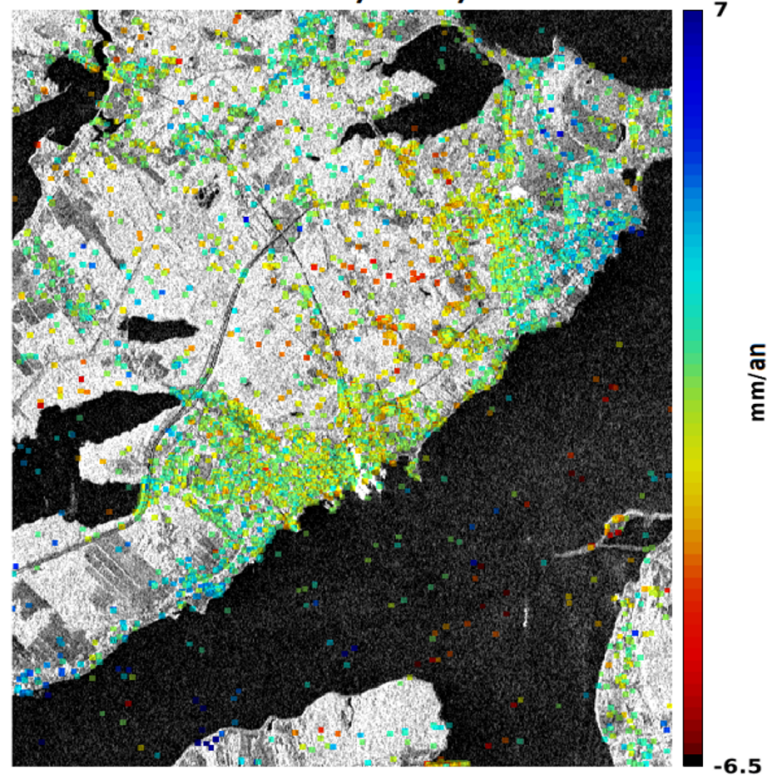
Lark harbour



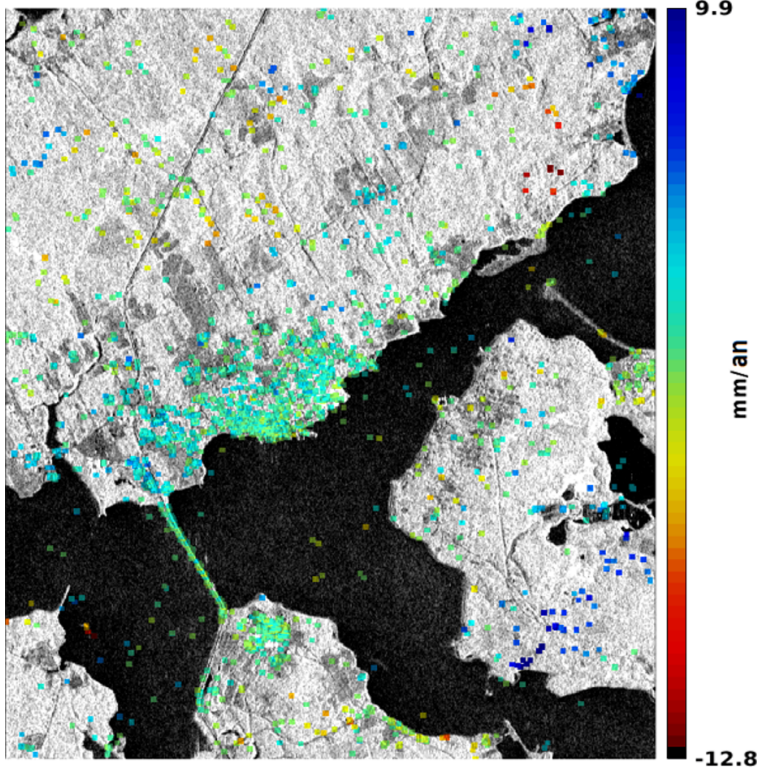
Lower escuminac



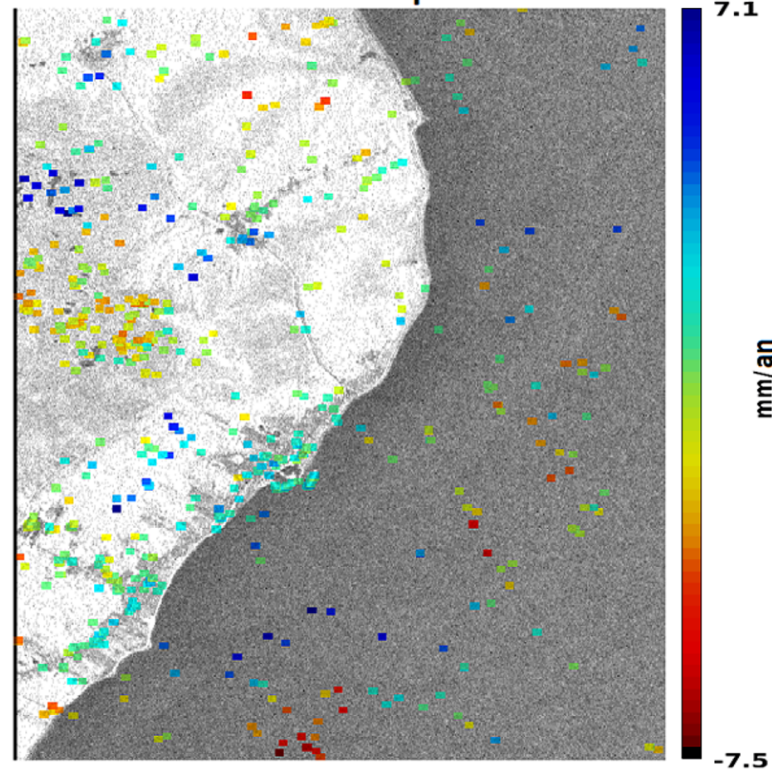
North sydney



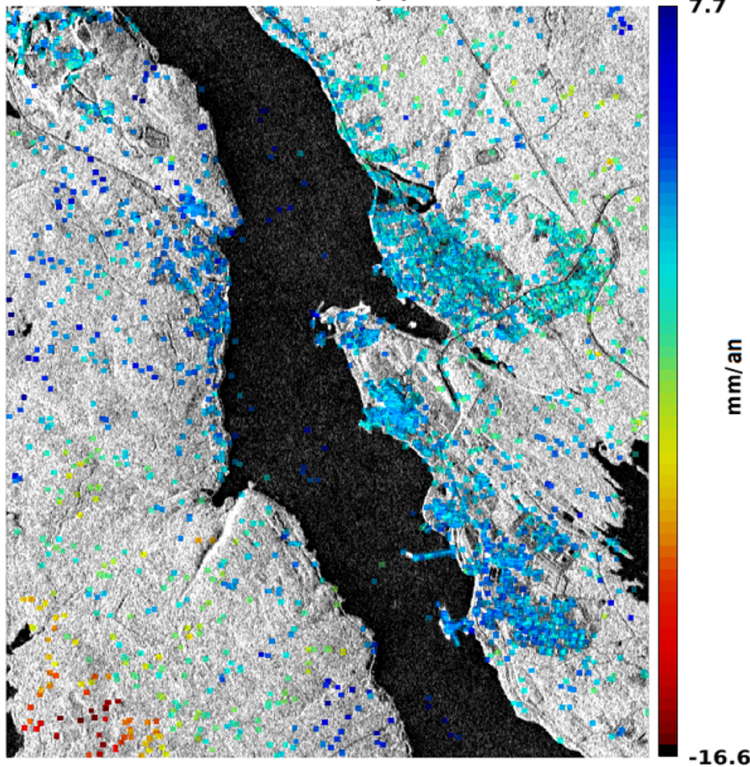
Pictou



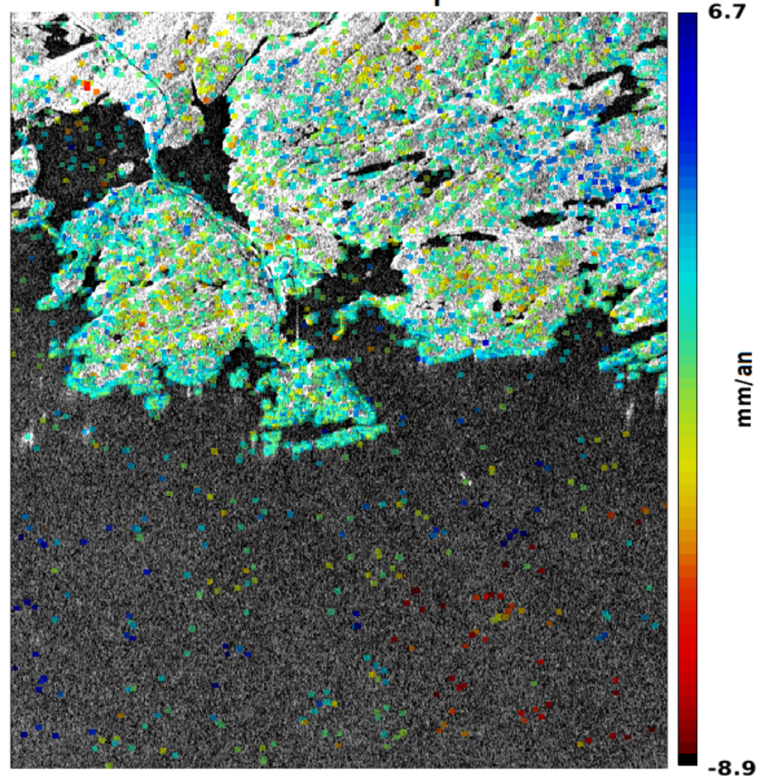
Point sapin



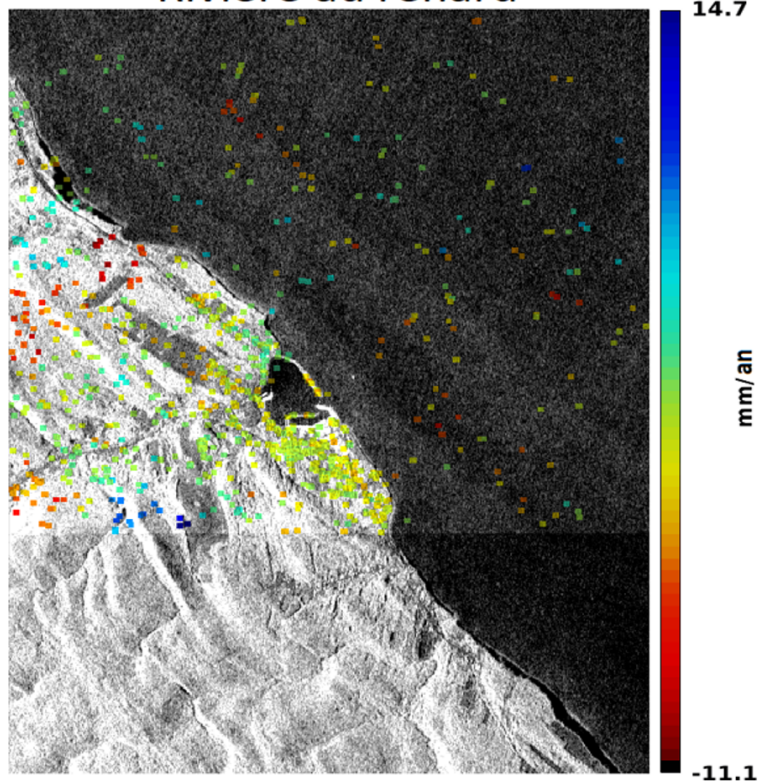
Point tupper



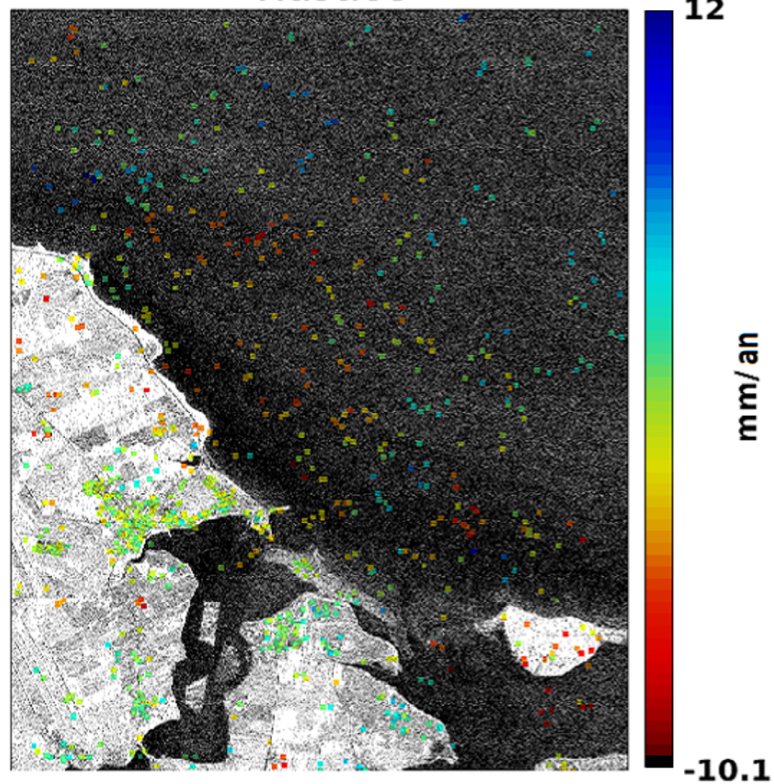
Port aux basques



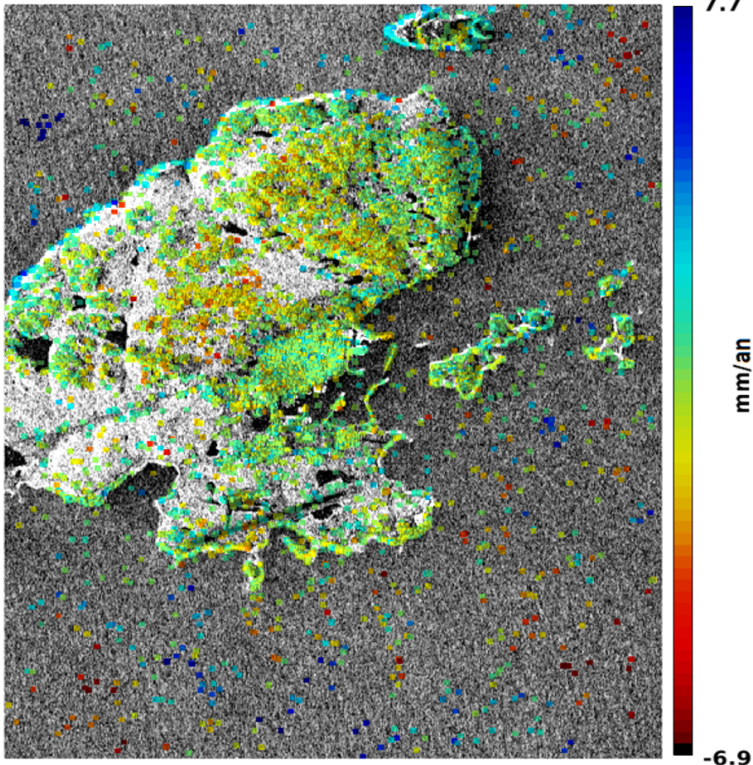
Riviere au renard



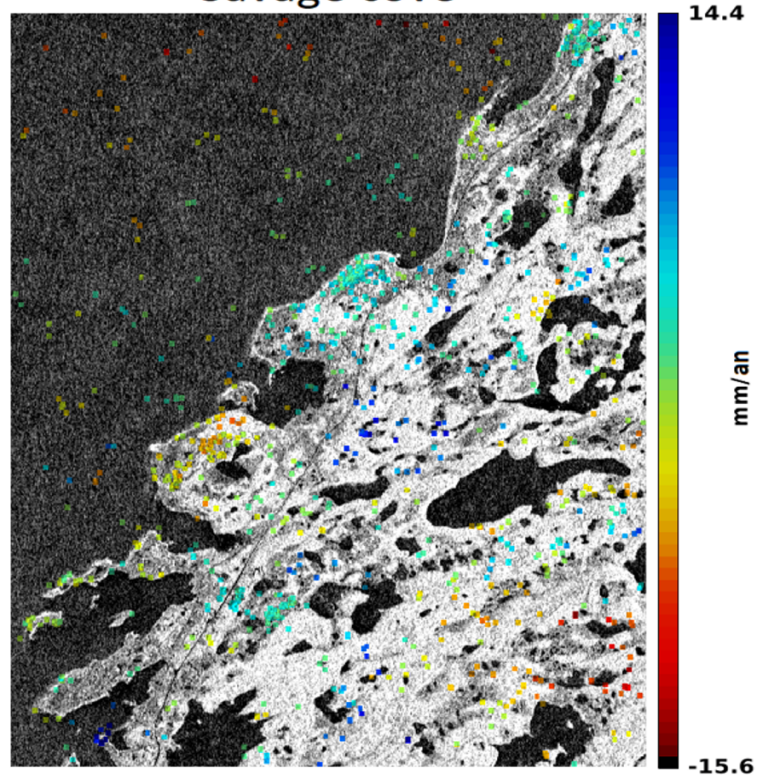
Rustico



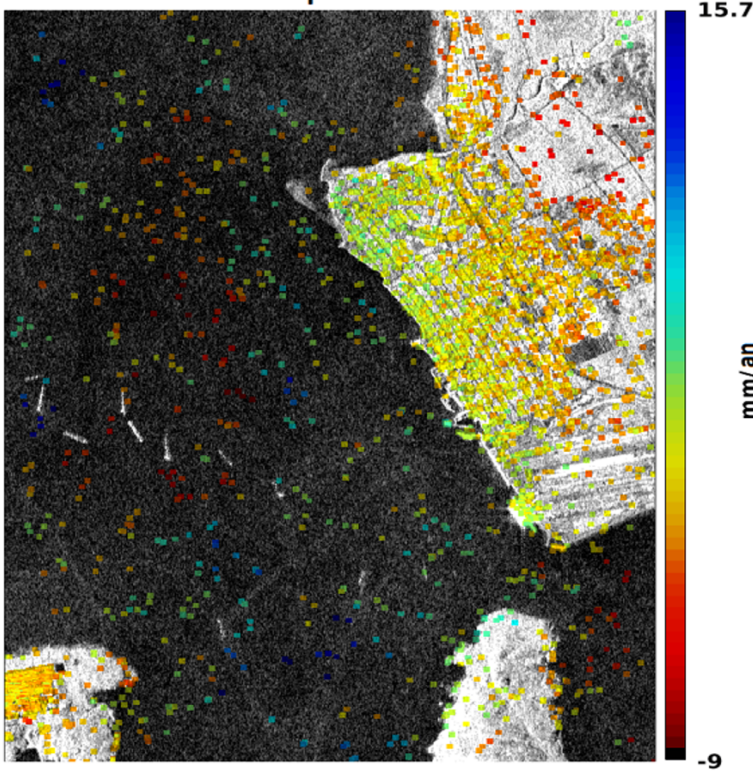
Saint pierre



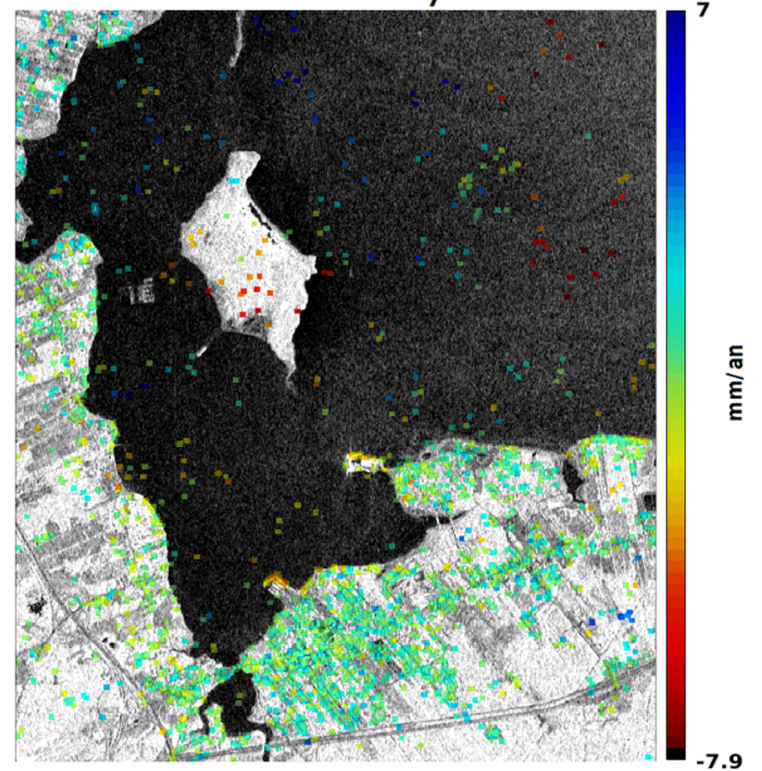
Savage cove



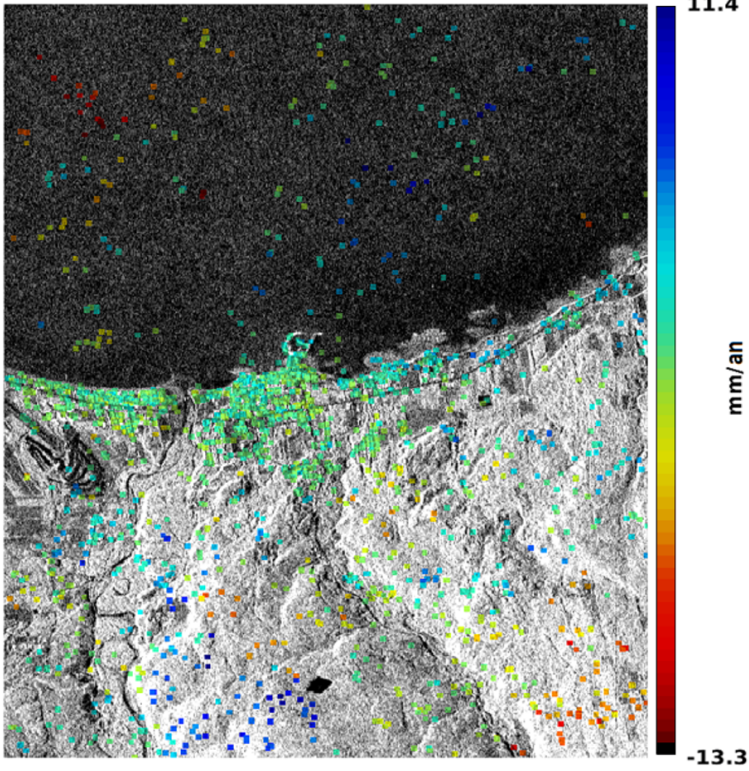
Sept iles



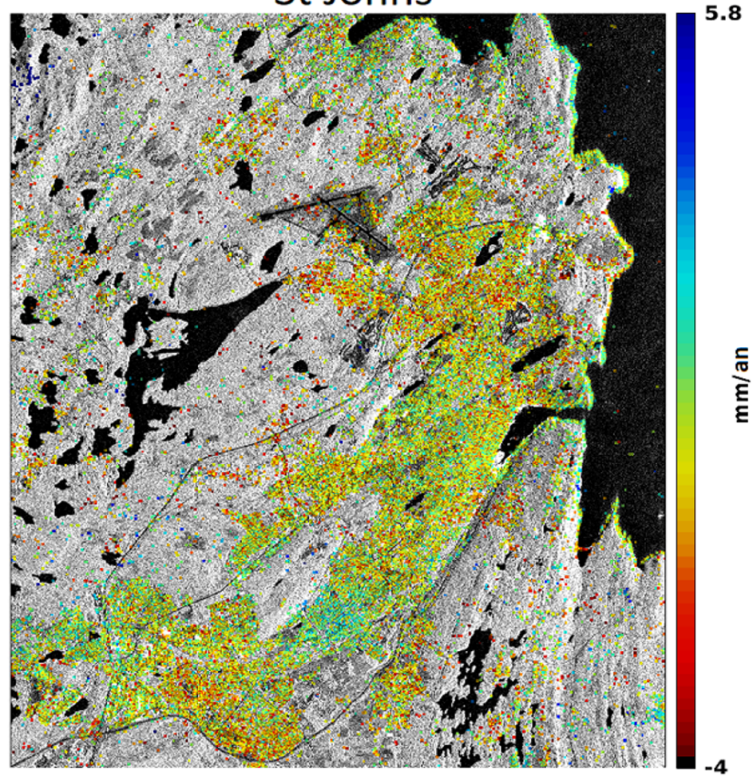
Shediac bay



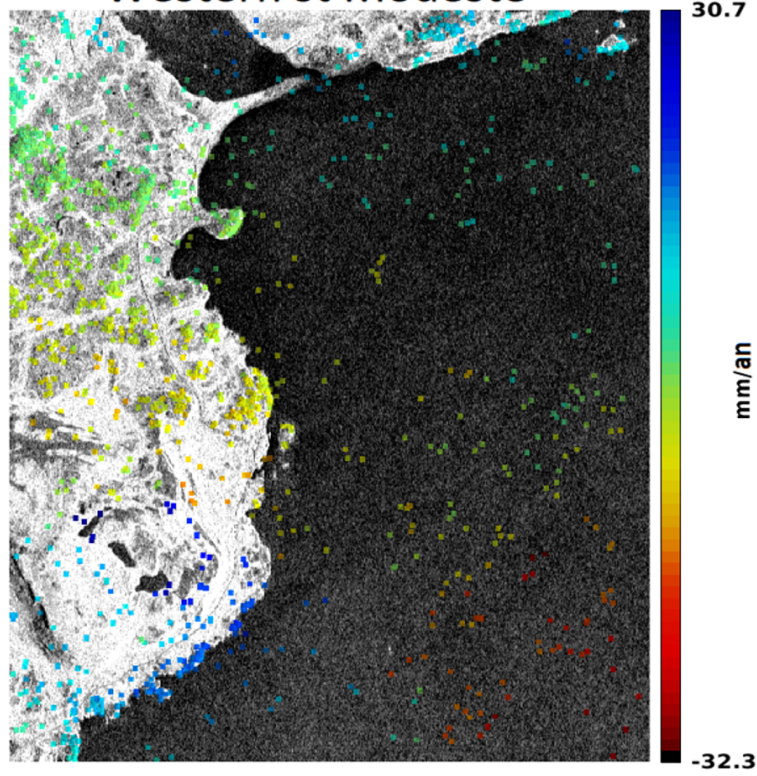
Ste anne des monts



St Johns



Western st Modeste



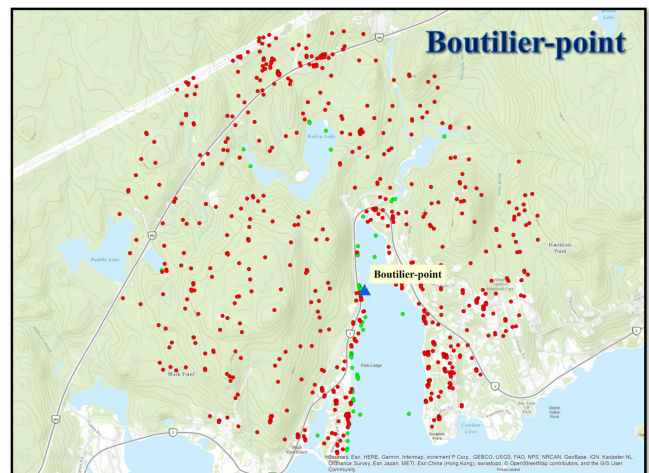
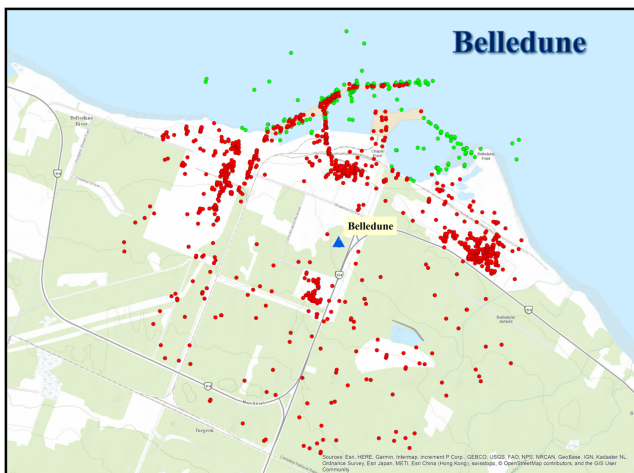
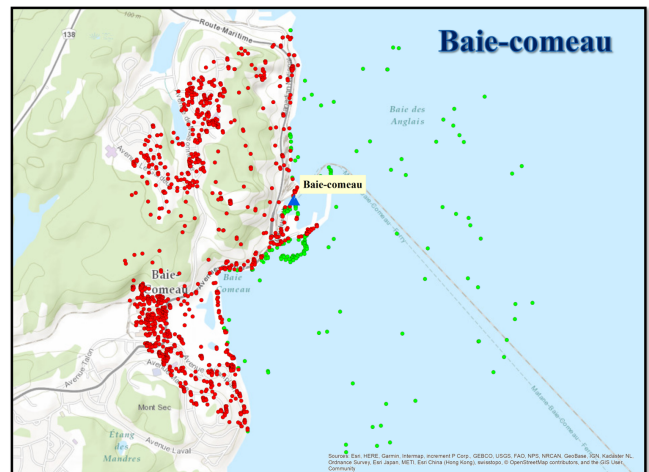
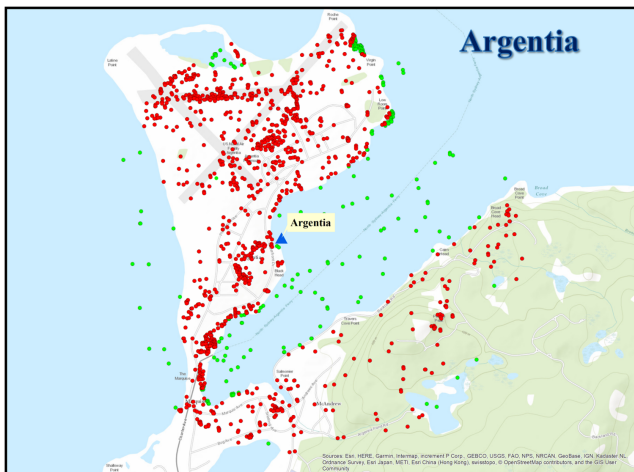


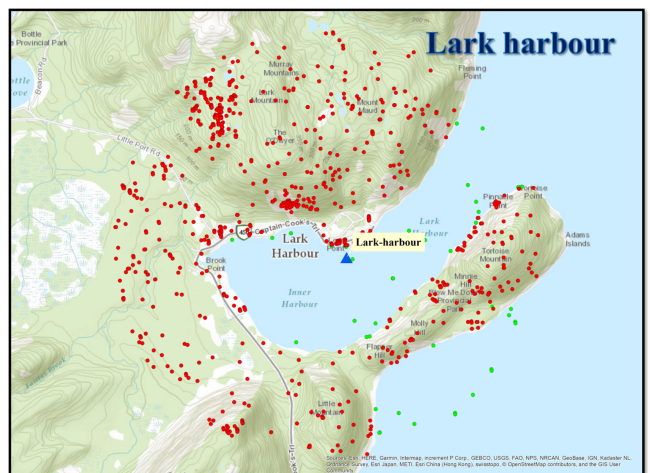
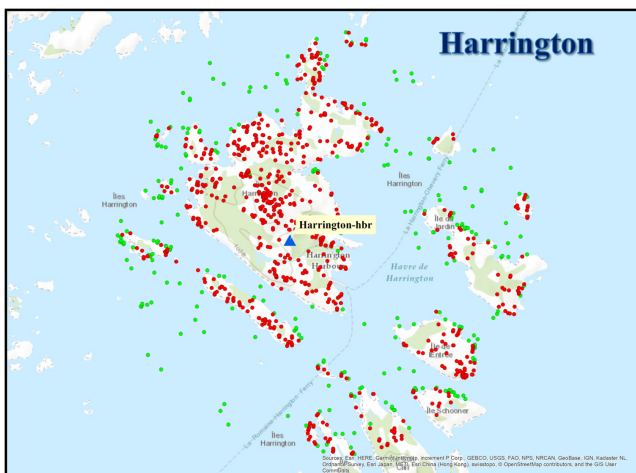
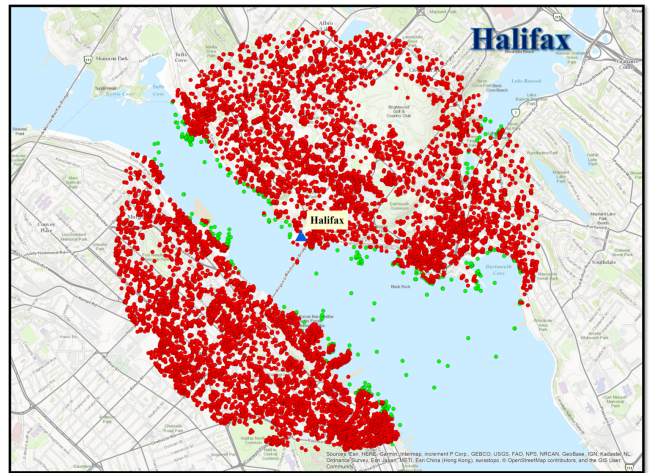
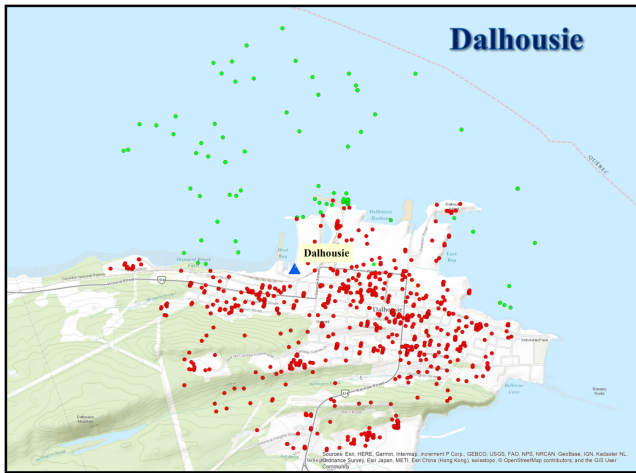
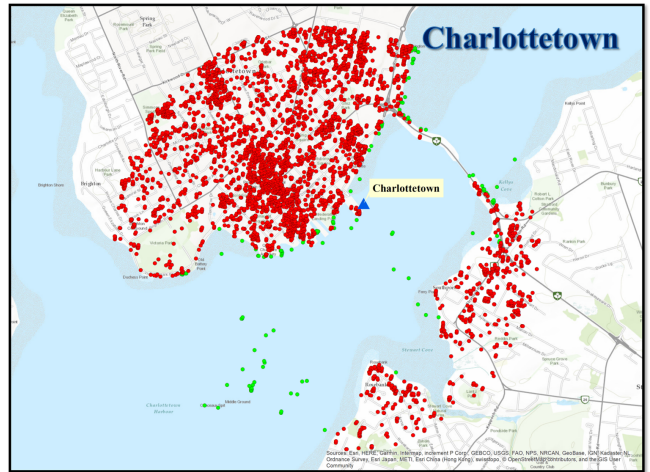
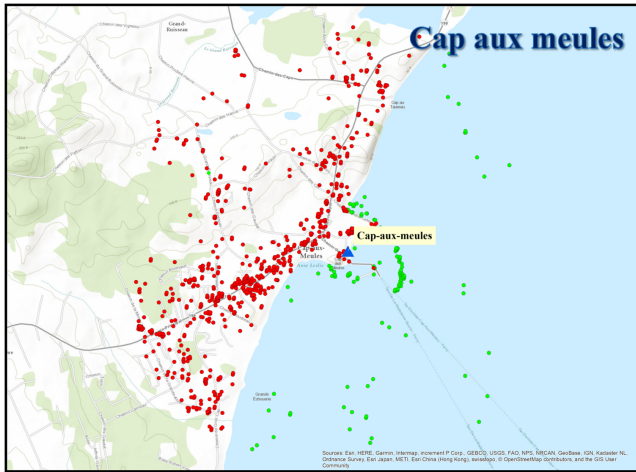


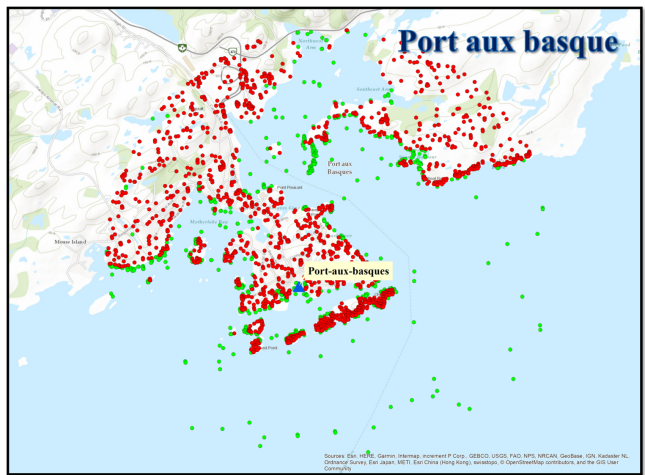
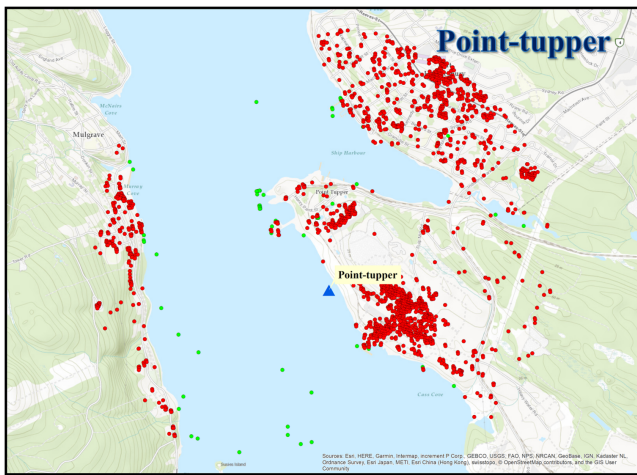
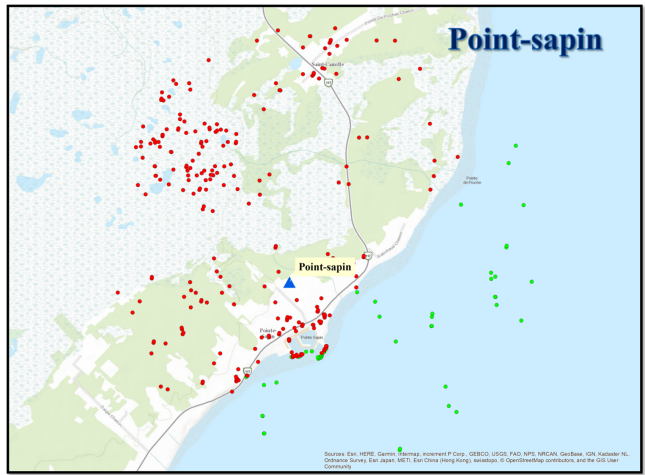
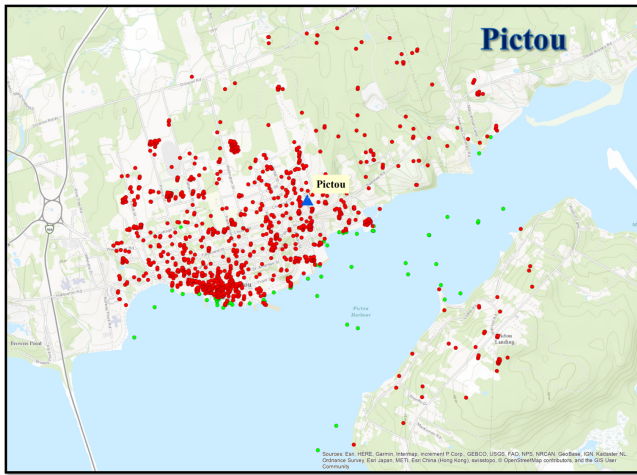
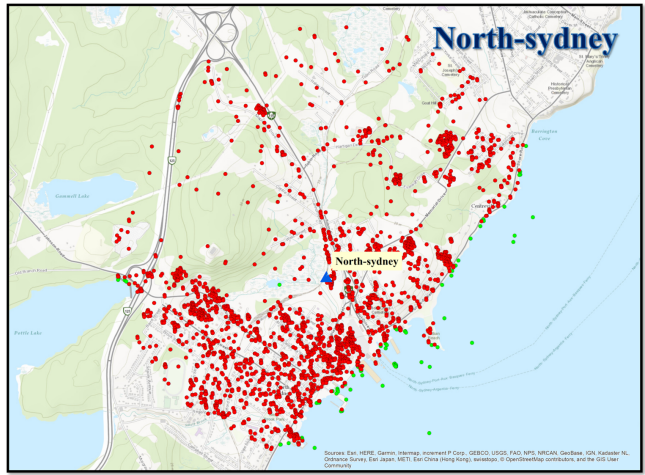
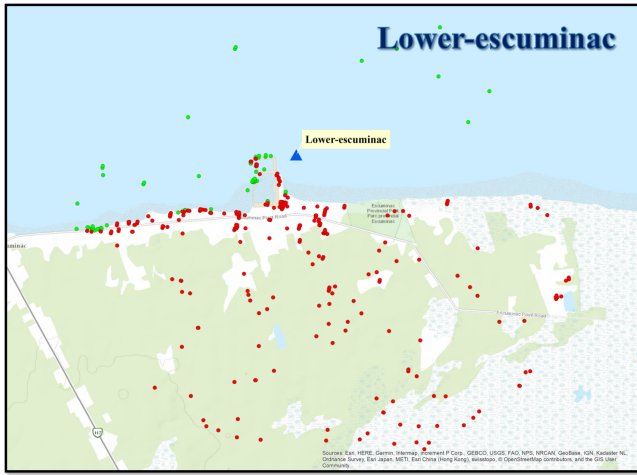
# Annexe D

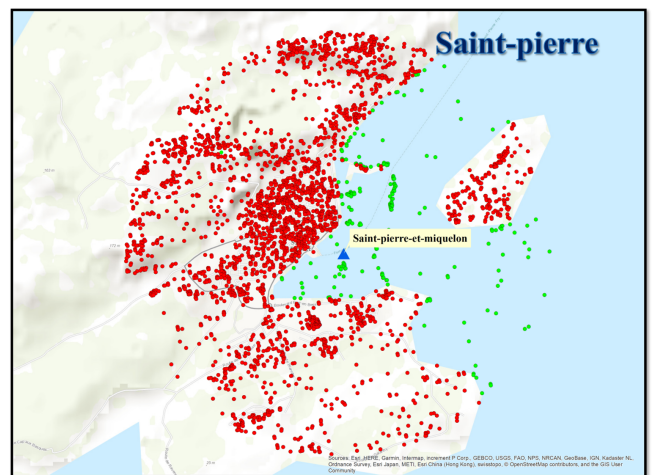
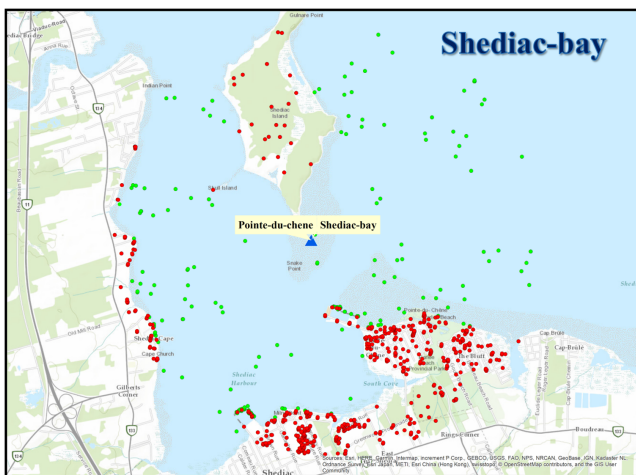
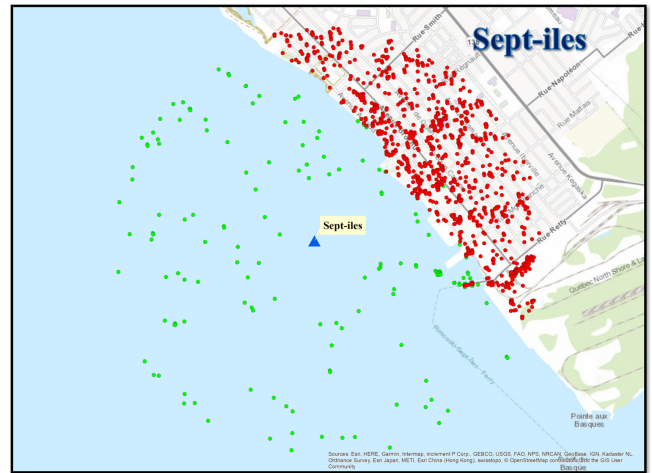
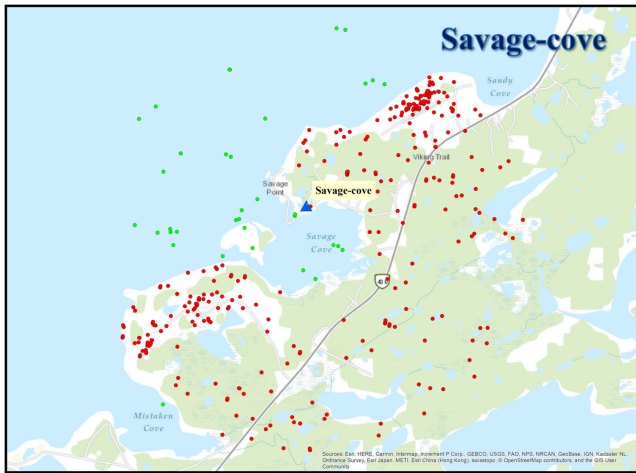
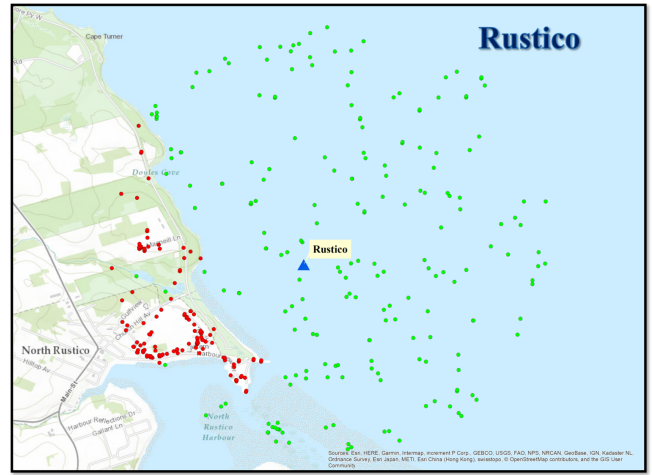
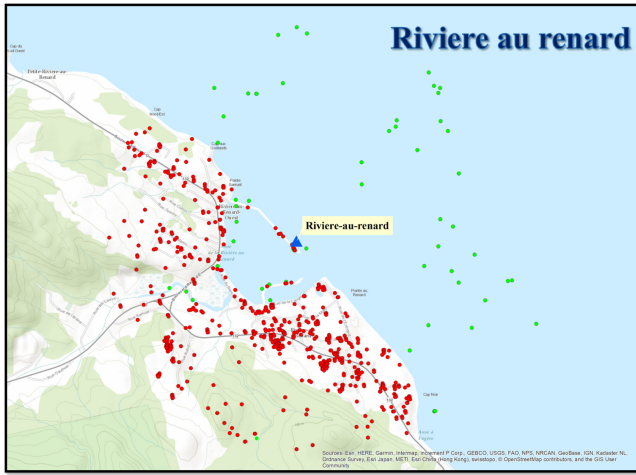
## Modification des points DP dans ArcGIS

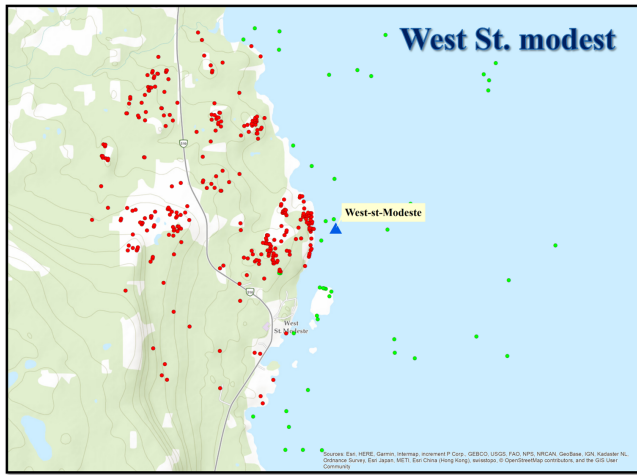
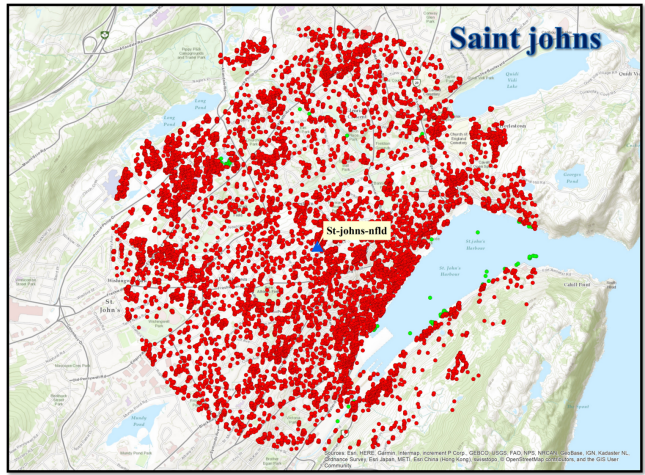
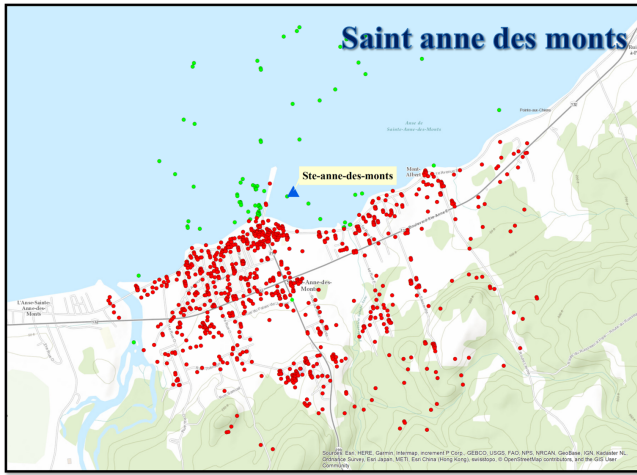
**Remarque:** le point du triangle **bleu** est une station marégraphique, les points **verts** sont les résultats de StaMPS et les points **rouges** sont des points sélectionnés dans ArcGIS.







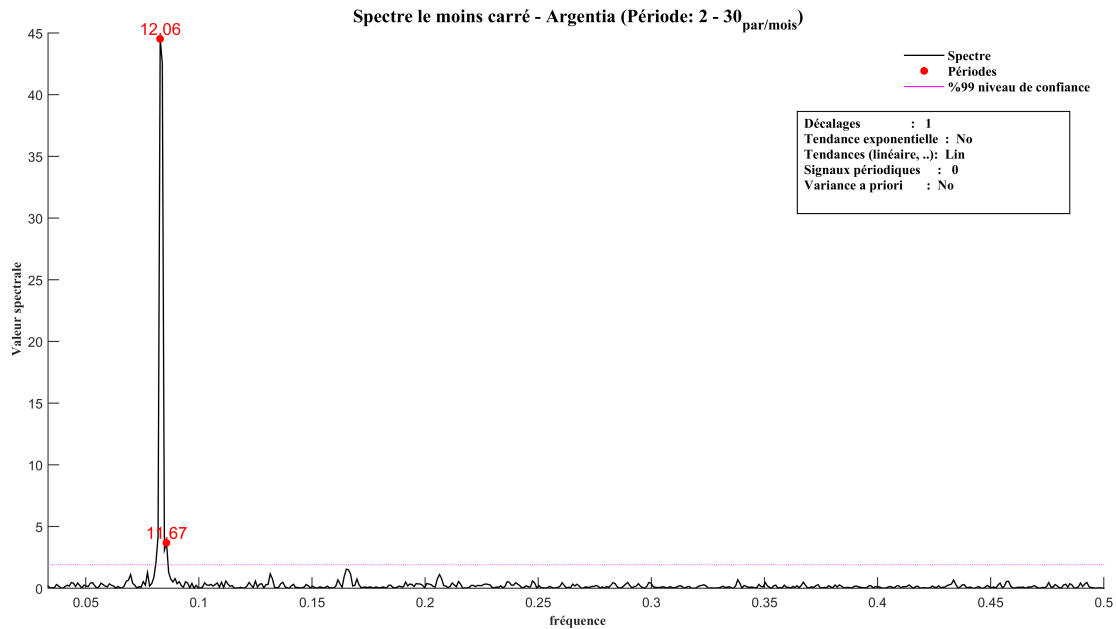






# Annexe E

## Constituants de marée obtenus à partir des données marégraphiques

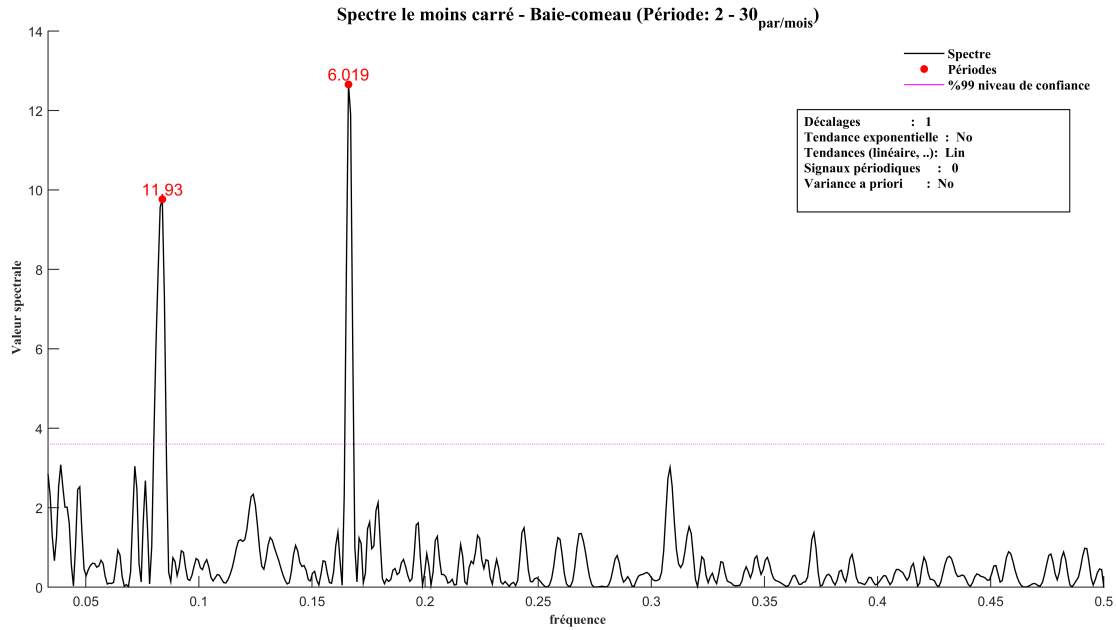


### Analyse ASMC

	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		2.4 mm/an	0.2		
Annuelle	12.06	0.08	0.00	255.2	0.2
Semi-annuelle					

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
Argentia	6.975	2.45	0.08	255.2		




---

---

### Analyse ASMC

---

	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
<b>Tendance linéaire</b>		-5.5 mm/an	0.5		
<b>Annuelle</b>	11.93	0.03	0.00	224.1	0.3
<b>Semi-annuelle</b>	6.02	0.03	0.00	252.2	0.3

---

---

### Analyse harmonique

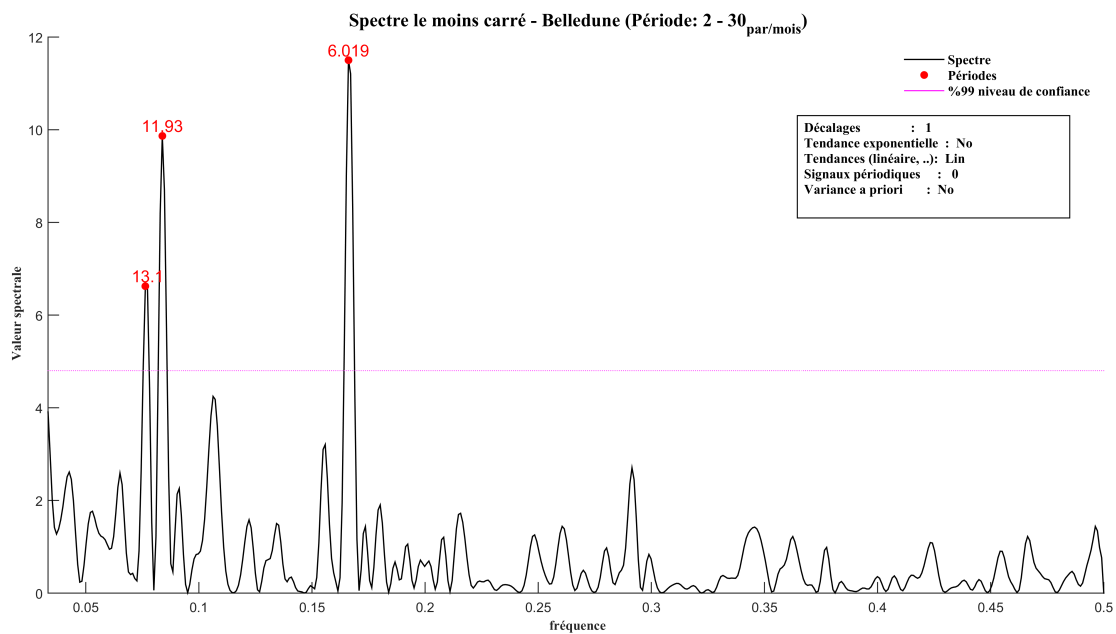
---

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
<b>Baie-comeau</b>	6.976	-5.47	0.03	224.1	0.03	252.2

---

---






---

---

### Analyse ASMC

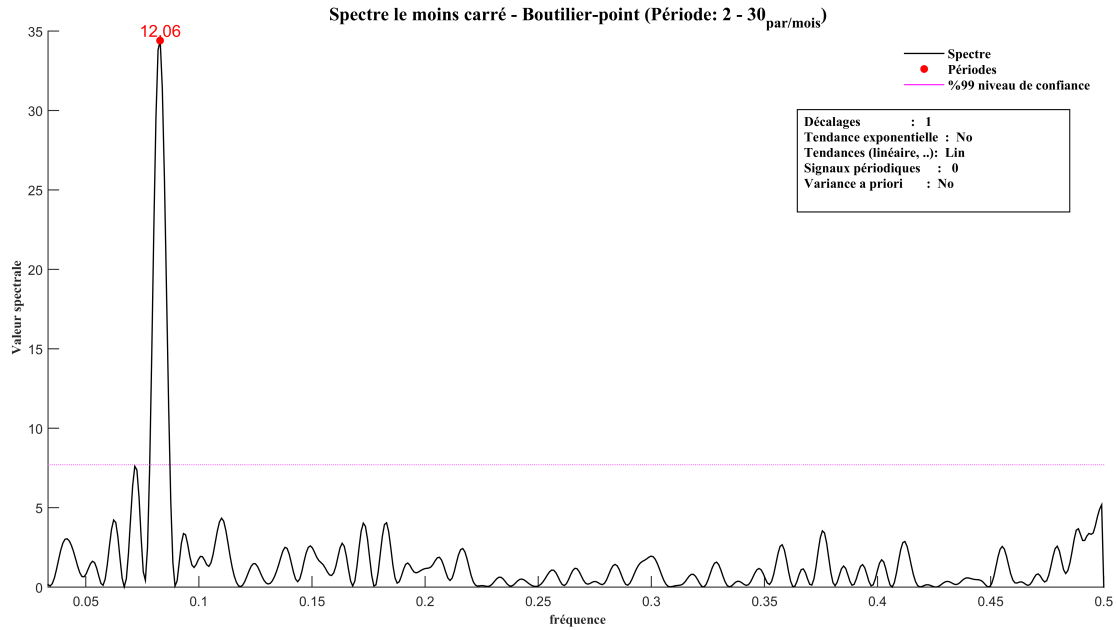
	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
<b>Tendance linéaire</b>		4.2 mm/an	0.8		
<b>Annuelle</b>	11.93	0.03	0.01	324.2	0.3
<b>Semi-annuelle</b>	6.02	0.03	0.01	50.1	0.3

---

---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
<b>Belledune</b>	6.826	4.23	0.03	324.2	0.03	50.1




---

---

### Analyse ASMC

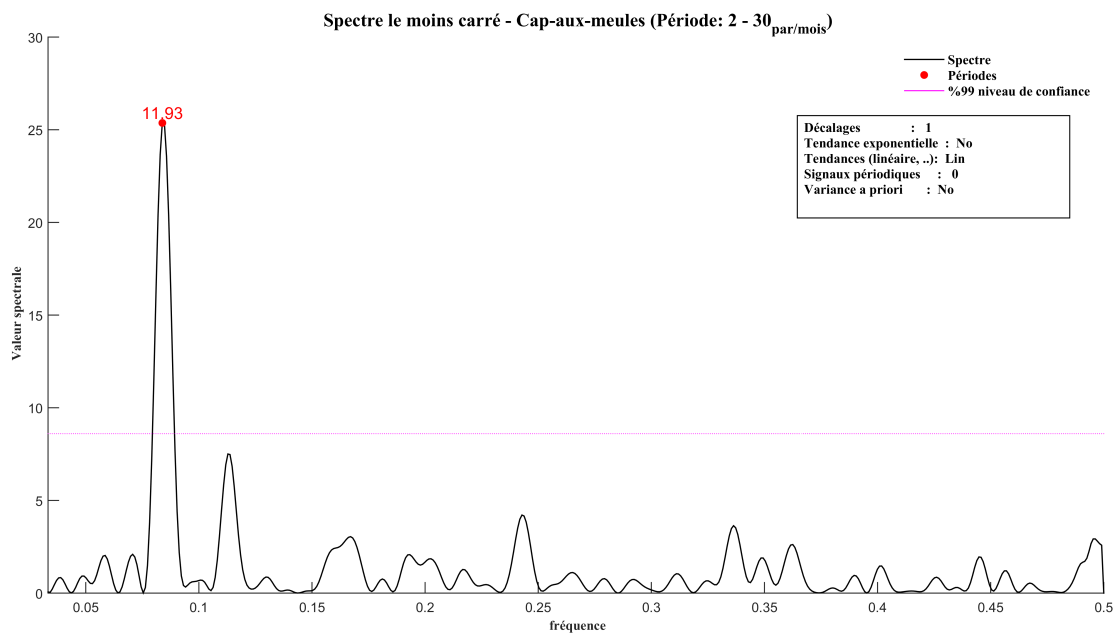
	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
<b>Tendance linéaire</b>		-0.6 mm/an	1.5		
<b>Annuelle</b>	12.06	0.05	0.01	6.4	0.4
<b>Semi-annuelle</b>					

---

---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
<b>Boutilier-point</b>	6.991	-0.64	0.05	6.3		




---

---

### Analyse ASMC

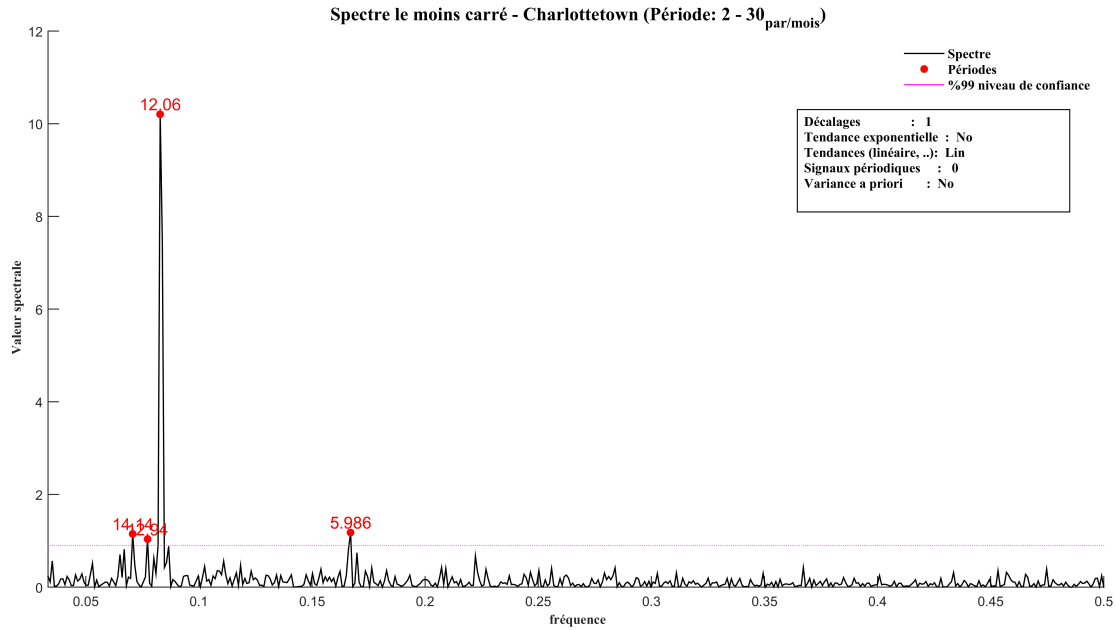
	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		1.9 mm/an	1.3		
Annuelle	11.93	0.03	0.01	192.6	0.3
Semi-annuelle					

---

---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
Cap-aux-meules	7.009	1.9	0.03	192.5		




---

---

### Analyse ASMC

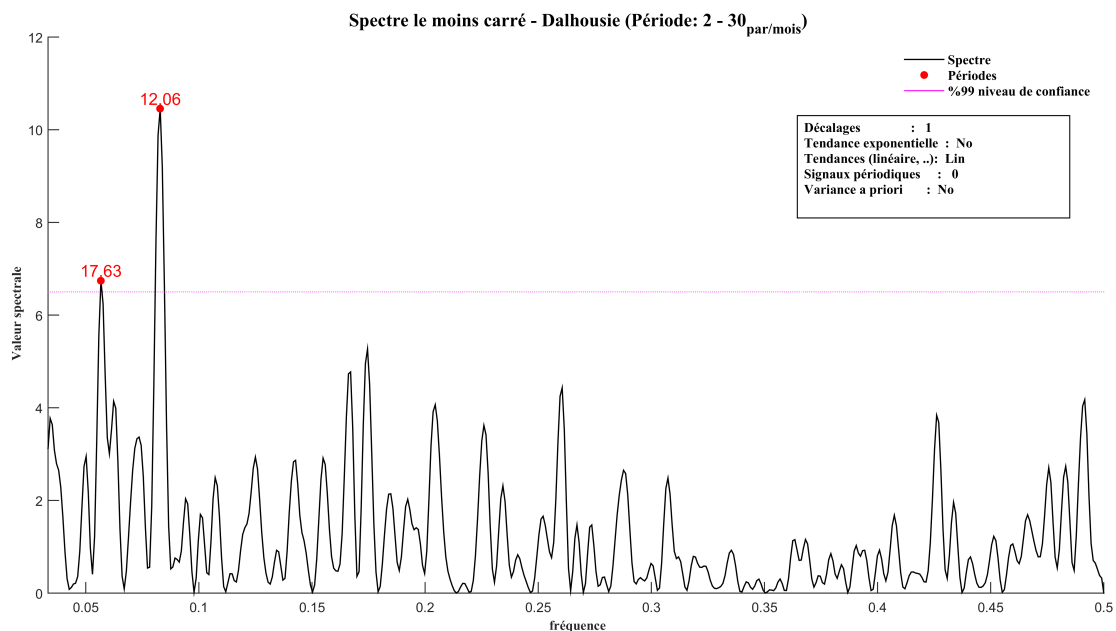
	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		3.2 mm/an	0.1		
Annuelle	12.06	0.03	0	156.0	0.1
Semi-annuelle	6.00	0.01	0	206.5	0.1

---

---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
<b>Charlottetown</b>	6.772	3.21	0.03	156.0	0.01	206.5




---

---

### Analyse ASMC

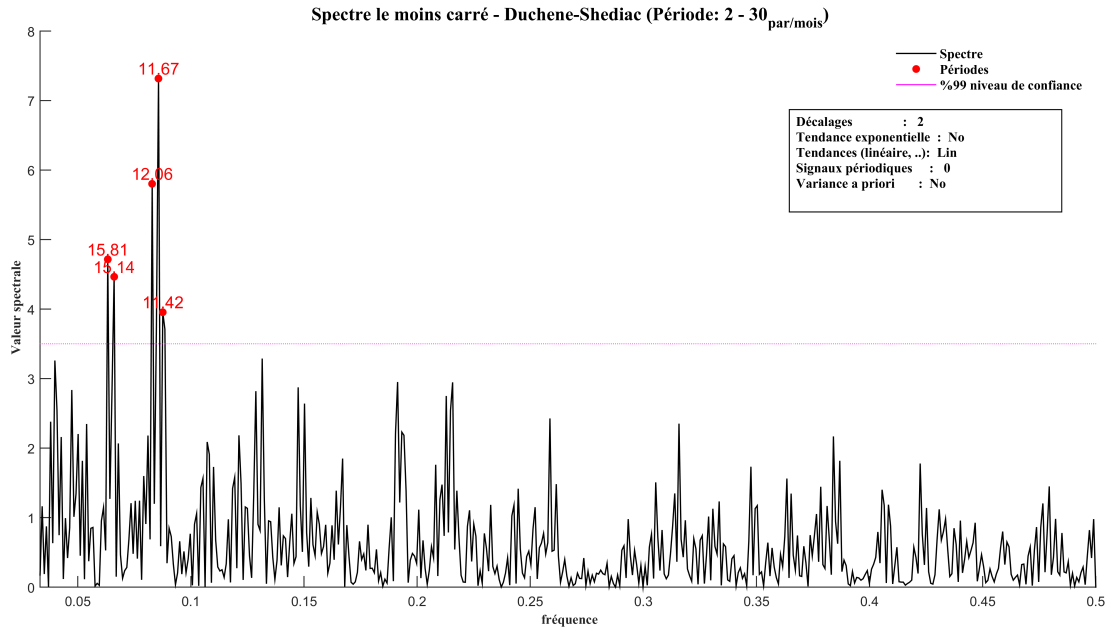
	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		2.5 mm/an	0.9		
Annuelle	12.06	0.03	0.01	254.7	0.4
Semi-annuelle					

---

---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
Dalhousie	7.011	2.55	0.03	254.5		




---

---

### Analyse ASMC

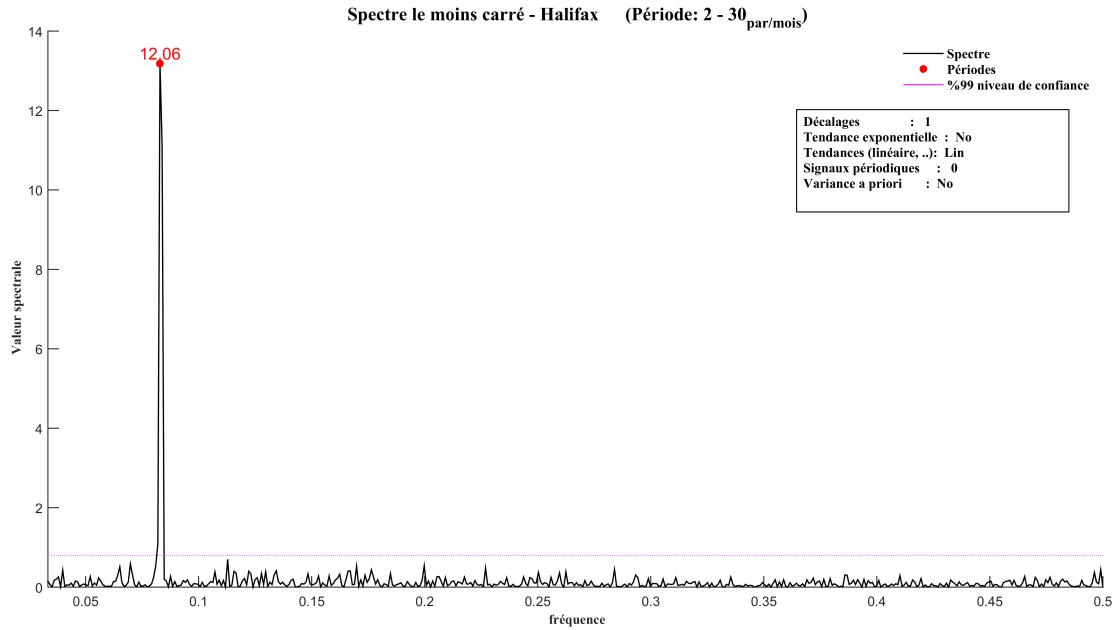
	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		2.2 mm/an	0.5		
Annuelle	12.06	0.02	0.01	271.1	0.3
Semi-annuelle					

---

---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
Chene-Shediac	6.977	2.34	0.02	271.5		




---



---

### Analyse ASMC

	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		3.3 mm/an	0.1		
Annuelle	12.06	0.03	0.00	17.9	0.1
Semi-annuelle					

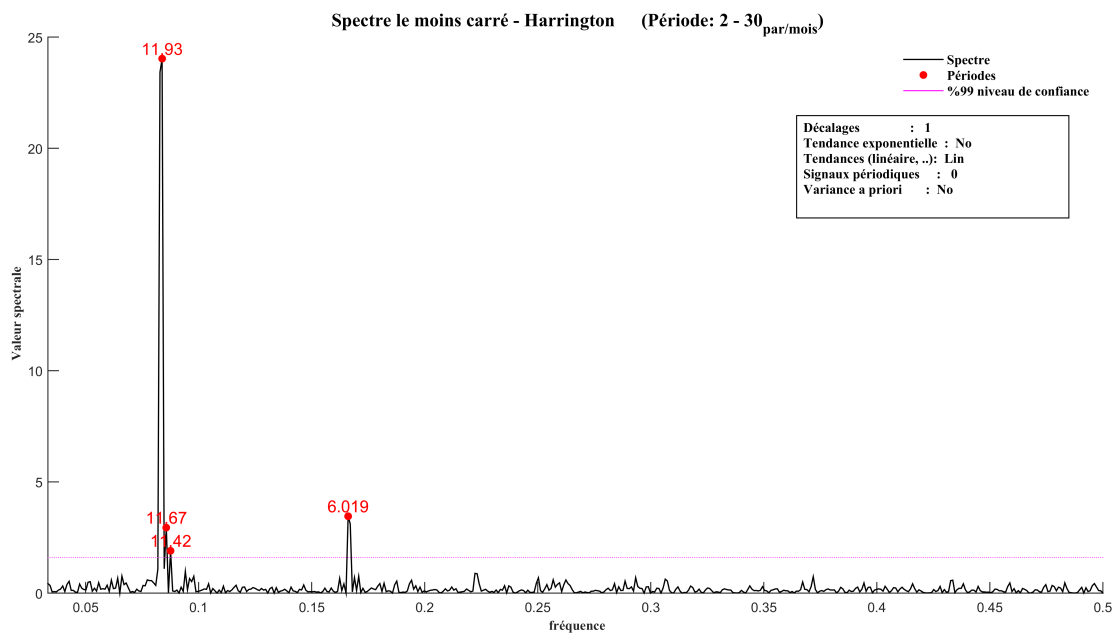
---



---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
Halifax	6.759	3.27	0.03	17.9		




---



---

### Analyse ASMC

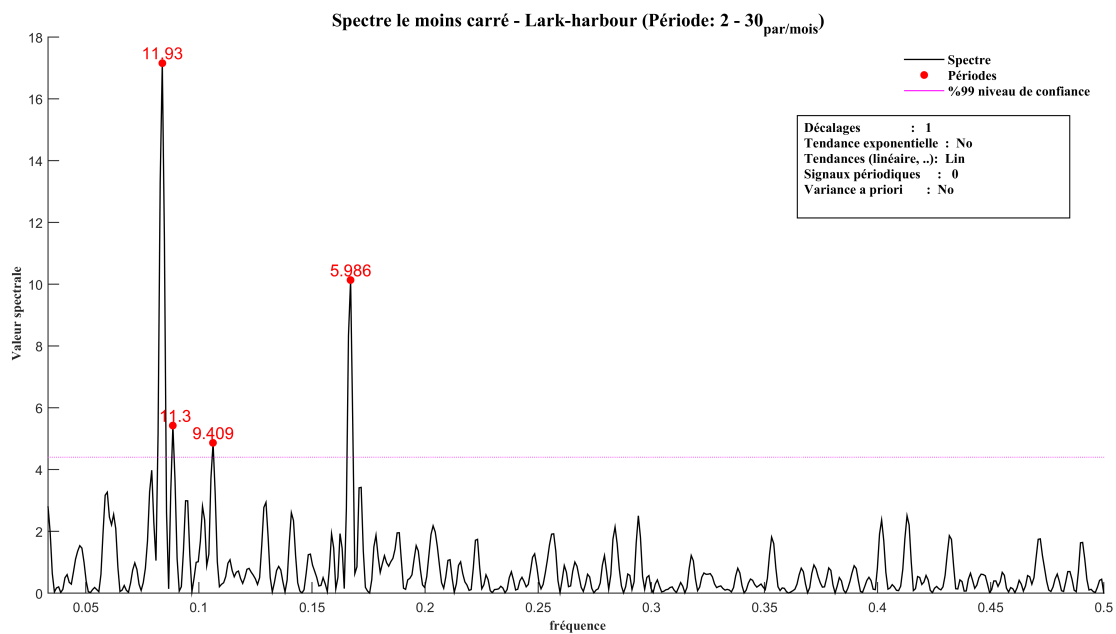
	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		-0.7 mm/an	0.1		
Annuelle	11.93	0.04	0.00	105.5	0.2
Semi-annuelle	6.02	0.02	0.00	130.2	0.2

---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
<b>Harrington</b>	7.021	-0.68	0.04	105.5	0.02	130.2






---

---

### Analyse ASMC

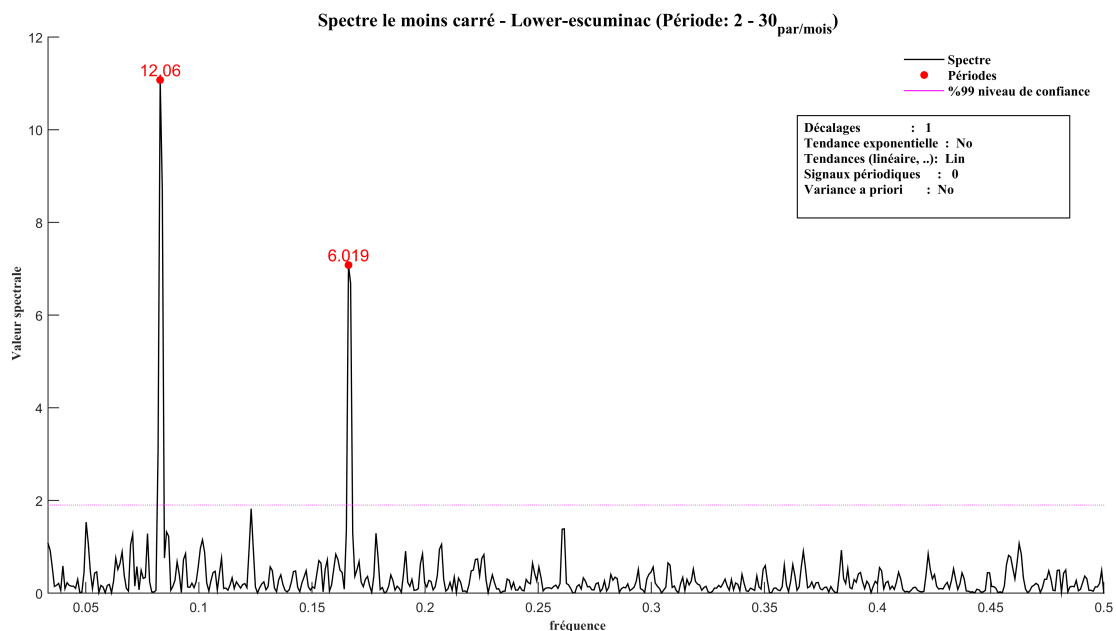
	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		0.5 mm/an	0.5		
Annuelle	11.93	0.03	0.00	113.7	0.3
Semi-annuelle	6.00	0.03	0.00	301.8	0.3

---

---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
Lark-harbour	7.008	0.54	0.03	113.6	0.03	301.8




---



---

### Analyse ASMC

	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
<b>Tendance linéaire</b>		3.1 mm/an	0.2		
<b>Annuelle</b>	12.06	0.03	0.00	242.6	0.2
<b>Semi-annuelle</b>	6.02	0.02	0.00	303.6	0.2

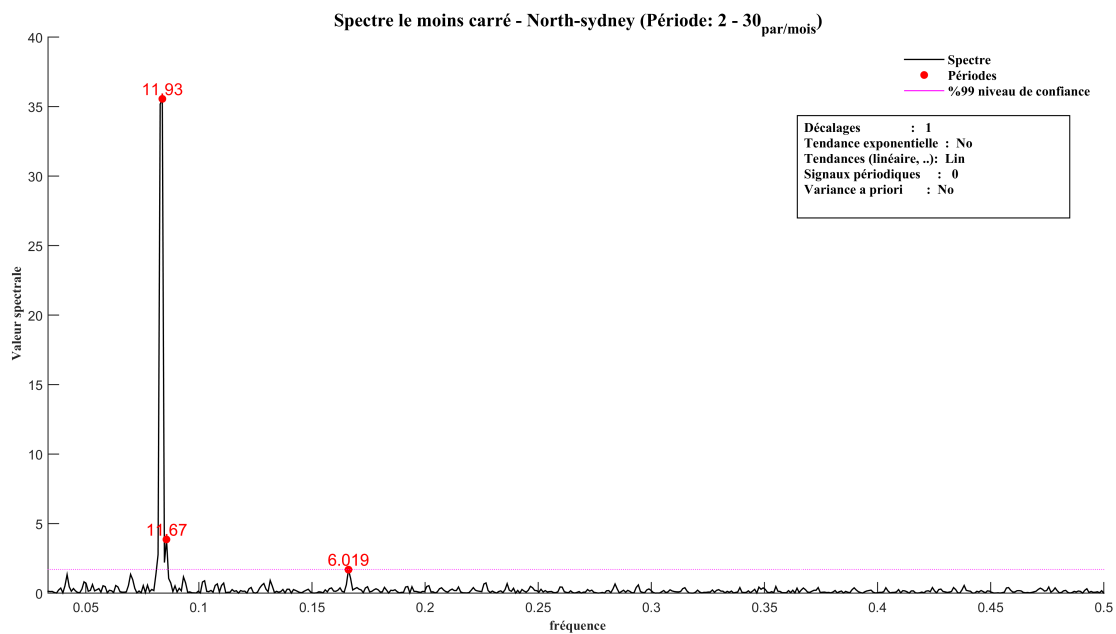
---



---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
<b>Escuminac</b>	6.998	3.06	0.03	242.6	0.02	303.6




---



---

### Analyse ASMC

	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		3.7 mm/an	0.2		
Annuelle	11.93	0.06	0.00	28.2	0.2
Semi-annuelle	6.02	0.01	0.00	343.6	0.2

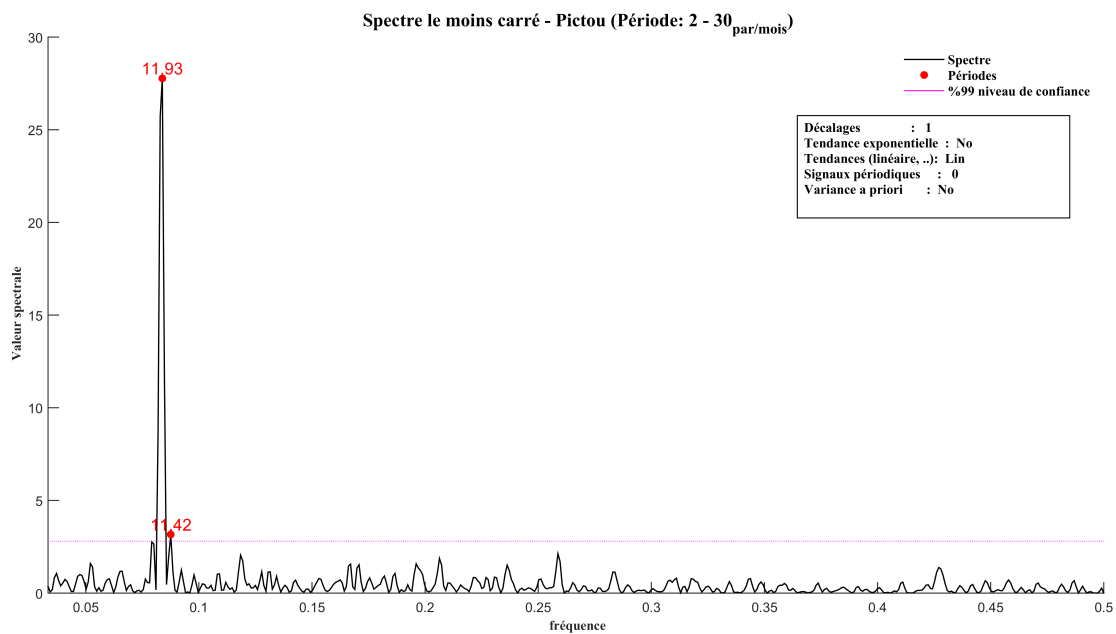
---



---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
North-sydney	6.968	3.72	0.06	28.2	0.01	343.6




---



---

### Analyse ASMC

	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		2.5 mm/an	0.4		
Annuelle	11.93	0.06	0.00	240.3	0.3
Semi-annuelle					

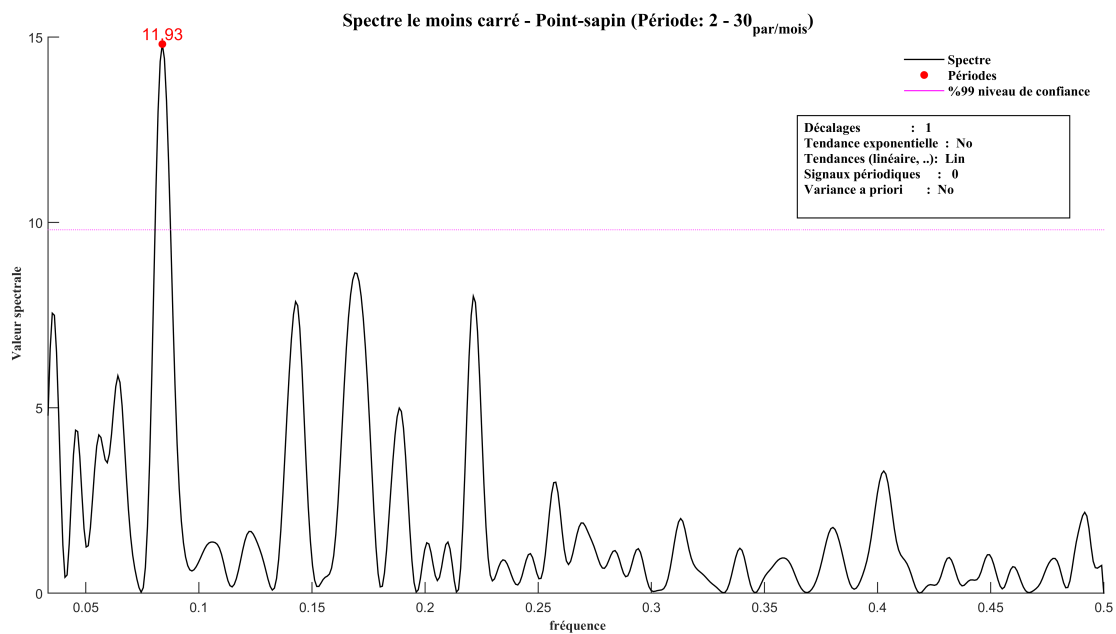
---



---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
Pictou	6.977	2.53	0.06	240.1		




---



---

### Analyse ASMC

	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		4.1 mm/an	1.9		
Annuelle	11.93	0.04	0.01	333.0	0.5
Semi-annuelle					

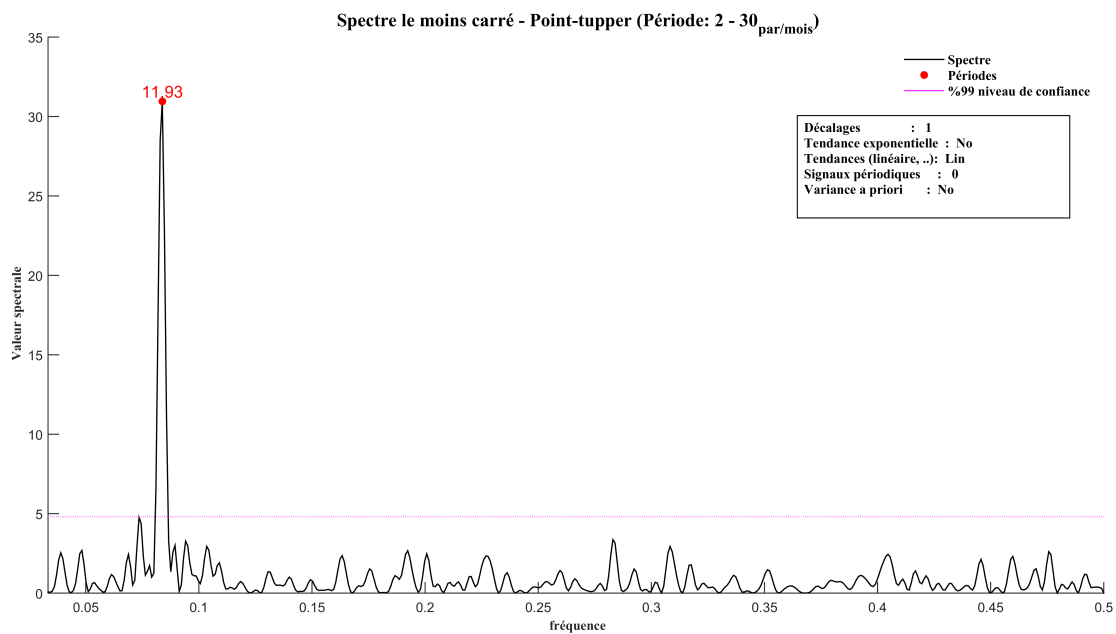
---



---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
Point-sapin	7.068	4.07	0.04	333.0		




---

---

### Analyse ASMC

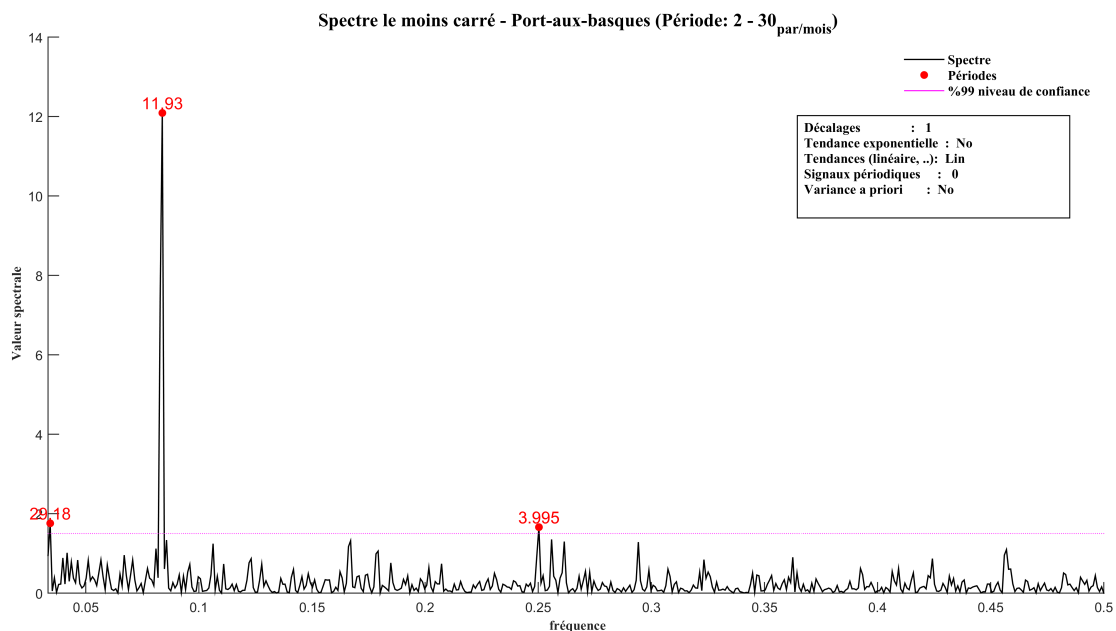
	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		1.5 mm/an	0.6		
Annuelle	11.93	0.05	0.01	5.3	0.3
Semi-annuelle					

---

---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
Point-tupper	6.987	1.55	0.05	5.2		




---

---

### Analyse ASMC

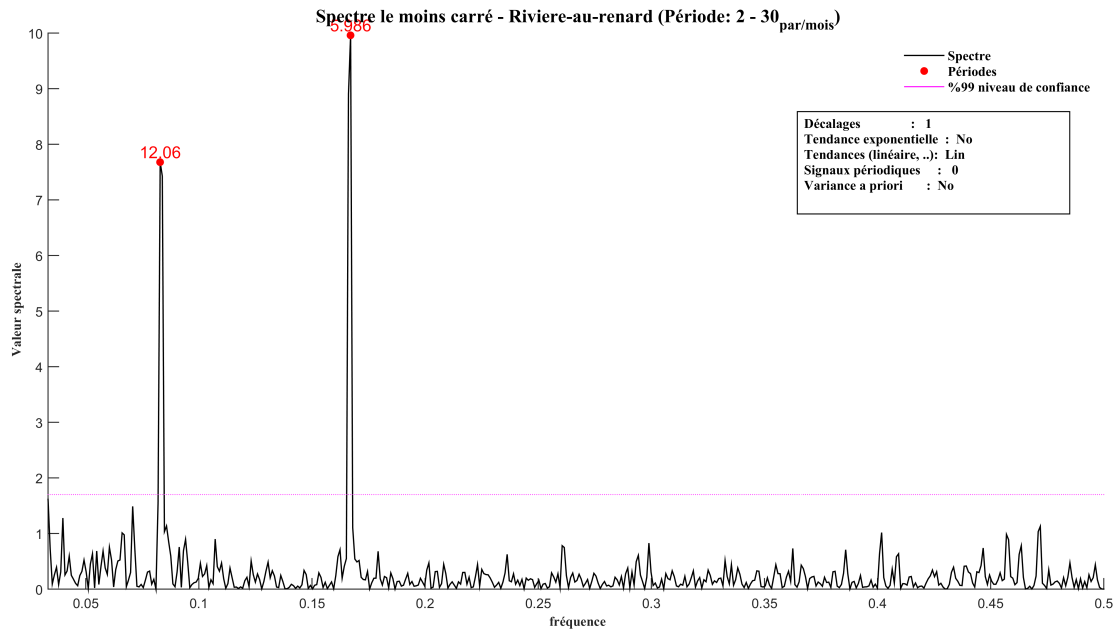
	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		2.7 mm/an	0.1		
Annuelle	11.93	0.03	0.00	56.8	0.2
Semi-annuelle					

---

---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
Port-basques	6.919	2.69	0.03	56.8		




---

---

### Analyse ASMC

	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		0.9 mm/an	0.2		
Annuelle	12.06	0.02	0.00	197.3	0.2
Semi-annuelle	6.00	0.03	0.00	331.3	0.2

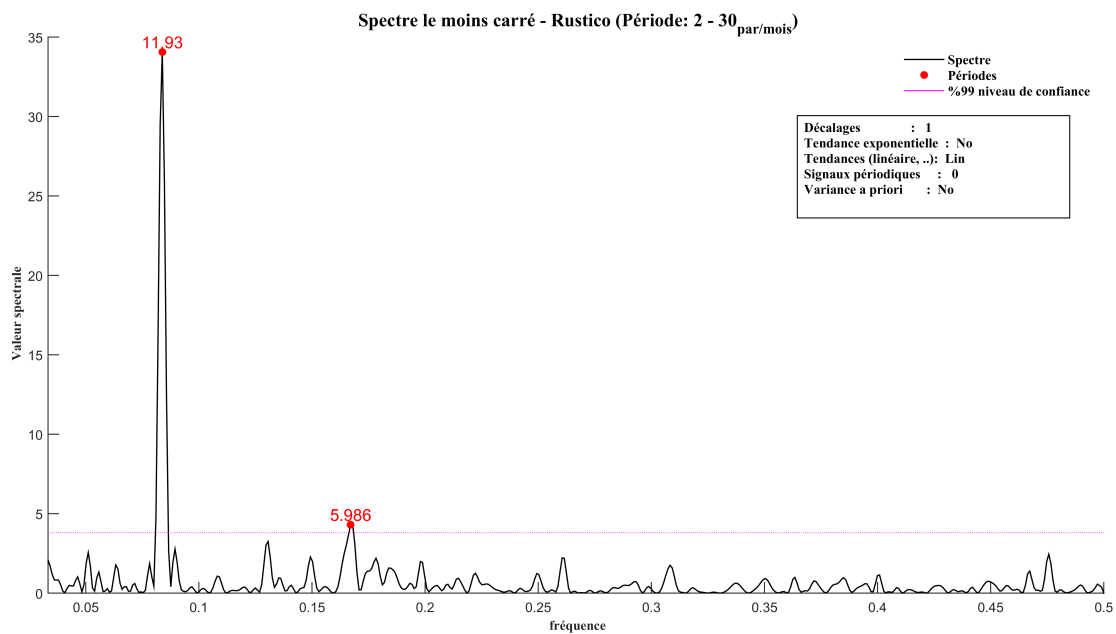
---

---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
Riviere-renard	7.013	0.92	0.02	197.3	0.03	331.3






---

---

### Analyse ASMC

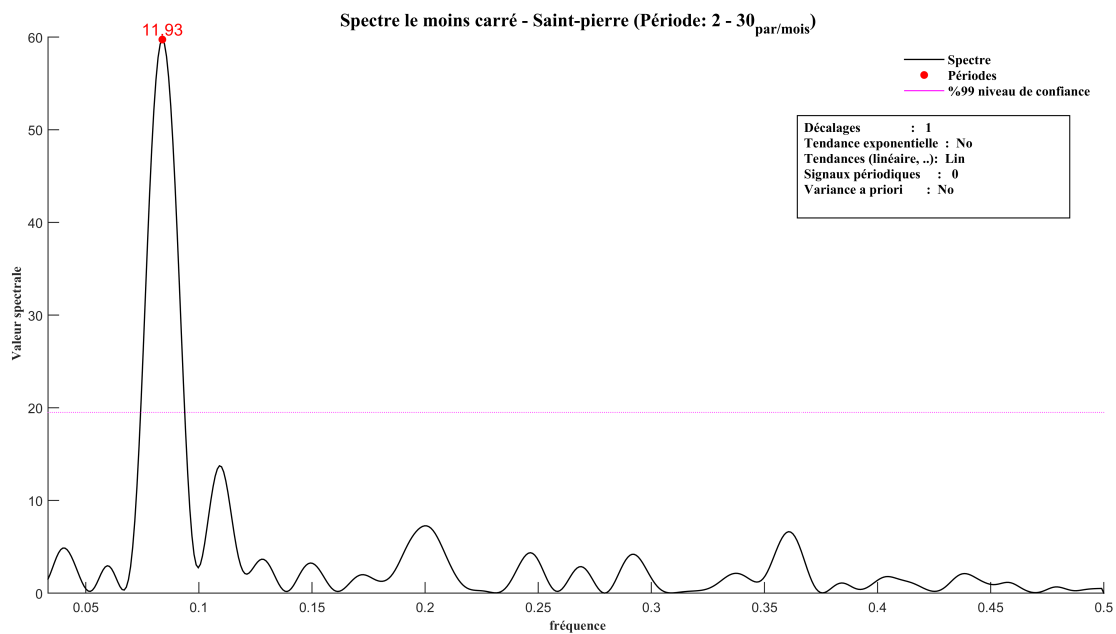
	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
<b>Tendance linéaire</b>		3.2 mm/an	0.6		
<b>Annuelle</b>	11.93	0.06	0.01	199.2	0.3
<b>Semi-annuelle</b>	6.00	0.02	0.01	68.6	0.3

---

---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
<b>Rustico</b>	6.885	3.22	0.06	199.2	0.02	68.5




---



---

### Analyse ASMC

---

	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		-1.9 mm/an	3.5		
Annuelle	11.93	0.06	0.01	201.7	0.4
Semi-annuelle					

---



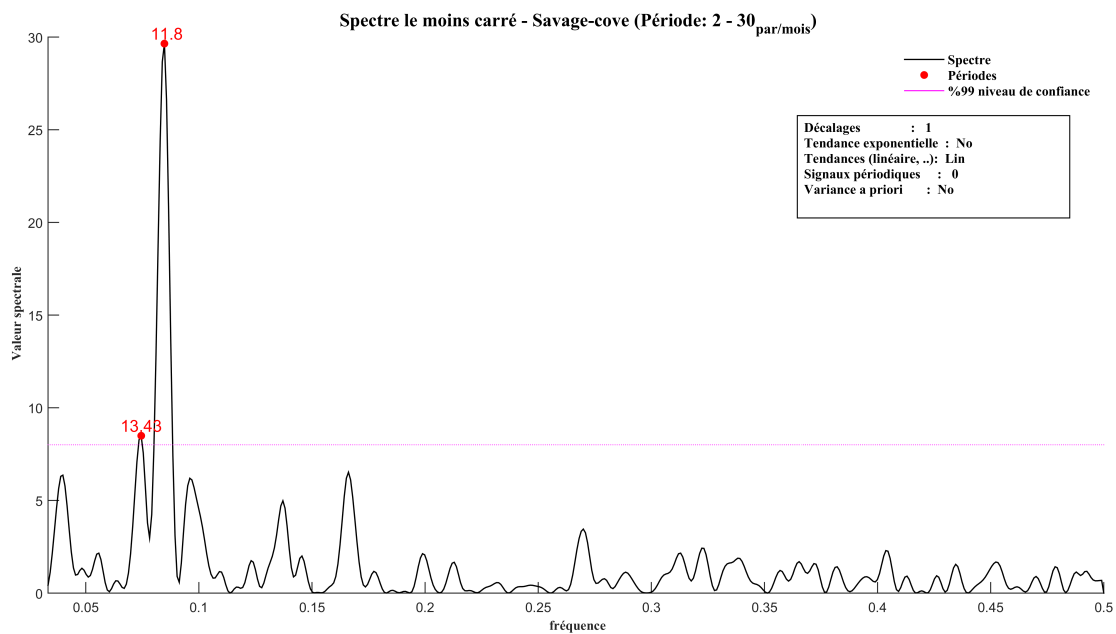
---

### Analyse harmonique

---

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
Saint-pierre	7.009	-1.59	0.06	201.2		

---




---

---

### Analyse ASMC

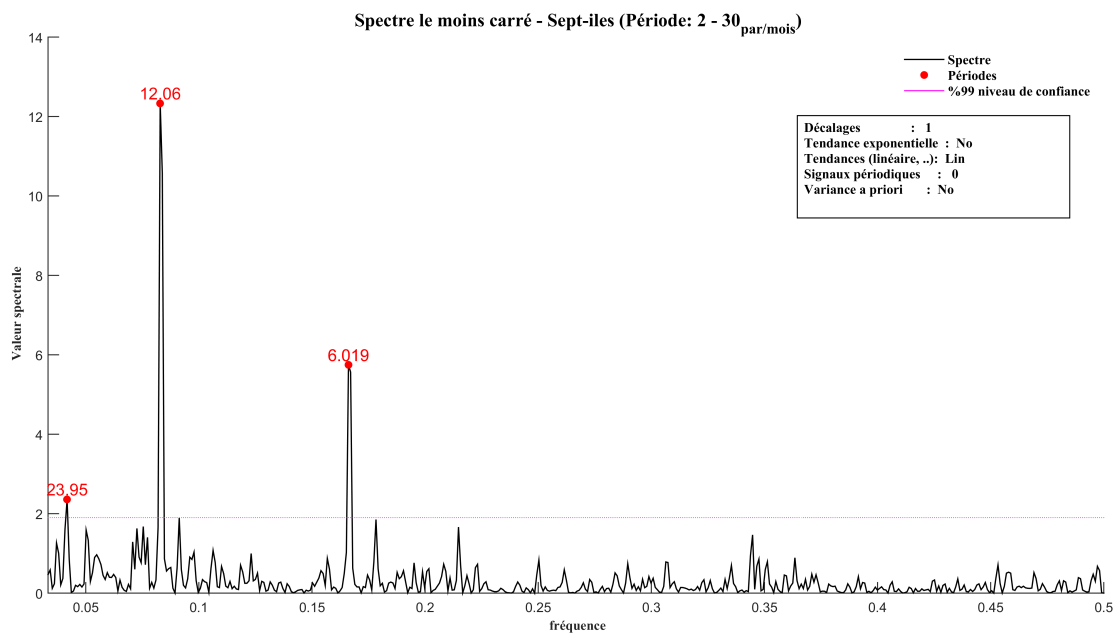
	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		-5.6 mm/an	1.6		
Annuelle	11.80	0.06	0.01	349.1	0.4
Semi-annuelle					

---

---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
Savage-cove	7.088	-5.64	0.06	349.1		




---



---

### Analyse ASMC

	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		0.8 mm/an	0.2		
Annuelle	12.06	0.03	0.00	82.3	0.2
Semi-annuelle	6.02	0.02	0.00	58.1	0.2

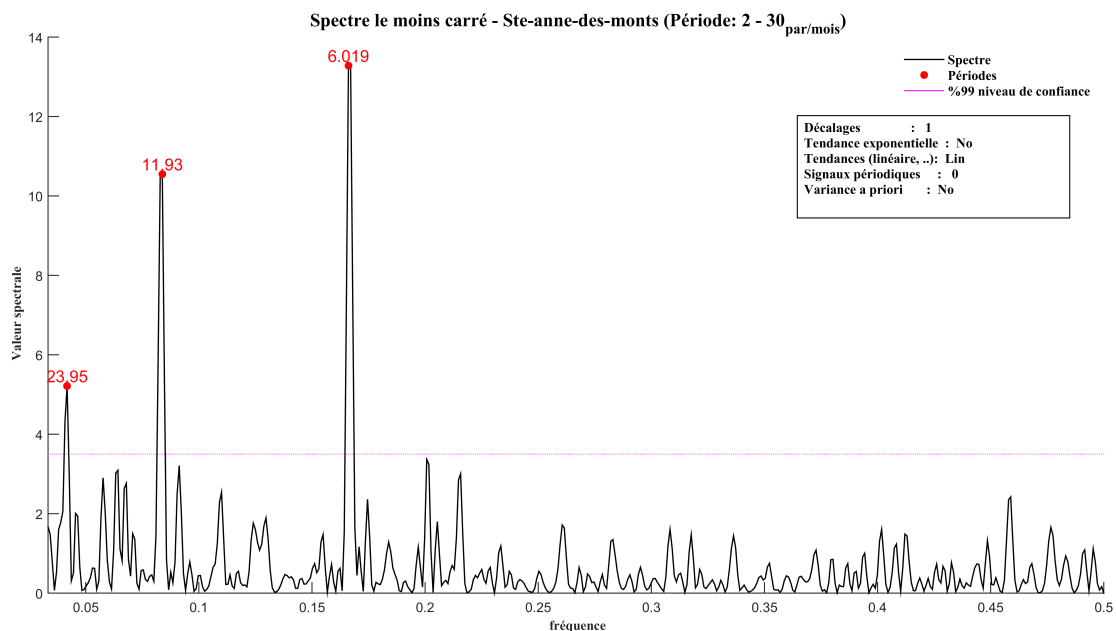
---



---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
Sept-iles	7.06	0.81	0.03	82.3	0.02	58.1




---

---

### Analyse ASMC

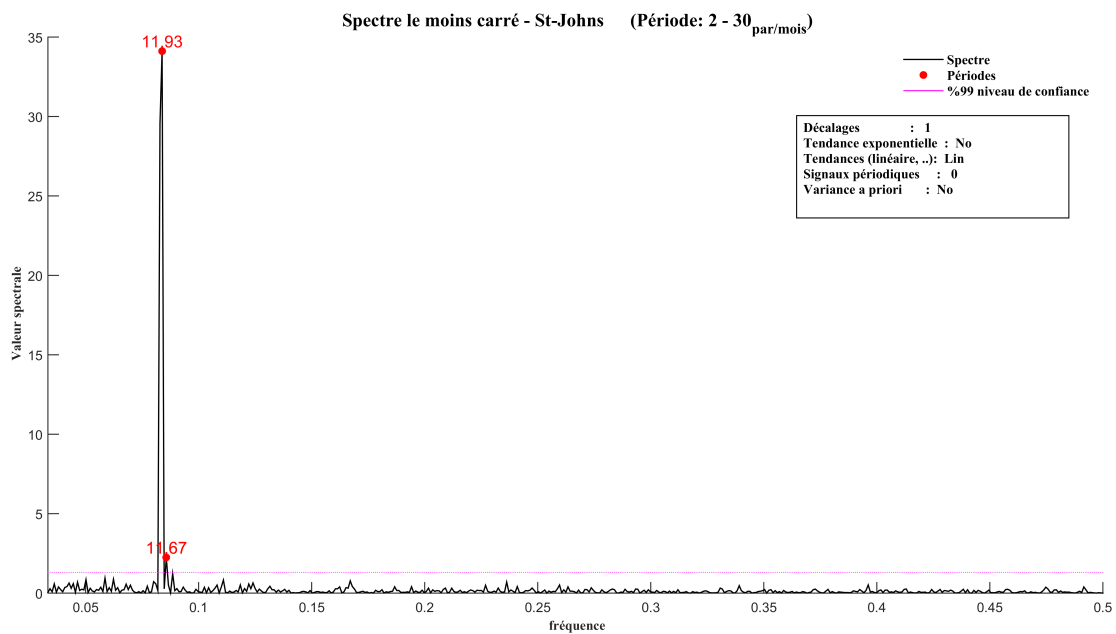
	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		-2.5 mm/an	0.4		
Annuelle	11.93	0.02	0.00	295.7	0.2
Semi-annuelle	6.02	0.03	0.00	34.7	0.2

---

---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
Ste-monts	7.051	-2.54	0.02	295.6	0.03	34.7




---

---

### Analyse ASMC

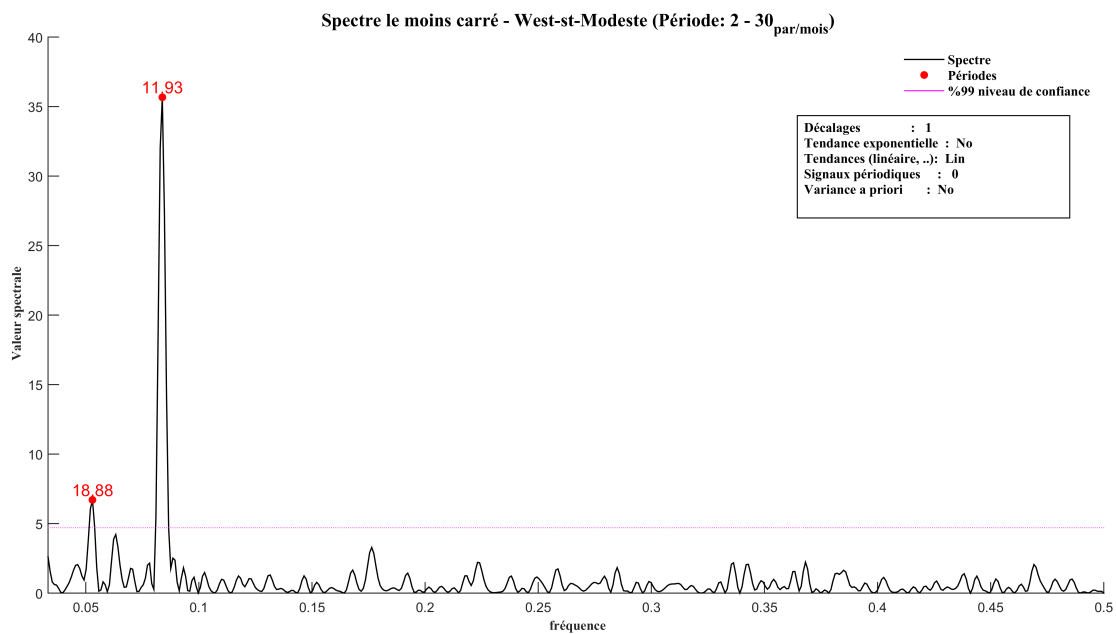
	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		2.0 mm/an	0.2		
Annuelle	11.93	0.08	0.00	34.8	0.2
Semi-annuelle					

---

---

### Analyse harmonique

	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
St-Johns	6.943	1.98	0.08	34.8		




---



---

### Analyse ASMC

	Période (mois)	Amp. (m)	sigma (m)	Phase (°)	sigma (°)
Tendance linéaire		0.7 mm/an	0.9		
Annuelle	11.93	0.09	0.01	357.7	0.5
Semi-annuelle					

---



---

### Analyse harmonique

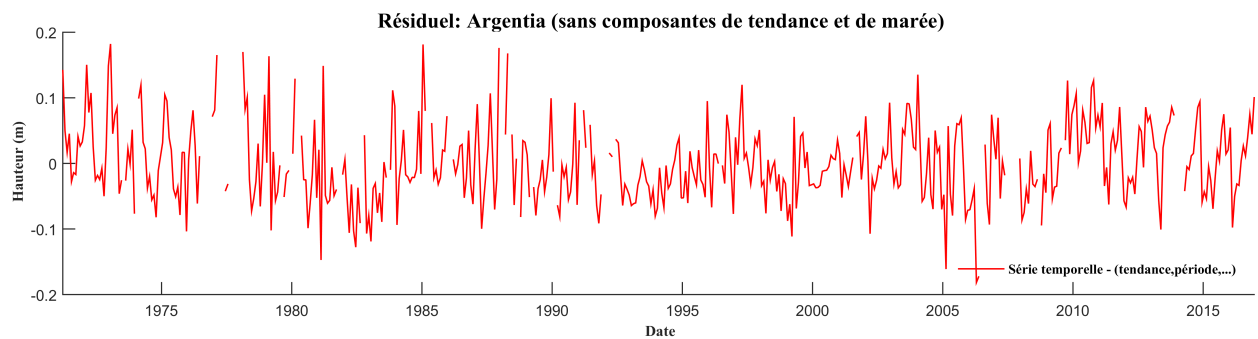
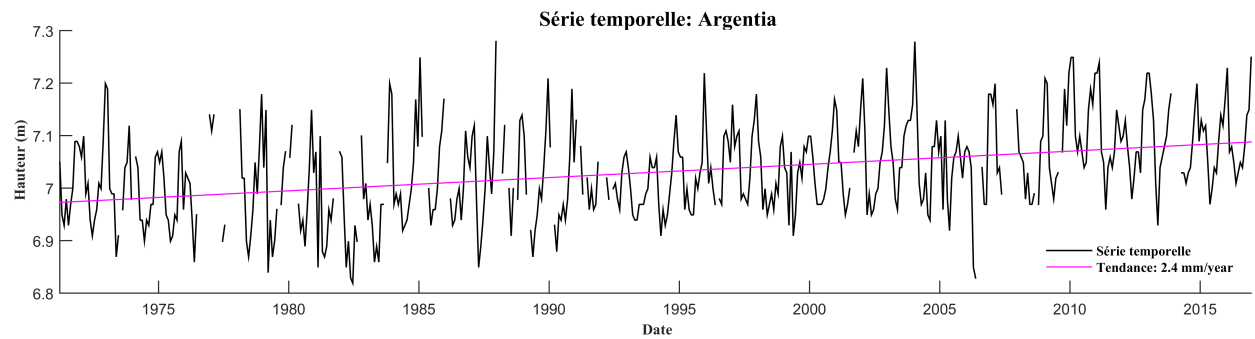
	Bias (m)	Tendance (mm/an)	Annuelle amp. (m)	Annuelle phase (°)	Semi-ann. amp. (m)	Semi-ann. phase (°)
West-Modeste	6.953	0.66	0.09	357.6		

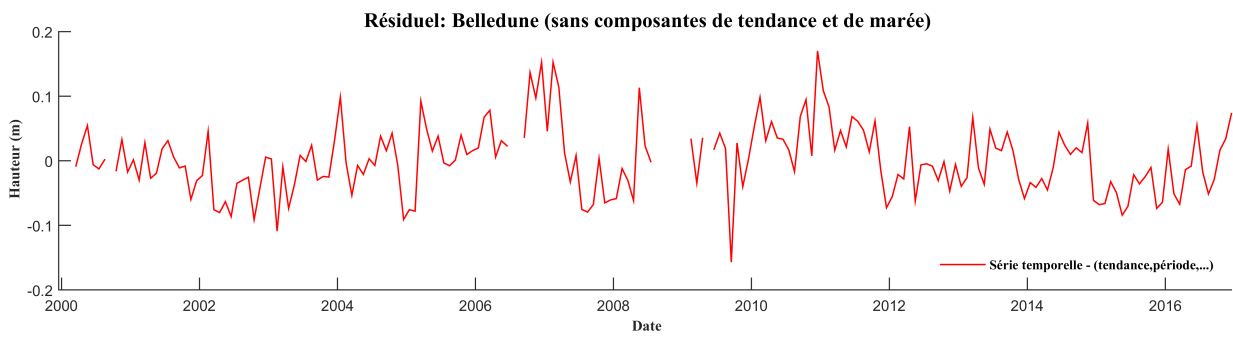
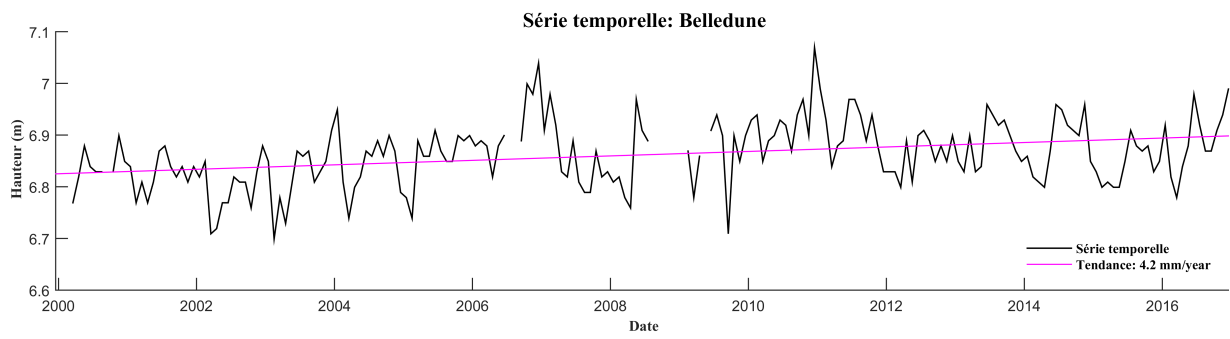
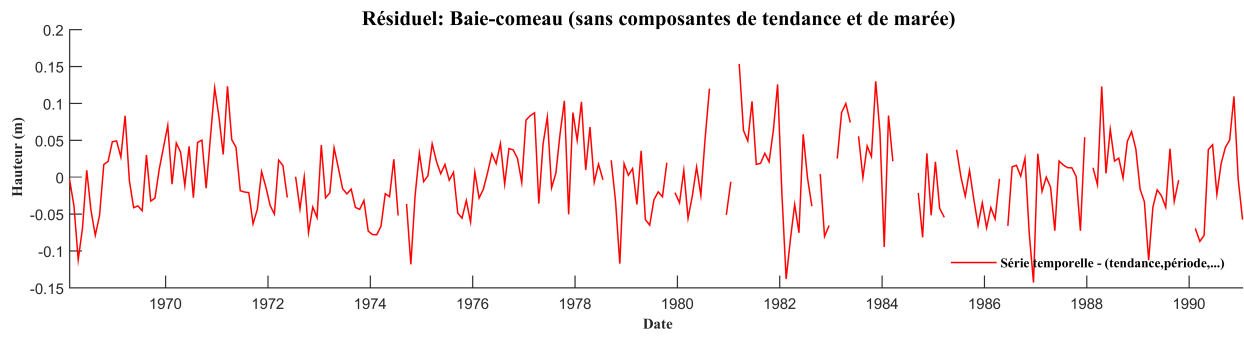
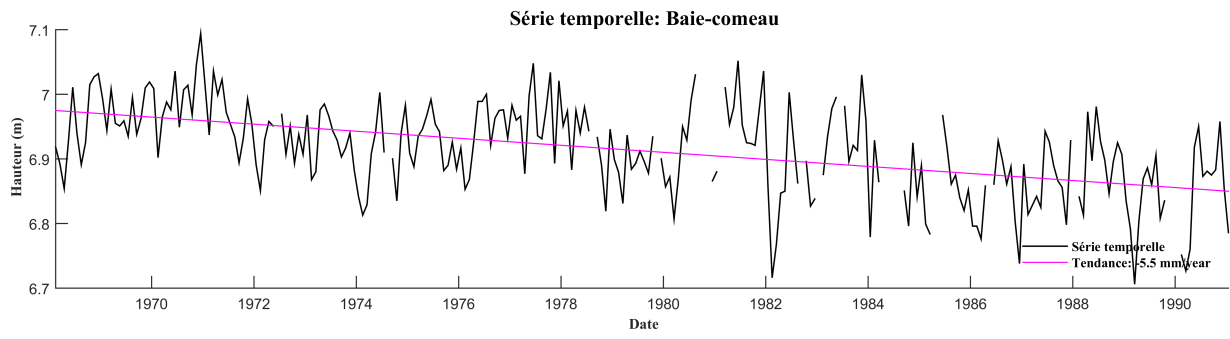


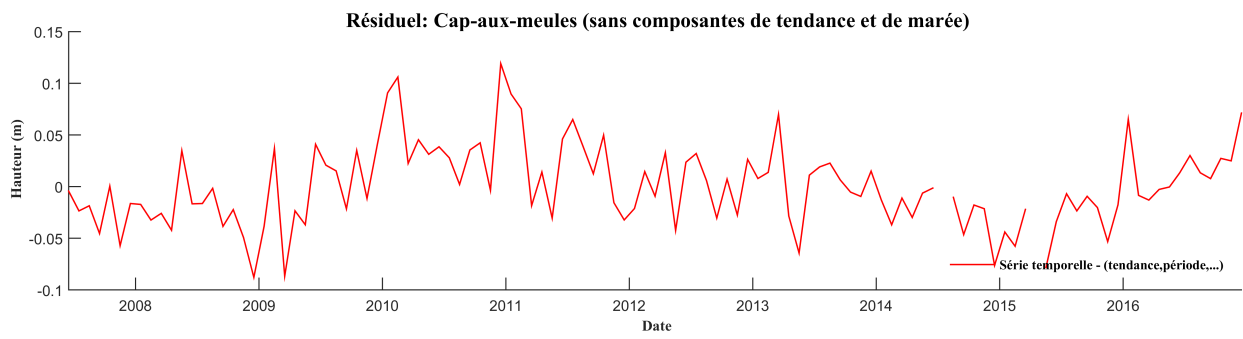
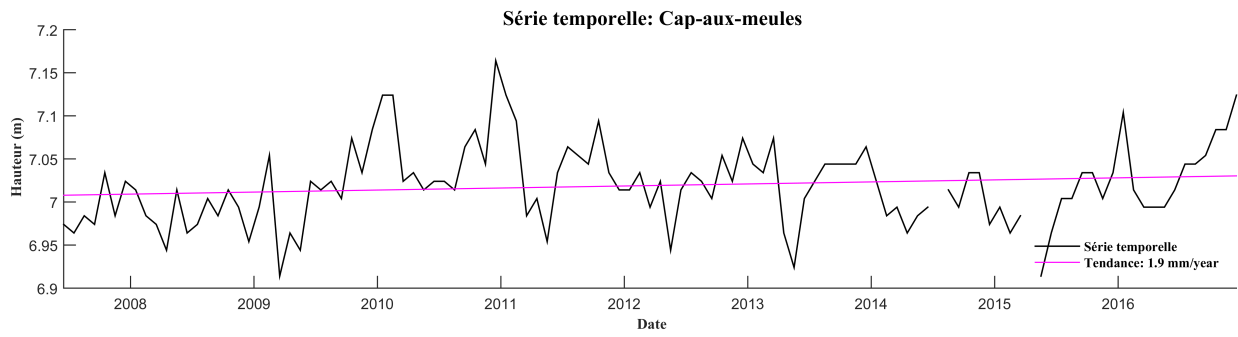
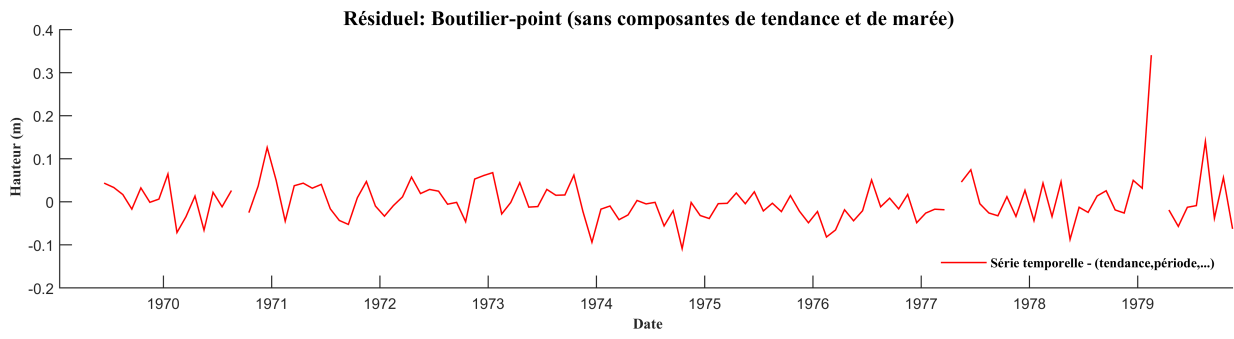
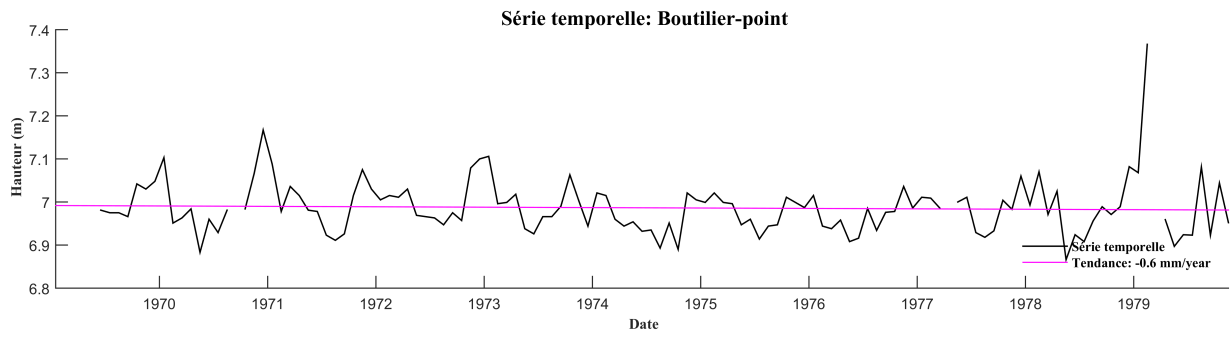


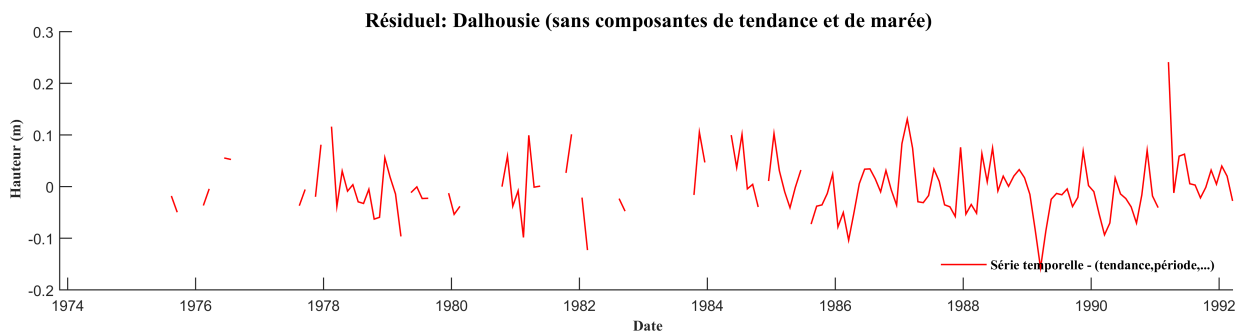
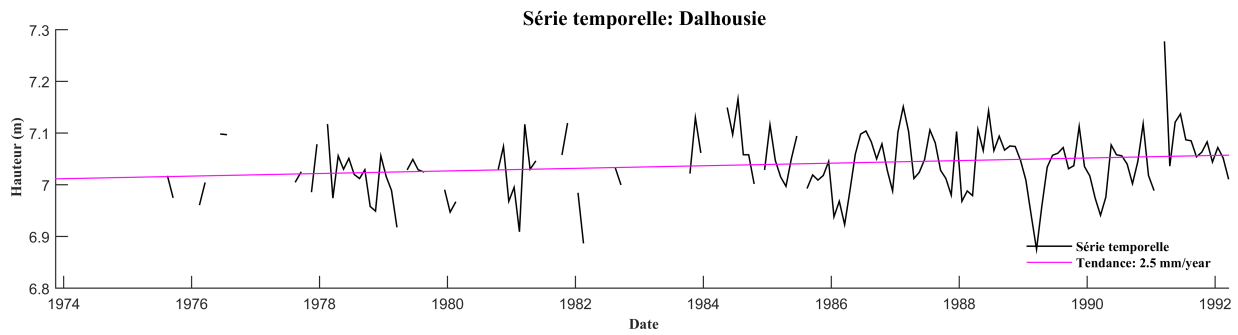
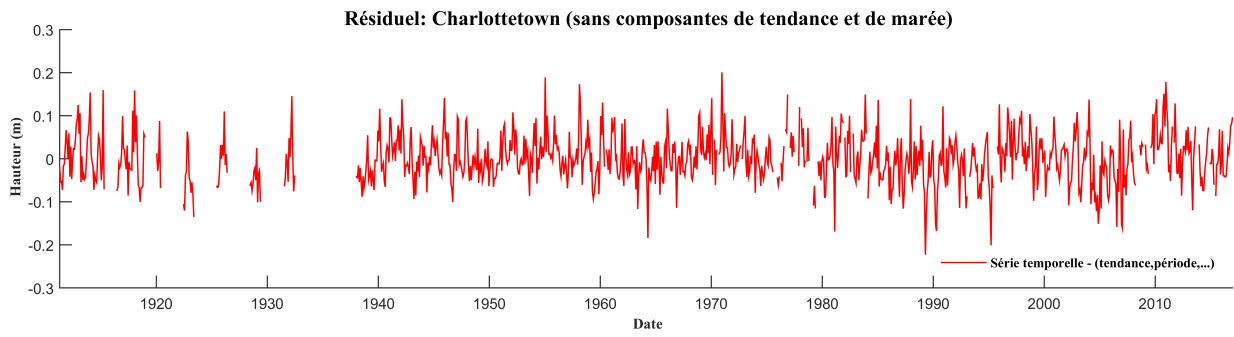
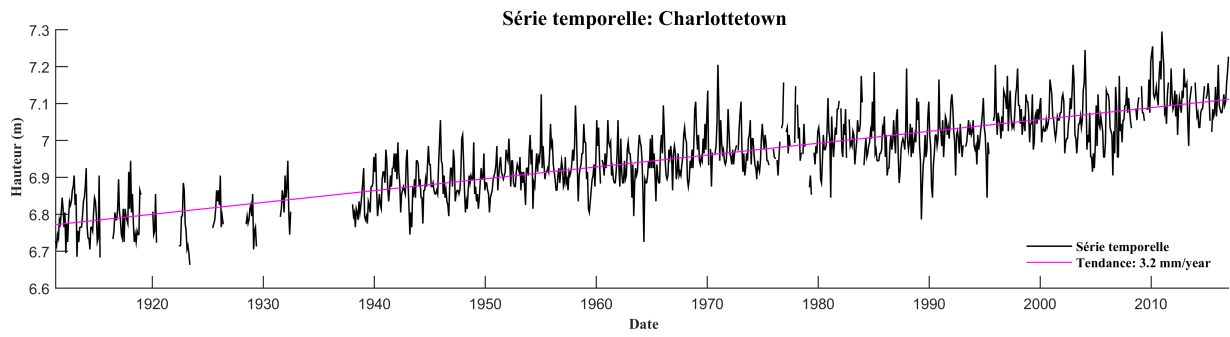
# Annexe F

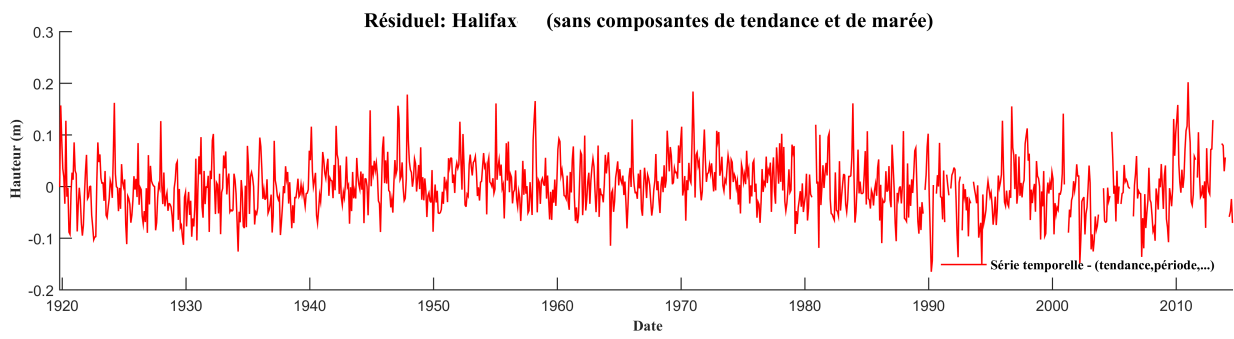
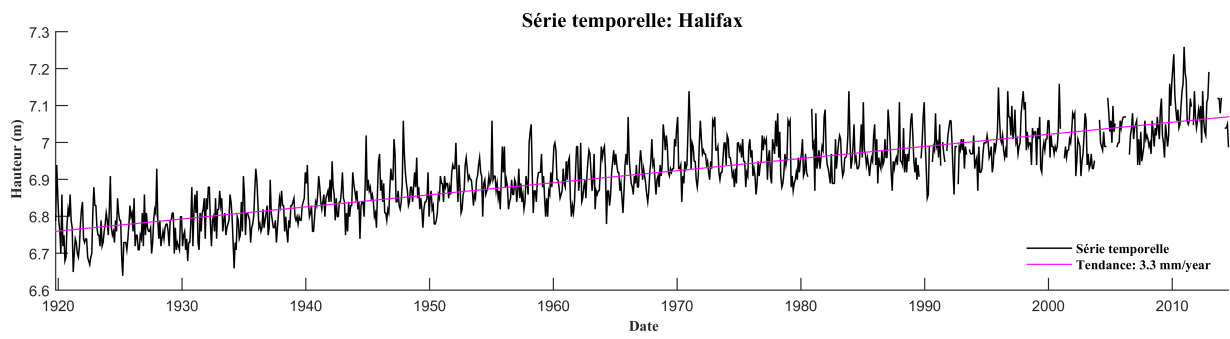
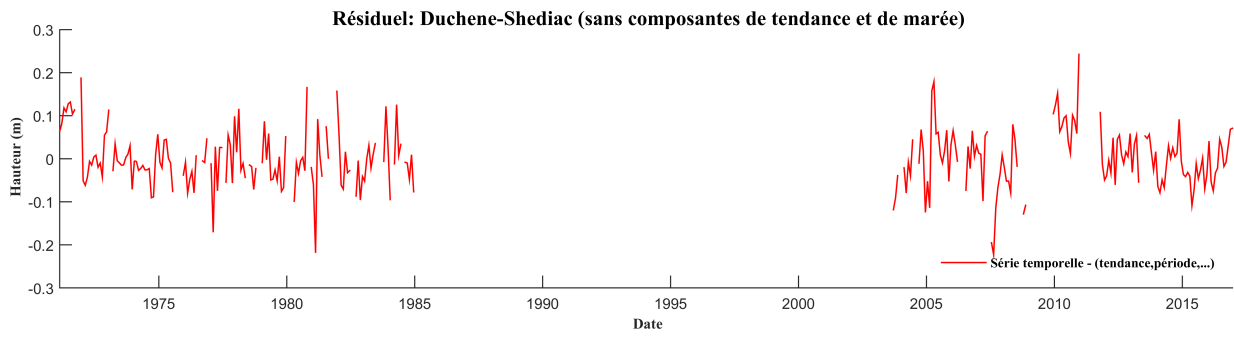
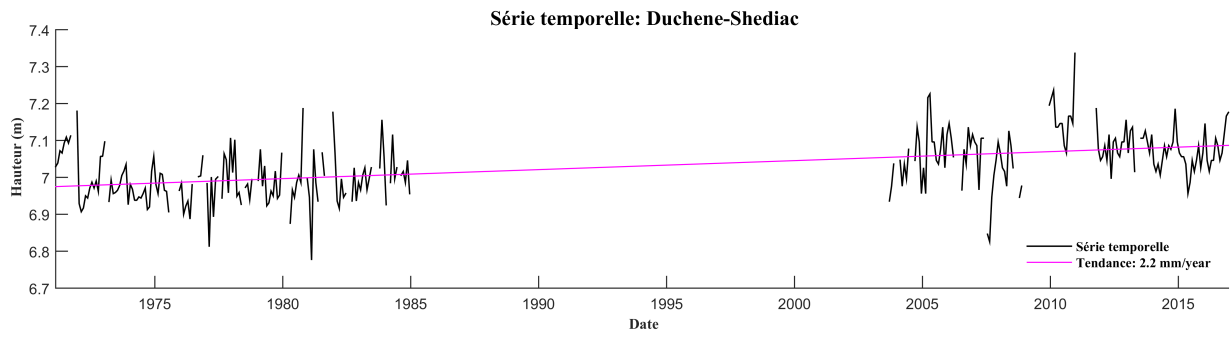
## Valeur NMM et résidus des données marégraphiques

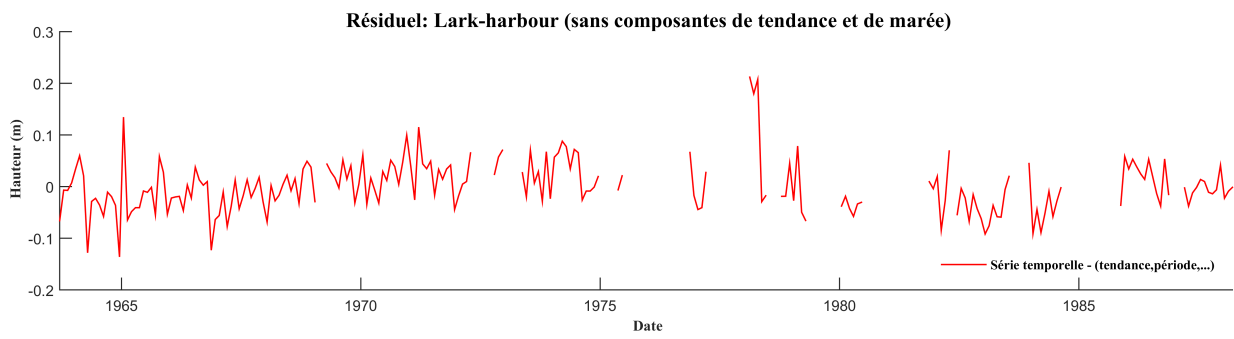
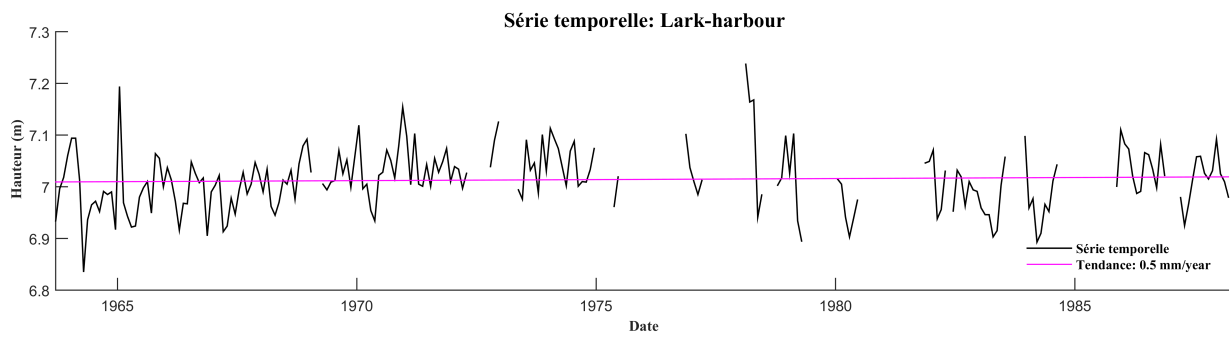
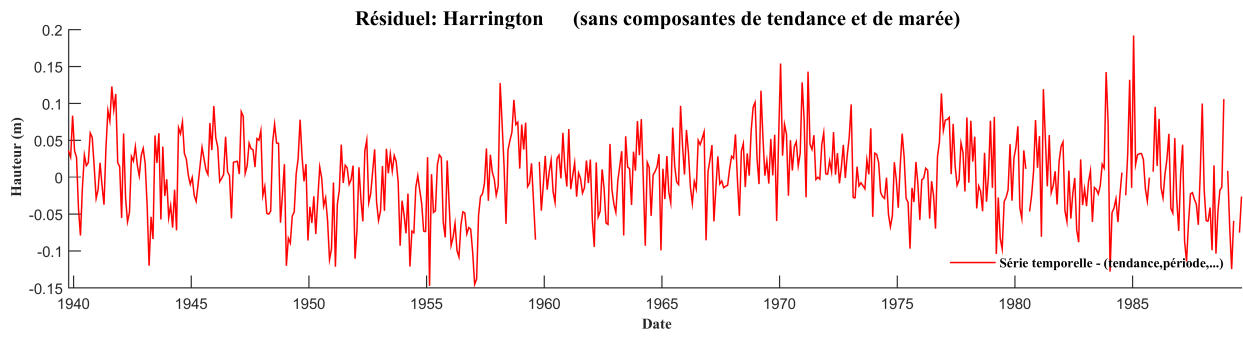
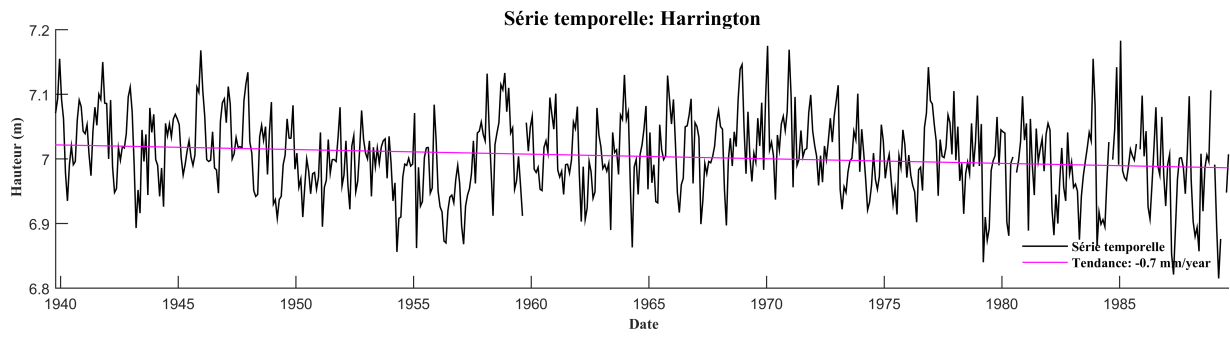


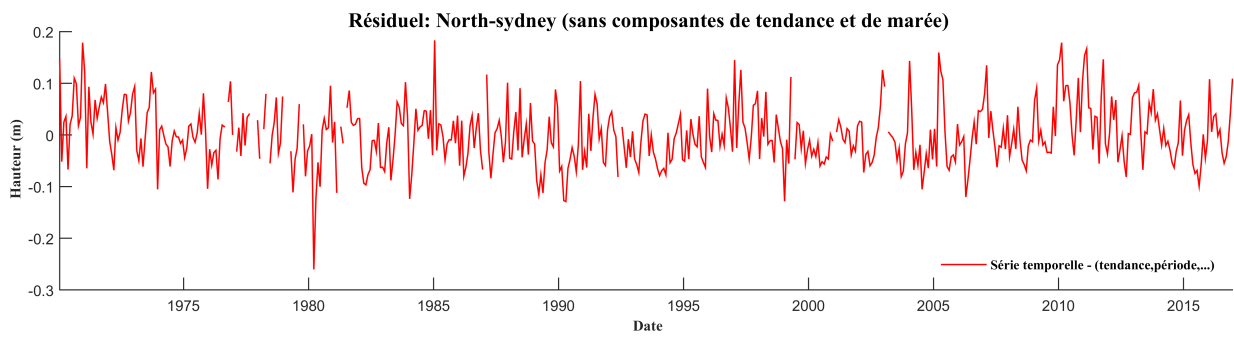
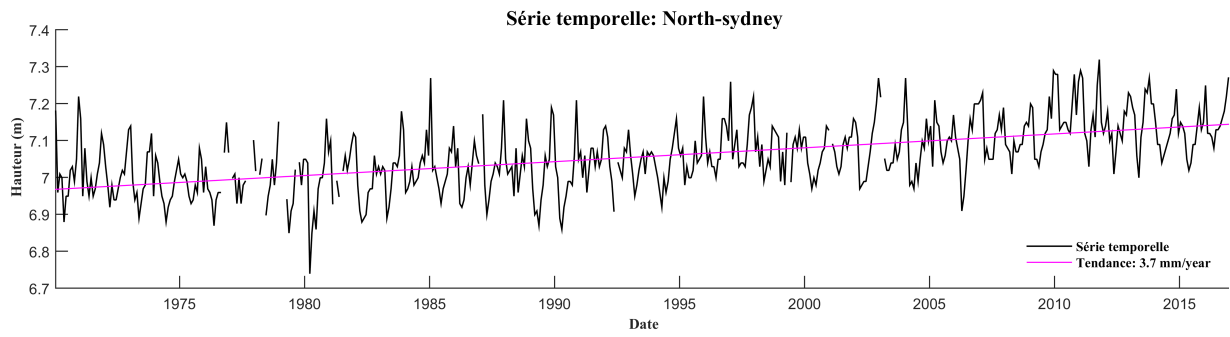
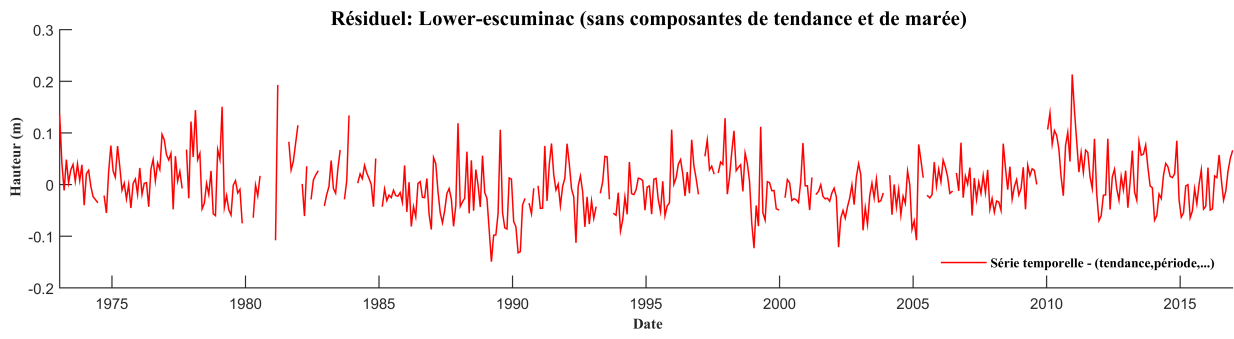
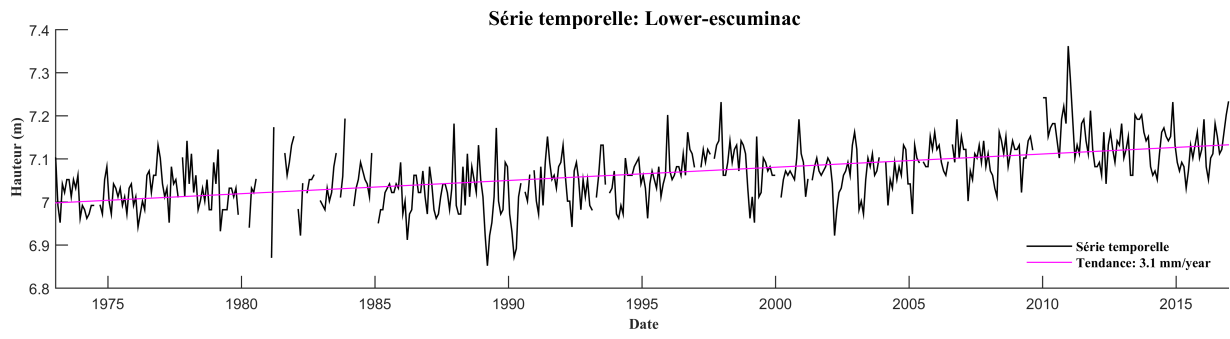


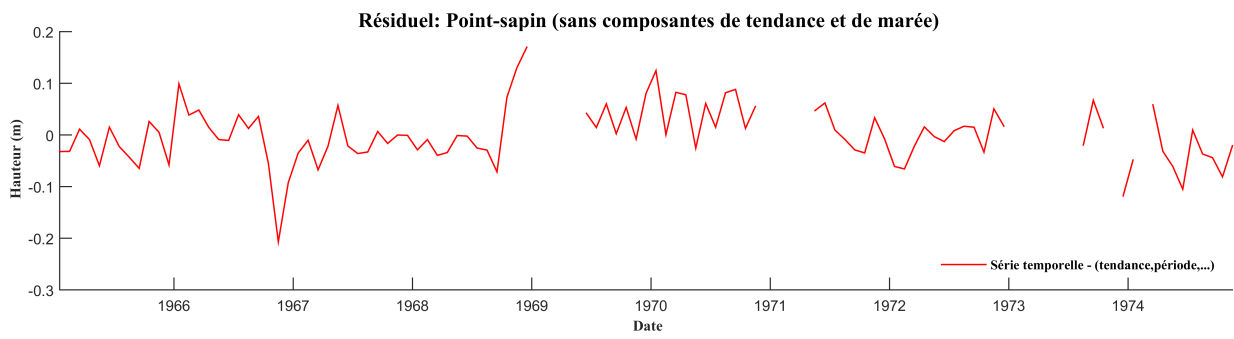
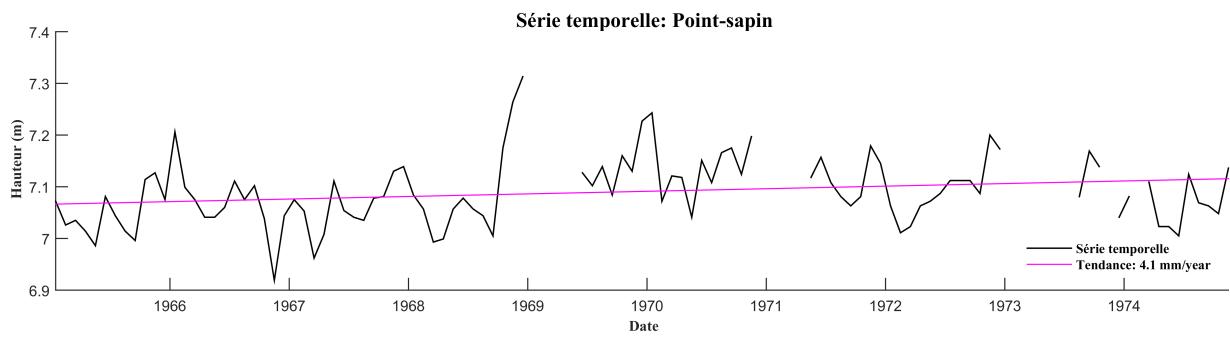
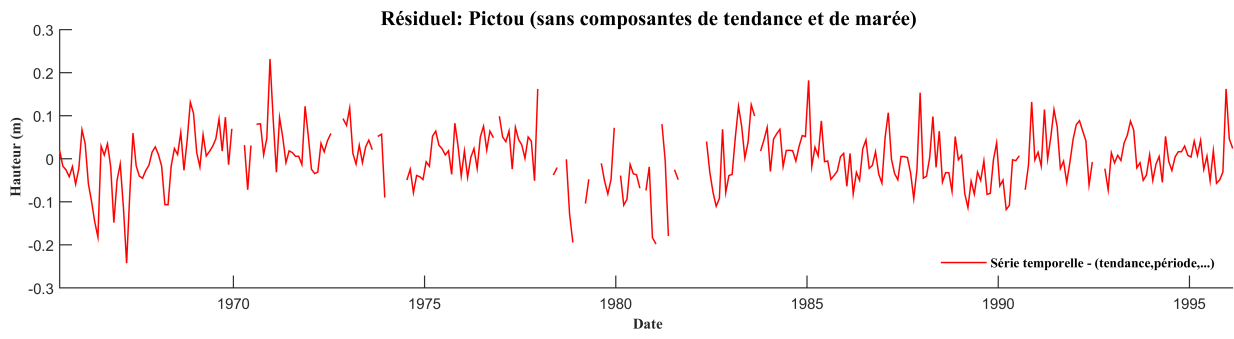
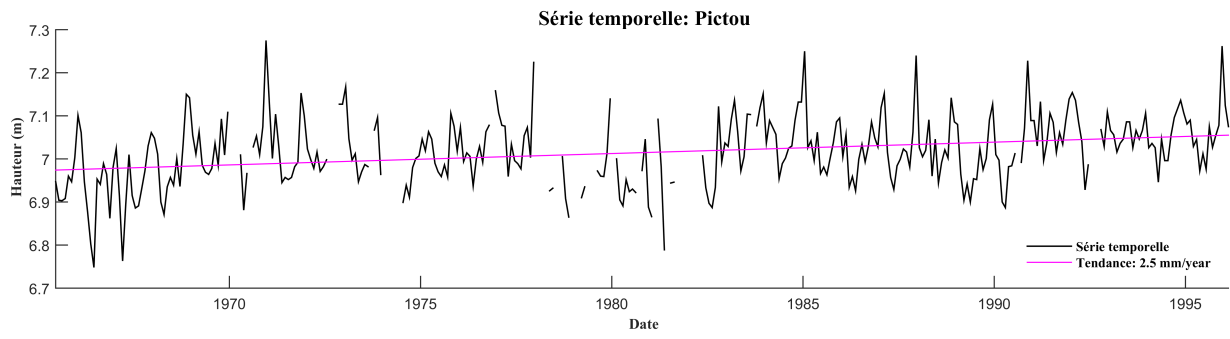




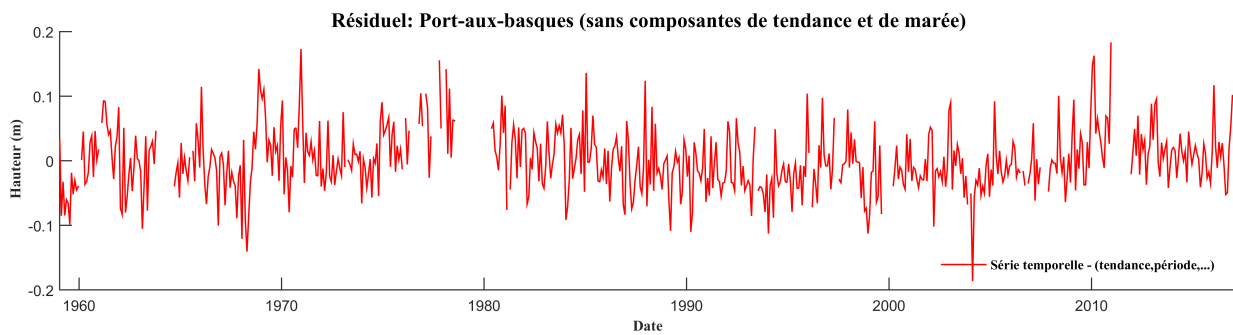
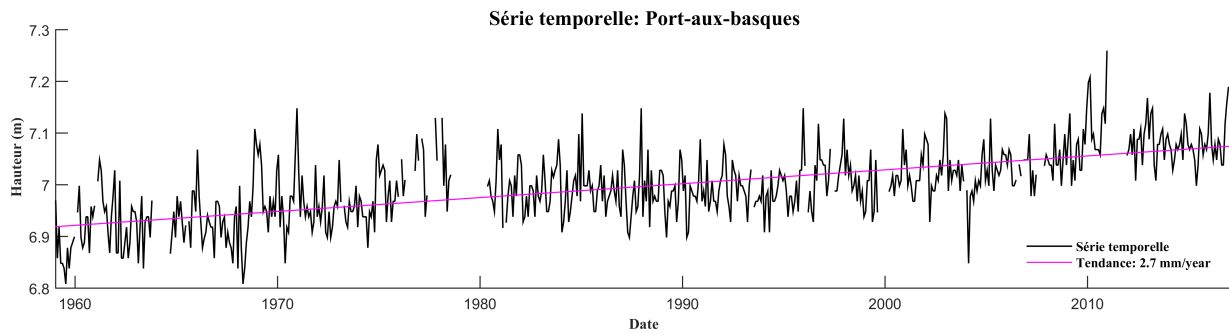
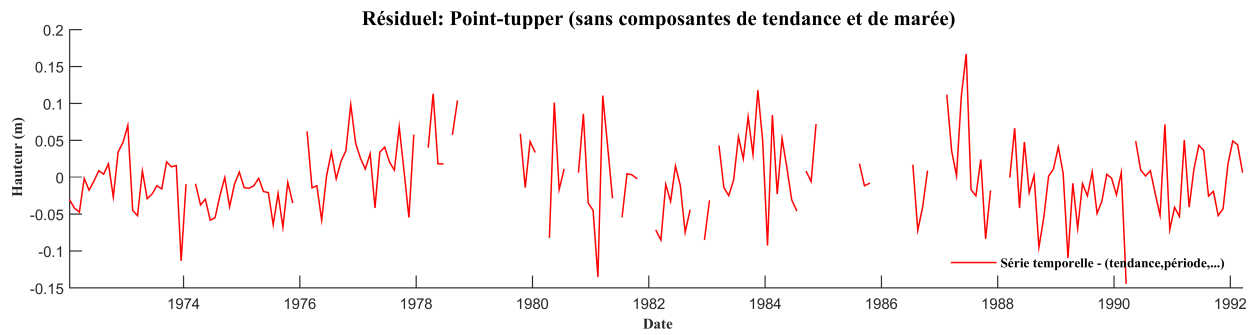
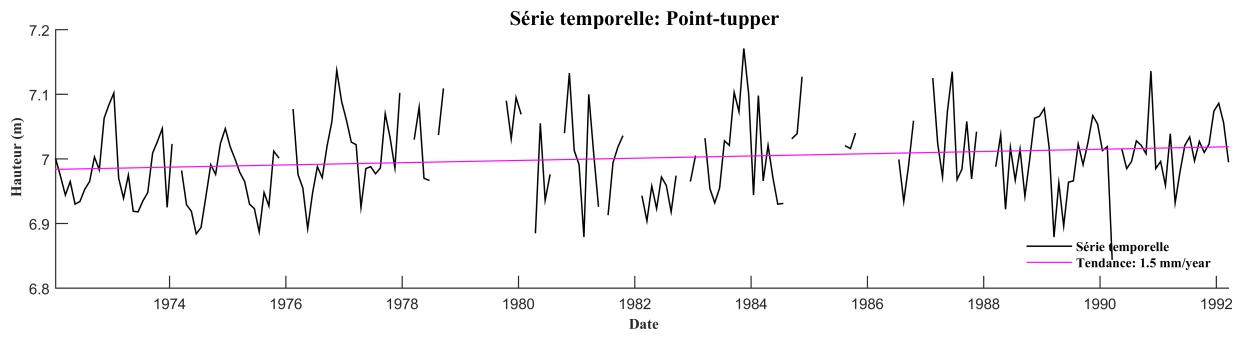


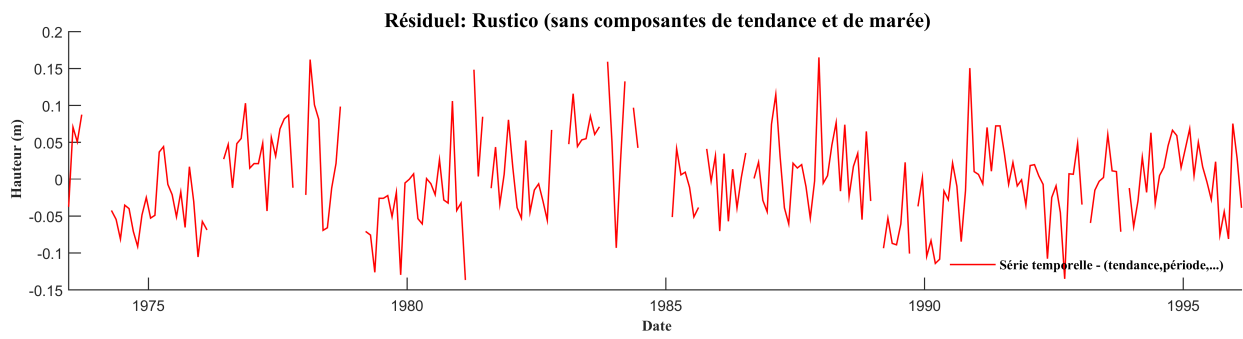
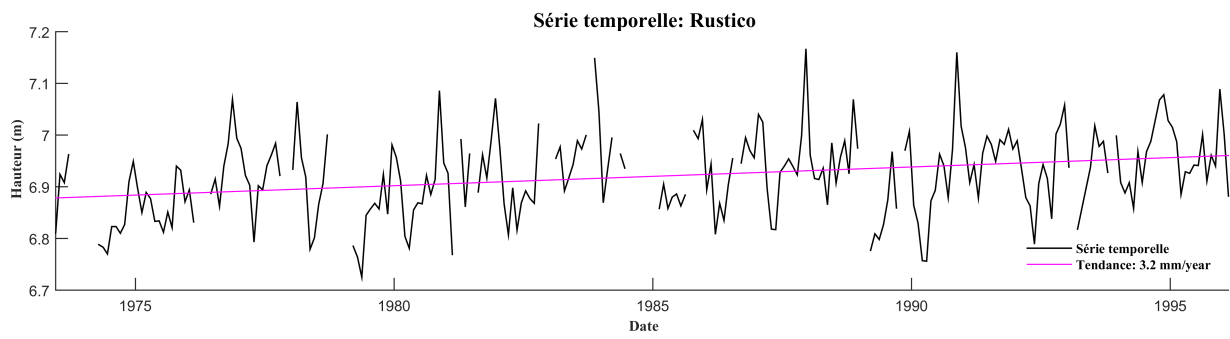
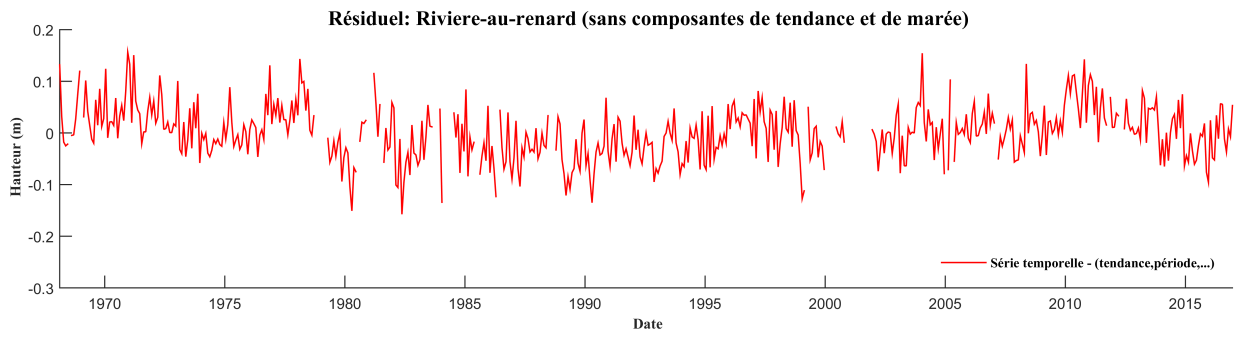
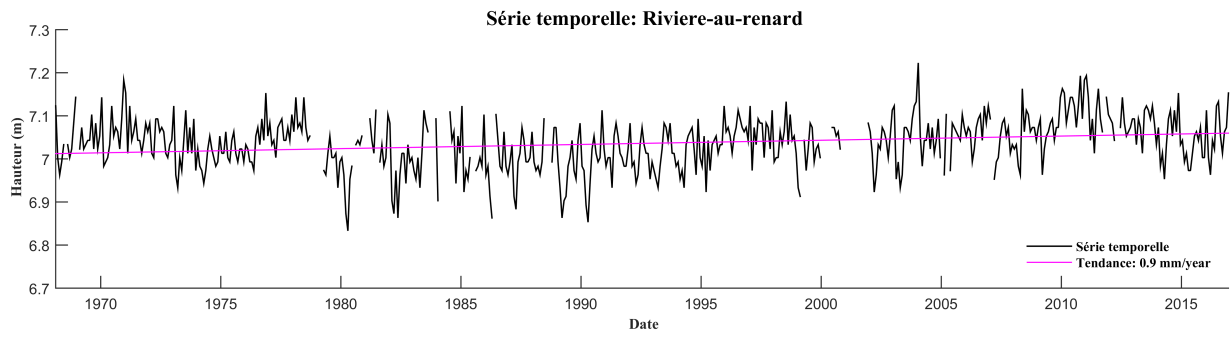


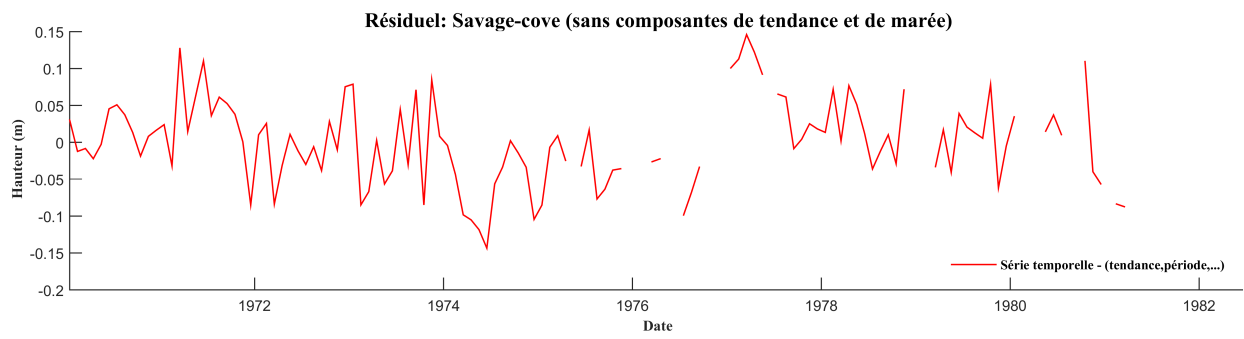
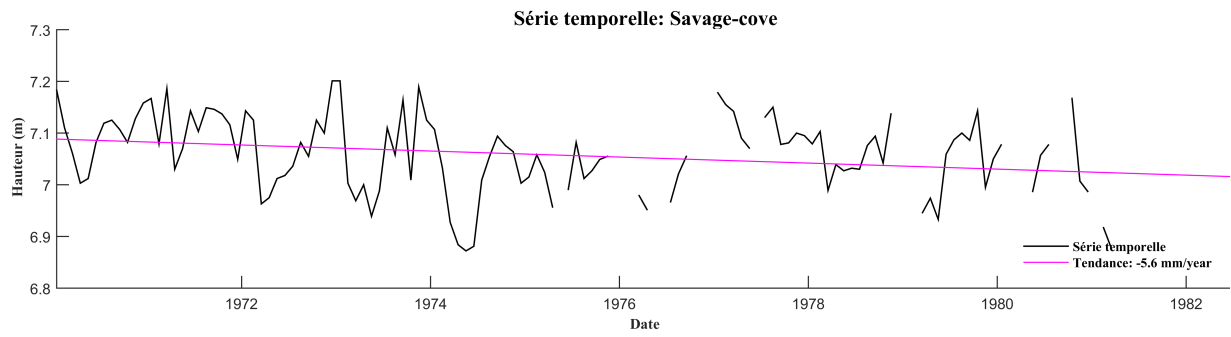
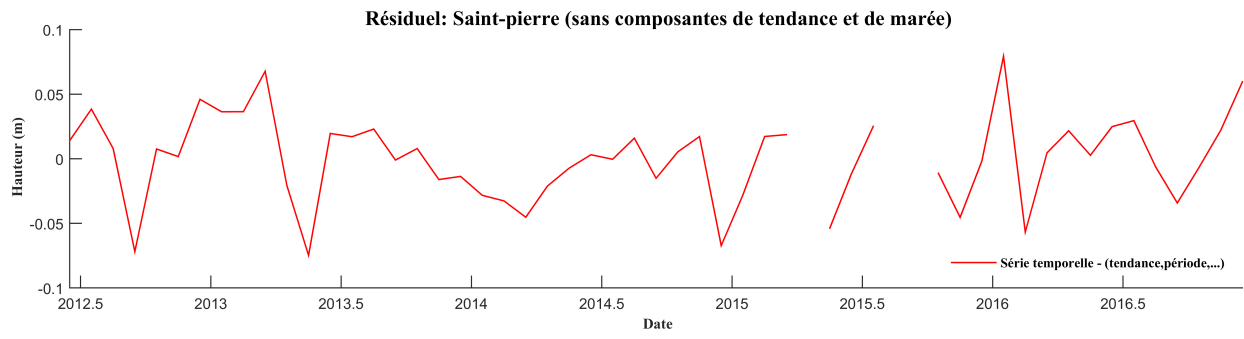
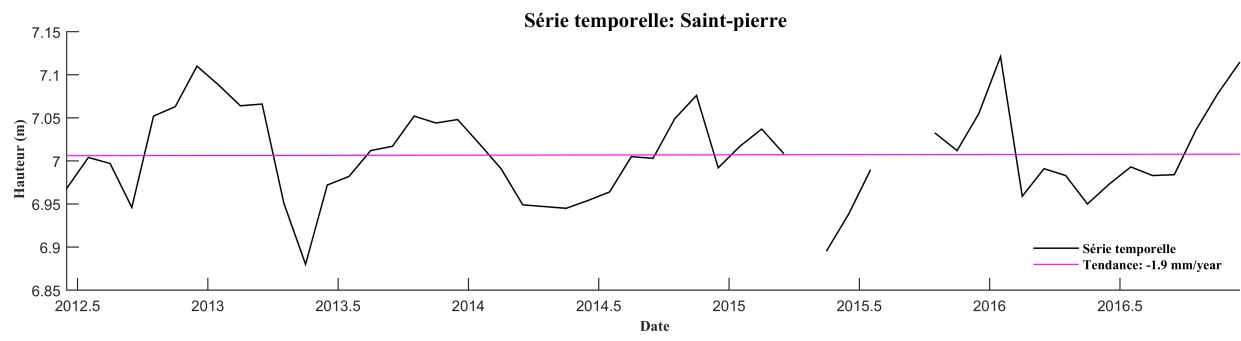


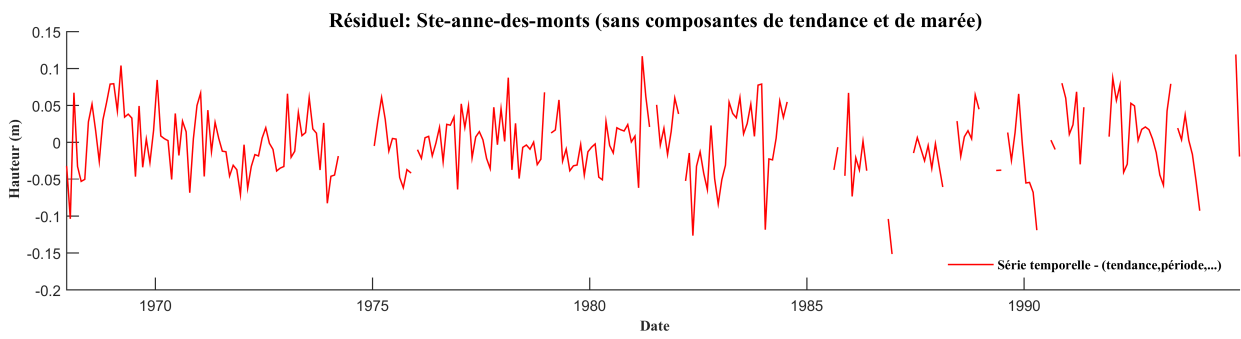
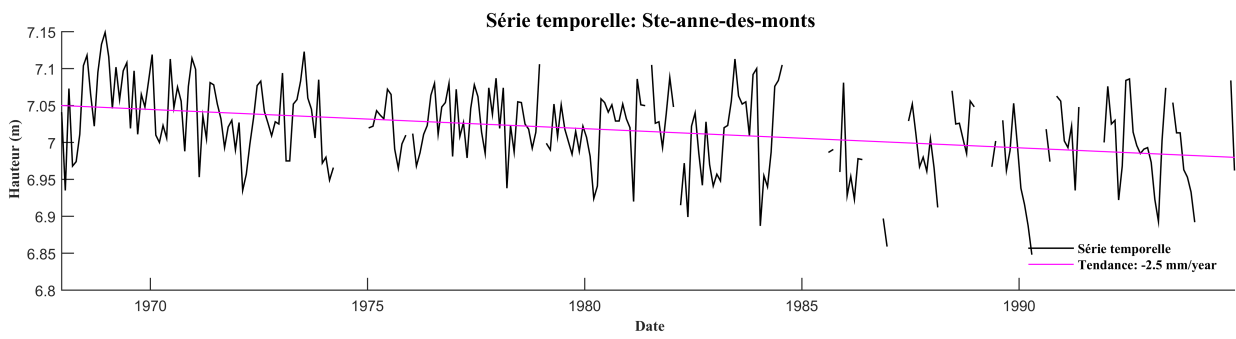
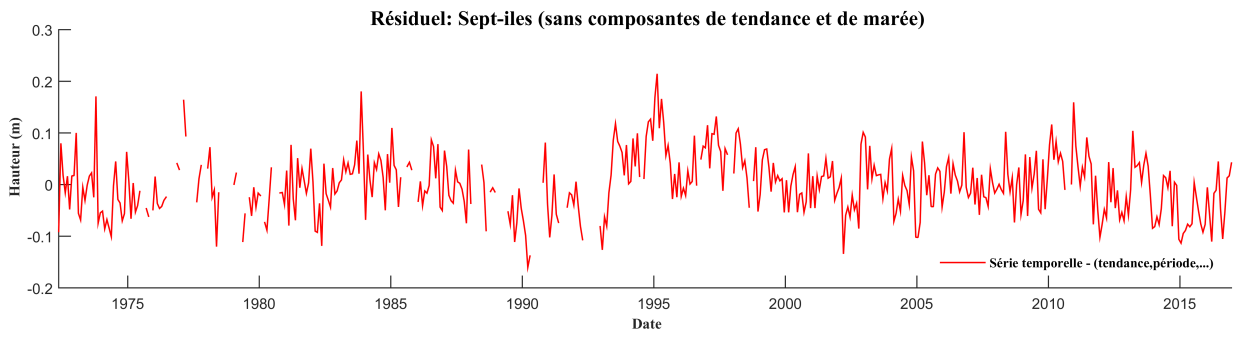
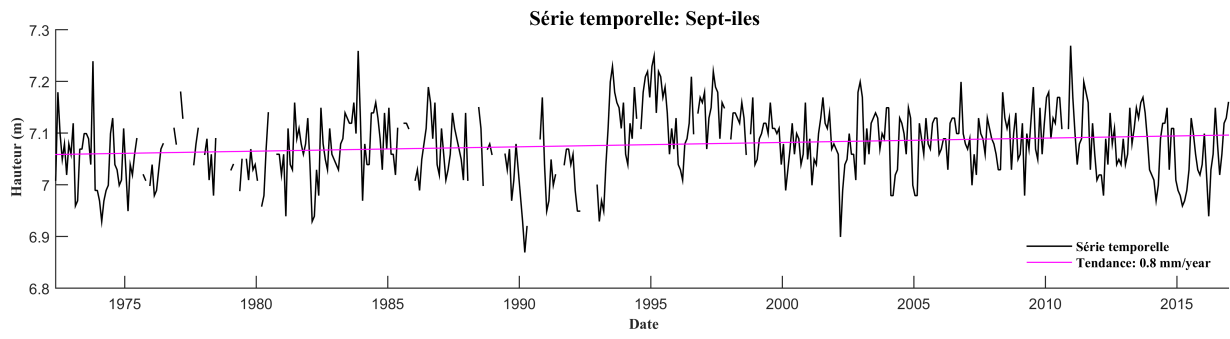


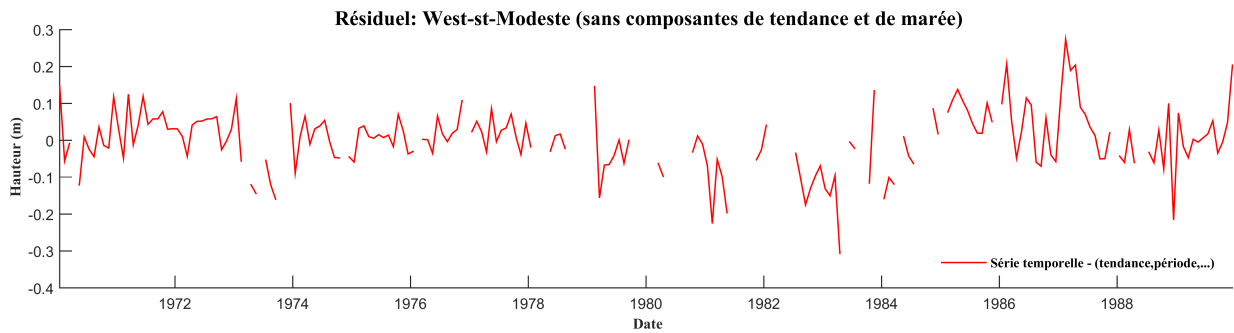
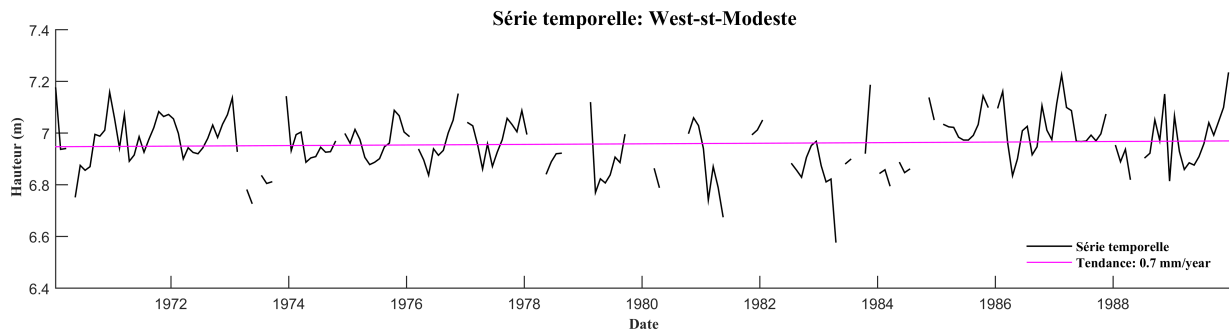
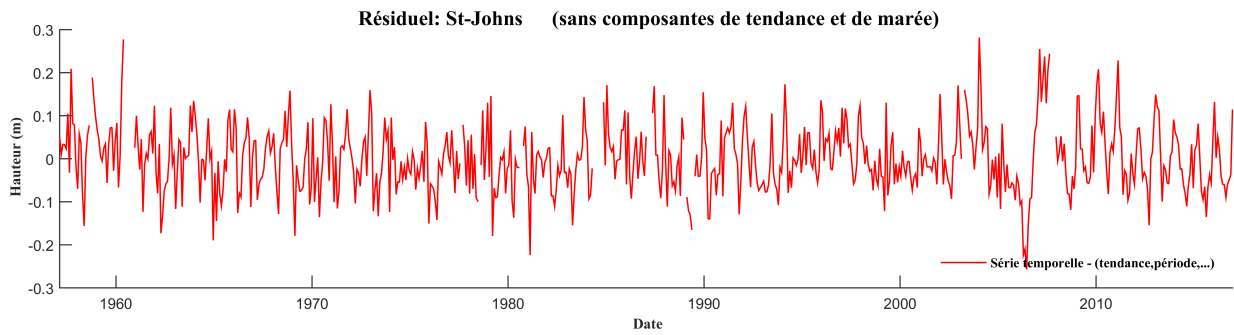
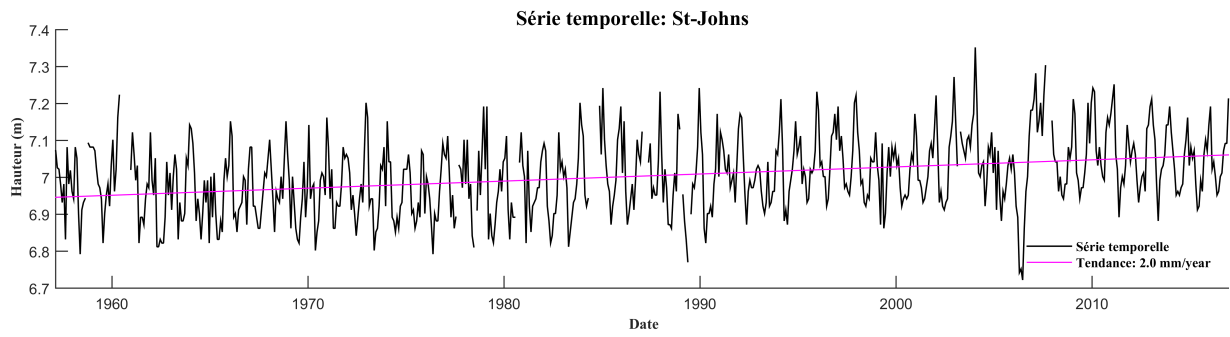














# Annexe G

## Valeur NMM et résidus des données altimétriques satellitaires

