



HAL
open science

Surveillance de santé structurale des ouvrages d'art incluant les systèmes de positionnement par satellites

Nicolas Manzini

► **To cite this version:**

Nicolas Manzini. Surveillance de santé structurale des ouvrages d'art incluant les systèmes de positionnement par satellites. Structures. Université Paris-Est, 2020. Français. NNT : . tel-03143785

HAL Id: tel-03143785

<https://hal.science/tel-03143785v1>

Submitted on 17 Feb 2021

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

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



Thèse présentée pour obtenir le grade de :

Docteur de l'Université Paris-Est

École doctorale : Sciences, Ingénierie et Environnement

Spécialité : Génie civil

Par

Nicolas Manzini

Titre

**Surveillance de santé structurale des ouvrages
d'art incluant les systèmes de positionnement
par satellites**

*Structural health monitoring of civil infrastructures including
satellite positioning systems*

Soutenue le 4 novembre 2020, devant le jury composé de :

M. BRUHWILER Eugen	<i>Président du jury</i>
M. BRIOLE Pierre	<i>Rapporteur</i>
M. SCHOEFS Franck	<i>Rapporteur</i>
M. BROSSAULT Marc-Antoine	<i>Examineur</i>
Mme. CHATZI Eleni	<i>Examinatrice</i>
M. KASSER Michel	<i>Examineur</i>
M. ORCESI André	<i>Directeur de thèse</i>
M. THOM Christian	<i>CoDirecteur de thèse</i>
M. BOTTON Serge	<i>Invité</i>
M. ORTIZ Miguel	<i>Invité</i>

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre Sites, l'UGE et l'IGN, avec des intervenants répartis entre Paris, Lyon, et Nantes. S'organiser et suivre un projet avec de tels écarts est souvent une tâche difficile... Pour cette raison, je voudrais en premier lieu remercier Messieurs André Orcesi, Christian Thom, Marc-Antoine Brossault, Miguel Ortiz, Serge Botton, et aussi Antoine Clément, pour leur encadrement au cours de cette thèse. Encadrement qui a conjugué à la fois précision, rigueur, mais aussi bienveillance et sympathie. Malgré les distances, je n'aurais pu souhaiter de meilleurs encadrants.

Je tiens également à montrer ma gratitude envers les membres du jury : le Professeur Eugen Brühwiler, pour avoir accepté de présider ce jury, le Professeur Franck Schoefs et le Directeur de Recherche Pierre Briole, pour avoir été rapporteurs de mon travail, et également les Professeurs Eleni Chatzi et Michel Kasser qui m'ont fait l'honneur de lire ce mémoire et de participer à la soutenance de cette thèse en tant qu'examineurs. À cette occasion, je tiens aussi à montrer ma reconnaissance à Messieurs Bruno Godart, François Toutlemonde, Laurent Labourie et Patrick Losset pour leurs nombreux conseils et pour la relecture de mon manuscrit.

Je souhaite remercier tous les adorables collègues du laboratoire EMGCU, ainsi que la direction MAST. Au cours de ces trois années, passées à cheval entre le laboratoire et le bureau, j'ai eu beaucoup de chance de rencontrer et de côtoyer des collègues de laboratoire à la fois ouverts, pointus, sérieux, mais qui savent également être des gens terriblement sympathiques et bienveillants. Je tiens à vous remercier pour tout ce que vous m'avez apporté, qu'il s'agisse de conseils, de connaissances, d'aide pour les manipulations expérimentales, et plus généralement de bons souvenirs. J'en profite également pour saluer les collègues du laboratoire PICS-L, qui ont eu la gentillesse de m'accueillir et de me supporter pendant un petit semestre. Merci à vous tous.

Je tiens également à remercier tous mes collègues Sitiens. Que ce soit au niveau d'avis éclairés, de soudures que je suis incapable de faire proprement, ou encore l'implication dans des affaires Sitiennes et la recherche de cas d'application ; j'ai eu la chance d'avoir des collègues intéressés et intéressants, tout en étant bienveillants. Je tiens à le préciser car ce n'est vraiment pas quelque chose d'acquis, je ne pense pas que l'on trouve beaucoup d'entreprises avec des collègues ayant un tel esprit dynamique et positif. Merci pour tout. Une pensée particulière pour Sébastien, qui m'a supporté pendant ces 3 années, tout en étant toujours un vrai modèle. Enfin je tiens encore une fois à remercier la direction de Sites, pour avoir cru en ce projet il y a 4 ans lorsque je débarquais avec André pour présenter un sujet sur des GPS montés sur une poutre dans le parking du campus... Il fallait un peu d'audace comme qui dirait.

Je profite de l'occasion pour adresser ma reconnaissance à mes amis, qui se reconnaîtront, grâce à qui ce long périple a été plus facile à supporter.

Enfin, je tiens à remercier ma famille, en particulier Manu, Julie, Adrien, Héloïse, Alice, Nanou, Nadine, Serge, et Roland, qui ont toujours fait preuve d'un soutien indéfectible, même dans mes erreurs, et qui ont toujours été à la hauteur, même lorsque moi je ne l'étais pas. Merci à vous tous.

À Nadine. J'aurais souhaité que tu puisses lire ces pages.

RESUME

La surveillance de santé structurale, ou structural health monitoring (SHM), a pour objectif de caractériser et suivre au cours du temps le comportement et les performances de structures de génie civil. Le SHM repose sur l'établissement d'indicateurs de santé ou de performance permettant de détecter, et si possible localiser, quantifier ou prédire un endommagement de la structure. Aujourd'hui, le SHM exploite encore très peu les déplacements absolus d'une structure, la majorité des capteurs étant limités à des mesures locales ou relatives. Le Global Positioning System (GPS) est accessible au grand public depuis l'an 2000. Il a depuis été rejoint par d'autres systèmes aux principes similaires, formant les Global Navigation Satellite Systems (GNSS), qui offrent des solutions de positionnement absolu pouvant atteindre une précision millimétrique.

Cette thèse prend place dans le contexte où les GNSS apparaissent comme de bons candidats pour compléter des instrumentations SHM traditionnelles. Des résultats d'études récentes sur des solutions GNSS à bas coût (antennes de petite taille, récepteurs monofréquence) ont motivé l'orientation des travaux sur l'utilisation de ce type de solutions. Le compromis effectué sur les performances matérielles est contrebalancé par l'utilisation d'un traitement spécifique et par la possibilité de déployer plus de capteurs sur un ouvrage pour un investissement identique. Ces travaux se concentrent sur les structures de grande taille, comme les ouvrages d'art ou les immeubles de grande hauteur, dont le suivi est complexe en raison de leurs dimensions, et qui sont plus à même de produire des déplacements observables par des stations GNSS. La finalité des travaux entrepris est de répondre à la question suivante : peut-on, et comment, utiliser des stations GNSS à bas coût pour détecter des anomalies ou un changement sur une structure de génie civil ?

La première partie de cette thèse a été consacrée à l'évaluation expérimentale de solutions GNSS à bas coût. Différentes combinaisons d'antennes et de récepteurs ont été évaluées en utilisant un positionnement relatif sur la phase, afin de sélectionner une station efficiente. En parallèle, l'impact de plusieurs paramètres de calcul ont été évalués dans des scénarios expérimentaux fixes et dynamiques afin de proposer une solution GNSS, comprenant matériel et traitement, optimale. Un positionnement infracentimétrique est obtenu avec la solution sélectionnée. La seconde partie de la thèse considère les données issues de l'instrumentation de deux ouvrages d'art par des réseaux de capteurs GNSS intelligents, les Geocubes, dont les composantes sont similaires à celles évaluées dans la première partie. L'analyse des séries par comparaison et corrélation aux températures et gradients internes des structures a permis de valider la capacité des stations déployées à suivre la réponse des ouvrages aux effets environnementaux. Leur étude a également mis en avant la redondance des observations grâce à l'étude des corrélations plus ou moins fortes entre les séries GNSS acquises. La dernière partie de la thèse est consacrée à l'utilisation de modèles prédictifs des séries GNSS pour la détection d'anomalies sur ouvrage. En l'absence de données thermiques et de modèles mécaniques complets et disponibles pour les structures étudiées, l'approche des modèles par apprentissage exploitant les données d'un réseau de capteurs GNSS a été choisie. La comparaison de plusieurs outils de régression a permis de sélectionner les réseaux de neurones récurrents (RNN) comme outil privilégié. Enfin, une stratégie de détection des anomalies, exploitant plusieurs modèles prédictifs pour chaque série temporelle, a été proposée et testée sur des anomalies réelles observées, puis simulées.

Mots clefs : GPS, GNSS, positionnement, surveillance de santé structurale, ouvrages d'art

ABSTRACT

Structural health monitoring (SHM) aims to characterize and monitor the behaviour and performance of civil engineering structures over time. SHM relies on the definition of health or performance indicators in order to detect, and if possible locate, quantify or predict damage on the structure. Nowadays, SHM still makes little use of the absolute displacements of a structure, as the majority of the deployed sensors are limited to local or relative measurements. The Global Positioning System (GPS) has been fully available publicly since 2000. It has since been joined by other systems with similar characteristics, forming the Global Navigation Satellite Systems (GNSS), which can achieve absolute positioning with an accuracy up to a few millimeters.

This PhD thesis takes place in a context where GNSS solutions appear as good complementary tools to traditional SHM instrumentations. Results of recent studies using low-cost GNSS solutions (small antennas, single frequency receivers) have motivated this research work to focus on similar hardware. The decrease of hardware performance is offset by using some specific processing parameters, and by the possibility to deploy more sensors on a structure for a similar cost. This work focuses on large structures such as bridges, dams, or high-rise buildings, whose monitoring is complex due to their dimensions, and which are more likely to have displacements that can be detected with GNSS stations. The purpose of this work is to answer the following question: is it possible, and how, to use low-cost GNSS stations to detect abnormalities or changes in a structure's behaviour?

The first part of this thesis is dedicated to the experimental assessment of various low-cost GNSS solutions. Multiple combinations of antennas and receivers have been evaluated using relative phase positioning in order to select an efficient station. In parallel, several processing parameters have been evaluated in fixed and dynamic experimental scenarios, and an optimal GNSS solution, including hardware and processing, was selected. This solution is able to achieve sub centimeter accuracy. In the second part, datasets from two civil engineering structures equipped with smart GNSS sensor networks are studied. The components of the deployed sensors, the Geocube, are similar to those evaluated in the first part. Time series analysis through comparison and correlation with temperature data validated that the on-site low-cost GNSS stations are able to monitor the effect of environment on structural response. This study also highlights the redundancy of observations with various levels of correlations between the GNSS time series. The last part of this research is devoted to the use of predictive models of on-site GNSS time series for novelty detection. In the absence of complete thermal data or mechanical models available for the investigated structures, an approach using machine learning models with data from multiple sensors of a GNSS network was chosen. The comparison of several regression tools led to select recurrent neural networks (RNN) as the optimal tool. Finally, an automated novelty detection strategy, exploiting several predictive models for each sensor, was proposed and tested on both real and simulated anomalies.

Keywords: GPS, GNSS, positioning, structural health monitoring, engineering structures

TABLE DES MATIERES

Remerciements	i
Résumé	v
Abstract	vii
Table des matières	ix
Glossaire	xi
Introduction	1
I. Potentiel des GNSS pour la surveillance de santé structurale	3
I.1. Principes et objectifs de la surveillance d'ouvrages	4
I.2. Approches courantes d'instrumentation et de télésurveillance	7
I.2.1. Détection d'anomalie ou d'endommagement	7
I.2.2. Méthodes et outils usuels pour la surveillance des ouvrages d'art	8
I.2.3. Tendances et innovation	13
I.3. Systèmes de positionnement par satellites	15
I.3.1. Définition et principes fondamentaux	15
I.3.2. Méthodes de calcul précises	18
I.3.3. Eléments constitutifs d'une solution GNSS	22
I.3.4. Limites et contraintes	24
I.4. Utilisation des GNSS pour la surveillance structurale	25
I.4.1. Surveillance des tours et structures de grande hauteur	26
I.4.2. Surveillance des ponts et viaducs	29
I.4.3. Utilisation de stations GNSS à bas coût	32
I.4.4. Synthèse	33
II. Evaluation expérimentale de stations GNSS à bas coût	35
II.1. Revue des méthodes d'évaluation expérimentales pour les phénomènes dynamiques	36
II.1.1. Critères d'évaluation en statique	36
II.1.2. Evaluation à partir de dispositif expérimentaux à excitation contrôlée	37
II.1.3. Evaluation à partir de dispositif expérimentaux en oscillation libre	42
II.1.4. Synthèse sur les protocoles d'évaluation expérimentale	45
II.2. Approche GNSS choisie	46
II.3. Evaluation de matériel GNSS	51
II.3.1. Matériel évalué	51
II.3.2. Protocoles expérimentaux	53
II.3.3. Critères d'évaluation	56
II.3.4. Résultats & discussions	58
II.4. Evaluation des modes et paramètres de calcul	61
II.4.1. Modes et paramètres de calcul évalués	61
II.4.2. Evaluation des modes et paramètres de calcul en scénario fixe	62
II.4.3. Evaluation des modes et paramètres de calcul en scénarios dynamiques	66
II.5. Synthèse	73
III. Instrumentation d'ouvrages d'art par réseaux de capteurs GNSS à bas coût	75

III.1. Solution GNSS déployée : le Géocube	76
III.2. Instrumentation du pont de Brotonne	77
III.2.1. Présentation de l'ouvrage	77
III.2.2. Instrumentation en place et données disponibles	78
III.2.3. Etude des séries GNSS par parties d'ouvrage	83
III.2.4. Analyse du comportement global de l'ouvrage	103
III.3. Instrumentation du pont d'Aquitaine	108
III.3.1. Présentation de l'ouvrage	108
III.3.2. Instrumentation en place et données disponibles	109
III.3.3. Etude du calcul effectué par G3GPS	112
III.3.4. Etude des séries GNSS par parties de l'ouvrage	115
III.3.5. Analyse du comportement global de l'ouvrage	126
III.4. Synthèse et perspectives	130
IV. Analyse des données de réseaux de capteurs GNSS pour la détection d'anomalies	133
IV.1. Contexte	134
IV.2. Outils de régression par apprentissage	135
IV.2.1. Modèles linéaires	135
IV.2.2. Modèles autorégressifs et moyennes mobiles	136
IV.2.3. Machines à vecteurs support	136
IV.2.4. Réseaux de neurones artificiels	137
IV.3. Etude de modèles de régression des séries acquises par les réseaux de capteurs GNSS	143
IV.3.1. Données utilisées	143
IV.3.2. Critères d'évaluation d'une régression	145
IV.3.3. Ajustement et paramétrage dans le cas des réseaux de neurones	146
IV.3.4. Etude de sensibilité des outils de régression	158
IV.4. Détection des anomalies à l'aide des réseaux de neurones artificiels	164
IV.4.1. Principes et enjeux	164
IV.4.2. Stratégie d'automatisation proposée	169
IV.4.3. Application de la détection automatisée d'anomalies	172
IV.5. Synthèse	177
Conclusions et perspectives	179
Contributions scientifiques	181
Perspectives	182
Références	185
Annexe I : Paramètres de calcul RTKLib	199

GLOSSAIRE

Terme :	Définition :
Antenne GNSS	Elément d'une station GNSS dont le rôle est de capter les signaux émis par les satellites GNSS.
GNSS	Terme générique pour les systèmes de positionnement et de navigation par satellites.
NRTK	Technique de positionnement précis par GNSS utilisant des corrections ou des observations générées par un réseau de stations de référence transmises en temps réel.
Ouvrage d'art	Ouvrage de génie civil dédié à l'établissement ou la protection de voies de communication dont la conception et la réalisation nécessitent une grande expérience pratique.
PPP	Technique de positionnement précis par GNSS utilisant des modèles de correction pour l'amélioration de la précision d'une station GNSS.
Récepteur GNSS	Elément d'une station GNSS dont le rôle est de décoder les signaux GNSS collectés par une antenne et d'effectuer des traitements préliminaires afin d'obtenir une première estimation de la position et permettre le stockage des observations.
RTK	Technique de positionnement précis par GNSS utilisant un calcul relatif en temps réel grâce à une liaison directe (radio ou filaire) avec une station de référence.
Solution GNSS	Ensemble qui regroupe une ou plusieurs station(s) GNSS, le transfert ou le stockage des observations ainsi que leur traitement.
Station GNSS	Ensemble qui regroupe une antenne GNSS et un récepteur GNSS.
Système de référence	Ensemble de conventions permettant la description de la position précise d'un point situé dans l'espace.
Télésurveillance	Démarche qui consiste à collecter automatiquement les données acquises sur un ouvrage pour les exploiter à distance.

INTRODUCTION

Les ouvrages d'art sont des éléments clés des réseaux de communication et de l'aménagement du territoire, et leur exploitation implique des enjeux économiques, sociétaux, et sécuritaires majeurs. A l'échelle globale, le prolongement et l'intensification de leur exploitation nécessitent en réponse une stratégie de surveillance adaptée pour en assurer la sécurité et la pérennité. En France, comme dans de nombreux pays, certains régimes de surveillance d'ouvrages sont basés sur l'instrumentation et la télésurveillance. L'instrumentation, qui consiste à déployer sur un ouvrage des capteurs pour collecter des données automatiquement, peut être utilisée soit pour améliorer la connaissance de l'ouvrage et de son comportement, soit pour en suivre l'évolution au cours du temps. Ce suivi peut être réalisé avec différentes temporalités, allant d'une haute surveillance visant à déclencher une alerte en cas de danger à un suivi à long terme visant à détecter des changements dans le comportement d'une structure. La finalité de cette approche consiste à détecter, et éventuellement à localiser, quantifier ou prédire un endommagement d'un ouvrage. Pour y répondre, un panel varié d'instruments et de techniques, comme la surveillance vibratoire, acoustique, le suivi des déformations ou le suivi géométrique, peut être mis en œuvre pour compléter les inspections d'ouvrages. Cependant, malgré la diversité des techniques disponibles, la plupart de ces approches se basent sur des mesures locales et relatives, ce qui peut rendre difficile le suivi des ouvrages de grande dimension.

Dans ce contexte, les systèmes satellites de géolocalisation et de navigation (*Global Navigation Satellite Systems*, GNSS), qui permettent le positionnement et le suivi d'un point dans un référentiel global, régional ou même local sans dérive, apparaissent comme complémentaires aux techniques de surveillance traditionnelles. Ces caractéristiques en font des candidats d'autant plus pertinents pour le suivi des déplacements et déformations sur de grands ouvrages. Les évolutions des techniques et du matériel GNSS au cours des deux dernières décennies permettent aujourd'hui d'avoir à disposition des solutions commerciales de pointe capables d'atteindre des précisions infracentimétriques en temps réel, et avec un échantillonnage pouvant atteindre 100Hz. Si ce type de matériel est aujourd'hui parfois déployé dans des opérations de surveillance, il reste généralement limité au rôle de mise en référence d'autres mesures (relevés topographiques), notamment en raison du prix élevé des solutions commerciales. A contrepiéd des tendances du matériel GNSS commercial haute précision, les travaux présentés ici portent sur l'utilisation d'un matériel plus modeste et moins coûteux. L'utilisation de ce type de solutions GNSS a vocation à permettre le déploiement de réseaux de capteurs sur des ouvrages, et ainsi favoriser l'utilisation des technologies GNSS pour le suivi de leur comportement global.

Ces travaux s'insèrent à la jonction entre les domaines de la surveillance d'ouvrages en génie civil et celui du positionnement par satellites à travers l'étude du potentiel de capteurs GNSS à bas coût pour la surveillance d'ouvrage et leur exploitation. Cette thèse a pour objectifs de répondre aux problématiques suivantes :

- quel matériel et quel(s) traitement(s) parmi les solutions GNSS à bas coût sont les plus pertinents pour la surveillance d'ouvrages d'art ?
- quelles performances peuvent être obtenues avec une station GNSS à bas coût ?
- quels phénomènes ou quelles réponses structurelles peuvent être suivis à l'aide de ce type de capteurs ?
- comment exploiter les acquisitions pour détecter d'éventuelles anomalies structurales ?

Pour y répondre, ce manuscrit se divise en quatre chapitres. Le premier chapitre s'attèle à établir le lien entre les applications de surveillance structurale et les techniques de positionnement par satellites. Les concepts et enjeux de la surveillance y sont présentés, ainsi que les principes fondamentaux du positionnement par satellites. Un état de l'art des applications des

GNSS pour la surveillance est proposé, et permet d'en identifier les limites actuelles et de sélectionner une approche innovante basée sur les GNSS.

Le second chapitre porte sur l'évaluation expérimentale de solutions GNSS à bas coût. La stratégie de traitement, basée sur un calcul relatif en post-traitement, y est détaillée, et les performances de différentes combinaisons de matériel sont évaluées à travers plusieurs critères de précision, d'exactitude et de robustesse. L'impact de plusieurs paramètres de calculs est évalué dans des scénarios fixes et dynamiques. Une revue des différents dispositifs expérimentaux utilisés dans la littérature scientifique a été réalisée afin de proposer des protocoles expérimentaux pertinents.

Le troisième chapitre propose une étude des résultats tirés de l'instrumentation par réseaux de capteurs GNSS à bas coût de deux ouvrages d'art, le pont de Brotonne et le pont d'Aquitaine, en France. L'étude est réalisée en regroupant les données par parties d'ouvrages et en les confrontant à des données de capteurs de référence et des données thermiques, afin d'identifier les phénomènes pouvant être suivis par de tels capteurs. Les caractéristiques globales des acquisitions sont également comparées.

Le quatrième chapitre porte sur l'exploitation des acquisitions GNSS sur ouvrages pour la détection d'anomalies ou de changements dans le comportement de la structure instrumentée. Plusieurs outils de régression par apprentissage sont considérés, allant de modèles linéaires simples à des outils avancés comme les réseaux de neurones artificiels, dont les performances sont comparées au travers d'une étude de sensibilité. Une stratégie d'exploitation des modèles des différents capteurs est alors proposée afin d'aider à isoler les comportements anormaux.

Finalement, les conclusions de l'étude réalisée sont tirées afin de mettre en évidence les apports des travaux menés et les perspectives sur des recherches futures.

I. POTENTIEL DES GNSS POUR LA SURVEILLANCE DE SANTE STRUCTURALE

Ce chapitre a pour objectif de présenter les principes et enjeux de la surveillance d'ouvrages de génie civil ainsi que le potentiel des systèmes de positionnement par satellite pour y contribuer. Pour cela, la première partie de ce chapitre rappelle des concepts et enjeux de la surveillance d'ouvrages et décrit certaines des méthodes d'instrumentation et techniques de surveillance les plus courantes. Dans une seconde partie, les principes et caractéristiques fondamentaux des systèmes de positionnement par satellites sont présentés. Une revue des applications du positionnement par satellite pour la surveillance est proposée tout en identifiant les limites actuelles pour une utilisation vis-à-vis de la surveillance des ouvrages.

I.1. PRINCIPES ET OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE D'OUVRAGES

Les ouvrages de génie civil sont des éléments clés des réseaux de communication, et par conséquent de l'aménagement du territoire. Leur exploitation implique des enjeux de natures variées : des enjeux économiques liés à l'acheminement de biens et de personnes, des enjeux sociétaux de couverture du territoire, et des enjeux de sécurité pour la protection des usagers et riverains. Avec la densification des réseaux de transport à l'échelle mondiale et l'augmentation constante du nombre d'utilisateurs, ces ouvrages subissent une sollicitation croissante. Le besoin de les maintenir en service le plus longtemps possible (Brühwiler, [2015]) entraîne un vieillissement global des parcs d'ouvrages à l'échelle mondiale, ce qui implique une augmentation du nombre d'ouvrages nécessitant un suivi plus fin ou des opérations de maintenance. Par exemple, aux Etats-Unis, un rapport de 2019 de l'*American Road & Transportation Builders Association* (ARTBA, [2019]) estime qu'environ 8% des ponts du parc américain sont structurellement déficients, et qu'environ 1 ouvrage sur 3 nécessite des réparations. En France, un rapport d'information sénatorial de 2019 (Maurey et al., [2019]) note que sur l'ensemble des 250000 ponts français, environ 10% présentent un risque et nécessitent des réparations. Une majorité de ces structures sont des ouvrages de petite taille dont la gestion est assurée par les collectivités. Quant aux 12000 ouvrages du réseau routier national, environ 7% présenteraient un risque d'effondrement « à terme » si aucune action de rénovation n'est entreprise. Dans la majorité des cas, l'absence de maintenance appropriée ou le non-renouvellement du parc sont attribués au manque d'investissement. Cette situation appelle au développement d'outils permettant d'optimiser les budgets de maintenance et de réparation d'ouvrages, les stratégies d'inspection et de surveillance ayant une place prépondérante pour y parvenir.

En France, l'Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEOA) propose un référentiel de politique de gestion des ouvrages d'art. Cette gestion regroupe les actions de surveillance, d'évaluation, d'entretien et de réparation entreprises pour en assurer la sécurité et la pérennité. La surveillance d'un ouvrage décrit l'ensemble des contrôles et examens permettant de suivre son état et d'effectuer des recommandations sur sa maintenance. Elle doit aboutir à son évaluation, qui consiste à en quantifier l'état. Pour la surveillance, le référentiel de l'ITSEOA couple des actions ponctuelles liées à des événements particuliers à un régime périodique constitué des actions suivantes :

- le contrôle annuel de l'ouvrage, qui a pour objectif de vérifier l'état des dispositifs de sécurité des usagers, de chercher l'apparition de nouveaux désordres apparents depuis la précédente visite, et de constater l'évolution de désordres déjà notés ;
- la visite d'évaluation triennale, qui est un examen visuel de l'ouvrage permettant de façon similaire au contrôle annuel de constater l'apparition ou l'évolution de désordres sur l'ouvrage. Cette visite permet surtout d'en apprécier l'état apparent, et aboutit à une cotation de l'ouvrage ;
- les inspections détaillées, qui consistent en un examen visuel détaillé de l'ouvrage pouvant être complété par des mesures sur site, des auscultations ou des contrôles. Leur objectif est de dresser un bilan de santé complet de l'ouvrage. Les ouvrages concernés sont les ouvrages exceptionnels, innovants, comportant des détails critiques, les ouvrages supportant un fort trafic, tous les tunnels, tranchées couvertes et grands ouvrages en béton précontraint. Les ouvrages ayant subi des modifications ou sollicitations susceptibles d'altérer leur état, présentant un risque en raison de leur âge ou conception, ou plus généralement dont l'état est significativement dégradé doivent également faire l'objet d'inspections détaillées. La périodicité par défaut des inspections détaillées est fixée à 6 ans, mais celle-ci peut être ajustée selon les conditions d'accès ou l'état de l'ouvrage. Cette inspection aboutit également à une cotation de l'état de l'ouvrage ;
- les inspections détaillées de parties d'ouvrages. Ces inspections spécifiques peuvent être réalisées soit en complément d'une visite d'évaluation lorsque certains éléments de la

structure sont inaccessibles, soit en complément d'une inspection détaillée lorsque l'inspection desdits éléments requiert l'intervention d'équipes très spécialisées. Elles visent à dresser un bilan précis de l'état des éléments concernés. Comme pour les inspections détaillées, leur périodicité est fixée par défaut à 6 ans, mais celle-ci peut être modulée.

Ces actions périodiques sont complétées par des visites ou inspections détaillées ponctuelles liées à des événements particuliers de la vie de l'ouvrage, comme sa (re)mise en service, la fin d'un contrat de garantie ou de responsabilité, ou suite à des événements imprévus susceptibles d'avoir endommagé l'ouvrage, etc...

Ce régime de surveillance permet d'évaluer et de mettre à jour la connaissance d'un parc d'ouvrages de façon continue. Plusieurs stratégies de gestion des parcs d'ouvrages existent. On peut citer en France la méthode des Visites Simplifiées Comparées (Méthode VSC), applicable sur tout type d'ouvrage, qui s'appuie sur l'établissement de trois indices d'état :

- l'indice d'état mécanique définissant l'état structurel ;
- l'indice d'état d'usages relatif aux conditions de sécurité et de confort des usagers ;
- l'indice d'état stratégique, définissant l'importance de l'ouvrage.

Le croisement de ces trois indices produit un indice d'état global, qui est alors utilisé pour établir un classement des interventions à réaliser, pondérant ainsi l'état des structures et leur importance stratégique.

La méthode départementale (MD) est une méthode de gestion conçue pour être adaptée au patrimoine des collectivités locales. Elle combine l'évaluation de l'état apparent des ouvrages avec des indices de priorité socio-économiques pour aider à la programmation de la maintenance du parc. L'état apparent des ouvrages y est estimé sous la forme d'indices d'état déterminés à partir de l'observation de défauts et de désordres cotés. Cette méthode est une approche simplifiée et comporte de nombreux outils (logiciel, modèles de procès-verbaux d'inspection, guides) à destination de collectivités locales.

L'ITSEOA recommande la cotation des ouvrages selon la méthodologie Image Qualité des Ouvrages d'Art (IQOA), qui définit trois classes d'ouvrages selon leur état apparent et structural. La classe 1 regroupe tous les ouvrages en bon état apparent, ne nécessitant que des travaux d'entretien courant. Les ouvrages de classe 2 nécessitent un entretien spécialisé en raison de défauts sur les éléments de protection, sur les équipements, ou des défauts structuraux mineurs. Deux sous-classes séparent les ouvrages nécessitant un entretien spécialisé sans urgence (classe 2) de ceux nécessitant un entretien urgent (2E). Enfin, la classe 3 regroupe les ouvrages dont la structure est altérée et nécessitant des travaux de réparation. Deux sous-classes distinguent les cas où les travaux de réparation n'ont pas de caractère d'urgence (classe 3) ou sont au contraire urgents (3U). La cotation d'un ouvrage, selon la classe attribuée, doit permettre la prise de décision pour le gestionnaire : changement ou ajustement du régime de surveillance (Figure I-1), planification des opérations d'entretien ou de réparation, et éventuellement des mesures de sauvegarde ou de sécurité (restrictions, interruption partielle ou totale de service).

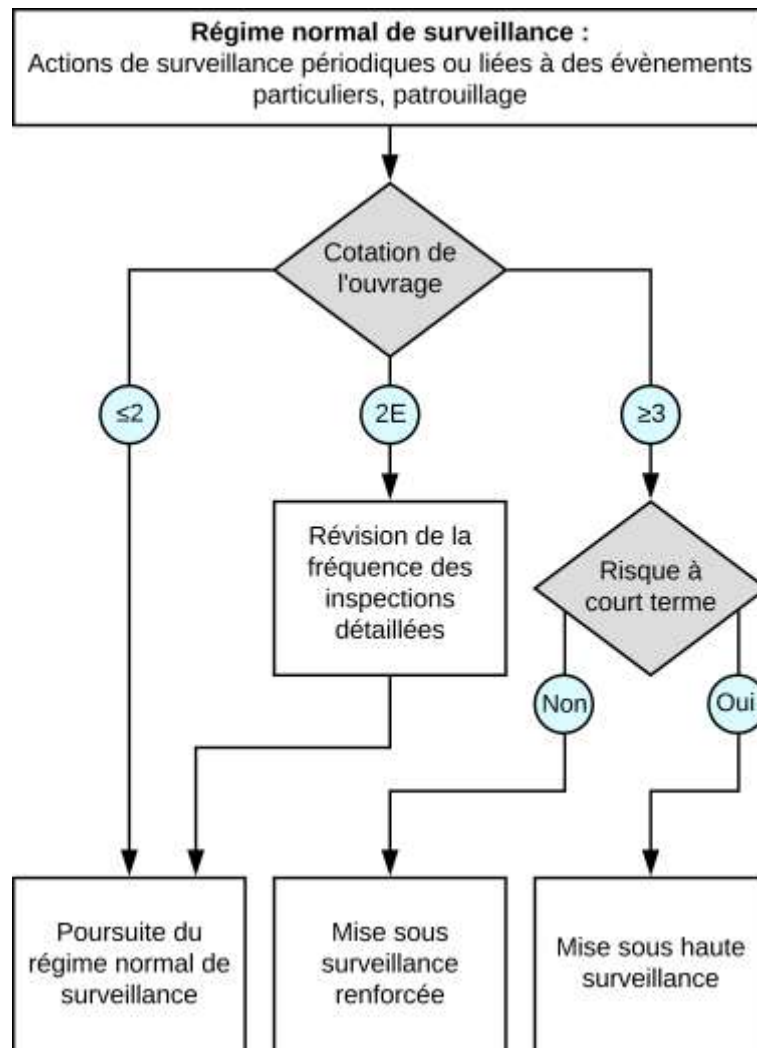


Figure I-1 Logigramme des régimes de surveillance pour un ouvrage classique (ITSEOA 2010)

Lorsque l'état d'un ouvrage est significativement dégradé, ou qu'un doute existe sur la nature des désordres, le gestionnaire peut passer l'ouvrage en régime de surveillance renforcée, voire de haute surveillance si l'état de la structure implique un risque de sécurité pour les usagers. La surveillance renforcée a généralement pour objectif de détecter l'évolution anormale ou l'aggravation de l'état d'une structure qui pourrait affecter la sécurité des usagers. Elle peut aussi être mise en œuvre pour permettre de mieux identifier les problèmes d'une structure et appréhender son comportement en cas d'incertitude sur l'origine des désordres observés, ou encore pour vérifier l'efficacité d'une réparation structurale. La surveillance renforcée est généralement constituée d'examen réalisés avec une fréquence accrue par rapport aux examens périodiques (semestriels, trimestriels, mensuels, hebdomadaires...), et peut être complétée par l'instrumentation de l'ouvrage. La haute surveillance est une mesure exceptionnelle réservée aux ouvrages en état défectueux afin d'assurer la sécurité des usagers et tiers ou limiter les conséquences matérielles en cas de défaillance à l'aide d'alarmes. Elle repose généralement sur la télésurveillance.

L'instrumentation et la télésurveillance des ouvrages d'art sont ainsi des éléments majeurs des régimes de surveillance spéciaux bien qu'elles n'y soient pas nécessairement cantonnées (instrumentation d'ouvrages neufs). L'innovation des différents processus les constituant (technologies de capteurs, méthodes d'acquisition, télétransmission, traitement et analyse des données) est un enjeu clé pour l'amélioration des stratégies de gestion du patrimoine

I.2. APPROCHES COURANTES D'INSTRUMENTATION ET DE TELESURVEILLANCE

Bien que les ouvrages et leurs enjeux soient variés, l'instrumentation et la télésurveillance reposent généralement sur des approches similaires. Ce paragraphe présente brièvement les méthodes et capteurs de surveillance couramment déployés pour la surveillance d'ouvrages d'art.

I.2.1. DETECTION D'ANOMALIE OU D'ENDOMMAGEMENT

Dans le cadre d'une surveillance par instrumentation, la recherche d'anomalie repose principalement sur la comparaison du comportement de l'ouvrage à un état de référence. L'objectif est de détecter soit un écart significatif soudain du comportement de certains éléments ou de l'ouvrage dans son ensemble avec un état de référence, soit l'apparition d'une dérive au cours du temps. Un des premiers enjeux de la mise en place d'un système de surveillance est le dimensionnement de ce dernier et la localisation des capteurs déployés (Schoefs et al., [2011]). L'installation de capteurs doit permettre de détecter les signes faibles et avant-coureurs d'une anomalie sans que sa localisation ne soit nécessairement connue à l'avance tout en optimisant le nombre de capteurs déployés (en raison de contraintes pratiques ou économiques).

Par ailleurs, la réponse des ouvrages d'art est généralement fortement influencée, sinon dominée, par la réponse de la structure aux effets environnementaux ou aux charges. Pour appréhender ces changements sous conditions variables, il est possible d'utiliser des modèles mécaniques de l'ouvrage prédisant le comportement de l'ouvrage en fonction des conditions ambiantes. Le modèle physique fournit un comportement de référence de l'ouvrage, une anomalie est détectée si les données de l'instrumentation correspondent à une réponse différente de celle annoncée par le modèle. On parle alors d'approche *model-driven*. Le déploiement de tels modèles est une étape complexe, puisqu'elle nécessite l'acquisition de nombreuses données complémentaires (environnement, charges), une bonne connaissance de l'ouvrage et de ses matériaux, et une validation des lois mécaniques établies. Des modèles physiques basés sur les données environnementales peuvent être utilisés pour procéder à la normalisation des données, c'est-à-dire le retrait de la réponse induite par les effets environnementaux.

Pour éviter d'avoir recours à un modèle physique ou à une connaissance fine du comportement mécanique de l'ouvrage (information qui n'est régulièrement pas disponible sur de nombreux ouvrages), d'autres approches basées sur une analyse statistique ont été proposées. Ces approches se basent sur l'utilisation de modèles statistiques, qui ne prennent en compte que les distributions statistiques des mesures chronologiques sans faire d'hypothèse sur la structure. On parle de méthode *data-driven*. On peut distinguer deux types d'approches : les approches exogènes, utilisant des régressions entre données, et les approches endogènes se basant uniquement sur l'historique de la variable étudiée pour effectuer une prédiction. Il existe des techniques simples, comme la moyenne mobile ou le lissage exponentiel (Hyndman et al., [2018]) qui peuvent être directement appliquées à des données provenant d'un capteur. D'autres méthodes plus complexes ont vocation à traiter plusieurs données en même temps ou à extraire des relations plus complexes entre les données, et permettre une appréciation plus globale de l'ouvrage. Si certaines, comme la fusion de données (Ataei et al., [2005]; Cury et al., [2010]; Ou et al., [2003]; J. W. Park et al., [2014]; Santos et al., [2013]), sont encore peu répandues, d'autres approches comme la reconnaissance de forme (*pattern recognition*) (Cury et al., [2012]; Gul et al., [2009]; Santos et al., [2017]; Yeung et al., [2005]a) font l'objet d'un intérêt croissant depuis deux décennies. L'objectif de ces méthodes est d'extraire des variables caractéristiques de l'ouvrage (*features*) et suivre son état de santé. La plupart fonctionnent avec des algorithmes à apprentissage, c'est-à-dire un jeu de données sur lequel l'algorithme est entraîné avant d'être appliqué par la suite. On distingue deux familles : les méthodes non supervisées qui visent à regrouper des échantillons sans étiquettes les plus proches, et les méthodes supervisées dans lesquelles des étiquettes sont attribuées aux échantillons. L'objectif est d'être capable de classer de nouveaux échantillons afin de déterminer si ceux-ci sont anormaux.

Qu'un modèle physique soit disponible ou non, l'enjeu de la surveillance est de fournir une information robuste pour le gestionnaire permettant la prise de décision. L'utilisation d'indicateurs fusionnant les données et informations doit aboutir une information synthétique fiable et plus simple à interpréter que l'analyse individuelle de chaque capteur ou relevé (Cury, [2010]) et permettre la détection d'endommagement. On distingue quatre niveaux de connaissance pour la détection d'endommagement :

- niveau 1 : existence de l'endommagement,
- niveau 2 : localisation du dommage,
- niveau 3 : quantification de l'endommagement,
- niveau 4 : pronostic sur un éventuel changement de durée de vie de l'ouvrage.

Dans le cadre de la haute surveillance, la détection d'anormalité doit être rapide voire immédiate, et ne permet pas une analyse par comparaison entre des données d'une période de référence et une période étudiée. Le déclenchement d'alertes repose généralement sur la définition de seuils. Ces seuils peuvent être fixés a priori, à l'aide d'une connaissance du comportement de l'ouvrage, ou le cas échéant à partir d'une tendance déjà observée sur les données de l'ouvrage. Les seuils peuvent également être fixés a posteriori à partir de données d'apprentissage en se basant sur la distribution des valeurs mesurées, sur la relation entre des variables paramétriques, ou sur des données normalisées (sans composantes due aux variations environnementales).

Selon les types d'ouvrage, la nature des anomalies détectées ou suspectées, et les contraintes d'exploitation, il existe une grande variété d'approches pour la surveillance des ouvrages d'art. Les plus courantes sont présentées dans les paragraphes suivants.

I.2.2. METHODES ET OUTILS USUELS POUR LA SURVEILLANCE DES OUVRAGES D'ART

I.2.2.1. SURVEILLANCE VIBRATOIRE

L'analyse vibratoire est une approche clé de la surveillance de santé des ouvrages d'art. Les accéléromètres (Figure I-2) sont les capteurs de référence les plus courants (Godart, [2015]). Leur fonctionnement se base sur la mesure de mouvement d'une masse interne pour estimer l'accélération subie par le capteur. Ils sont capables de mesurer l'accélération subie au point d'installation avec une grande précision (jusqu'à 10^{-5} ms^{-2}) avec une fréquence d'acquisition qui peut atteindre 4 kHz. On distingue généralement deux types courants d'accéléromètres : les accéléromètres capacitifs et les accéléromètres piézoélectriques. Si ces capteurs sont relativement faciles à déployer, ils sont limités à un point de mesure par capteur.



Figure I-2 Tandem d'accéléromètres pour la surveillance d'ouvrages

D'autres capteurs permettent d'effectuer des mesures réparties. C'est le cas par exemple des vibromètres laser. Il s'agit de capteurs sans contact utilisant une source lumineuse

monochromatique projetée sur le ou les points de relevé. En exploitant l'effet Doppler affectant le signal réfléchi, il est possible par interférométrie d'estimer la fréquence et la phase de vibration des points relevés. Plus récemment, l'utilisation de réseaux de capteurs à fibre optique rencontre un intérêt croissant. Ces derniers peuvent être utilisés pour localiser et mesurer les vibrations le long de la fibre optique mise en place (Q. Zhang et al., [2013]). La résolution possible est significativement inférieure à celle d'un vibromètre, mais la portée est bien supérieure, la fibre optique pouvant être installée sur la longueur d'un ouvrage. Son installation est par ailleurs plus complexe.

Plusieurs méthodes encore peu éprouvées à l'échelle industrielle visent à proposer une solution de suivi vibratoire global d'un ouvrage. Des études récentes s'intéressent à l'utilisation de techniques de corrélation d'images digitales (*Digital Image Correlation*, DIC) couplées à des caméras à haute fréquence d'acquisition pour du suivi vibratoire à large échelle (Busca et al., [2014]; S. W. Kim et al., [2013]). Les résultats obtenus montrent que ce type de solution est capable de suivre les vibrations en divers points d'une structure à l'aide de cibles artificielles ou naturelles distantes. Enfin, d'autres solutions utilisent une approche similaire à celle des vibromètres laser, combinant doppler et interférométrie, mais en les appliquant sur des ondes radar (Stabile et al., [2013]). L'utilisation du radar permet d'accroître significativement la portée d'acquisition, augmentant par la même occasion la surface pouvant être couverte par un instrument. Ces solutions visent à proposer une cartographie des vibrations sur l'ensemble d'un segment d'ouvrage, comme le tablier d'un pont.

L'analyse modale est une méthode historique d'analyse des données vibratoires. C'est une pratique courante sur les grands ouvrages souples susceptibles de vibrer avec le passage d'usagers ou le vent : ponts, viaducs, cheminées, mâts. Les fréquences propres sont utilisées comme des indicateurs de santé structurale (Cawley et al., [1979]) : l'endommagement d'un ouvrage d'art diminue sa rigidité, et se traduit par une diminution de sa ou ses fréquence(s) propre(s). De nombreuses études (par exemple Friswell et al., [1994]; Kato et al., [1986]; Messina et al., [1998]) ont proposé des méthodes de détection d'endommagement basées sur la variation des fréquences propres, mais pointent également les limites de cette méthode : sensibilité assez faible à l'endommagement en conditions réelles, et difficulté à localiser l'endommagement.

Les déformées ont également été exploitées pour établir des indices de santé, comme la corrélation entre les déformées avec un état de référence (Catbas et al., [1998]), la variation de la courbure des déformées modales (Pandey et al., [1991]), ou la matrice de flexibilité (Pandey et al., [1994]). Cependant, les paramètres modaux peuvent s'avérer très sensibles aux conditions de température, vent ou humidité, nécessitant une correction à l'aide modèles de l'ouvrage. Des méthodes *data-driven* ont également été explorées pour l'analyse dynamique (Iwasaki et al., [2004]; Reda Taha et al., [2005]; Yeung et al., [2005]b), avec néanmoins des limites quant à la détection des faibles endommagements ou une grande sensibilité au bruit. Plus récemment, l'utilisation de données symboliques a également été explorée pour mieux rendre compte des caractéristiques dynamiques (Cury, [2010]).

I.2.2.2. SUIVI DE DEPLACEMENTS ET DEFORMATIONS

De nombreux capteurs peuvent être déployés sur un ouvrage pour suivre les déplacements et déformations et en qualifier la réponse dynamique (hors vibrations) ou ses déformations statiques locales (Godart, [2015]). Il existe plusieurs capteurs de déplacement de contact, comme les LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) (Figure I-3), les capteurs inductifs, potentiométriques, magnétostrictifs ou encore les capteurs à jauge. Tous fonctionnent de manière similaire : le capteur est installé sur un support fixe de référence, et une section mobile du capteur est en contact avec l'élément mobile de l'ouvrage dont on souhaite mesurer les déplacements. Lors d'un mouvement, la partie mobile du capteur se déplace et génère un changement de champ magnétique, de résistance ou d'inductance qui peut être mesuré et permettre le calcul du déplacement. Ces différentes solutions ont des courses d'amplitudes différentes (de 1 mm maximum pour les capteurs inductif à 1 m pour les capteurs à jauge ou à potentiomètre). Leurs précisions respectives sont proportionnelles à la course de mesure sélectionnée. Sur les plus

courtes distances (plage millimétrique), la plupart de ces capteurs ont une précision de l'ordre de quelques μm . Il existe également des capteurs de déplacement sans contact, comme les capteurs à courant de Foucault, qui peuvent mesurer la distance avec une surface conductrice avec une précision similaire, sur une portée maximale de l'ordre du cm. Les capteurs à triangulation laser peuvent quant à eux estimer le déplacement avec n'importe quel type de matériau, sans contact. Ce type de capteur est souvent plus onéreux et surtout plus sensible aux perturbations (variations de température, encrassement des lentilles).



Figure I-3 Capteur de déplacement LVDT

En se basant sur une approche similaire aux capteurs de déplacement de contact, les extensomètres et fissuromètres mécaniques amovibles (Figure I-4) permettent de suivre au cours du temps une déformation. Ils sont généralement utilisés lorsqu'il n'est pas nécessaire de rattacher l'écartement à une référence fixe (par exemple, pour le suivi d'ouverture d'un joint de chaussé ou d'une fissure). Les extensomètres à corde vibrante, généralement installés à l'intérieur du matériau, permettent de mesurer la déformation d'un élément de l'ouvrage en mesurant la fréquence de vibration d'une corde libre à l'intérieur d'un cylindre rigide du capteur. La mesure de la déformation repose sur le changement de la fréquence de vibration de la corde qui varie selon sa tension, elle-même déterminée par l'écartement entre les extrémités du dispositif.



Figure I-4 Fissuromètre avec enregistreur embarqué

Les solutions à base de fibre optique tendent à devenir de plus en plus courantes sur ouvrages. Les approches en réseaux de Bragg, de l'interférométrie de Michelson, de cavité Fabry-

Pérot, ou de capteurs à micro-courbures offrent des solutions à résolution et portée variée, reposant sur un principe de variation de temps de trajet d'une onde électromagnétique dans la fibre selon les déformations subies. Les capteurs à fibre optique sont généralement plus coûteux que les extensomètres classiques, mais offrent la possibilité d'un suivi dynamique fin avec un taux d'échantillonnage élevé.

La recherche de déplacements et déformations peut également se faire à travers le suivi de l'orientation et l'inclinaison d'éléments de l'ouvrage. Les nivelles et inclinomètres (Figure I-5) mécaniques reposent sur un système de mesure à bulle pour déterminer précisément l'orientation d'un élément, tandis que les inclinomètres électroniques reposent généralement sur la mesure d'angle d'un pendule pour déterminer l'écart à la verticale. Enfin, les techniques d'interférométrie radar par satellites (InSAR) permettent de générer des cartes de déplacements relatifs à grande échelle (Briole et al., [2015]; Lazecky et al., [2015]; Sousa et al., [2014]). Ces approches tendent à devenir plus courantes, notamment grâce à l'appui de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) avec les missions Envisat puis Sentinel.



Figure I-5 Inclinomètre de surface base longue

Le suivi des déformations et déplacement est applicable sur tout type de structure. L'exploitation des mesures pour la surveillance se fait généralement par la recherche de tendance ou le franchissement de seuils. Généralement, les mesures de déformations ou de déplacements locaux sont analysées avec une connaissance du comportement des éléments étudiés (joints, éléments mobiles, appareils d'appuis) ou d'un défaut observé (ouverture de fissure). Les mesures de déplacement peuvent également être exploitées par comparaison avec un modèle mécanique ou statistique (Kromanis et al., [2014], [2017]) pour la recherche d'anomalie (loi de comportement des matériaux, réponse d'un élément selon la température...).

I.2.2.3. SUIVI GEOMETRIQUE

Le suivi géométrique global d'un ouvrage d'art est généralement assuré par des interventions ponctuelles. La méthode la plus courante, le relevé topométrique, repose sur des mesures d'angles réalisées à l'aide de théodolites ou tachéomètres (qui ajoutent des mesures de distances aux mesures d'angles) entre des cibles disposées sur l'ouvrage. Grâce à des mesures réalisées à partir de plusieurs stations, il est possible de calculer par triangulation les distances entre toutes les cibles et d'établir la géométrie des points relevés. Le suivi géométrique est réalisé par comparaison entre les résultats obtenus à différentes dates. Afin de faciliter la comparaison au cours du temps et d'assurer la pérennité des données, les relevés sont souvent rattachés à une référence fixe de coordonnées connues, généralement calculées à l'aide d'une station GNSS. D'autres techniques permettent de proposer un suivi géométrique des surfaces, avec la génération de nuages de points denses. Les scanners tridimensionnels se basent sur la mesure de la réflexion d'une onde électromagnétique (laser, LiDAR, ou rayons X) ou ultrasonore projetée sur la surface étudiée. La mesure du temps de trajet permet d'estimer la distance avec chaque point de mesure. A l'aide d'un viseur pivotant selon deux axes, un scanner est ainsi capable de produire un nuage de points dense des éléments de l'ouvrage dans sa ligne de vue (et à sa portée). Certains scanners peuvent également relever la couleur du point visé, facilitant l'exploitation du nuage de points.

Une autre approche, la photogrammétrie (Kasser et al., [2002]), permet également de collecter des données tridimensionnelles denses pour le suivi géométrique. La photogrammétrie consiste à utiliser la parallaxe entre des photographies haute définition acquises depuis plusieurs points de vue pour reconstituer des modèles 3D (et texturés) de l'ouvrage. En plus de l'information géométrique obtenue, ce type de relevé permet également de procéder à une inspection visuelle virtuelle pour des endroits difficilement accessibles. L'acquisition des photographies peut être réalisée par des opérateurs au sol ou des drones pour un suivi à haute

précision. Ces techniques de suivi géométrique reposent sur des relevés ponctuels pour du suivi à long terme.

Pour un suivi géométrique continu, bien que des outils comme les scanners puissent être opérés automatiquement, la solution la plus courante déployée sur ouvrage d'art repose sur l'utilisation de stations totales robotisées. Une station totale robotisée (Figure I-6) est une version automatisée d'un tachéomètre, capable de retrouver le centre des cibles visées pour procéder à des relevés automatiques, pouvant être effectués à de courts intervalles (de l'ordre de quelques dizaines de minutes, selon le nombre de points relevés).



Figure I-6 Station robotisée

Le suivi géométrique est généralement réalisé pour de grands ouvrages, où le suivi de déplacements et déformations n'est pas suffisant pour qualifier le comportement de la structure, et aux ouvrages liés aux voies de communication. Similairement aux méthodes de suivi de déformation et de déplacement, l'exploitation du suivi géométrique repose essentiellement sur la recherche de tendance, le franchissement de seuils, et la comparaison à un modèle mécanique de l'ouvrage.

I.2.2.4. SURVEILLANCE ACOUSTIQUE

Le suivi acoustique d'un ouvrage est une approche adaptée à la détection de ruptures dans les structures à câbles (Brevet et al., [2003]; Gautier et al., [2013]; Kretz et al., [2006]). Les capteurs d'émissions acoustiques sont conçus de façon similaire à des microphones, appliqués en surface ou dans le matériau de la structure. Ces capteurs sont capables d'écouter les ondes sonores qui se propagent dans les matériaux de l'ouvrage en réponse à l'excitation de la structure ou en présence d'évènements anormaux. La surveillance acoustique ne nécessite pas de déterminer un état de référence, puis qu'elle ne repose pas sur la comparaison entre deux états. Cette approche s'appuie sur la détection « en direct » d'évènements sur l'ouvrage : en cas d'une rupture quelconque, une onde acoustique d'amplitude inhabituelle se propage dans la structure, et peut être détectée dans les capteurs. La capacité de détection repose alors sur la qualité du filtrage des données pour distinguer une anomalie du bruit ambiant lié à l'exploitation de la structure. L'écoute acoustique est plus répandue dans les structures à câbles, où des ruptures fragiles peuvent apparaître sans nécessairement entraîner la mise en danger immédiate de la structure ou de ses usagers.

I.2.2.5. CAPTEURS COMPLEMENTAIRES

La surveillance d'une structure ne repose pas que sur la mesure de sa réponse aux effets induits par les conditions météorologique ou les charges d'exploitation, mais aussi sur le suivi direct des phénomènes sources. Une large variété de phénomènes sources ou internes peut être surveillée à l'aide d'instruments divers.

Les effets météorologiques peuvent être suivis à l'aide de différents types de capteurs : sondes de température mesurant la température de l'air (Figure I-7a), anémomètres pour la

vitesse et la direction du vent (Figure I-7b), capteurs d'humidité de l'air, pluviomètres estimant les précipitations (Figure I-7c), et baromètres mesurant la pression atmosphérique. La mesure de l'ensoleillement est également un enjeu important pour estimer les flux thermiques de l'ouvrage : les pyranomètres utilisent une cellule photovoltaïque pour estimer le flux d'énergie solaire reçue localement. D'autres capteurs visent à qualifier des conditions environnementales au sens large, comme des capteurs de hauteur de manteau neigeux utilisant la réflexion de rayons cosmiques, ou des capteurs qualifiant un cours d'eau enjambé par l'ouvrage (capteur de niveau d'eau, capteur de débit). Des sismomètres peuvent également être déployés à proximité des ouvrages pour suivre les événements pouvant affecter la structure. La charge anthropique quant à elle, peut être mesurée à l'aide de systèmes de pesage en marche (cellule de charge, barreaux piézoélectriques) ou de mesure de pression (cellule de pression totale). Ces capteurs permettent de mesurer la force et la pression, respectivement, appliquées par le passage des véhicules sur la structure.



a) Sonde de température



b) Anémomètre



c) Pluviomètre

Figure I-7 Capteurs météorologiques

Cependant, la quantification des variations des conditions environnementales et charges d'exploitations ne suffit généralement pas à qualifier la réponse structurale. Des capteurs variés peuvent être déployés pour étudier les charges entre plusieurs éléments de la structure, comme les cellules de charge ou les cellules de pression, permettant de vérifier les interactions entre les éléments structuraux.

La mesure de l'humidité et la température dans l'ouvrage et dans les matériaux est également un enjeu clé pour comprendre ou modéliser leurs comportements. Les hygromètres peuvent être utilisés pour estimer l'humidité relative locale, et les sondes de température (sondes platine, thermistances, thermocouples) permettent d'estimer la température en un point de l'ouvrage. La disposition des sondes thermiques est déterminante pour l'efficacité du suivi thermique. Plusieurs effets sont à prendre en compte : la complexité de l'ouvrage, la variabilité des matériaux et de leurs interfaces, la présence de zones d'air, et les sources différentes de chaleur (température extérieure, rayonnement solaire, radiation thermique interne). Pour un suivi pertinent, il est courant d'équiper chaque élément avec plusieurs sondes, généralement à des profondeurs différentes et sur plusieurs faces. L'utilisation de nombreuses mesures permet d'estimer au mieux la température moyenne du matériau, mais aussi la présence de gradients thermiques. Enfin, les capteurs à fibre optique à effet Raman peuvent être utilisés pour obtenir une mesure de température distribuée, sur une portée pouvant atteindre plusieurs kilomètres.

I.2.3. TENDANCES ET INNOVATION

Depuis une dizaine d'années, plusieurs technologies connaissent une attention particulière pour faciliter ou généraliser l'acquisition de données sur ouvrages. L'évolution de la surveillance structurale est portée par les innovations des industries dans le domaine de la miniaturisation, de l'internet des objets (*internet of things*, IoT) et de l'utilisation de jeux de données massifs.

La technologie des microsystèmes électromécaniques (*microelectromechanical systems*, MEMS) permet la fabrication en masse de petits capteurs peu coûteux et généralement peu

consommateurs (Figure I-8). Ce type de capteur est généralement moins précis que les capteurs traditionnellement déployés sur ouvrage. Cependant leur faible coût offre la possibilité de multiplier le nombre de capteurs déployés, facilitant la combinaison de données pour leur filtrage et permettant d'envisager une meilleure prise de connaissance sur l'ensemble d'un ouvrage. Ces capteurs variés (accéléromètres, sondes de température, d'humidité, capteurs piézo-électriques ou optiques) se sont généralisés dans l'industrie automobile, aéronautique et des télécommunications, et tendent à devenir plus courants dans les applications de génie civil (Ha et al., [2013]; Kavitha et al., [2013], [2016]; Meyer et al., [2008]).



Figure I-8 Exemple de capteur MEMS

Le développement des MEMS et systèmes embarqués a également permis une accélération dans le développement des drones civils (*unmanned aerial vehicles*, UAV). Ces appareils pilotés à distance présentent l'intérêt d'une grande mobilité et d'une capacité de port (charge utile) variable, allant de quelques centaines de grammes à plusieurs kilogrammes selon la taille des appareils. Ceux-ci peuvent être utilisés pour compléter les inspections visuelles (Figure I-9) grâce à l'acquisition de données sur des zones difficiles d'accès (Ellenberg et al., [2015]; Ham et al., [2016]; P. Liu et al., [2014]). Les contrôleurs de vol embarqués facilitent également les opérations autonomes (Kang et al., [2018]), bien que celles-ci soient encore difficiles à envisager en milieu urbain en raison des règles de sécurité et de la législation.



Figure I-9 Drone utilisé pour l'inspection d'un ouvrage

La miniaturisation des systèmes embarqués a également favorisé le développement des capteurs dits intelligents. Un capteur intelligent se distingue d'un capteur classique par la présence d'un organe de calcul interne et d'une interface de communication bidirectionnelle. La présence de ces éléments offre au capteur intelligent des fonctionnalités comme :

- des acquisitions sélectives (sauvegarde de données si une condition définie est remplie) ;
- le prétraitement des données (filtrage adaptatif, remplacement de données manquantes) ;
- l'évaluation de la qualité des données acquises ;

- l'autodiagnostic du capteur (état de fonctionnement, usure, diagnostic de panne) ;
- le contrôle et la configuration à distance du capteur ;
- une transmission des données par paquets, optimisée pour le fonctionnement en réseau.

Les capteurs intelligents visent à faciliter le déploiement de réseaux de capteurs sans fil sur ouvrage (Moreu et al., [2017]; Spencer et al., [2016], [2015], [2017]), réduisant significativement le matériel à déployer comparativement aux instrumentations filaires classiques (Frigui et al., [2018]). Les protocoles de communication basse consommation type Lora, Sigfox ou Zigbee se sont massivement développés avec l'IoT, et s'étendent désormais progressivement aux applications de surveillance structurale (J.-H. Kim et al., [2018]; P. Wang et al., [2012]). Ces approches visent à réduire le temps d'intervention sur ouvrage, pour la pose ou pour la maintenance d'une instrumentation, au profit de capteurs plus versatiles développés en amont.

En parallèle des développements sur les méthodes d'acquisition, les approches d'analyse des données sont en phase de mutation. Les approches *model-driven* sont toujours considérées comme la référence pour la compréhension du comportement d'un ouvrage. Néanmoins, la tendance actuelle au déploiement de capteurs moins coûteux mais plus nombreux et la facilité d'accès à une puissance de calcul élevée favorisent le développement de méthodes *data-driven*. L'augmentation de capteurs déployés sur des ouvrages et la constitution d'historiques numériques entraînent un accroissement massif des données d'instrumentations disponibles. Les approches d'explorations de données (*data mining*) se sont développées dans la surveillance structurale (Gordan et al., [2017]; H. Li et al., [2015]) pour mettre à profit ce stock de données accessibles. L'exploration de données a vocation à aider à l'interprétation de données en se soustrayant au besoin d'une connaissance précise du comportement mécanique d'un ouvrage. La collecte massive de données et la gestion de parcs d'ouvrages instrumentés ouvre également des perspectives d'application des techniques dédiées aux *big data* pour la surveillance structurale (Matarazzo, Shahidi, Chang, et al., [2015]; Matarazzo, Shahidi, & Pakzad, [2015]).

Enfin, la thématique de l'intelligence artificielle (*artificial intelligence*, AI) s'est très fortement développée dans de nombreux domaines comme le traitement et l'analyse d'images, la reconnaissance de texte, l'analyse de comportements... Les applications liées aux réseaux de neurones, qui sont un élément constitutif majeur de l'intelligence artificielle, se sont multipliées au cours de la dernière décennie, notamment à travers le *deep learning* (réseaux de neurones à plusieurs couches cachées). Ces applications se sont développées notamment grâce aux volumes massifs de données désormais accessibles. L'approche du *deep learning*, et plus généralement des réseaux de neurones, rencontre un fort intérêt pour la surveillance de santé structurale (Cha et al., [2017]; Kao et al., [2013]; Lin et al., [2017]) pour son aptitude à résoudre des problèmes complexes de modélisation, de reconnaissances de formes ou de classification.

Ces tendances, aussi bien au niveau du matériel que des approches de traitement, tendent à favoriser une réduction du temps d'intervention sur ouvrage et du coût des instruments déployés au profit de mesures plus nombreuses et d'une émancipation des approches *model-driven* traditionnelles. L'intégration des approches de positionnement par satellite s'insère dans ce contexte global d'évolution de la surveillance des ouvrages d'art.

I.3. SYSTEMES DE POSITIONNEMENT PAR SATELLITES

I.3.1. DEFINITION ET PRINCIPES FONDAMENTAUX

Le *Global Positioning System* (GPS), est le premier système de positionnement par satellites opérationnel et rendu accessible publiquement. Le GPS a été développé par l'*US Navy* à partir des années 70 afin de fournir un service fiable de navigation n'importe où à la surface du globe (G. Xu et al., [2016]). Après plusieurs phases de test, le système est considéré comme opérationnel en 1993 avec 24 satellites en orbite. Le GPS était à ce stade bridé pour les usagers civils ou étrangers,

avec une précision ponctuelle dégradée de l'ordre de la centaine de mètres, contre une précision de quelques mètres pour l'armée, obtenue à l'aide d'un signal crypté. Il faut attendre l'an 2000 pour que le service devienne pleinement accessible au grand public. Le GPS a depuis été rejoint par des systèmes dits compatibles, c'est à dire fonctionnant selon les mêmes principes et pouvant être utilisés conjointement, voire interopérables dans certains cas. Le premier est le système soviétique GLONASS, entré en phase opérationnelle pour la première fois en 1996 avec 24 satellites, phase qui sera rapidement interrompue par manque de maintenance. Suite à des efforts de relance au cours des années 2000, le système est de nouveau considéré comme pleinement opérationnel depuis 2011. En parallèle, la Chine a déployé le système BeiDou, en fonction depuis 2003 et devant être pleinement opérationnel d'ici 2020. Enfin, depuis 2014 l'Union Européenne déploie régulièrement des satellites du système Galileo, le premier système de positionnement civil. Les premiers services du système sont disponibles depuis 2016, le déploiement de l'ensemble des satellites du système étant prévu pour fin 2020.

L'appellation *Global Navigation Satellite System* (GNSS) intègre le GPS, GLONASS, BeiDou et GALILEO. Les GNSS multiplient le nombre de satellites accessibles, facilitant le calcul de position pour les utilisateurs. Les GNSS introduisent aussi une notion de concurrence entre les technologies déployées et les services vendus, dans un domaine où le GPS était la seule solution accessible auparavant. Tous les GNSS reposent sur un fonctionnement similaire. Chaque système est divisé en trois segments :

- le segment spatial, qui est constitué de la constellation des satellites GNSS opérationnels ;
- le segment de contrôle, qui se compose de stations terrestres réparties à la surface du globe chargées de contrôler les orbites et le bon fonctionnement des satellites, et si besoin de procéder à des ajustements ;
- le segment utilisateur, qui correspond aux usagers équipés de stations GPS exploitant les signaux émis par les satellites pour se positionner ;

Les satellites sont positionnés dans un système de référence global (Figure I-10) adapté au positionnement à l'échelle mondiale. Celui-ci associe un ellipsoïde de référence permettant de décrire la surface de la Terre à un repère $R = (O; \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ avec les propriétés suivantes :

- Le centre O est supposé confondu avec le centre des masses de la Terre ;
- $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ est une base orthonormée directe ;
- $(O; \vec{k})$ est parallèle à l'axe des pôles géographiques ;
- $(O; \vec{i}, \vec{k})$ est confondu avec le plan méridien international ;
- Le repère est en co-rotation avec la Terre.

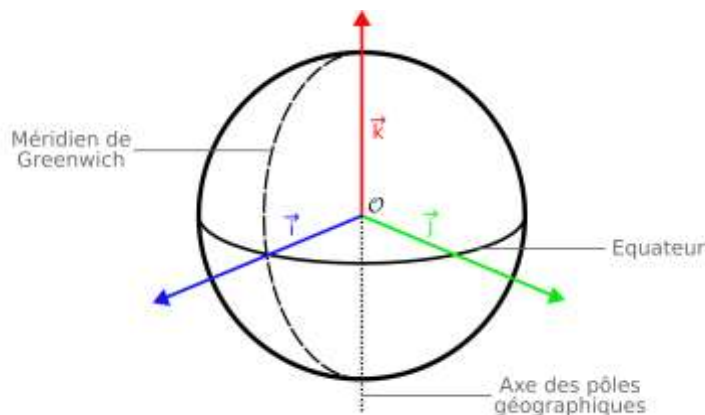


Figure I-10 Système de référence global R

La définition de ce système de référence comportant des notions théoriques précises mais difficile à traduire précisément à la surface de la Terre (centre des masses, axe des pôles), on utilise un repère de référence. Ce repère de référence est constitué de points dont les coordonnées sont connues par rapport à R , et discrétise la surface de la Terre afin de pouvoir s'y positionner. On qualifie ce repère de réalisation numérique du système de référence. Puisque ce système est valable sur tout le globe terrestre, y positionner un objet revient à en exprimer la position absolue. Cette notion de coordonnées absolues permet au positionnement par satellites de conserver une référence stable au cours du temps et ainsi d'éliminer les problèmes de dérive.

Les orbites, et par extension les positions des satellites sont régulièrement recalculées et ajustées sous le contrôle du segment sol. Des outils de géodésie spatiale, tels que le VLBI (*Very Long Base Interferometry*) ou le SLR (*Satellite Laser Ranging*) sont déployés pour y parvenir.

Le calcul de la position des usagers se base sur la mesure de temps de propagation de signaux émis par le segment spatial. Les satellites GNSS sont équipés d'horloges atomiques qui sont couplées à des modèles de correction qui assurent la synchronisation des satellites entre eux. Chaque satellite diffuse en permanence plusieurs signaux, dont :

- un code pseudo-aléatoire qui lui est propre généré à partir son horloge. Il s'agit d'un signal comportant une série de bits indépendants les uns des autres mais dont l'ensemble forme une suite périodique ;
- un message de navigation contenant des informations permettant de calculer leur position (paramètres d'orbites par exemple).

Au sol, un utilisateur équipé d'une antenne GNSS et d'un récepteur r peut décoder les signaux réceptionnés. D'une part, le récepteur récupère les informations sur les satellites pour en estimer la position. D'autre part, le récepteur génère le code pseudo-aléatoire correspondant à chaque satellite s à l'aide de son horloge interne. En recalant les signaux générés et les signaux reçus, le récepteur peut estimer un temps de trajet Δt_r^s pour chaque signal. En supposant que les ondes émises se propagent en ligne droite à la vitesse de la lumière c , il est possible d'estimer une distance p_r^s comme le produit $c \times \Delta t_r^s$. Cette distance étant estimée indirectement par le biais d'un décalage entre plusieurs signaux et en faisant des hypothèses simplificatrices sur la synchronisation des horloges et la propagation du signal, on la qualifie de pseudo-distance. La pseudo-distance p_r^s est une approximation de la distance géométrique ρ_r^s séparant un récepteur r et un satellite s .

A partir de l'expression de la pseudo-distance en fonction des coordonnées du récepteur (X_r, Y_r, Z_r) et de chaque satellite (X^s, Y^s, Z^s) , il est possible de définir un système d'équations pour résoudre les trois inconnues de position (X_r, Y_r, Z_r) (Eq. I-1).

$$p_r^s = \sqrt{(X_r - X^s)^2 + (Y_r - Y^s)^2 + (Z_r - Z^s)^2} \quad \text{Eq. I-1}$$

Cependant, les horloges équipant les récepteurs GNSS sont généralement beaucoup moins stables que les horloges atomiques des satellites et désynchronisées du système. Il est nécessaire de considérer que le récepteur estime un temps de trajet comprenant un terme d'erreur d'horloge inconnu δt_r . Cette désynchronisation est égale pour tous les satellites à une même époque (instant de mesure). On peut alors exprimer les coordonnées du récepteur selon cette inconnue et les coordonnées connues des satellites à chaque époque (Eq. I-2). Il est nécessaire d'estimer δt_r pour que la pseudo-distance p_r^s soit représentative de la distance ρ_r^s .

$$c(\Delta t_r^s + \delta t_r) = \sqrt{(X_r - X^s)^2 + (Y_r - Y^s)^2 + (Z_r - Z^s)^2} \quad \text{Eq. I-2}$$

Avec au moins quatre observations à une époque donnée, il est possible de résoudre les quatre inconnues et d'obtenir la position absolue de l'antenne GNSS utilisée (Figure I-11). Par ailleurs, la résolution du décalage d'horloge δt_r du récepteur donne accès à une mesure précise

de l'heure, et permet aux stations GNSS d'être nativement synchronisées. La méthode utilisée pour la résolution du système est généralement celle des moindres carrés, après linéarisation des équations. Cette approche est appelée calcul sur le code. Elle est généralement utilisée par les appareils mobiles et ordinateurs embarqués pour de la navigation, et offre une précision horizontale de l'ordre de quelques mètres. La précision verticale est sensiblement dégradée (généralement d'un facteur 2), en raison de la disposition des satellites visibles qui occupent tous la même demi-sphère autour de l'axe vertical. Si cette précision est satisfaisante pour de la navigation, elle est cependant clairement insuffisante pour des applications liées à la surveillance structurale. Il est alors nécessaire de déployer un calcul plus complexe.

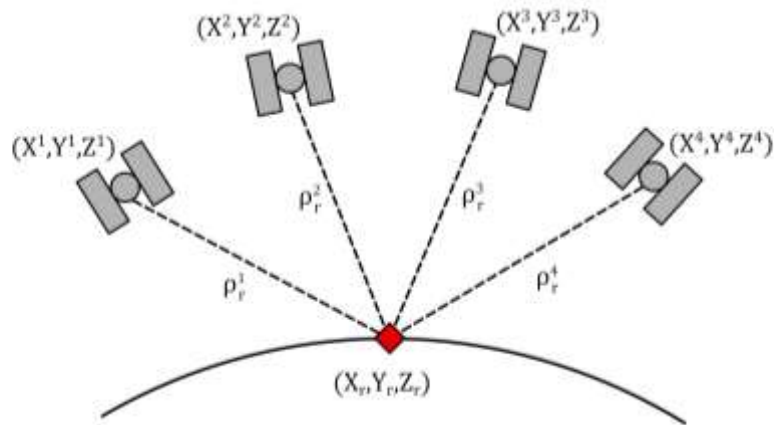


Figure I-11 Représentation des distances entre un récepteur et plusieurs satellites

I.3.2. METHODES DE CALCUL PRECISES

La précision du calcul de position peut être considérablement augmentée en utilisant un calcul sur la phase de l'onde porteuse du signal (Remondi et al., [1985]). Cette approche utilise le déphasage $\Delta\phi_r^s$ entre les ondes porteuses des signaux reçus par le récepteur et celles générées à l'aide de son horloge interne. Le déphasage entre les deux signaux est estimé à l'aide de leur fonction corrélation. Ce déphasage représente alors le temps de trajet de l'onde entre le satellite et le récepteur (de façon analogue à Δt_r^s pour un calcul sur le code). Le déphasage peut être décomposé en deux termes (Figure I-12) :

- une partie entière, notée N_r^s , qui représente le nombre de cycles entiers (longueurs d'ondes) écoulés lors du trajet,
- une partie fractionnaire, notée ϕ_r^s , qui représente la « dernière » fraction de cycle mesurée.

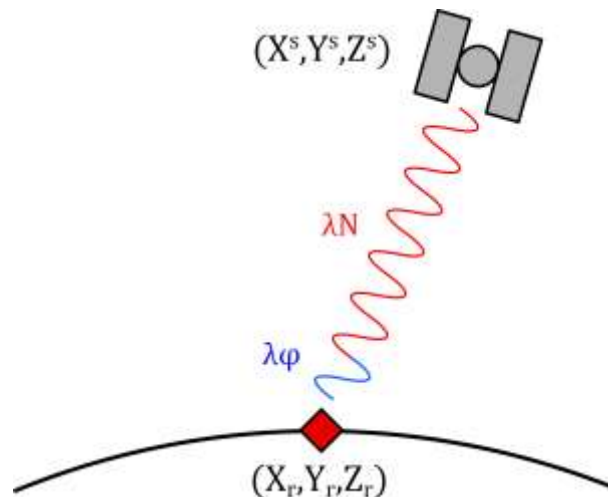


Figure I-12 Représentation de la distance récepteur/satellite en fonction du nombre de cycles N et la phase mesurée

On peut exprimer de façon très simplifiée la relation attendue entre ces deux termes, la longueur d'onde λ de la porteuse et la distance ρ_r^s (Eq. I-3).

$$\lambda(N_r^s + \varphi_r^s) = \rho_r^s \quad \text{Eq. I-3}$$

Cependant, seul le terme φ_r^s peut être mesuré par le récepteur, le nombre de cycle entiers N_r^s étant une inconnue, on parle d'ambiguïté entière. Afin d'optimiser la précision du calcul sur la phase, il est nécessaire de prendre en compte différentes sources d'erreurs qui pouvaient être négligées lors d'un calcul sur le code pseudo-aléatoire (Beutler et al., [1987]). En plus des erreurs d'horloge du récepteur δt_r , on liste les erreurs suivantes :

- les erreurs d'horloge des satellites δt^s , qui représentent les imperfections de la synchronisation des satellites,
- le retard ionosphérique $\tau_{r,iono}^s$, engendré par le passage des ondes dans l'ionosphère, couche de l'atmosphère chargée en ions,
- le retard troposphérique $\tau_{r,tropo}^s$, engendré par le passage des ondes dans la couche la plus dense de l'atmosphère, notamment chargée en eau,
- les approximations sur les orbites ou les positions des satellites GNSS, ainsi que les erreurs liées au matériel, à son installation et aux perturbations locales. Ces erreurs sont regroupées dans un terme ε .

Il est alors possible d'exprimer la relation entre les deux termes du déphasage et la distance en prenant en compte ces erreurs (Eq. I-4).

$$N_r^s + \varphi_r^s = \frac{1}{\lambda} \rho_r^s + \frac{c}{\lambda} (\delta t_r - \delta t^s) + \tau_{r,iono}^s + \tau_{r,tropo}^s + \varepsilon \quad \text{Eq. I-4}$$

La résolution de l'ambiguïté entière est un enjeu clé du positionnement sur la phase, puisqu'une nouvelle inconnue est introduite. Les récepteurs étant capables de compter le nombre de cycles écoulés à partir de la première acquisition, tant qu'il n'y a pas d'interruption du signal il est possible de résoudre l'ambiguïté entière à un instant initial et de propager la solution aux observations suivantes. En cas d'interruption de la résolution ou du signal, il est nécessaire de recalculer une nouvelle ambiguïté entière : on parle de saut de phase.

La réduction ou l'élimination des termes d'erreur est déterminante pour obtenir une précision optimale. Différentes familles de calcul permettent de traiter ces erreurs dans des degrés et conditions variées pour obtenir une précision optimale. On propose ici de les répartir en trois familles, selon l'utilisation ou non d'une ou plusieurs stations de référence. Au sein de ces familles, on distingue deux types d'approches :

- les approches en post-traitement, qui consistent à faire une recherche discrète des ambiguïtés sur l'ensemble d'une série temporelle et de chercher les valeurs les plus probables. Cette recherche est généralement effectuée en deux étapes, une première où les ambiguïtés sont estimées comme des valeurs réelles, et une seconde où elles sont estimées comme des entiers ;
- les approches en temps réel, ou « résolution à la volée » (*resolution on the fly*), qui applique les mêmes principes mais en intégrant les nouvelles mesures en continu. Le temps réel se base uniquement sur des observations antérieures pour la résolution à une époque donnée, contrairement à l'approche post-traitement qui peut utiliser des mesures antérieures et postérieures sur un jeu d'observation délimité. La résolution à la volée est plus sensible aux sauts de phase, et nécessite une élimination particulièrement robuste des erreurs.

Il est important de noter que l'appellation temps réel réfère à la notion de flux de données ingéré et traité, garantissant qu'un résultat sera disponible après un laps de temps fixé. Certaines méthodes dites temps réel sont des variantes des méthodes en post-traitement dont la chaîne de traitement génère une latence (collecte des données nécessaires et temps de calcul) pouvant aller de plusieurs minutes à quelques heures. D'autres méthodes proposent une chaîne de traitement offrant un positionnement temps réel avec quelques secondes de latence seulement : on propose de référer à ces dernières en tant que calcul instantané.

La première famille de calcul est constituée des méthodes ne nécessitant pas à l'utilisation d'observations issues de stations de référence. La méthode la plus courante est le Positionnement Ponctuel Précis, ou *Precise Point Positioning* (PPP). Le PPP est un traitement en temps différé exploitant les mesures de phase. Cette technique repose sur l'utilisation de modèles de correction pour éliminer plusieurs sources d'erreurs :

- les erreurs d'horloges et de position des satellites sont atténuées à l'aide de modèles de correction fournis à intervalles réguliers par des organismes comme l'IGS (*International GNSS Service*) ;
- le retard ionosphérique peut être éliminé de plusieurs façons : soit par l'utilisation d'un modèle paramétrique de la ionosphère, soit par l'utilisation d'une combinaison dite « *ionosphere free* » (M. Ge et al., [2008]), qui met à profit le caractère dispersif de l'ionosphère et l'utilisation de signaux acquis dans plusieurs bandes de fréquence ;
- le retard troposphérique est atténué grâce à l'utilisation de modèles empiriques basés sur les données météorologiques, ou des modèles plus précis visant à modéliser la charge d'eau de l'atmosphère.

Selon la qualité du matériel utilisé et des corrections appliquées, le PPP permet d'obtenir une précision centimétrique à l'échelle mondiale : généralement, un matériel multifréquence est préféré pour garantir une précision centimétrique.

Au cours de la dernière décennie, les approches de « PPP temps réel » (RT-PPP) se sont développées. Le concept repose sur la diffusion en continu des données et modèles de correction par des voies dédiées (inspiré des systèmes d'augmentation type SBAS ou GBAS, dédiés au calcul sur le code), ces corrections étant généralement calculées à partir d'un réseau de stations GNSS dédiées. Les corrections sont appliquées en temps réel instantané, et permettent une résolution à la volée des ambiguïtés entières, dans un calcul similaire au PPP. La précision attendue est plus faible que celle d'un calcul en post-traitement, en raison de modèles souvent moins précis et d'une résolution des ambiguïtés plus sensible aux sauts de phase.

La seconde famille de calcul est celle exploitant une station de référence : on parle de calcul relatif. Le GNSS relatif est une approche qui peut être réalisée en post-traitement ou en temps réel, et qui consiste à intégrer une station de référence, dont la position est fixe et connue dans un référentiel donné. Cette station fixe est utilisée pour corriger les termes d'erreurs sur une ou plusieurs station(s) de mesure. La position finale est obtenue relativement à la station de référence, et donc dans son référentiel. La technique des simples différences (Figure I-13), appliquée entre les données des deux récepteurs permet d'éliminer les erreurs liées aux horloges et positions des satellites.

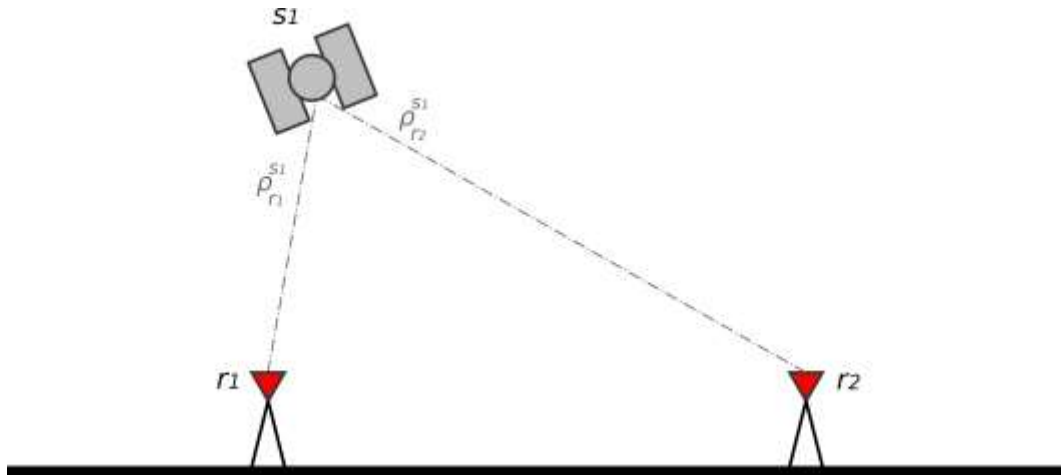


Figure I-13 Fonctionnement des simples différences en calcul relatif

La technique des doubles différences (Figure I-14), appliquée entre deux satellites, permet d'éliminer les erreurs d'horloges des récepteurs. Le détail de cette technique est donné dans le Chapitre II. Si les stations de référence et de mesure sont suffisamment proches (distance inférieure à 10-15 km), les retards liés à l'ionosphère et la troposphère peuvent être éliminés en considérant qu'ils affectent les stations de la même manière. Aujourd'hui, de nombreux organismes (généralement nationaux) disposent à l'échelle nationale de réseaux de station de référence, et permettent aux utilisateurs d'en collecter les données pour procéder facilement à un calcul relatif.

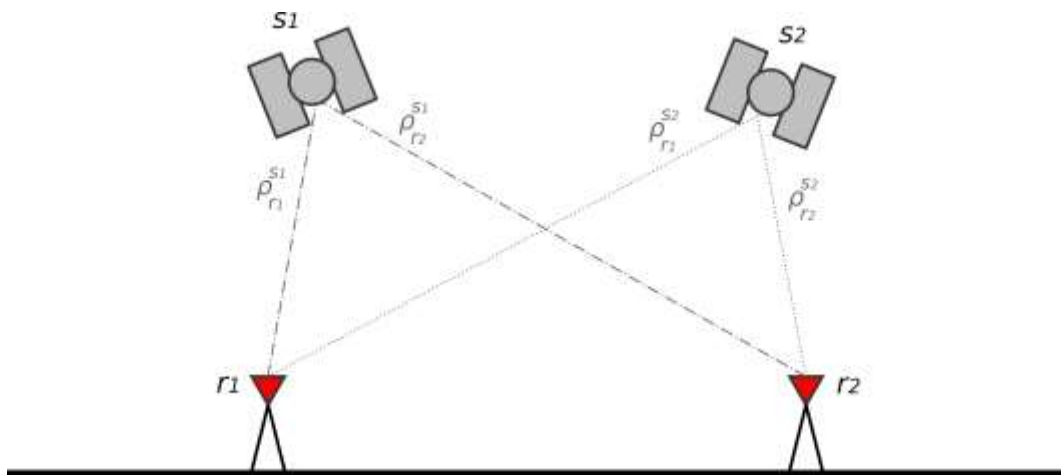


Figure I-14 Fonctionnement des doubles différences en calcul relatif

La précision d'un calcul relatif dépend grandement de la distance avec la station de référence (ligne de base). Dans le cadre d'un calcul en post-traitement avec une ligne de base inférieure au kilomètre, la précision obtenue dans le référentiel de calcul peut être infracentimétrique, même avec du matériel monofréquence.

Le RTK (*Real Time Kinematic*) est une variante du positionnement relatif qui repose sur une transmission directe des données des stations (généralement par un lien radio) pour résoudre les ambiguïtés à la volée. L'avantage du RTK est qu'il permet une résolution instantanée. Cette dernière entraîne cependant une baisse de la précision par rapport au calcul relatif « classique », avec une précision de l'ordre de 2-3cm pour une courte ligne de base.

Enfin, la troisième famille regroupe les méthodes dites en réseau, qui exploitent les observations de plusieurs stations de référence. En post-traitement, deux approches sont possibles :

- la combinaison de plusieurs calculs relatifs avec plusieurs références, en pondérant les résultats selon des critères déterminés (distance, qualité du calcul, du signal). Cette approche est généralement réservée pour les applications géodésiques ou l'établissement de stations de référence fixes, et peut permettre d'atteindre une précision millimétrique ;
- la génération d'une station de référence virtuelle (*Virtual Reference Station, VRS*), qui consiste à utiliser les données des stations constituant le réseau et de simuler les observations « attendues » à un point fixe donné, souvent proche des stations de mesure. Cette station virtuelle est alors utilisée dans un calcul relatif classique. Cette approche permet d'obtenir une précision d'ordre centimétrique malgré des lignes de base importantes.

Au cours de la dernière décennie l'utilisation de réseaux dits *Network Real Time Kinematic (NRTK)* s'est développée, principalement sous la forme de solutions commerciales, pour permettre l'application de calculs en réseau en temps réel. Les NRTK peuvent être utilisés pour générer des VRS en temps réel, permettant un positionnement précis quasi instantané. Les NRTK peuvent également être utilisés pour générer des corrections (effets atmosphériques, erreurs d'horloges) intégrées dans un calcul relatif (*Flaschen Korrektur Parameter, FKP* ou *Master Auxiliary Concept, MAC*).

Ces différentes approches, selon les conditions dans lesquelles elles sont appliquées et le matériel utilisé, permettent d'atteindre une précision théorique centimétrique, voire infra-centimétrique dans certains cas (Figure I-15). Cependant, l'utilisation des GNSS est soumise à plusieurs conditions et contraintes relatives à l'installation et le traitement des données.

	0 Référence	1 Référence	N Références
Solution disponible en temps différé	<p>PPP</p> <ul style="list-style-type: none"> → Besoin de matériel multifréquence → Post-traitement ou temps réel (avec délais) → Position obtenue dans un référentiel global 	<p>Relatif</p> <ul style="list-style-type: none"> → Besoin d'une courte ligne de base pour précision optimale → Post-traitement ou temps réel (avec délais) → Position obtenue dans le référentiel de la station de base 	<p>Calcul en réseau / VRS</p> <ul style="list-style-type: none"> → Calcul plus complexe → Post-traitement → Position obtenue dans un référentiel global
Solution disponible en instantané	<p>RT-PPP</p> <ul style="list-style-type: none"> → Besoin d'un matériel multifréquence → Besoin d'un système de collecte en temps réel des corrections → Position obtenue dans un référentiel global 	<p>RTK</p> <ul style="list-style-type: none"> → Besoin d'une courte ligne de base pour précision optimale → Besoin d'une liaison temps réel entre les stations → Position obtenue dans le référentiel de la station de base 	<p>NRTK (VRS, FKP, MAC)</p> <ul style="list-style-type: none"> → Besoin d'un système de collecte en temps réel des données de stations ou de corrections → Position obtenue dans un référentiel régional

Figure I-15 Synthèse des méthodes de positionnement GNSS précises

I.3.3. ELEMENTS CONSTITUTIFS D'UNE SOLUTION GNSS

La notion de solution GNSS englobe le matériel constituant la station GNSS, les moyens de collecte et transmission des données, et le traitement appliqué pour obtenir un positionnement. Une station GNSS comporte systématiquement au moins deux éléments nécessaires à l'acquisition et au traitement des données : le récepteur GNSS et l'antenne GNSS.

Le récepteur GNSS est l'instrument chargé de collecter les signaux reçus des satellites GNSS, de les convertir soit en observations ou en messages de navigation, et d'effectuer au minimum une première estimation de la position. Le terme d'observations correspond aux mesures des décalages entre les signaux générés en interne à partir de sa propre horloge et des signaux reçus. Les observations sont généralement des observations sur le code, sur la phase, ou dans le domaine fréquentiel (Doppler). Elles constituent les mesures de base des stations GNSS. Le terme de message de navigation correspond aux informations liées aux satellites : les paramètres d'orbites,

les corrections d'horloges, des données pour la correction ionosphérique, et éventuellement des messages spéciaux. Il existe un format standard pour les observations et messages de navigation : le format RINEX. De nombreux fabricants utilisent néanmoins un format propriétaire lors des acquisitions. Le récepteur produit généralement une estimation de sa position à l'aide d'un calcul simple sur le code, même si certaines solutions commerciales intègrent des modules capables de nativement collecter des corrections ou de réaliser un calcul précis embarqué (cf. méthodes listées dans le Paragraphe I.3.2). La performance – et donc la gamme – d'un récepteur est généralement jugé sur plusieurs critères :

- la compatibilité avec les constellations GNSS, allant du GPS seul à une compatibilité avec toutes les constellations (GPS, Glonass, Beidou, Galileo). L'augmentation du nombre de satellites augmente le nombre d'observations utilisables pour le positionnement ;
- la compatibilité avec les différentes bandes de fréquence émises par les différents satellites, allant du monofréquence, au bifréquence et au multifréquence. L'augmentation du nombre de fréquences permet de multiplier le nombre d'observations, et d'améliorer la correction des effets atmosphériques et la résolution des ambiguïtés entières ;
- la fréquence d'échantillonnage, allant jusqu'à 100Hz pour les solutions commerciales les plus puissantes ;
- le nombre de canaux. Un canal est une interface abstraite utilisée pour suivre et démoduler un signal dans une bande de fréquence d'un satellite, il est donc nécessaire d'avoir au moins un canal par observation. Le nombre de canaux est cependant supérieur au nombre d'observations, ce qui permet d'assigner plusieurs canaux pour chaque signal de chaque satellite, et donc d'avoir une meilleur acquisition. Les récepteurs les plus modestes comptent quelques dizaines de canaux, les plus puissants pouvant monter jusqu'à 700 canaux ;
- la stabilité de l'horloge interne. Différents types d'horloges existent, comme les horloges à cristal simple (XO), les horloges TCXO (*Temperature Controled Cristal Oscillator*), OCXO (*Oven Controled Cristal Oscillator*), MCXO (*Microcontroller Compensated Cristal Oscillator*), USO (*Ultra Stable Oscillator*), ou les horloges à rubidium.

A ces éléments techniques s'ajoutent diverses caractéristiques propres à l'utilisation du matériel : existence d'une interface utilisateur, récepteur programmable, durcissement du matériel (chocs, vibrations, humidité), connectique et systèmes de communication, calcul embarqué, ect.

Le récepteur est relié à l'aide d'un câble coaxial à une antenne GNSS, dont la gamme peut elle aussi être estimée à partir de plusieurs critères :

- la compatibilité avec les différentes constellations GNSS et bandes de fréquences des satellites ;
- le gain de l'antenne et son rapport signal sur bruit ;
- l'existence et la précision d'une calibration précise de l'antenne, permettant de déterminer la position du centre de phase de l'antenne à l'intérieur de celle-ci ;
- la présence de bouclier contre les multitrajets (Figure I-16), qui peut prendre la forme de plan de masse circulaire simple, de bouclier plus épais usiné de façon à piéger les ondes indésirables, voire comme pour le cas des « choke rings », de cercles concentriques usinés en un seul bloc.

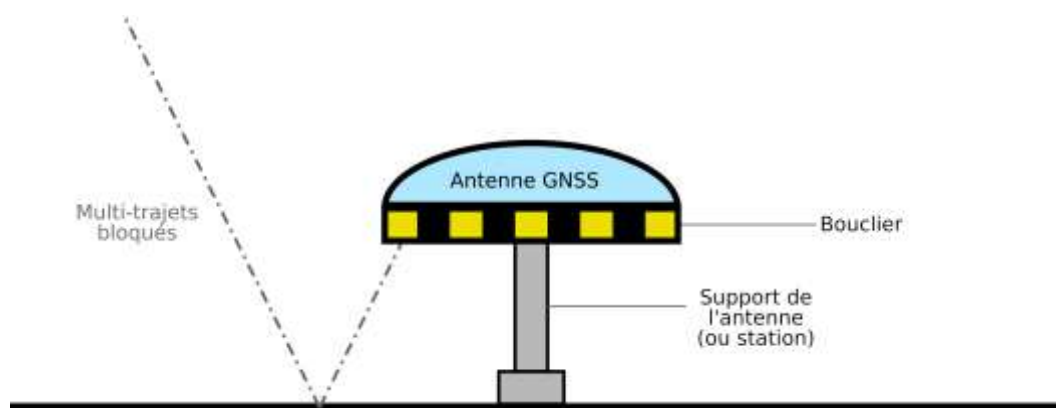


Figure I-16 Dispositif de bouclier contre les multitrajets

Les multitrajets sont générés par le rebond des ondes des satellites sur l'environnement autour de l'antenne, ce qui a pour effet de rallonger le temps de trajet de l'onde mesurée et de fausser les distances estimées avec les satellites. Cette perturbation est particulièrement notable dans les situations où la ligne directe avec le satellite est obstruée, et pour lesquels seuls les multitrajets arrivent sur l'antenne : le récepteur n'a pas la possibilité de détecter si l'onde provient d'un rebond car il s'agit du premier signal reçu. Généralement, il convient d'appliquer un angle de coupure sur l'horizon (de l'ordre de 10° à 15°), ou d'utiliser un bouclier sur l'antenne afin de la protéger de ces signaux. Les multitrajets peuvent être identifiés dans certains scénarios. Avec une station fixe, leurs effets ont un impact sur les séries temporelles avec une répétabilité égale à la période de retour en position dans le ciel des satellites utilisés. Ce genre de correction est cependant complexe à envisager pour une station de mesure mobile.

De façon similaire aux récepteurs, des caractéristiques liées au déploiement comme le durcissement de l'antenne ou la connectique sont à prendre en compte. Enfin, certaines antennes qualifiées d'antennes intelligentes comportent un récepteur intégré, les transformant en stations autonomes.

Les solutions GNSS haut de gamme sont généralement utilisées pour des applications topographiques ou géodésiques. Les stations topographiques font généralement référence à un matériel versatile utilisé pour les applications de topométrie, de relevé ou d'instrumentations, tandis que les stations géodésiques font référence à des stations généralement laissées fixes servant de référence ou pour le suivi de déplacements à long terme. Les deux expressions désignent un matériel au minimum bifréquence avec plusieurs centaines de canaux et avec une antenne comportant une protection avancée contre les multitrajets. Le matériel à bas coût est plus généralement constitué de récepteurs monofréquence avec moins d'une centaine de canaux, des petites horloges à cristal simple ou TCXO, couplés à des antennes dotées d'un bouclier simple.

I.3.4. LIMITES ET CONTRAINTES

L'utilisation du matériel GNSS est liée à plusieurs contraintes d'installation et d'utilisation pour atténuer les erreurs présentes dans le calcul. En premier lieu, si l'installation de matériel GNSS est relativement aisée puisqu'elle ne nécessite pas d'insertion dans la structure, plusieurs contraintes sont à prendre en compte. L'antenne GNSS doit être positionnée de façon à avoir le plus grand angle de ciel visible. Une plus grande visibilité du ciel permet d'augmenter non seulement le nombre de satellites visibles, mais aussi leur durée de visibilité, diminuant le nombre de sauts de phase lors du calcul. Bien que les 95 satellites GNSS en service en 2019 permettent d'avoir un nombre suffisant de satellites dans un petit angle de vision, une mauvaise répartition spatiale des satellites utilisés peut avoir un impact significatif sur la précision du calcul. La géométrie environnante est également un facteur clé à prendre en compte lors d'une instrumentation, les stations GNSS étant particulièrement sensibles aux effets des multitrajets (Van Nee, [1992]). Ceux-ci peuvent avoir un impact centimétrique sur la précision des séries temporelles, et sont différents d'une station à l'autre : ils ne peuvent donc pas être effacés

simplement. Dans le domaine du génie civil, leur filtrage est particulièrement difficile : la répétabilité de la constellation GPS (23h56) est proche de la périodicité de 24h des effets thermiques liés au cycle jour/nuit. Afin d'en diminuer l'impact, il convient d'installer l'antenne GNSS de façon à éviter au maximum les sources de réflexion.

Les problématiques d'acquisition et de flux de données doivent également être soulevées. Les données d'observation peuvent être rapidement volumineuses puisqu'elles comportent des informations de mesure de code, de phase, de rapport signal sur bruit et de doppler avec chaque satellite pour chaque mesure. La question du transfert des observations de la station GNSS vers une centrale d'acquisition/collecteur peut ainsi être complexe si aucune liaison filaire n'est possible. Dans le cadre d'une instrumentation dense (réseau de capteurs GNSS déployés), le volume de données à transférer depuis le site d'instrumentation vers un serveur distant (client, exploitant, laboratoire) peut inciter à vouloir effectuer le calcul GNSS directement sur site, et à ne pas transférer les données brutes.

La notion de système de référence est également source de complications. Si les GNSS permettent un positionnement absolu dans un référentiel global, celui-ci n'est pas toujours le plus pertinent à utiliser. Des effets liés à la déformation de la croûte terrestre peuvent être variables à l'intérieur d'un référentiel même à l'échelle nationale (dans des pays à forte activité sismique), et peuvent donc être perçus sur les mesures et interprétés de façon erronée comme des dérives. Dans le contexte du génie civil, il est pertinent d'utiliser un référentiel local et adapté à la structure observée. Avec l'utilisation de techniques relatives, cette étape est particulièrement simple puisqu'il suffit de considérer un repère dans lequel la station de référence est fixe. Avec l'utilisation du PPP, il convient de bien vérifier les propriétés des systèmes de référence et repères de référence régionaux, ainsi que leurs mises à jour.

Enfin, le coût du matériel GNSS n'est pas à négliger. Les stations GNSS étant des appareils complexes et pointus, la plupart des solutions « clé en main » de précision sont commercialisées pour des tarifs compris entre 8 000€ et 18 000€ (en € 2019). En réponse aux enjeux de rentabilité de la surveillance structurale, il convient alors de maximiser l'exploitation de ces capteurs, d'en proposer une intégration intelligente dans les systèmes de surveillance, ou encore de s'intéresser aux performances de solutions GNSS plus abordables.

I.4. UTILISATION DES GNSS POUR LA SURVEILLANCE STRUCTURALE

La surveillance de santé structurale des ouvrages d'art repose principalement sur des méthodes exploitant des informations et mesures dynamiques ou statiques locales. Peu d'outils permettent un suivi géométrique global et absolu de l'ouvrage, et les mesures associées ne sont généralement exploitées que par des approches simples ou nécessitant un modèle physique de référence.

Le positionnement par satellites est un outil déjà présent dans les applications de surveillance structurale, principalement pour la mise en place de points de référence pour les autres mesures, ou le rattachement de données dans le cadre de mesure optiques ou topométriques. Il est pourtant rarement exploité en tant que capteur de mesure sur ouvrage. Les GNSS offrent pourtant des solutions capables de fournir une information de position en 3D dans un référentiel donné (positionnement absolu), sans dérive au cours du temps, et avec un déploiement relativement aisé. Leur exploitation comme capteur de mesure peut permettre d'obtenir une information complémentaire aux mesures des systèmes de surveillance conventionnels. Leurs possibilités et performances sont déjà éprouvées dans les domaines de la navigation, mais aussi dans des applications de précision telles que la définition de systèmes de référence, la mise en référence de mesures locales, le suivi de déformations des sols, ou plus généralement, de déformations lentes. L'amplitude et la vitesse des phénomènes observés dans ces applications recouvrent, au moins partiellement, celles observables sur une structure de génie civil souple, comme un ouvrage d'art.

I.4.1. SURVEILLANCE DES TOURS ET STRUCTURES DE GRANDE HAUTEUR

L'une des premières utilisations documentées d'une station GNSS pour la surveillance des ouvrages de génie civil remonte aux années 90. Lovse et al., [1995] installèrent une paire de stations GPS au sommet de la tour de Calgary, haute de 160 m, ainsi qu'une référence précise permettant un calcul relatif. À cette époque, seul le GPS était opérationnel, et le signal complet n'était pas publiquement accessible. L'objectif était de vérifier la capacité d'une station GPS à observer les oscillations d'une grande tour induites par les effets du vent. Les résultats ont montré que la solution GPS était capable d'observer des oscillations d'une amplitude totale de 6cm avec des fréquences allant jusqu'à 0,3 Hz. Il fut cependant noté que le bruit des données était trop élevé pour permettre une analyse plus poussée. Bien que ces résultats soient très encourageants compte tenu de la nouveauté de cette technique à l'époque, l'étude ne s'appuyait que sur de courtes sessions. Les effets de multitrajets sur la précision des données, la stabilité et la répétabilité à long terme des mesures n'avaient donc pas pu être qualifiés.

Les GNSS apparaissent comme un outil pertinent pour le suivi de ce type d'ouvrage. En effet, les instruments traditionnels de mesure de vibration comme les accéléromètres sont limités pour le suivi des déplacements lents en raison des doubles intégrations nécessaires pour calculer des déplacements (W. S. Chan et al., [2006]; Roberts, Meng, et al., [2004]). Les instruments de topométrie (tachéomètres, stations robotisées) peuvent être utilisés pour compléter ces mesures avec le suivi des déplacements statiques et quasi-statiques. Cependant leur implémentation n'est pas optimale : en raison de la géométrie de la tour, pour en suivre plusieurs façades ou simplement les quatre points au sommet, il est quasi-systématiquement nécessaire de déployer plusieurs instruments (coûteux) de part et d'autre de la structure. De plus, les déplacements suivis sur ce type d'ouvrage sont principalement des déplacements horizontaux, ce qui s'accorde bien avec les techniques GNSS qui offrent une plus grande précision horizontale que verticale.

Dai et al., [2006]; Xin Li et al., [2018] notèrent néanmoins qu'une grande différence d'altitude (>200m) entre la station de référence et la station de mesure peut avoir un impact significatif sur la précision des séries temporelles. Lorsque deux stations présentent un écart vertical important, la « hauteur » d'atmosphère les séparant va altérer différemment les signaux reçus par les deux stations. Cet effet est par ailleurs variable avec l'humidité de l'air (faible par temps sec, plus fort avec l'humidité croissante), ce qui peut le rendre difficile à modéliser. Surtout, l'installation de la station de référence peut s'avérer complexe. Les immeubles de grande hauteur étant généralement en milieu urbain et dense, la pose d'une station au niveau du sol peut être impossible à cause de la formation de canyons urbains. Çelebi et al., [2002] ont étudié le potentiel d'un dispositif similaire pour la surveillance en temps réel de hautes tours en milieu urbain. Ils ont confirmé la difficulté à mettre en place une station de référence dans ce genre d'environnement. En cherchant des points fixes à proximité de la tour surveillée (San Francisco, Etats-Unis), le nombre de satellites visibles pouvait chuter en dessous de quatre lors des essais. Ils optèrent pour une installation de la station de référence sur un autre immeuble, plus bas, et fixe (Figure I-17). Si cette approche présente l'inconvénient de devoir s'assurer de l'immobilité de la structure, elle offre une meilleure visibilité des satellites, et est régulièrement utilisée pour ce genre d'applications. Meng et al., [2004] proposèrent une approche basée sur l'utilisation de pseudolites, des sources émettrices fixées au sol simulant des satellites artificiels, afin de compenser le manque de satellites visibles en ville. Malgré l'amélioration de la précision dans le scénario étudié, l'utilisation des pseudolites ne s'est pas généralisée, puisqu'elle nécessite l'installation de points de référence à haute précision et qu'elle amenuise l'aspect « déploiement aisé » des stations GNSS. Bien que les masques en milieu urbain peuvent désormais être partiellement compensés dans les applications de navigation grâce à l'utilisation de plusieurs constellations GNSS, la performance d'un calcul de précision reste dégradée en raison de la faible dispersion des satellites visibles dans le ciel.

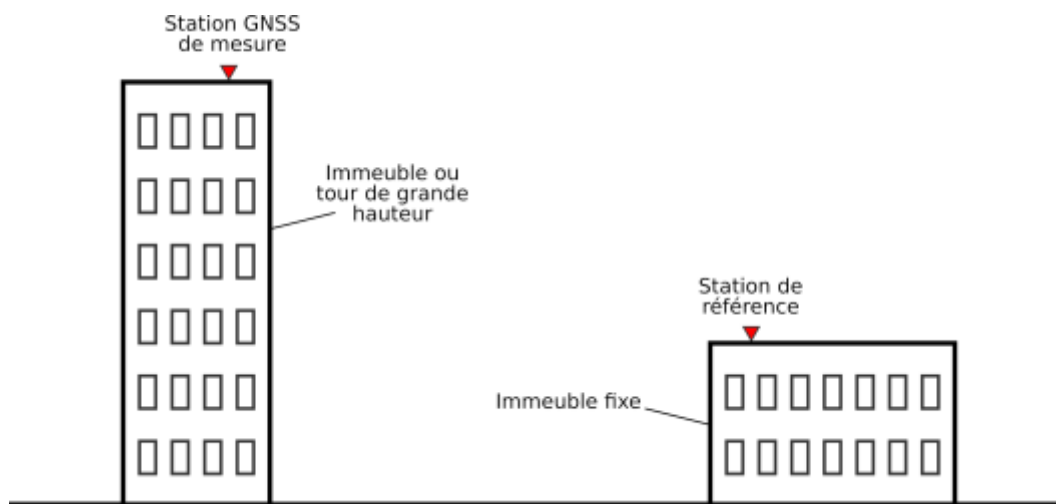


Figure I-17 Surveillance d'un immeuble de grande hauteur avec référence sur immeuble

Des systèmes de surveillance incluant des stations GNSS haute fréquence sur les toits d'immeubles de grande hauteur, avec une référence à proximité et une approche en post-traitement ont été déployés par Herring et al., [2019]; Kijewski-Correa, Kareem, et al., [2006]; Kijewski-Correa, Kilpatrick, et al., [2006]; Kuang et al., [2011]; Q. Li et al., [2016]; H. S. Park et al., [2008]; J. Yi et al., [2013]. Il ressort que les stations déployées furent capables d'identifier la réponse de la structure au vent, à travers l'identification des premiers modes propres des immeubles instrumentés. Surtout, les stations GNSS apparaissent comme des outils complémentaires aux accéléromètres traditionnels en étant capables d'identifier les mouvements quasi-statiques induits pendant une période à fort vent, ou les effets thermiques. Chatzi et al., [2012] proposèrent une stratégie de fusion de données GNSS avec des mesures d'accéléromètres pour le suivi des tours de très grande hauteur afin de combiner le suivi des déplacements les plus lents par des stations GNSS au suivi des vibrations par des accéléromètres. Des variations des réponses dynamique et quasi-statique furent observées par des stations GNSS lors d'évènements particuliers, comme lors de tempêtes (H. S. Park et al., [2008]; J. Yi et al., [2013]) ou d'un séisme (Herring et al., [2019]). Dans une approche d'optimisation des coûts d'instrumentation, Z. Yi et al., [2018] proposèrent un dispositif combinant des stations sur ouvrage haute fréquence avec une station de référence basse fréquence. Avec cette approche, la position des antennes de mesure est calculée en positionnement relatif à la fréquence d'échantillonnage plus faible de la station de référence. Un second calcul autonome (type PPP) est réalisé à plus haute fréquence, et est ensuite recalé sur la solution du calcul relatif de façon à combiner l'exactitude du premier calcul et la haute fréquence d'échantillonnage du second. Cette approche vise à permettre l'intégration des données de stations de réseaux de référence nationaux, généralement avec un échantillonnage plus faible, pour les applications de surveillance dynamique.

Afin de proposer des systèmes de surveillance et d'alerte en temps réel (haute surveillance), Xiaojing Li et al., [2006]; Tamura et al., [2002]; Xiong et al., [2019] ont investigué le potentiel d'un dispositif exploitant un positionnement par RTK (Figure I-18). Leurs études ont confirmé le potentiel de cette technique en temps réel, malgré une précision dégradée par rapport à un calcul en post-traitement. Xiaojing Li et al., [2006]; Tamura et al., [2002] confirmèrent la capacité d'un tel dispositif GNSS à suivre les changements de comportement lors de tempêtes ou d'un séisme. L'utilisation d'un dispositif en temps réel impose néanmoins des contraintes d'installation parfois complexes pour la liaison des stations, et le besoin d'un filtrage (*Random Decrement Technique*, RDT) comme montré par Xiong et al., [2019] pour extraire les caractéristiques de l'ouvrage. Ces contraintes font qu'un dispositif en post-traitement est généralement préféré pour permettre un suivi renforcé de ce type d'ouvrage.

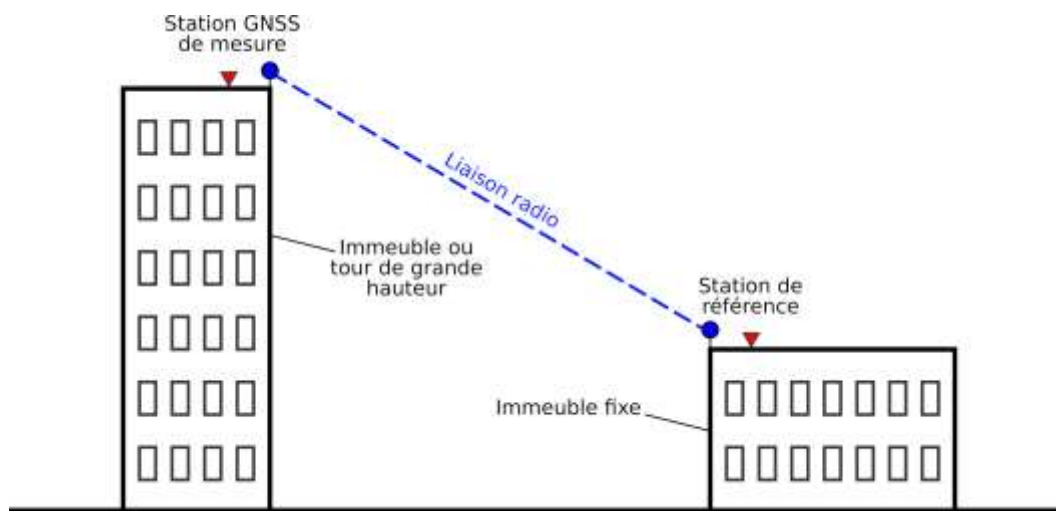


Figure I-18 Dispositif de surveillance RTK pour grands immeubles

Malgré un intérêt récent pour les techniques PPP pour le suivi dynamique, permettant de ne pas avoir à recourir à une station de référence (P. Xu et al., [2013]; Yigit, [2016]; Yigit et al., [2017]), peu d'études ont pour le moment validé la performance d'un tel dispositif sur ce type d'ouvrage. On peut noter que Kuang et al., [2013] ont identifié le potentiel d'un calcul PPP pour le suivi de la réponse structurale au vent.

Le suivi du comportement de structures de grande hauteur autres que des immeubles a également été étudié. Breuer et al., [2002], [2008] ont utilisé une station déployée au sommet d'une tour télévision construite comme une aiguille en béton de 150m de haut supportant une cabine et des antennes TV. Des séries temporelles obtenues par un calcul relatif en post-traitement ont pu être corrélées avec la vitesse du vent, la chauffe des matériaux par le soleil, et la présence d'un orage. Cazzaniga et al., [2005]; Górski, [2015], [2017] ont équipé des cheminées industrielles de stations GNSS à leur sommet. A l'aide d'un calcul relatif en post-traitement, les séries temporelles GNSS ont pu être utilisées pour observer la réponse dynamique des cheminées. Un constat similaire aux applications sur immeubles de grande hauteur peut être fait : les GNSS sont efficaces pour identifier les modes propres et déplacements les plus lents, et complémentaires à une instrumentation par accéléromètres plus traditionnelle. Górski, [2015] a utilisé les données GNSS acquises sur une cheminée de 300m couplées à un filtrage RDT pour extraire les caractéristiques dynamiques de la structure. Les fréquences propres, les amplitudes de mouvements selon 10 directions (horizontales) et les coefficients d'amortissement furent identifiés, confirmant le potentiel des outils GNSS pour le suivi dynamique de ce type de structure.

Compte tenu des contraintes d'installation des stations GNSS, qui nécessitent un maximum de portion de ciel visible, la quasi-totalité des études sur les structures de grande hauteur exploitent les données de stations installées à leurs sommets. L'installation de capteurs GNSS à des niveaux intermédiaires, pourtant courante pour une instrumentation classique par accéléromètres, est évitée en raison des importants effets de masque (~50% du ciel) générés par la structure elle-même. Dans ce contexte, Pehlivan, [2018] évalua la performance de deux stations GNSS installées de façon diamétralement opposées à hauteur intermédiaire sur une tour (Figure I-19), de sorte que les deux stations aient des effets de masque significativement différents. Les séries temporelles furent générées avec un calcul RTK. Une première étude des données a montré des coupures importantes et irrégulières sur les deux stations en raison des masques importants. Néanmoins, après un filtrage avancé comprenant six étapes, l'auteur fut capable d'extraire la fréquence propre principale de la structure des deux capteurs, les deux valeurs obtenues étant en accord. Si cette étude note encore de nombreuses limitations sur la précision et la disponibilité des données, elle appelle à d'autres applications exploitant l'installation de stations GNSS à des emplacements autres qu'au sommet des structures.

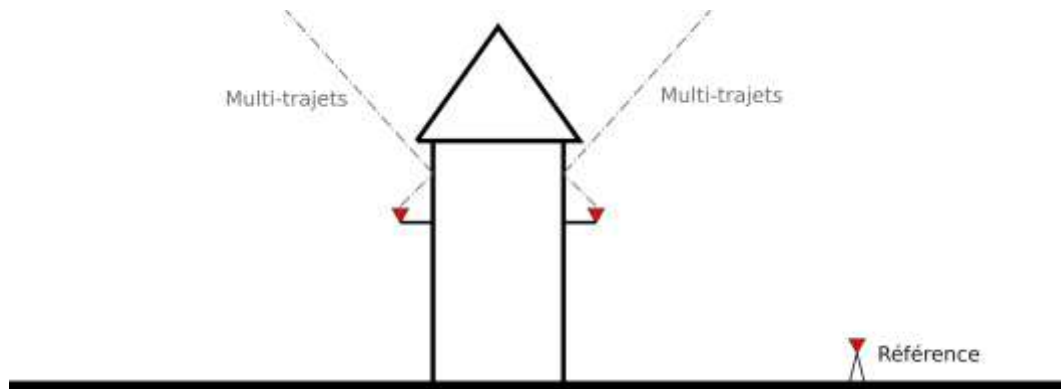


Figure I-19 Comparaison des multitrajets sur deux faces d'une tour

I.4.2. SURVEILLANCE DES PONTS ET VIADUCS

Les ponts et viaducs, en particulier les ouvrages de grande taille, présentent des défis et enjeux similaires aux structures de grande hauteur pour leur instrumentation. En raison de leur souplesse, leurs fréquences propres sont relativement faibles (les plus grands ouvrages pouvant avoir leurs premiers modes propres entre 0,05 Hz et 1 Hz). Surtout, leurs dimensions entraînent des mouvements de grande amplitude, pouvant atteindre plusieurs décimètres pour les effets de flèche générés par les conditions météorologiques (température, vents forts) ou une charge importante. Le suivi de ces réponses dynamiques et quasi-statiques et des déformations statiques à long terme est rendu complexe par la taille (distance à une référence fixe), la disposition (chevauchement d'obstacle) et l'exploitation des ouvrages. Compte tenu des propriétés de ces mouvements, les caractéristiques du positionnement par satellites en font un candidat pertinent pour compléter les techniques d'instrumentation traditionnelles.

Dès la fin des années 90, Ashkenazi et al., [1997] proposèrent une première évaluation de la capacité de stations GNSS à suivre le comportement de grands ponts. Ils équipèrent un pont suspendu en béton doté d'une travée centrale de 1400m de long (pont du Humber) en deux endroits : une station a été installée sur un mât au centre du tablier, et une autre au sommet d'un des pylônes. Le traitement a été réalisé par un calcul relatif en temps réel avec une station de référence située sur une partie fixe de l'ouvrage. L'étude de courtes séries temporelles du tablier (durée inférieure à 15 minutes) a permis d'identifier des mouvements verticaux et latéraux. Cependant, des difficultés liées à l'installation du matériel GPS furent mise en avant : en plus des problèmes de liaison radio, la mise en place de la station de mesure elle-même a posé quelques difficultés. Le besoin de dégager le plus de ciel visible pour permettre une bonne visibilité des satellites est complexe sur ce genre d'ouvrage : les pylônes, câbles, garde-corps et le trafic sont des sources de multitrajets, le trafic étant une source irrégulière et dont l'impact sur la précision est d'autant plus difficile à prévoir. L'approche classique consiste à surélever l'antenne sur un mât, mais comme l'a montré cette étude, ce type de support peut être facilement mis en mouvement par le vent ou le passage de véhicules. La pose de stations GNSS au niveau du tablier d'un pont peut donc nécessiter la mise en place d'un support complexe voire encombrant, permettant d'assurer une élévation suffisante à l'antenne GNSS tout en prévenant toute vibration notable. Si cette problématique peut sembler secondaire, elle a un impact sur le coût de déploiement d'une instrumentation par GNSS et par conséquent sur sa viabilité. La courte durée des séries proposées par Ashkenazi et al., [1997] empêche d'évaluer l'ampleur de l'impact des multitrajets pour une instrumentation permanente. Néanmoins, le potentiel de cette technologie encore nouvelle à l'époque pour le suivi d'ouvrages d'art a été mis en avant par cette étude.

La capacité de stations GNSS à suivre les phénomènes de déformation par une mesure de flèche (Figure I-20) a été investiguée par Guo et al., [2013]; Psimoulis et al., [2016]; Roberts et al., [2001]; J. Wang et al., [2016] pour des ponts suspendus et par Górski et al., [2018]; Handayani et al., [2015]; Kaloop & Hu, [2016]; Tang et al., [2017]; Watson et al., [2007]; Xi et al., [2018] pour des ponts à haubans. Ces études confirment l'aptitude des solutions GNSS pour suivre la réponse

quasi-statique de ponts de dimensions variées. L'absence de dérive sur les mesures GNSS couplée à la notion de positionnement absolu permet à cette technologie d'être particulièrement efficace pour suivre ce type de mouvements. L'installation de stations GNSS sur le tablier ou les pylônes d'un ouvrage permet une mesure précise et directe de la flèche, là où les accéléromètres sont mis en difficulté par la fréquence lente du phénomène et le besoin d'intégrer les mesures. Les mesures de flèche par GNSS sur le tablier ou les pylônes d'ouvrages ont notamment été corrélées au trafic (Guo et al., [2013]; Handayani et al., [2015]) ou aux conditions environnementales (J. Wang et al., [2016]) pour les valider. Watson et al., [2007] utilisèrent les observations GNSS acquises sur le tablier et au sommet d'un pylône d'un pont à haubans pour élaborer des corrections pour un modèle existant de l'ouvrage.

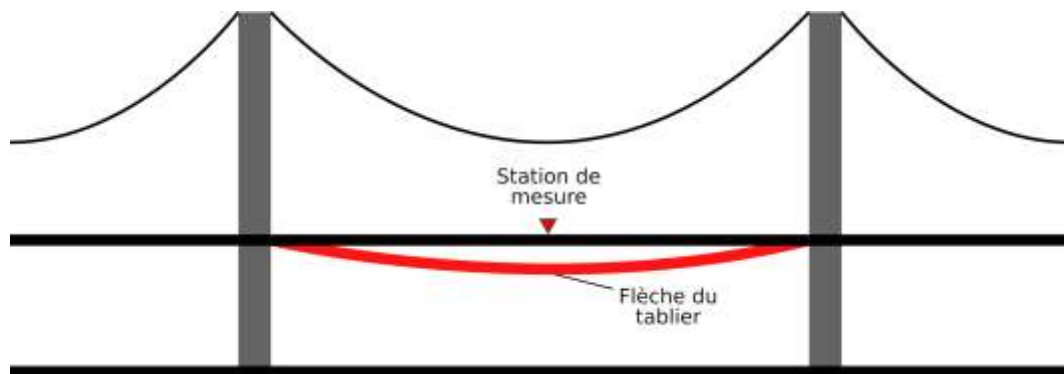


Figure I-20 Mesure de flèche du tablier à l'aide d'une station GNSS

La plupart des instrumentations sur ouvrage reposent sur un système GNSS relatif multifréquence. Dans une optique d'optimisation des coûts, Tang et al., [2017] ont évalué le potentiel d'un calcul PPP pour ces applications. L'utilisation du PPP permet de ne pas avoir recours à une station de référence, et *in-fine* à réduire le nombre de stations à déployer pour une instrumentation. Ils notèrent cependant les limites de cette approche, encore moins précise et robuste pour le suivi de phénomène quasi-statiques ou dynamiques. Avec un objectif similaire de réduction des coûts, Cosser et al., [2003] comparèrent la performance de stations monofréquence et multifréquence pour le suivi de déformations sur ouvrages. Si le matériel entièrement monofréquence a été nettement moins performant qu'un matériel multifréquence, les auteurs ont noté le potentiel d'une combinaison entre une référence multifréquence et une station de mesure monofréquence.

Avec l'augmentation des fréquences d'acquisition du matériel GNSS commercial et une attention grandissante sur les méthodes de calcul dynamiques, la capacité des stations GNSS à suivre les phénomènes dynamiques a rencontré un intérêt croissant au cours de la dernière décennie. Chen et al., [2017]; Meo et al., [2006]; Psimoulis et al., [2016]; Sun et al., [2017]; J. Wang et al., [2016]; L. Xu et al., [2002]; T. H. Yi et al., [2010] étudièrent la capacité de stations GNSS à identifier les fréquences ou modes propres de ponts suspendus et Górski et al., [2018]; Kaloop & Hu, [2016]; Lekidis et al., [2005]; Schaal et al., [2009] sur des ponts à haubans. La capacité de stations GNSS à suivre le comportement dynamiques d'ouvrages ouvre plusieurs perspectives pour cette technologie. D'une part, en complément de l'aptitude des GNSS à suivre les mouvements lents (flèche, déformations permanente), la capacité à suivre les vibrations et fréquences propres d'un ouvrage en font un capteur versatile, capable de suivre des phénomènes statiques et dynamiques sur un ouvrage. D'autre part, les GNSS représentent une source de mesure sans dérive pouvant compléter et vérifier les données acquises par les accéléromètres traditionnels. Le déploiement de réseaux de capteurs GNSS (Figure I-21) sur le tablier d'un ouvrage (Meo et al., [2006]; J. Wang et al., [2016]; L. Xu et al., [2002]) permet une identification et une visualisation des modes propres des ouvrages. Les fréquences les plus élevées identifiées régulièrement sur ouvrage par les auteurs sont de l'ordre de 2Hz. Malgré un matériel haut de gamme déployé en calcul relatif, les performances des stations GNSS sont limitées par rapport aux accéléromètres traditionnels. En raison d'un échantillonnage qui reste inférieur sur les stations

GNSS, ceux-ci sont incapables de détecter les fréquences propres les plus élevées des ouvrages. En particulier, les fréquences les plus élevées ayant généralement des amplitudes plus faibles, la précision du positionnement par satellite est limitante pour la détection de certaines fréquences caractéristiques pourtant inférieures à la fréquence de Nyquist du matériel déployé.

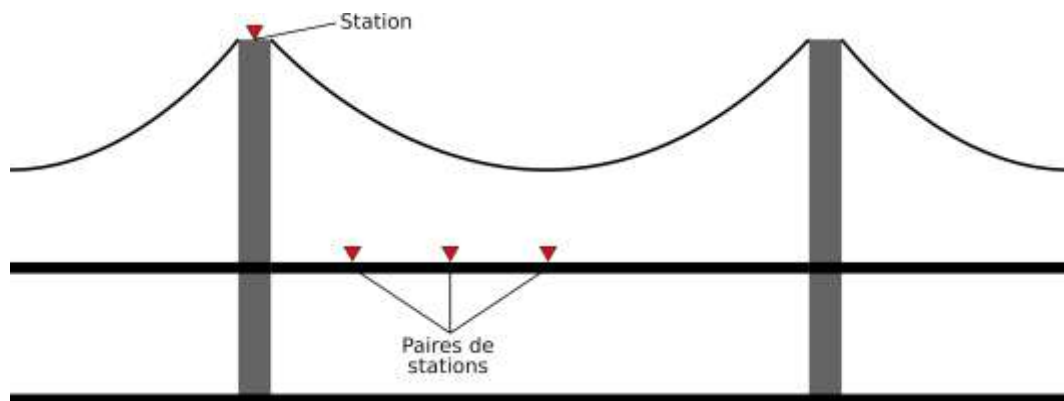


Figure I-21 Réseau de stations déployé par Xu et al. [2002]

Une stratégie pour réduire les limites du matériel GNSS est la combinaison de données : les caractéristiques des accéléromètres (mesure relative, haute fréquence, meilleure performance sur les petite vibrations) en font des capteurs complémentaires. Roberts, Meng, et al., [2004] ont proposé un algorithme de combinaison utilisant les vitesses et positions mesurées par GNSS pour corriger les deux étapes d'intégration des données issues des accéléromètres. Cette stratégie permet d'obtenir des séries avec l'échantillonnage élevé et la grande sensibilité des accéléromètres tout en corrigeant les mouvements les plus lents avec la station GNSS. Une stratégie de combinaison différente fut proposée par Moschas et al., [2011], en utilisant les données d'accéléromètres pour identifier les fréquences dominantes et filtrer le bruit des séries GNSS dans le domaine spectral. Une fois filtrées, les séries GNSS sont utilisées pour estimer avec une précision accrue les amplitudes des différentes oscillations détectées. Les auteurs confirmèrent la capacité de leur solution filtrée à détecter des fréquences de l'ordre de 4 Hz avec un matériel échantillonné à 10 Hz.

Une autre approche consiste à utiliser du matériel à très haute fréquence. Roberts, Cosser, et al., [2004]; T. H. Yi et al., [2013]b étudièrent le potentiel de stations GNSS à 50 Hz et 100 Hz pour le suivi d'ouvrages. L'échantillonnage à 100 Hz représente encore aujourd'hui la capacité maximale des solutions GNSS commerciales haut de gamme. Roberts, Cosser, et al., [2004]; T. H. Yi et al., [2013]b furent capables avec leur matériel d'identifier des fréquences caractéristiques allant jusqu'à 10 Hz, ce qui témoigne d'un écart significatif des capacités de suivi dynamique avec la plupart des solutions 10 Hz ou 20 Hz généralement déployées. Néanmoins, les auteurs notent que certaines fréquences propres intermédiaires ne sont pas détectées par la station GNSS, peut-être en raison de leurs amplitudes plus faibles, ce qui tend à montrer que malgré un échantillonnage élevé, le positionnement GNSS resté limité par sa précision pour les plus petites vibrations.

La réduction du bruit des séries GNSS permet le suivi de mouvements plus fins. La technique de la décomposition en ondelettes fut exploitée par Kaloop et al., [2011]; Meo et al., [2006]; T. H. Yi et al., [2013]b pour isoler les fréquences caractéristiques des séries GNSS, la méthode s'avérant plus robuste qu'une décomposition de Fourier discrète classique (Kaloop et al., [2011]). Dans une même optique Kaloop & Kim, [2016] utilisèrent la décomposition en ondelettes pour isoler la réponse quasi-statique d'un ouvrage. Enfin, Kaloop & Kim, [2014] proposèrent une méthode de filtrage basée sur l'utilisation d'un réseau de neurones à filtre adaptatif. Les auteurs concluent à la capacité du filtre à isoler le bruit du récepteur et les multitrajets, et envisagent l'utilisation des stations GNSS comme sources de données pour la détermination de l'état de la structure.

Si les performances en suivi quasi-statique et dynamique d'ouvrages par des stations GNSS ont été validées, peu d'études présentent des systèmes de surveillance basés directement sur les

données GNSS. Vazquez et al., [2017] ont utilisé des tandems de stations GNSS déployés sur un pont routier pour comparer la flèche de l'ouvrage aux valeurs de dimensionnement. L'étude de la réponse semi-statique obtenue par filtrage en moyenne mobiles et de la réponse dynamique a permis de mettre en avant un comportement anormal de l'ouvrage, et la nécessité d'un renforcement de la surveillance de l'ouvrage. Kaloop et al., [2009], [2011] ont utilisé les données de deux stations GNSS installées aux sommets des pylônes d'un pont à hauban endommagé pour en étudier la réponse dynamique. A partir de données acquises avant et après une session de réparation, les auteurs ont pu confirmer la sensibilité des données GNSS à l'endommagement de la structure. L'étude a aussi permis de confirmer l'impact du trafic sur les fissures de l'ouvrage et par extension sur sa réponse globale. Enfin, Kaloop & Li, [2014] proposèrent une approche basée sur un modèle prédictif de comportement. A l'aide de modèles NNARMAX (*Neural Network Auto-Regression Moving Average with exogenous input*), les auteurs ont établi des modèles liant des mesures de température, d'humidité, de vitesse du vent et du nombre de véhicules sur l'ouvrage aux déplacements observés par GNSS au sommet d'un pylône de l'ouvrage (Figure I-22). Ce type de modèle peut alors être exploité pour observer un éventuel changement de comportement dans l'ouvrage, et par extension pour la détection d'endommagement structural.

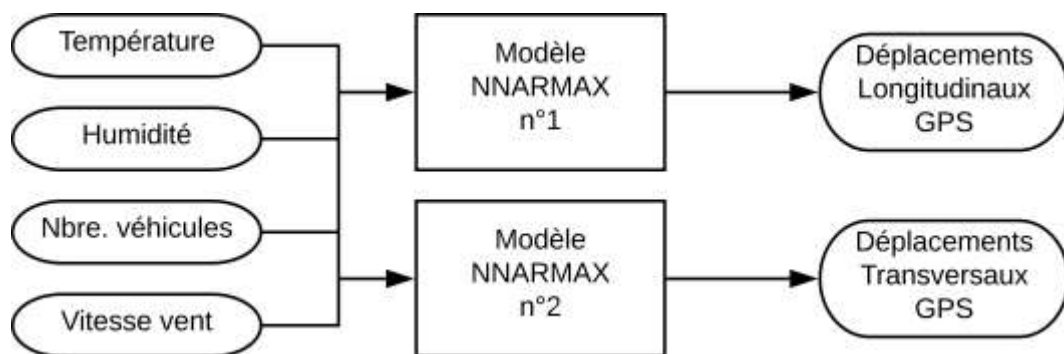


Figure I-22 Modèles de comportement utilisés par Kaloop et al. [2014]

I.4.3. UTILISATION DE STATIONS GNSS A BAS COUT

Le déploiement de stations GNSS sur ouvrages est souvent limité par le coût du matériel, et se cantonne généralement à la pose d'une station de référence ou à l'installation d'un nombre réduit de stations.

Dans un contexte général de réduction des coûts d'instrumentation, T. Liu et al., [2017]; Takasu et al., [2009] ont analysé la performance de stations monofréquence GPS et GNSS à l'aide d'un calcul RTK en courte ligne de base. Les auteurs constatèrent une précision centimétrique pour Takasu et al., [2009] et infracentimétrique pour T. Liu et al., [2017], confirmant le potentiel de récepteurs à bas coût pour des applications de précision. Dans une optique similaire, Caldera et al., [2016]; Kirkko-Jaakkola et al., [2015] ont testé la performance de stations similaires en utilisant les données de réseaux géodésiques permanents. Cette approche vise à réduire encore plus les coûts de déploiement dans les pays équipés de réseaux permanents en retirant la nécessité d'établir une référence, au détriment d'une ligne de base supérieure. Caldera et al., [2016] ont validé la capacité d'un récepteur GPS L1 couplé avec une petite antenne « patch » pour le suivi de déformations lentes, estimant la solution capable de détecter des déplacements lents de l'ordre de 3 mm.

Kirkko-Jaakkola et al., [2015] ont comparé les performances de ce type de station avec celles du capteur GNSS d'un smartphone. Bien que les smartphones ne soient pas nécessairement moins chers que du matériel GNSS à bas coût, ils présentent un potentiel intéressant de capteur intelligent, intégrant tous les composants nécessaires pour la collecte, la gestion, la transmission et éventuellement le traitement de données. La multitude de capteurs embarqués comme des accéléromètres, des sondes de température et d'humidité en fait de potentiels capteurs multifonctions. L'intégration de l'antenne GNSS ne correspond en revanche pas particulièrement aux applications à haute précision, celles-ci étant généralement des antennes multidirectionnelles

dont le but n'est pas d'avoir une calibration fine du centre de phase mais de fonctionner dans n'importe quelle orientation. Les auteurs notent une précision significativement plus faible et un bruit de mesure élevé avec les données acquises par un smartphone qu'avec une station GNSS bas coût commerciale, limitant leur utilisation pour les applications de précision.

Dans le contexte des applications de monitoring, Jo et al., [2013] étudièrent la performance de stations GPS L1 pour le suivi de phénomènes dynamiques, en utilisant uniquement un positionnement sur le code. Dans cette approche, plusieurs stations à bas coût sont déployées, et les séries temporelles issues de leur traitement sont combinées pour procéder à la qualification de phénomènes dynamiques. Les auteurs confirment la capacité d'un tel dispositif à suivre des oscillations d'amplitudes multidécimétriques. Si ce genre de mouvement n'est pas caractéristique de la plupart des structures de génie civil, le résultat est encourageant sachant que seul le calcul sur le code a été utilisé (la plupart des stations topographiques commerciales offrent une précision de l'ordre de 25cm avec un calcul sur le code). Cette étude illustre le potentiel de la multiplication des capteurs pour l'amélioration de la précision des données en utilisant un matériel significativement moins cher.

Benoit et al., [2014]; Benoit, Briole, et al., [2015]; Benoit, Dehecq, et al., [2015] présentèrent et évaluèrent le potentiel d'une station GPS monofréquence pour les applications de géotechnique. La solution proposée est construite comme un capteur intelligent ayant vocation à être déployé en réseau pour permettre un suivi dense ou à large échelle avec un déploiement aisé. Les auteurs confirment la performance infracentimétrique du capteur, et valident son application pour le suivi de glissements de terrain et de mouvements de glacier. Sampietro et al., [2017] présentèrent une solution basée sur une station GNSS monofréquence pour le suivi de déformation des sols, validant sa performance infracentimétrique. Les performances obtenues par ces deux solutions GNSS permettent d'envisager des applications pour le suivi de structures de génie civil.

I.4.4. SYNTHÈSE

Après avoir rappelé enjeux et objectifs de la gestion d'un parc d'ouvrages, et par extension de la surveillance structurale, ce chapitre a proposé une revue des approches courantes d'instrumentation d'ouvrages. Les caractéristiques clés du positionnement par GNSS (nature absolue du positionnement dans un repère, précision, absence de dérive), comparées aux méthodes traditionnelles en font un candidat pertinent pour compléter les techniques d'instrumentation actuelles.

Un état de l'art des applications des techniques GNSS pour la surveillance structurale a permis de mettre en avant plusieurs tendances au cours des deux dernières décennies. Premièrement, les GNSS font l'objet d'un intérêt croissant dans le domaine du génie civil s'expliquant par la capacité des stations à être déployées aisément et en extérieur, ainsi que par la possibilité de mesurer des déplacements en trois dimensions sans dérive. Cet intérêt peut être corrélé avec la multiplication des solutions commerciales disponibles et de l'amélioration croissante de leurs performances. Deuxièmement, les techniques de positionnement par calcul relatif sont très largement préférées : le positionnement dans un référentiel régional ou mondial permis par les techniques PPP ou de calcul géodésique n'a qu'une faible plus-value pour la surveillance d'ouvrages disposant généralement déjà d'un référentiel local. Enfin, malgré les caractéristiques des GNSS qui semblent favoriser les applications de suivi statique ou quasistatique, un fort intérêt s'est développé envers l'utilisation des GNSS pour le suivi dynamique (vibratoire) et en temps réel. Ces approches sont rendues possibles par l'utilisation de solutions commerciales haut de gamme à haute fréquence, et des techniques de positionnement RTK. Néanmoins, malgré l'utilisation d'un matériel de pointe, les performances en dynamique restent en deçà d'un matériel traditionnel moins coûteux. De manière générale, le déploiement de solutions GNSS reste limité par le coût du matériel commercial.

Dans une optique de réduction des coûts, un intérêt pour les solutions GNSS à bas coût s'est développé au cours de la dernière décennie. Ces solutions reposent sur un matériel modeste avec des performances moindres comparées à celles des solutions commerciales de pointe, mais dont

le traitement permet de partiellement compenser les faiblesses dans des scénarios déterminés. L'étude de leurs performances dans des applications de surveillance géotechniques semble témoigner de leur compatibilité avec les applications de génie civil (Figure I-23).

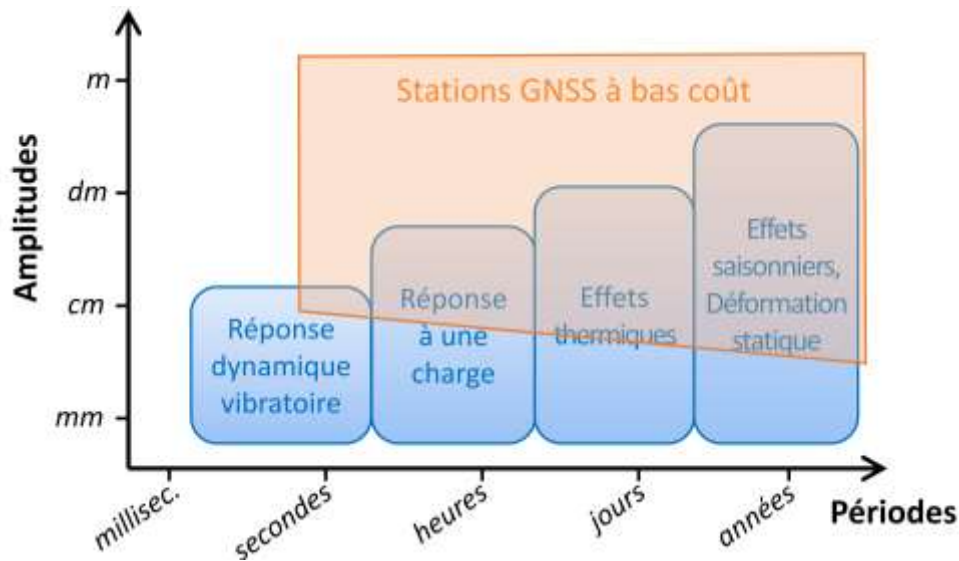


Figure I-23 Comparaison des caractéristiques des GNSS à bas coût et des phénomènes attendus dans le domaine de la surveillance d'ouvrage

L'utilisation de solutions GNSS à bas coût ouvre de nouvelles perspectives pour la place des GNSS dans l'instrumentation puisqu'elle offre la possibilité de multiplier les capteurs sur ouvrage pour un investissement similaire. Cette augmentation du nombre de capteurs peut fiabiliser et améliorer le suivi par GNSS en permettant la redondance de capteurs et une meilleure interprétation des données. En l'occurrence, multiplier le nombre de capteurs déployés permet de répartir plus de capteurs sur l'ensemble d'un ouvrage. A l'aide d'un réseau de capteurs couvrant l'ensemble d'une structure, il devient envisageable de l'utiliser pour compléter le suivi géométrique global de l'ouvrage avec des séries temporelles denses. Ces données peuvent également être utilisées pour le suivi des déformations de l'ouvrage, et par conséquent le suivi de sa réponse globale aux effets environnementaux et charges d'exploitation. Ce potentiel appelle à se questionner sur les possibilités que pourraient offrir une intégration pertinente de tels capteurs GNSS dans un système de surveillance d'ouvrage d'art.

Pour répondre à cette question, le Chapitre II propose une évaluation expérimentale de solutions GNSS à bas coût afin de déterminer quel matériel et quel traitement choisir pour une solution adaptée au suivi d'ouvrages. La performance de solutions GNSS à bas coût est alors testée *in-situ* dans le Chapitre III. L'étude de deux ponts instrumentés par un réseau de capteurs GPS monofréquence permet de confirmer les performances des solutions déployées, de valider les phénomènes qui peuvent être suivis, et d'effectuer une première analyse simple des données à travers l'étude des relations entre les séries temporelles obtenues. Enfin, le Chapitre IV porte sur une analyse poussée des données des GNSS et leur exploitation pour permettre la détection et localisation d'anomalies sur ouvrage. Des méthodes de régression à partir de diverses sources de données sont notamment étudiées, et une stratégie globale d'analyse des données est proposée.

II. EVALUATION EXPERIMENTALE DE STATIONS GNSS A BAS COUT

Le Chapitre I a mis en avant les principales limites actuelles des GNSS pour la surveillance d'ouvrages d'art. Les acteurs de la surveillance privilégient généralement le déploiement d'un matériel haut de gamme, performant et versatile, mais coûteux, et ce au détriment du nombre de stations pouvant être installées sur ouvrage. Le potentiel et la performance d'un matériel plus simple à bas prix ont pourtant été observés dans d'autres domaines de surveillance, notamment pour les applications de géotechnique. Dans ce contexte, ce chapitre présente les résultats d'une évaluation expérimentale de solutions GNSS à bas coût pour des applications de surveillance d'ouvrages. Pour cela, une revue des méthodes d'évaluation expérimentales a été réalisée avec pour objectif de dégager des protocoles expérimentaux pertinents. Ensuite, les différents éléments constituant une solution GNSS ont été évalués. Plusieurs composants matériels (antenne et récepteurs) ont été testés en scénario fixe afin d'identifier une station GNSS à bas coût optimale. Différents modes et paramètres de calcul ont alors été évalués dans des scénarios fixe et dynamiques afin de sélectionner les plus appropriés, et d'estimer les performances d'une solution complète (matériel et paramètres de calcul) pour le suivi de phénomènes caractéristiques d'ouvrages sous surveillance.

II.1. REVUE DES METHODES D'EVALUATION EXPERIMENTALES POUR LES PHENOMENES DYNAMIQUES

II.1.1. CRITERES D'EVALUATION EN STATIQUE

Une étape clé de l'évaluation d'une solution GNSS est l'évaluation en situation statique. Celle-ci a pour objectif de valider le fonctionnement de la chaîne d'acquisition (antenne, récepteur, configuration radio éventuelle) et du traitement appliqué (calcul PPP, différentiel, relatif, en réseau). Elle permet d'estimer la performance de la solution GNSS, généralement dans des conditions optimales (grande portion du ciel visible, pas d'obstacles, météo dégagée).

Plusieurs protocoles courants existent pour procéder à cette évaluation préliminaire. Dans le cas où une seule station est utilisée pour le traitement (calcul simple sur le code, la phase, PPP), le protocole expérimental est relativement simple : des séries temporelles sont générées à l'aide d'une station dont l'antenne est fixée, si possible sur un point de coordonnées connues *a priori*. La performance est alors caractérisée par la dispersion des données (écart type), et par comparaison aux coordonnées de références si disponibles (distance moyenne, erreur quadratique à une référence). Pour caractériser au mieux la performance attendue *in situ*, il est nécessaire de prendre en compte l'impact des multitrajets, générés par les rebonds d'ondes GNSS sur les surfaces et obstacles environnants. Les erreurs liées aux multitrajets ont une répétabilité égale à celle de la géométrie des satellites par rapport à la position du récepteur. Pour appréhender au mieux leur impact sur les séries temporelles, il est préférable de réaliser une session d'acquisition de durée supérieure à cette période de répétabilité.

La notion de *Dilution of Precision* (DOP) est utilisée pour estimer la propagation des erreurs des observations sur le calcul de position à partir de la géométrie des satellites. Pour l'estimer, on exprime la matrice de géométrie \mathbf{A} en fonction des coordonnées (x_r, y_r, z_r) du récepteur et (x^j, y^j, z^j) des j satellites visibles dans le référentiel conventionnel terrestre cartésien, et de leurs distances respectives P_j avec le récepteur (Eq. II-1).

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{(x_r - x^1)}{P_1} & \frac{(y_r - y^1)}{P_1} & \frac{(z_r - z^1)}{P_1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{(x_r - x^i)}{P_i} & \frac{(y_r - y^i)}{P_i} & \frac{(z_r - z^i)}{P_i} & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Eq. II-1}$$

Les trois premières colonnes de \mathbf{A} expriment les composantes des vecteurs unitaires entre le récepteur et chaque satellite. La quatrième colonne de la matrice \mathbf{A} est utilisée pour calculer les termes liés à l'erreur de mesure sur le temps. La matrice \mathbf{Q} est calculée à partir de \mathbf{A} (Eq. II-2). Ses termes peuvent être exprimés sous la forme donnée dans l'Eq. II-3.

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \quad \text{Eq. II-2}$$

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{xt} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} & \sigma_{yt} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} & \sigma_{zt} \\ \sigma_{xt} & \sigma_{yt} & \sigma_{zt} & \sigma_{tt} \end{pmatrix} \quad \text{Eq. II-3}$$

Le symbole t exprime les erreurs liées à la mesure de temps. Le *Geometric Dilution of Precision* (GDOP) est un coefficient calculé à partir des termes σ_{ii} sur la diagonale de la matrice \mathbf{Q} (Eq. II-4). Idéalement, en excluant les cas où l'on souhaite évaluer un récepteur dans des conditions de visibilité difficiles, il convient de maintenir au possible un GDOP inférieur ou égal à

2 pour des applications de positionnement précis. Une valeur trop élevée du GDOP peut indiquer soit un problème au niveau de l'acquisition (présence de masques, mauvaise situation géographique, matériel défaillant), soit au niveau du traitement.

$$GDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_t^2} \quad \text{Eq. II-4}$$

Le GDOP peut également être utilisé pour donner une estimation $\hat{\varepsilon}$ des erreurs de position pour chaque observation à partir des erreurs sur l'estimation des pseudodistances ε_ρ (Eq. II-5).

$$\hat{\varepsilon} = GDOP \times \varepsilon_\rho \quad \text{Eq. II-5}$$

D'autres termes plus spécifiques comme le *Position Dilution of Precision* (PDOP), le *Horizontal Dilution of Precision* (HDOP) ou le *Vertical Dilution of Precision* (VDOP) permettent d'estimer spécifiquement la précision de la position, la précision horizontale et la précision verticale respectivement. Ceux-ci sont composés des termes diagonaux correspondants de la matrice \mathbf{Q} . Le PDOP (Eq. II-6) est généralement utilisé en substitut du GDOP pour estimer la précision attendue.

$$PDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad \text{Eq. II-6}$$

Dans le cas où la technique de positionnement repose sur l'utilisation d'une station de référence (GNSS différentiel, GNSS relatif, RTK), il existe deux protocoles courants : le test *Zero Baseline* (ZBL) et le test *Short Baseline* (SBL). Dans un test ZBL, le récepteur de mesure et le récepteur de référence sont tous deux connectés à la même antenne positionnée sur un point de coordonnées connues. Ce test est généralement réalisé pour valider les chaînes d'acquisition et de traitement, et donner une estimation globale de la précision du matériel. Cependant, les deux récepteurs collectant leurs observations à partir du même point, tous les effets atmosphériques et les multitrajets sont éliminés, améliorant significativement la précision par rapport à des conditions réelles. Le test SBL (aussi parfois appelé *Near Zero Baseline*, NZBL) permet de palier à ce problème. Dans ce test, les deux récepteurs sont reliés à deux antennes identiques, séparées d'une distance inférieure à 50m. La faible distance entre la station de mesure et la station de référence permet d'annuler les effets atmosphériques mais pas les multitrajets. Ainsi, l'approche SBL permet d'obtenir une meilleure représentation des conditions réelles lors d'une évaluation statique.

Afin de valider les performances de solutions GNSS pour le suivi de phénomènes dynamiques, des protocoles expérimentaux variés ont été proposés afin de simuler des phénomènes observables sur ouvrages. Les paragraphes II.1.2 et II.1.3 proposent une revue de deux types de dispositifs expérimentaux : les dispositifs à excitation mécanique contrôlée, et ceux laissés en oscillation libre. La revue de ces dispositifs expérimentaux aboutit au choix de protocoles expérimentaux appliqués dans le paragraphe II.3.

II.1.2. EVALUATION A PARTIR DE DISPOSITIF EXPERIMENTAUX A EXCITATION CONTROLEE

L'évaluation de solutions GNSS en scénario dynamiques peut être réalisée à l'aide de dispositifs imposant un mouvement connu à l'antenne. Ces systèmes mécaniques peuvent être utilisés pour contrôler précisément les caractéristiques (amplitude, fréquence, direction) d'un mouvement simple imposé à une antenne GNSS.

Le suivi sismique fut un des premiers domaines d'intérêt pour l'utilisation de stations GNSS pour le suivi dynamique. L. Ge et al., [2000] ont proposé d'évaluer la capacité de stations GNSS pour le suivi d'évènements sismiques. Leur étude a porté sur l'utilisation de récepteurs à haute

fréquence d'acquisition (20 Hz) en appliquant un calcul Real Time Kinematic (RTK). Lors de leurs expérimentations, l'antenne rover fut montée sur un camion simulateur de tremblement de terre (Figure II-1), tandis que la station de référence était installée à une dizaine de mètres. En imposant une série d'oscillations horizontales et verticales décimétriques d'intensités variées, leur étude valide le potentiel de "sismomètres GPS". Cependant les déplacements imposés à l'antenne étant d'une amplitude particulièrement importante, et le scénario étudié peu représentatif (l'antenne de référence proche n'est pas affectée par le séisme), les résultats sont difficilement transférables aux applications de génie civil. Cette étude est néanmoins une des premières à analyser le suivi de vibrations proches de certains phénomènes observables sur des structures de génie civil avec des mesures de déplacements par GPS, et non sur des mesures d'accélération.

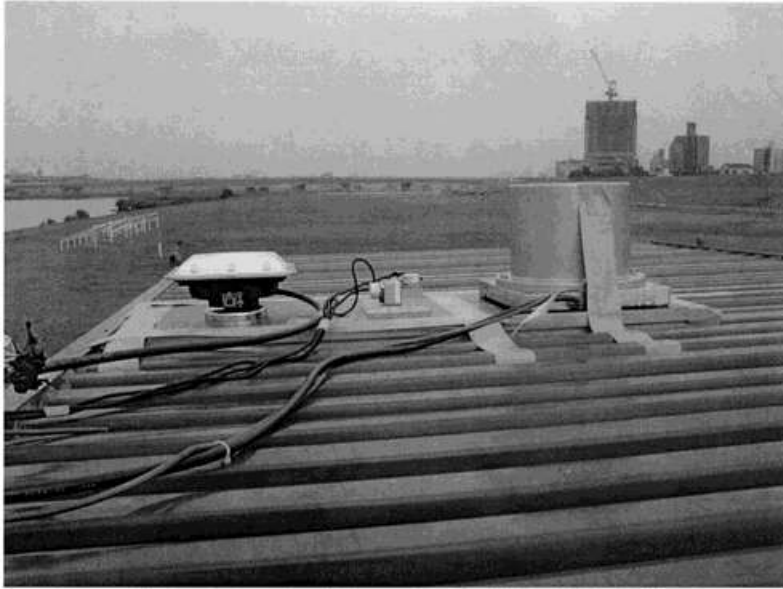


Figure II-1 Dispositif expérimental de Ge et al. [2000] sur un simulateur de tremblements de terre (extrait)

Ce type de dispositif expérimental est particulièrement coûteux et complexe à mettre en œuvre, et peu adapté à la simulation du comportement d'ouvrages de génie civil. D'autres approches exploitant des dispositifs plus simples furent explorées. Kijewski-Correa, Kareem, et al., [2006] ont présenté les résultats d'expérimentations conduites à l'aide d'un simulateur portable de mouvements capable de générer des déplacements selon une direction. La solution GNSS évaluée est constituée de deux récepteurs multifréquences couplés à des antennes choke ring, avec une fréquence d'acquisition de 10 Hz. Un calcul relatif a été réalisé en post-traitement et en SBL pour obtenir des séries temporelles. L'antenne GNSS rover a été montée sur un support en bois surélevé installé sur un simulateur de mouvements (Figure II-2). Ce support est supposé suffisamment court et rigide pour ne pas induire de vibrations supplémentaires perceptibles. Des mouvements de différentes natures comme des sinusoides, des *chirps* (signaux pseudopériodiques modulés en fréquence autour d'une fréquence porteuse) et des mouvements aléatoires ont été simulés, avec des amplitudes comprises entre 1 cm et 6 cm et des fréquences comprises entre 0,1 Hz et 2 Hz. L'estimation faite de la performance de la station GNSS repose sur la comparaison de la moyenne quadratique du bruit (*root mean square*, RMS) avec le signal de référence commandant le simulateur et les extrema des séries. L'étude proposée conclut à la capacité du dispositif GNSS mis en place à caractériser efficacement des vibrations compatibles avec celles observables sur des ouvrages de génie civil, avec des amplitudes de l'ordre de 4 cm. Il a également été mis en avant que plus la fréquence d'excitation est élevée, plus l'amplitude des déplacements doit être importante pour être observée, le système étant par ailleurs capable de correctement caractériser des oscillations centimétriques d'une fréquence de 0,1 Hz.

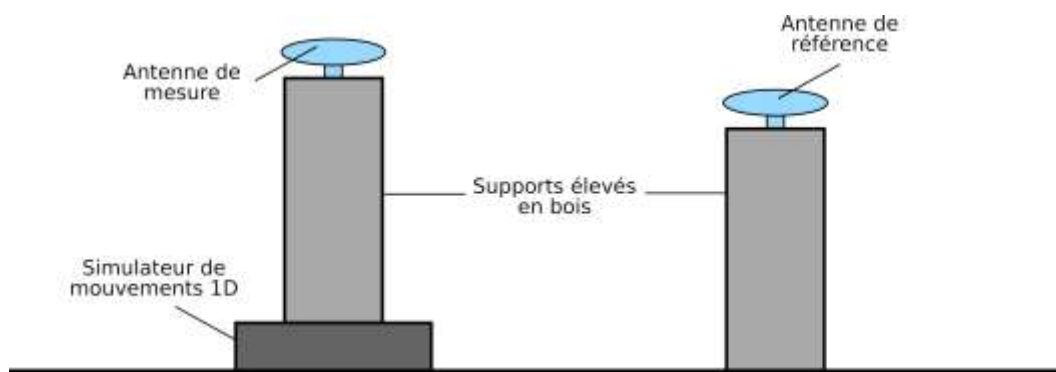


Figure II-2 Dispositif 1D proposé par Kijewski-Correa [2006]

Dans une optique similaire de simulation de mouvements à une dimension, Casciati et al., [2009] proposent un protocole expérimental mettant en œuvre un moteur linéaire. Dans ces essais, une antenne GNSS est installée à l'extrémité d'un bras métallique coulissant le long d'une glissière horizontale (Figure II-3). Ce dispositif a été utilisé pour simuler des déplacements contrôlés à une dimension.

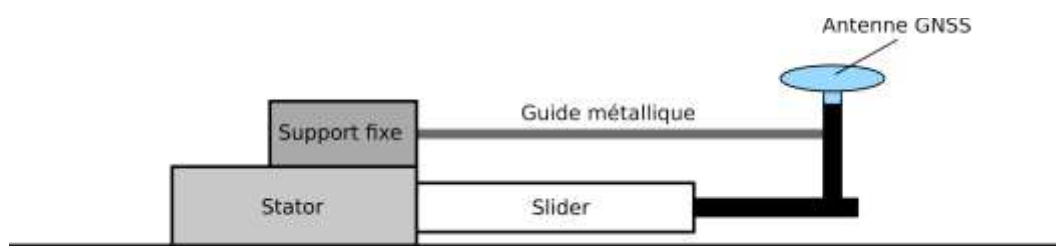


Figure II-3 Dispositif à moteur linéaire utilisé par Casciati et al. [2009]

La solution GNSS testée repose sur un tandem de récepteurs bi-fréquences couplés à des antennes de classe topographique, avec un échantillonnage maximal de 20 Hz, en appliquant un calcul relatif en temps réel. La station rover a été soumise à des oscillations d'amplitudes comprises entre 1 cm et 10 cm pour des fréquences comprises entre 0,1 Hz et 2 Hz. L'évaluation des séries GNSS y est réalisée par comparaison de la moyenne quadratique (*root-mean-square*, RMS) sur de courts intervalles du ratio entre les mesures GNSS et le signal imposé au moteur linéaire (Figure II-4). Les densités spectrales de puissance (*Power Spectral Density*, PSD) des deux signaux ont également été utilisées pour valider la bonne identification de la fréquence d'oscillation par le matériel GNSS. L'étude, cantonnée à l'analyse de signaux à une dimension, conclue à une validation des GNSS pour le suivi de vibrations infracentimétriques horizontales avec des fréquences inférieures ou égales à 2 Hz. Avec un dispositif similaire, Paziewski et al., [2018] ont évalué les performances d'une station GNSS multifréquence avec un échantillonnage à 50 Hz. Lors d'une session expérimentale, une oscillation avec une amplitude de 6 cm et une fréquence de 4,5 Hz a été imposée à l'antenne. Plusieurs stratégies de calcul avec ou sans station de référence ont été appliquées. Les auteurs concluent que, dans les meilleures conditions, les calculs effectués en très courte ligne de base peuvent offrir une précision atteignant 2 mm et 4 mm pour les déplacements horizontaux et verticaux, respectivement. Le calcul PPP et les méthodes employant des lignes de base plus longues se sont toutes avérées efficaces pour caractériser les mouvements appliqués sur la station, mouvements dont les caractéristiques sont proches des vibrations observables sur des structures souples comme des immeubles de grande hauteur. Il est cependant nécessaire de rappeler que cette évaluation se base sur une courte session de 15 minutes, et que les résultats obtenus ne représentent pas idéalement les effets des multitrajets.

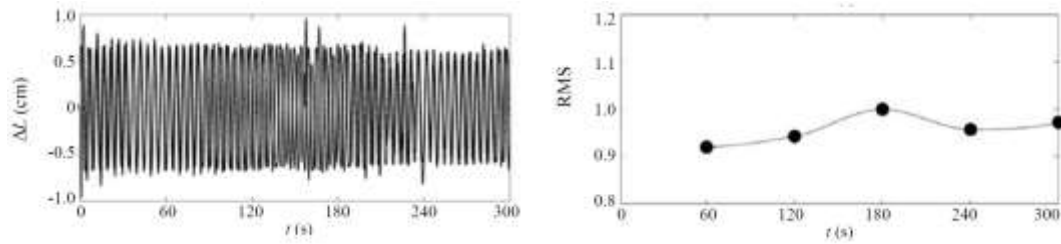


Figure II-4 Exemple de comparaison dans le domaine temporel et par calcul de RMS sur intervalles par Casciati et al. [2009] (extrait)

Pour permettre la simulation de mouvements à deux dimensions, Nickitopoulou et al., [2003] proposèrent un dispositif de génération de mouvements circulaires. Dans ce dispositif, l'antenne GNSS a été attachée à un bras métallique fixé sur un moteur tournant (Figure II-5). Avec ce dispositif, il est possible de jouer sur deux paramètres du mouvement de référence : sa périodicité à l'aide de la vitesse angulaire du moteur, et son amplitude selon la longueur du bras métallique. Par ses dimensions, ce scénario expérimental permet de générer des déplacements d'une amplitude supérieure aux dispositifs présentés précédemment, mais se cantonne à des fréquences d'excitation plus faibles. Dans une seconde étude, Nickitopoulou et al., [2006] utilisèrent ce système de bras tournant pour évaluer un tandem de stations topographiques échantillonnées à 1 Hz. La station de référence fut installée à quelques mètres du bras tournant (test SBL), et des calculs relatifs en temps réel et en post-traitement furent appliqués. Lors des expérimentations, des mouvements avec des rayons de 20 à 50 cm furent réalisés avec des périodes de rotation comprises entre 3 secondes (0,333 Hz) et 19 secondes (0,053 Hz). L'évaluation de la performance de la station repose sur la comparaison des cercles observés à partir des séries GNSS avec la trajectoire circulaire réelle (Figure II-6). Deux caractéristiques sont extraites : la position du centre de rotation, et le rayon du cercle. La dispersion de ces valeurs, la quantité d'*outliers*, et le résidu aux valeurs de référence sont utilisés pour caractériser la qualité de la solution obtenue. La dispersion sur la composante verticale a également été suivie. L'étude aboutit à une estimation de la précision des deux méthodes de calcul testées en situation dynamique, de 35 mm (composantes horizontales et verticale) pour le calcul en temps réel, et de 15 mm pour le calcul en post-traitement. La fréquence d'excitation maximale étant limitée à 0,33 Hz, compte tenu de l'amplitude des oscillations, ces résultats ne valident que les applications pour les structures très souples (bâtiments de très grande hauteur ou cheminées par exemple). Un dispositif similaire est présenté dans une étude de Breuer et al., [2008] pour estimer la précision d'un duo de récepteurs multifréquences en calcul relatif. L'étude expérimentale a été menée sur des séries d'expérimentations avec des cercles de 25 cm et 49 cm de diamètre avec une ligne de base de quelques mètres. La comparaison des résidus au cercle de référence a montré que sur de courtes périodes, la solution GNSS utilisée était capable d'atteindre une précision horizontale de l'ordre de 4 mm. Cependant, il fut également mis en avant que cette précision se dégrade lorsque la durée de l'essai dépasse plusieurs minutes en raison de l'apparition d'erreurs systématiques (générées par les multitrajets). Un essai plus simple sans moteur à vitesse angulaire constante fut réalisé pour compléter l'étude de la performance du matériel. Une précision horizontale de 3 mm a été estimée sur une série temporelle courte, mettant en avant que des déplacements de 6 mm et 9 mm pouvaient être utilisés pour identifier une variation dans le comportement de l'antenne avec une certitude de 95% et 99%, respectivement.

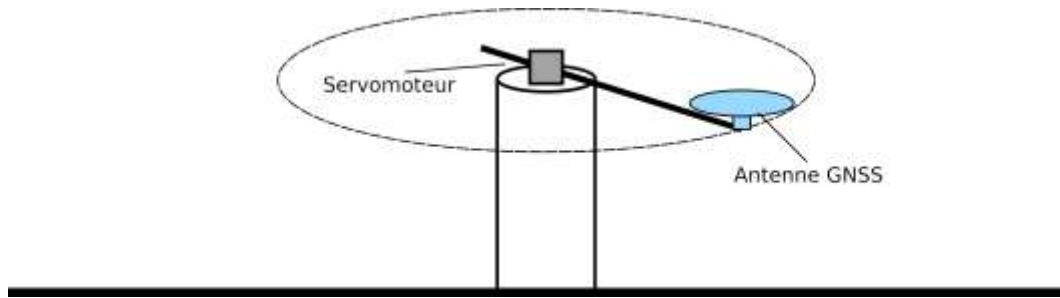


Figure II-5 Dispositif tournant de Nickitopoulou et al. [2003]

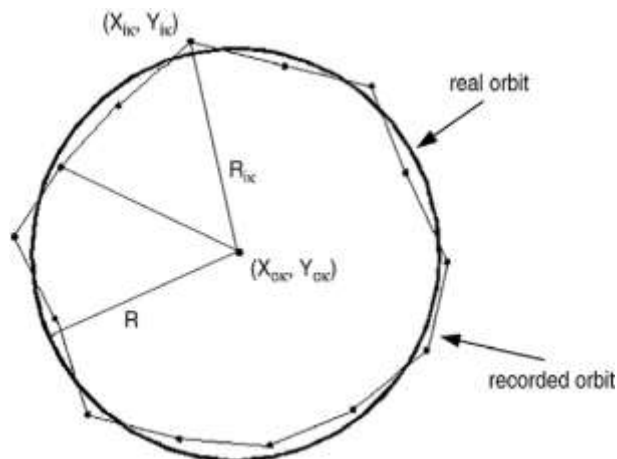


Figure II-6 Comparaison d'une trajectoire circulaire GNSS à une trajectoire de référence par Nickitopoulou et al. [2006] (extrait)

Afin d'évaluer des scénarios oscillants plus complexes, avec plusieurs fréquences principales et de l'amortissement, Psimoulis, Pytharouli, et al., [2008] proposèrent une expérimentation utilisant un appareil permettant de simuler des mouvements oscillants linéaires à plusieurs degrés de liberté. Le dispositif utilisé (ECP Systems Model 210a) est constitué d'un servomoteur contrôlé par ordinateur imposant des mouvements linéaires à un chariot coulissant lesté d'une masse ajustable et dont les mouvements sont amortis par un ressort relié à un support fixe. Dans cet état, le dispositif reproduit des mouvements avec un degré de liberté. Il est possible d'augmenter le degré en ajoutant un deuxième chariot lesté et relié au premier par un ressort, puis un troisième également relié avec un ressort au précédent (Figure II-7). Le dispositif permet ainsi de produire des mouvements avec 2 ou 3 degrés de liberté. Une solution formée d'une paire de récepteurs topographiques échantillonnant les données à 20Hz fut utilisée en appliquant un calcul relatif en post-traitement (scénario SBL). Plusieurs protocoles furent évalués : mise en excitation du mobile avec un seul degré de liberté, avec une fréquence constante puis variable (permettant d'étudier l'amortissement et les effets de résonance), et mise en excitation du mobile avec trois degrés de liberté. Les oscillations ont été imposées avec des amplitudes comprises entre 1 cm et 7 cm. L'évaluation repose sur l'analyse des séries temporelles et la capacité de la solution GNSS à estimer correctement les fréquences modales. Cette étude a permis de confirmer la capacité d'un calcul GNSS relatif à extraire précisément les caractéristiques d'un signal vibratoire complexe avec grande précision pour les fréquences inférieures ou égales à 2 Hz, malgré la présence d'un bruit plus important que les capteurs traditionnels dans le domaine temporel. Psimoulis & Stiros, [2008] validèrent également la capacité de cette solution GNSS à qualifier des mouvements simples (cas du module un degré de liberté) jusqu'à 4 Hz.

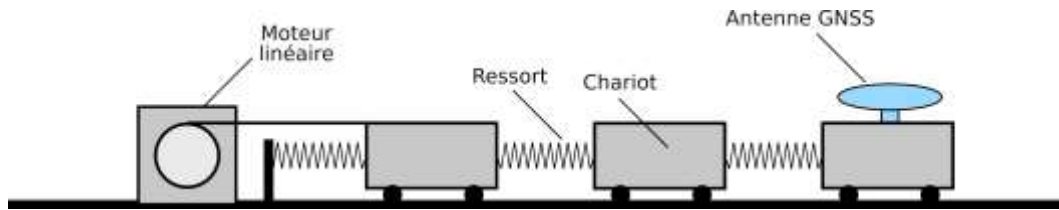


Figure II-7 Dispositif expérimental utilisé par Psimoulis et al. [2008]

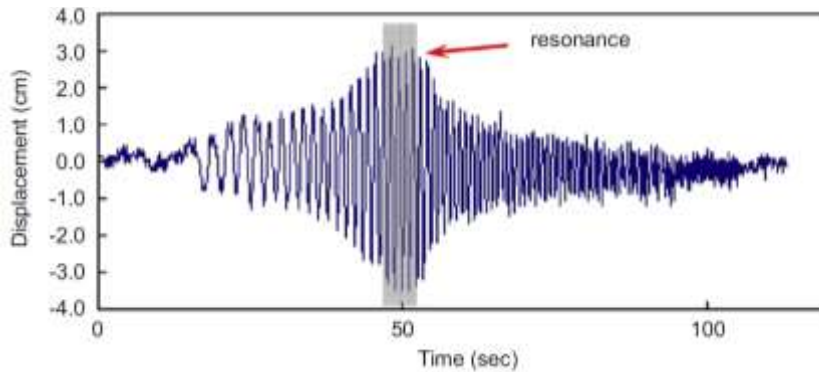


Figure II-8 Détection de la résonance dans les séries temporelles par Psimoulis et al. [2008] (extrait)

II.1.3. EVALUATION A PARTIR DE DISPOSITIF EXPERIMENTAUX EN OSCILLATION LIBRE

La reproduction expérimentale et contrôlée des mouvements complexes observables sur ouvrages nécessite la mise en œuvre de dispositifs expérimentaux eux aussi complexes. Une autre approche consiste à utiliser les fréquences naturelles d'oscillateurs libres. Le comportement de l'oscillateur n'est pas forcément connu à l'avance, et peut simplement être mesuré avec une technique de référence, comme dans l'étude de Roberts, Cosser, et al., [2004] qui utilise un dispositif original pour comparer les performances de deux récepteurs GNSS. Dans leurs expérimentations, une antenne fut installée sur un cadre en bois suspendu à un trépied à l'aide d'une corde élastique (Figure II-9). Cette installation permet une oscillation libre de la plateforme. Deux types d'essais furent conduits. Dans un premier cas, le cadre en bois a été mis en rotation, et dans un second, il oscillait librement sous l'action du vent. Les données acquises par les deux récepteurs reliés à cette antenne ont été utilisées pour un calcul relatif en post-traitement. L'évaluation a été réalisée par comparaison des résidus entre la série de référence (utilisant le matériel supposé le plus performant) et la série du matériel évalué. Ce protocole expérimental original est simple à réaliser et permet de générer des mouvements variés, mais il est en revanche difficile de contrôler l'excitation imposée au dispositif et donc de reproduire des manipulations.



Figure II-9 Dispositif expérimental tiré de Roberts et al. [2004]

Le mouvement de l'oscillateur peut aussi être une réponse à une excitation initiale : Moschas et al., [2014] ont mis en œuvre un scénario expérimental dans lequel l'oscillateur était constitué d'une mince tige en acier dont l'une des extrémités était fixée, et l'autre libre d'osciller. Pour chaque essai, l'oscillateur a d'abord été amené hors de sa position d'équilibre, puis relâché pour le laisser osciller librement. Les mouvements furent mesurés avec un accéléromètre, une station totale robotisée, et une station GNSS multifréquence topographique, avec des échantillonnages respectifs de 200 Hz, 10 Hz et 10 Hz. Deux méthodes de calcul ont été appliquées sur les données GNSS : un calcul relatif, exploitant une station de référence proche, et un calcul en PPP. Les séries temporelles de la station robotisée et du calcul GNSS relatif furent utilisés comme référence pour l'évaluation de la solution obtenue par PPP. Plusieurs critères furent évalués : capacité à suivre les déplacements quasi-statiques imposés avant les oscillations (Figure II-10) et comparaison avec les accélérations mesurées par l'accéléromètre pour le suivi de la réponse à l'excitation. L'étude a permis de confirmer des performances proches entre le calcul PPP et le calcul en relatif, avec une précision horizontale (axiale) de l'ordre de 5 mm, et la capacité à suivre des phénomènes oscillants de fréquences allant jusqu'à 4 Hz. Yigit, [2016] a proposé une étude similaire, en installant une station GNSS multifréquence (acquisitions à 10Hz) sur une barre métallique plate de 2 mètres. Cette barre, fixée au sol par un lest en acier (Figure II-11), a été sélectionnée afin de simuler les mouvements au sommet d'un immeuble souple de grande hauteur. Comme pour le protocole précédent, la barre est mise en excitation en la décalant de sa position d'origine puis en la libérant, la laissant osciller librement. La barre métallique étant plus grande et plus souple que la précédente, ses trois premiers modes de vibration ont été identifiés. Lors des essais, les déplacements dans la direction d'excitation ont atteint au maximum une amplitude métrique, tandis que les déplacements verticaux d'une amplitude de 20 cm ont été observés. Un calcul en PPP a été appliqué, et comparé à un calcul relatif en post-traitement réalisé avec une station de base proche servant de référence. Plusieurs caractéristiques ont été étudiées pour évaluer la performance de la solution PPP : le résidu avec la série temporelle de référence, la position des pics sur leurs spectres respectifs, et la détection efficace du changement de mode de la barre dans les séries temporelles. Il a été montré que la méthode PPP, sur des essais courts (expérimentation de durée inférieure à 30 minutes), est capable d'identifier les fréquences naturelles d'oscillation horizontales de 0,39 Hz et 4,33 Hz, et verticales de 0,78 Hz du dispositif. En revanche, il fut également noté l'apparition de tendances plus lentes sur les séries, probablement dues aux effets de multitrajets, qui ont été retirées à l'aide d'un filtre passe-haut, empêchant le suivi d'éventuels phénomènes plus lents.

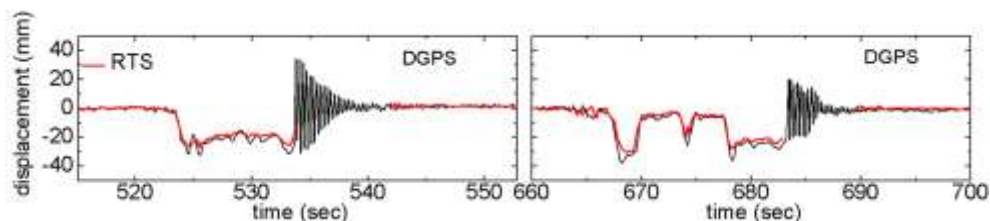


Figure II-10 Qualification de la capacité d'un calcul relatif à suivre les déplacements avant et après la mise en excitation par Moschas et al. [2014] (extrait)

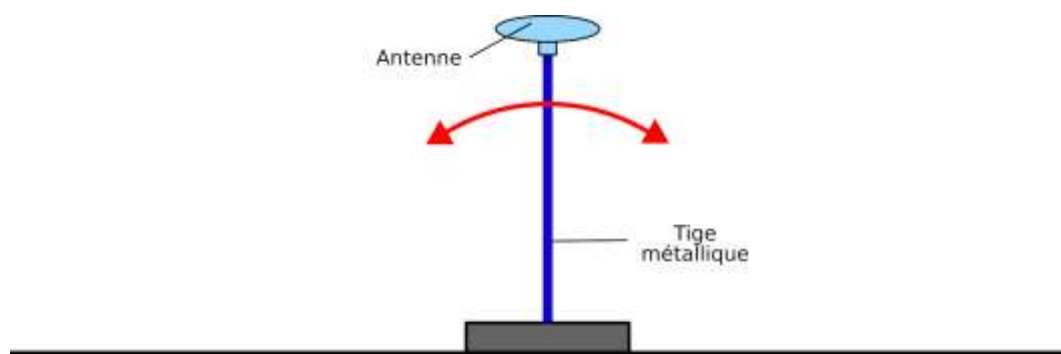


Figure II-11 Protocole expérimental utilisé par Yigit et al. [2016] pour le suivi de déplacements horizontaux

Pour valider la capacité d'un tel dispositif à suivre des déplacements verticaux, Yigit et al., [2017] proposèrent une variante de ce dispositif. Dans leur protocole expérimental, l'extrémité d'une barre métallique a été insérée entre deux pièces de béton chargées de maintenir cette extrémité fixe et de permettre à la barre d'être à l'horizontal au repos (Figure II-12). De façon similaire aux protocoles précédents, l'antenne GNSS a été installée sur l'extrémité laissée libre, et le dispositif a été mis en mouvement par un déplacement initial appliqué à l'extrémité libre. Des barres de plusieurs longueurs ont été testées avec plusieurs amplitudes d'excitation initiale afin de permettre d'évaluer plusieurs fréquences principales. L'évaluation repose sur un processus similaire à l'étude précédente, par comparaison dans le domaine temporel et spectral entre des calculs réalisés en PPP et un calcul relatif de référence. Cette étude confirme la capacité d'une solution PPP à détecter des mouvements avec une fréquence allant jusqu'à 2,9 Hz, compatibles en amplitude avec les phénomènes observables sur des ponts souples notamment. Cependant, il est une nouvelle fois noté qu'il a été nécessaire d'appliquer un filtre passe haut pour éliminer les erreurs latentes générées par les multitrajets.

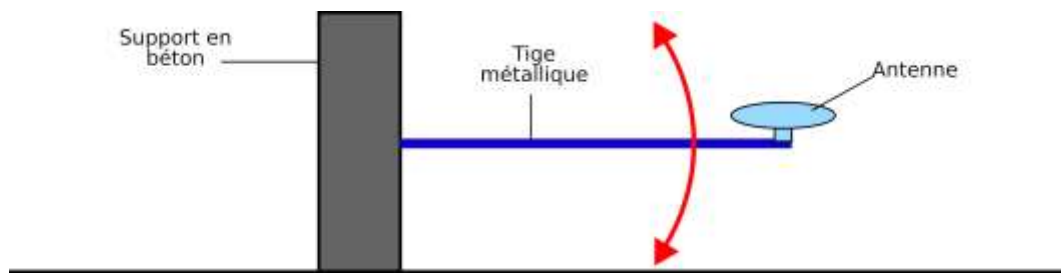


Figure II-12 Dispositif utilisé par Yigit et al. [2017] pour les déplacements verticaux

Afin de pouvoir ajuster au mieux le comportement du mobile libre tout générant des mouvements complexes, P. Xu et al., [2013] mirent au point un dispositif original à base d'une table vibrante composée d'une plaque maintenue par des ressorts à un support fixe (Figure II-13). Le changement des ressorts permet de changer l'oscillation libre du système. Les auteurs évaluèrent une station GNSS multifréquences échantillonnée à 50 Hz l'étude se concentrant principalement sur les phénomènes sismiques. L'approche PPP fut choisie pour permettre un calcul ne nécessitant pas de station de référence (qui serait également affectée par un séisme, dégradant significativement la précision du calcul). L'évaluation des performances a été réalisée par comparaison avec les mesures effectuées par une centrale inertielle dont les données ont été intégrées deux fois et translatées pour obtenir des séries de position de référence. Des déplacements décimétriques avec une fréquence de 1 Hz ont été appliqués par la table de simulation en trois dimensions pour permettre d'estimer la précision d'un calcul PPP lors de vibrations intenses. L'étude du résidu entre les données GNSS et celles de la centrale ainsi que l'analyse de leurs PSD ont permis de conclure que la solution PPP proposée offrait une précision de l'ordre de 4 mm et infracentimétrique sur les composantes horizontales et verticale, respectivement. Ces performances permettent d'envisager la détection de vibrations horizontales inférieures à 1 cm et de l'ordre de 1,5 cm à 2 cm en vertical, confirmant le potentiel de cette solution pour les applications en génie civil.

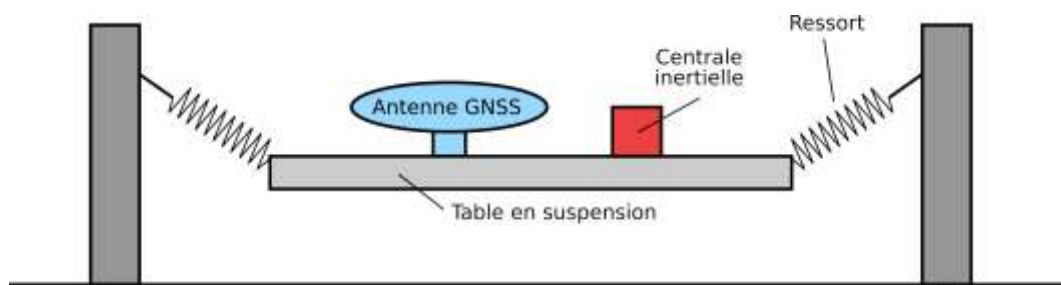


Figure II-13 Table de simulation de mouvements mise en œuvre par Xu et al. [2013]

Une autre approche expérimentale consiste à produire des maquettes simples d'ouvrages pour simuler leur comportement. Afin d'évaluer le potentiel d'une solution multifréquences en RTK avec un échantillonnage à 10 Hz pour le suivi du comportement de tours face au vent, Tamura et al., [2002] réalisèrent un modèle élastique miniature pour leurs essais expérimentaux. Ce modèle élastique d'1m60 est composé de 5 blocs lestés superposés reliés par des ressorts amortissant. Ainsi, cette maquette était capable de simuler des mouvements longitudinaux et transversaux selon la direction du vent et des mouvements de torsion, dont la fréquence naturelle la plus basse était de 1,32 Hz. La comparaison des déplacements estimés par des accéléromètres et mesurés par GNSS permis de valider la solution proposée pour une application sur ouvrage. Favre, [2016] réalisa l'évaluation d'un tandem de station multifréquences haut de gamme en calcul relatif à l'aide d'une "maquette de pont" (Figure II-14). Cette maquette était constituée d'un pied vertical métallique creux fixé au sol, d'une poutre métallique de 6m creuse fixée au pied, et d'une pièce verticale fixée pouvant être lestée pour faire varier les fréquences propres du dispositif. Les modes propres des différents éléments de la maquette ont été estimés à l'aide d'un modèle numérique en éléments finis. Lors des expérimentations, la maquette fut mise en mouvement en imposant un mouvement vertical à une extrémité de la poutre, et une station GNSS et des accéléromètres furent installés à l'autre extrémité. La comparaison des données GNSS et des accéléromètres dans le domaine temporel (amplitudes des déplacements) et fréquentiel (détection des pics dans le spectre) a permis de mettre en avant le potentiel du positionnement par satellite pour le suivi de vibrations, notant cependant que les fréquences les plus élevées (au-delà de 6 Hz) n'était pas détectées sur les séries GNSS, notamment en raison d'une amplitude trop faible.



Figure II-14 Dispositif "maquette de pont" utilisée par Favre [2016] (extrait)

II.1.4. SYNTHÈSE SUR LES PROTOCOLES D'ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE

La majorité des études regroupées dans les deux paragraphes précédents ont eu pour but de déterminer quelles oscillations/vibrations compatibles avec les applications de génie civil (Figure I-23) peuvent être suivies par GNSS selon leur fréquence et éventuellement leur amplitude (Tableau II-1). Il ressort notamment que dans de nombreux cas, la fréquence maximale observable est significativement inférieure à la fréquence de Nyquist, et que l'amplitude minimale a souvent été le facteur limitant. Ce dernier point est d'autant plus important que les structures les plus rigides, qui ont tendance à avoir les fréquences propres les plus élevées, tendent aussi à avoir des amplitudes les plus faibles.

Référence	Calcul	Ech. GNSS	Dépl. horizontaux		Dépl. verticaux	
			Amp. Min.	Fréq. Max.	Amp. Min.	Fréq. Max.
W.-S. Chan et al., [2006]	Relatif	20 Hz	10 mm	1 Hz	20 mm	1 Hz
Kijewski-Correa, Kareem, et al., [2006]	Relatif	20 Hz	10 mm	~0,1 Hz	/	/
Psimoulis & Stiros, [2008]	Relatif	20 Hz	~10 mm	4 Hz	/	/
Casciati et al., [2009]	Relatif (TR)	20 Hz	~10 mm	2 Hz	/	/
P. Xu et al., [2013]	PPP	50 Hz	10 mm	1 Hz	15 mm	1 Hz
Moschas et al., [2014]	PPP	10 Hz	/	4 Hz	/	/
Yigit, [2016]	PPP	10 Hz	/	4,3 Hz	/	0,8 Hz
Favre, [2016]	Relatif	20 Hz	/	/	/	0,55 Hz
Paziewski et al., [2018]	RTK & PPP	50 Hz	/	4,5 Hz	/	/
Yigit et al., [2017]	PPP	10 Hz	/	/	/	2,9 Hz

Tableau II-1 Synthèse des amplitudes minimales et amplitudes maximales estimées observables par GNSS

Ces études exploitent du matériel GNSS dédié aux applications de topographie ou de géodésie, un matériel qui est généralement coûteux. C'est d'ailleurs dans une optique de contrôle des coûts que la méthode PPP rencontre un intérêt croissant, car elle permet d'éviter d'avoir à déployer une station de référence. Le calcul relatif est lui considéré comme le plus précis, au point d'être à plusieurs reprises considéré comme référence. On remarquera enfin que la plupart des études visant à caractériser la fréquence maximale observable reposent sur des jeux de données relativement courts (inférieurs à une heure). Si l'impact des multitrajets a été noté à plusieurs reprises, il a généralement été considéré comme un phénomène lent pouvant être ignoré pour le suivi de fréquences de l'ordre du hertz, ou retiré à l'aide d'un filtre simple. Ce phénomène sera à prendre en compte lors de l'étude de mouvements plus lents, de période horaire ou journalière. Dans le cadre de l'étude statique, des séries d'au moins 24 heures devront être utilisées.

Cette variété de protocoles expérimentaux et de méthodes de qualification constitue un bassin d'idées originales pour effectuer l'évaluation d'une solution GNSS à bas coût. Il sera nécessaire de valider les performances des séries GNSS à caractériser des mouvements dans le domaine temporel (amplitude) et fréquentiel. L'utilisation de systèmes motorisés apparaît comme la plus pertinente pour la génération de mouvements oscillants, ces approches ne nécessitant pas de calcul d'un mouvement de référence à partir d'une technique tierce, et étant relativement simple à mettre en œuvre. Enfin, peu d'études ont porté sur la qualification de déplacements simples (non oscillants), il sera intéressant de vérifier le potentiel de la solution GNS étudiée pour ce genre de mouvements.

II.2. APPROCHE GNSS CHOISIE

L'objectif de ces travaux est de valider la performance de stations GNSS à bas coût pour le déploiement de réseaux de capteurs pour la surveillance d'ouvrages d'art. Afin d'évaluer les performances maximales, l'approche du calcul relatif a été sélectionnée. Cette méthode est pertinente avec les approches de surveillance par réseaux de capteurs GNSS puisqu'elle permet une mise en référence commune aisée des capteurs, éventuellement dans un repère local. Des points fixes de référence sont par ailleurs généralement établis à proximité des ouvrages en surveillance renforcée ou haute surveillance, facilitant la mise en place d'une station de référence proche. Compte tenu du matériel ciblé, le calcul est effectué uniquement sur les signaux GPS L1 (monofréquence).

Le calcul effectué sur la phase de la porteuse des signaux. La phase φ_r^s mesurée par un récepteur r avec un satellite s s'exprime (Eq. II-7) en fonction de l'ambiguïté entière N_r^s , de la distance ρ_r^s entre le récepteur et le satellite, de la vitesse de propagation c de la lumière dans le vide, de la longueur d'onde λ du signal, des erreurs d'horloge récepteur δt_r et satellite δt^s , et les termes d'erreur $\tau_{r,iono}^s$, $\tau_{r,tropo}^s$ et ε présentés dans le Chapitre I.

$$\varphi_r^s = \frac{1}{\lambda} \rho_r^s + \frac{c}{\lambda} (\delta t_r - \delta t^s) + \tau_{r,iono}^s + \tau_{r,tropo}^s - N_r^s + \varepsilon \quad \text{Eq. II-7}$$

La méthode utilisée pour l'élimination des erreurs et la résolution des ambiguïtés entières est celle des doubles différences. L'opération de base des doubles différences est l'opération des simples différences. La simple différence utilise les données de deux récepteurs ($r1, r2$) et d'un satellite ($s1$) pour éliminer les erreurs d'horloge δt^{s1} et d'orbites du satellite, identiques entre les deux observations. En utilisant une station de référence proche (ligne de base inférieure à 10km), il est possible de faire l'hypothèse que les deux stations sont affectées par la même tranche d'atmosphère. Il est ainsi possible de considérer les erreurs liées à la propagation des signaux dans l'atmosphère $\tau_{r,iono}^s$ et $\tau_{r,tropo}^s$ comme identiques entre les deux stations. L'équation de la simple différence s'exprime alors comme la différence de phase de deux récepteurs avec un satellite (Eq. II-8). On la note cette différence simple $\Delta\varphi_{r1,r2}^{s1}$ (Eq. II-9).

$$\varphi_{r1}^{s1} - \varphi_{r2}^{s1} = \frac{1}{\lambda} (\rho_{r1}^{s1} - \rho_{r2}^{s1}) + \frac{c}{\lambda} (dt_{r1} - dt_{r2}) - N_{r1}^{s1} + N_{r2}^{s1} + \varepsilon \quad \text{Eq. II-8}$$

$$\Delta\varphi_{r1,r2}^{s1} = \frac{1}{\lambda} \Delta\rho_{r1,r2}^{s1} + \frac{c}{\lambda} \Delta dt_{r1,r2} - \Delta N_{r1,r2}^{s1} + \varepsilon \quad \text{Eq. II-9}$$

avec :

$$\Delta\varphi_{r1,r2}^{s1} = \varphi_{r1}^{s1} - \varphi_{r2}^{s1} \quad \text{Eq. II-10}$$

$$\Delta\rho_{r1,r2}^{s1} = \rho_{r1}^{s1} - \rho_{r2}^{s1} \quad \text{Eq. II-11}$$

$$\Delta dt_{r1,r2} = dt_{r1} - dt_{r2} \quad \text{Eq. II-12}$$

$$\Delta N_{r1,r2}^{s1} = N_{r1}^{s1} - N_{r2}^{s1} \quad \text{Eq. II-13}$$

La double différence consiste à exprimer la différence de deux différences simples de deux récepteurs ($r1, r2$) avec deux satellites ($s1, s2$) (Eq. II-14). Elle permet d'éliminer le terme d'erreur lié aux horloges des récepteurs $\Delta dt_{r1,r2}$, qui est commun entre les deux simples différences $\Delta\varphi_{r1,r2}^{s1}$ et $\Delta\varphi_{r1,r2}^{s2}$. On note la double différence sur la phase $\nabla\Delta\varphi_{r1,r2}^{s1,s2}$ (Eq. II-15).

$$\Delta\varphi_{r1,r2}^{s1} - \Delta\varphi_{r1,r2}^{s2} = \frac{1}{\lambda} (\Delta\rho_{r1,r2}^{s1} - \Delta\rho_{r1,r2}^{s2}) - \Delta N_{r1,r2}^{s1} + \Delta N_{r1,r2}^{s2} + \varepsilon \quad \text{Eq. II-14}$$

$$\nabla\Delta\varphi_{r1,r2}^{s1,s2} = \frac{1}{\lambda} \nabla\Delta\rho_{r1,r2}^{s1,s2} - \nabla\Delta N_{r1,r2}^{s1,s2} + \varepsilon \quad \text{Eq. II-15}$$

avec :

$$\nabla\Delta\varphi_{r1,r2}^{s1,s2} = \Delta\varphi_{r1,r2}^{s1} - \Delta\varphi_{r1,r2}^{s2} \quad \text{Eq. II-16}$$

$$\nabla\Delta\rho_{r1,r2}^{s1,s2} = \Delta\rho_{r1,r2}^{s1} - \Delta\rho_{r1,r2}^{s2} \quad \text{Eq. II-17}$$

$$\nabla\Delta N_{r1,r2}^{s1,s2} = \Delta N_{r1,r2}^{s1} - \Delta N_{r1,r2}^{s2} \quad \text{Eq. II-18}$$

On utilise les notations $\Delta\phi_{r1,r2}^{s1}$ et $\nabla\Delta\phi_{r1,r2}^{s1,s2}$ qui s'expriment respectivement en fonction de $\Delta\phi_{r1,r2}^{s1}$ et $\nabla\Delta\phi_{r1,r2}^{s1,s2}$, et la longueur d'onde λ du signal utilisé, et qui sont utilisées par RTKlib.

$$\Delta\phi_{r1,r2}^{s1} = \lambda\Delta\phi_{r1,r2}^{s1} \quad \text{Eq. II-19}$$

$$\nabla\Delta\phi_{r1,r2}^{s1,s2} = \lambda\nabla\Delta\phi_{r1,r2}^{s1,s2} \quad \text{Eq. II-20}$$

Avec une approche similaire, les doubles différences peuvent également être appliquées aux pseudodistances en utilisant la formulation de la pseudodistance p_r^s en fonction de ρ_r^s , δt_r et δt^s (Eq. II-21). On note la double différence sur les pseudodistances $\nabla\Delta p_{r1,r2}^{s1,s2}$ (Eq. II-22).

$$p_r^s = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + \varepsilon \quad \text{Eq. II-21}$$

$$\nabla\Delta p_{r1,r2}^{s1,s2} = (p_{r1}^{s1} - p_{r2}^{s1}) - (p_{r1}^{s2} - p_{r2}^{s2}) = \nabla\Delta\rho_{r1,r2}^{s1,s2} + \varepsilon \quad \text{Eq. II-22}$$

Les calculs sont réalisés en post-traitement avec le logiciel RTKlib (Takasu, [2009], [2013]), qui est un logiciel scientifique mettant à disposition une grande variété de méthodes de calcul (PPP, relatif, RTK...) et de paramètres, tout en permettant l'accès au code source (logiciel open-source). RTKlib utilise un filtre de Kalman étendu (Extended Kalman Filter, EKF) pour générer les séries temporelles, qui offre notamment la possibilité d'appliquer des contraintes sur la position, la vitesse ou l'accélération de l'antenne, l'empêchant par exemple de s'éloigner rapidement de sa position précédente.

Un filtre de Kalman étendu K est un filtre à réponse impulsionnelle infinie qui fonctionne sur un processus itératif de prédiction et mise à jour. L'étape de mise à jour permet d'affiner un état \mathbf{x}_t^+ d'un système (position, vitesse, accélération...) et sa matrice de covariance associée \mathbf{P}_t^+ à un instant t à l'aide d'observations \mathbf{y}_t (pseudodistances, différences de phase, simple ou double différences...) et de la matrice du gain de Kalman \mathbf{K}_t (Eq. II-23, Eq. II-24). Les notations (-) et (+) désignent les valeurs avant et après mise à jour, respectivement.

$$\mathbf{x}_t^+ = \mathbf{x}_t^- + \mathbf{K}_t(\mathbf{y}_t - \mathbf{h}(\mathbf{x}_t^-)) \quad \text{Eq. II-23}$$

$$\mathbf{P}_t^+ = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_t\mathbf{H}(\mathbf{x}_t^-))\mathbf{P}_t^- \quad \text{Eq. II-24}$$

Avec :

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_t^- \mathbf{H}(\mathbf{x}_t^-) \times (\mathbf{H}(\mathbf{x}_t^-) \mathbf{P}_t^- \mathbf{H}(\mathbf{x}_t^-)^T + \mathbf{R}_t)^{-1} \quad \text{Eq. II-25}$$

Dans cette formulation, $\mathbf{h}(x)$ est une fonction permettant de modéliser les observations à partir d'un état prédit, $\mathbf{H}(x)$ est la matrice Jacobienne associée, \mathbf{R}_t est la matrice de covariance des résidus entre les observations et le modèle des observations et \mathbf{I} est la matrice identité. La formulation de $\mathbf{h}(x)$ et donc de $\mathbf{H}(x)$ et \mathbf{R}_t est dépendante de la méthode de calcul utilisée. Pour un calcul monofréquence entre deux récepteurs ($r1, r2$), avec $r2$ la référence fixe, le vecteur \mathbf{x}

contient la position \mathbf{r}_{r1} du récepteur $r1$ (3 composantes), sa vitesse \mathbf{v}_{r1} (3 composantes), et les ambiguïtés entières des simples différences avec les j satellites visibles ($s1, \dots, sj$) (Eq. II-26).

$$\mathbf{x} = (\mathbf{r}_{r1}, \mathbf{v}_{r1}, \Delta N_{r1,r2}^{s1}, \dots, \Delta N_{r1,r2}^{sj}) \quad \text{Eq. II-26}$$

Le vecteur \mathbf{y} contient les doubles différences de phases et de pseudodistances entre les satellites ($s1, \dots, sj$) et un satellite pivot si (Eq. II-27). Le satellite pivot est sélectionné automatiquement de façon à avoir la plus longue période de visibilité sur la période étudiée. Le satellite pivot change en cas de perte de visibilité.

$$\mathbf{y} = (\nabla \Delta \phi_{r1,r2}^{si,s1}, \dots, \nabla \Delta \phi_{r1,r2}^{si,sj}, \nabla \Delta \rho_{r1,r2}^{si,s1}, \dots, \nabla \Delta \rho_{r1,r2}^{si,sj}) \quad \text{Eq. II-27}$$

Enfin, pour un calcul avec une ligne de base courte ($\leq 10 \text{ km}$), $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ s'exprime en fonction des termes constituant les doubles différences entre les satellites sj et un satellite pivot si (Eq. II-28).

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = (\mathbf{h}_\phi, \mathbf{h}_p) \quad \text{Eq. II-28}$$

avec :

$$\mathbf{h}_\phi = \begin{pmatrix} \nabla \Delta \rho_{r1,r2}^{si,s1} - \lambda \nabla \Delta N_{r1,r2}^{si,s1} \\ \vdots \\ \nabla \Delta \rho_{r1,r2}^{si,sj} - \lambda \nabla \Delta N_{r1,r2}^{si,sj} \end{pmatrix} \quad \text{Eq. II-29}$$

$$\mathbf{h}_p = \begin{pmatrix} \nabla \Delta \rho_{r1,r2}^{si,s1} \\ \vdots \\ \nabla \Delta \rho_{r1,r2}^{si,sj} \end{pmatrix} \quad \text{Eq. II-30}$$

L'étape de prédiction permet d'estimer un état \mathbf{x}_{t+1}^- et sa covariance \mathbf{P}_{t+1}^- à partir des estimations mises à jour, de la matrice transfert \mathbf{F}_t^{t+1} , et de \mathbf{Q}_t^{t+1} la matrice de covariance du bruit de processus entre les instants t et $t + 1$ (Eq. II-31, Eq. II-32).

$$\mathbf{x}_{t+1}^- = \mathbf{F}_t^{t+1} \mathbf{x}_t^+ \quad \text{Eq. II-31}$$

$$\mathbf{P}_{t+1}^- = \mathbf{F}_t^{t+1} \mathbf{P}_t^+ (\mathbf{F}_t^{t+1})^T + \mathbf{Q}_t^{t+1} \quad \text{Eq. II-32}$$

La forme de \mathbf{F}_t^{t+1} et de \mathbf{Q}_t^{t+1} est déterminée par le mode de calcul employé. Dans le cas d'un calcul dit « cinématique », \mathbf{F}_t^{t+1} s'exprime comme une matrice identité, et \mathbf{Q}_t^{t+1} comme décrit dans l'Eq. II-33 (on note J le nombre de double différences utilisées dans le filtre de Kalman). Des variantes sont détaillées dans le Chapitre II.4.1.

$$\mathbf{Q}_t^{t+1} = \begin{pmatrix} \infty_{3 \times 3} & \dots & 0 \\ \vdots & 0_{3 \times 3} & \vdots \\ 0 & \dots & 0_{(3J-3) \times (3J-3)} \end{pmatrix} \quad \text{Eq. II-33}$$

Lors de la mise à jour du vecteur d'état (Eq. II-34), on obtient un vecteur d'état \mathbf{x}_t^+ contenant des estimations de sa position $\hat{\mathbf{r}}_{r1}$, de sa vitesse $\hat{\mathbf{v}}_{r1}$ et des ambiguïtés des simples différences $\widehat{\Delta N}_{r1,r2}^{sj}$, ainsi que sa matrice de covariance \mathbf{P}_t^+ .

$$\mathbf{x}_t^+ = (\hat{\mathbf{r}}_{r1}, \hat{\mathbf{v}}_{r1}, \widehat{\Delta N}_{r1,r2}^{s1}, \dots, \widehat{\Delta N}_{r1,r2}^{sj}) \quad \text{Eq. II-34}$$

La résolution des ambiguïtés est réalisée sur ces valeurs mises à jour : \mathbf{x}_t^+ et \mathbf{P}_t^+ sont différenciées à l'aide de la matrice \mathbf{D} de transformation des simples différences vers doubles différences :

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} I_{6 \times 6} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{pmatrix} \quad \text{Eq. II-35}$$

On obtient ainsi $\hat{\mathbf{x}}_t^+$ qui exprime les doubles différences d'ambiguïtés de phase calculées à partir des simples différences estimées et sa covariance associée estimée $\hat{\mathbf{P}}_t^+$ (Eq. II-36, Eq. II-37). Les termes de position et de vitesse restent inchangés.

$$\hat{\mathbf{x}}_t^+ = \mathbf{D}\mathbf{x}_t^+ = (\hat{\mathbf{r}}_{r1}, \hat{\mathbf{v}}_{r1}, \hat{\mathbf{N}}) \quad \text{Eq. II-36}$$

$$\hat{\mathbf{P}}_t^+ = \mathbf{D}\mathbf{P}_t^+\mathbf{D}^T \quad \text{Eq. II-37}$$

avec :

$$\hat{\mathbf{N}} = \widehat{\nabla \Delta N}_{r1,r2}^{si,s1}, \dots, \widehat{\nabla \Delta N}_{r1,r2}^{si,sj} \quad \text{Eq. II-38}$$

La covariance $\hat{\mathbf{P}}_t^+$ peut être séparée en 4 matrices de covariance Q_{RR} , Q_{RN} , Q_{NR} et Q_{NN} , respectivement les covariances de la position et vitesse seules, de la position et vitesse avec les ambiguïtés, des ambiguïtés avec la position et la vitesse, et enfin des ambiguïtés seules (Eq. II-39).

$$\hat{\mathbf{P}}_t^+ = \begin{pmatrix} Q_{RR} & Q_{NR} \\ Q_{RN} & Q_{NN} \end{pmatrix} \quad \text{Eq. II-39}$$

La résolution des ambiguïtés consiste à trouver du vecteur d'entiers $\check{\mathbf{N}}$ solution du système à moindres carrés entiers (*Integer Least Squares*, ILS) défini par :

$$\check{\mathbf{N}} = \underset{\check{\mathbf{N}} \in \mathbb{Z}}{\operatorname{argmin}} \left((\check{\mathbf{N}} - \hat{\mathbf{N}})^T Q_{NN}^{-1} (\check{\mathbf{N}} - \hat{\mathbf{N}}) \right) \quad \text{Eq. II-40}$$

RTKlib utilise les algorithmes LAMBDA et MLAMBDA pour résoudre ce problème, et trouver la valeur optimale $\check{\mathbf{N}}$. Les algorithmes peuvent également exprimer la seconde meilleure solution au problème $\check{\mathbf{N}}_2$. Cette valeur est utilisée pour calculer un « ratio test » R_{test} (Eq. II-41).

$$R_{test} = \frac{(\check{\mathbf{N}}_2 - \hat{\mathbf{N}})^T Q_{NN}^{-1} (\check{\mathbf{N}}_2 - \hat{\mathbf{N}})}{(\check{\mathbf{N}} - \hat{\mathbf{N}})^T Q_{NN}^{-1} (\check{\mathbf{N}} - \hat{\mathbf{N}})} \quad \text{Eq. II-41}$$

La valeur de R_{test} est comparée à un seuil R_{seuil} . Si R_{test} est supérieure à R_{seuil} , alors les ambiguïtés sont considérées comme résolues (*Fixed*) à l'instant t . Les positions et vitesses de l'antenne sont alors mises à jour avec les valeurs $\check{\mathbf{r}}_{r1}$ et $\check{\mathbf{v}}_{r1}$ ajustées grâce à $\check{\mathbf{x}}$ (Eq. II-42).

$$\begin{pmatrix} \check{\mathbf{r}}_{r1} \\ \check{\mathbf{v}}_{r1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{r}}_{r1} \\ \hat{\mathbf{v}}_{r1} \end{pmatrix} - Q_{RN} Q_{NN}^{-1} (\hat{\mathbf{x}} - \check{\mathbf{x}}) \quad \text{Eq. II-42}$$

Si R_{test} est inférieure à R_{seuil} , alors les ambiguïtés sont considérées comme non-résolues (*Float*) à l'instant t , et les positions et vitesses ne sont pas mises à jour.

La résolution des ambiguïtés à chaque époque (temps GPS) permet d'une part d'accroître significativement la précision du calcul, et permet un calcul plus rapide. Néanmoins, il est important de noter que le test utilisé pour valider la résolution ne repose pas sur une estimation de l'exactitude ou de la précision réelle de la position obtenue, mais sur la proximité des entiers obtenus par rapport aux valeurs décimales estimées.

II.3. EVALUATION DE MATERIEL GNSS

II.3.1. MATERIEL EVALUE

L'objectif de cette évaluation est d'identifier une station GNSS la plus efficiente. Les deux éléments principaux d'une station GNSS, le récepteur et l'antenne, sont évalués dans ce paragraphe en procédant à différentes combinaisons antenne/récepteur. Trois récepteurs GPS monofréquence (L1) à bas coût ont été évalués :

- un récepteur U-Blox NEO-6M, couplé à une carte Arduino utilisée pour paramétrer le récepteur (et permettre l'enregistrement des mesures de phase qui n'est pas activé par défaut sur cette puce) et enregistrer les données au format propriétaire ubx. Le récepteur possède 50 canaux et une fréquence maximale d'acquisition de 5Hz, mais avec la mesure de phase activée, la carte Arduino a rencontré des difficultés à enregistrer les données à une fréquence supérieure à 2Hz. Ce type de récepteur utilise une horloge interne à cristal simple. Son prix avoisine les 15€ (prix en € 2019, comme tous les autres prix annoncés dans ce chapitre) ;
- un récepteur U-Blox NEO-6T, intégré à une carte PEGASE développée par l'IFSTTAR (Figure II-15), utilisée ici pour contrôler le récepteur et enregistrer les données au format ubx. Les caractéristiques de ce récepteur sont proches de celles du NEO-6M (50 canaux, échantillonnage à 5Hz), mais il s'en distingue par sa capacité native à enregistrer les mesures sur la phase, et l'utilisation d'une horloge interne TCXO (Temperature Compensated Crystal Oscillator). Une horloge TCXO permet une meilleure stabilité qu'une horloge cristal, notamment face aux variations de température. Ce type de récepteur peut être acheté aux alentours de 50€ ;
- un récepteur U-Blox LEA-6T, intégré à un boîtier d'acquisition U-Blox EVK-6T (kit d'évaluation). Avec ce système, le récepteur est contrôlé en connectant le boîtier à un ordinateur équipé du logiciel de contrôle du fabricant. Les données sont également enregistrées par l'ordinateur, et non à bord du boîtier comme les deux précédents systèmes, ce qui complexifie les sessions longues. Le récepteur LEA-6T est très similaire au NEO-6T (échantillonnage, canaux, horloge interne), les seules différences se situant au niveau des possibilités d'intégration à des circuits électroniques (mémoire intégrée, détection de court-circuit). Ces différences n'impactent pas la performance du récepteur, et les résultats obtenus devraient être très proches de ceux du NEO-6T. Néanmoins, étant donné que cette puce est fournie sur un circuit intégré du fabricant, elle constitue une bonne référence pour valider les résultats obtenus avec le NEO-6T. Son prix peut également être estimé aux alentours de 50€.

Des antennes variées ont été combinées à ces récepteurs pour procéder à leur évaluation (Figure II-15). Quatre antennes ont été testées :

- une antenne de type patch du fabricant CTi. Les antennes patch sont généralement les antennes les moins coûteuses et les plus petites (1 à 2 cm de diamètre), et ne comportent pas de protection spécifique contre les multitrajets. L'antenne CTi utilisée ne dispose pas d'une fiche de calibration d'antenne précise. Son tarif avoisine 30€ ;
- une antenne Antcom G3Ant-52AT1, dédiée aux applications de navigation précise. L'antenne, de 5 cm de diamètre, est équipée d'un plan de masse – ou plan de sol – (*ground plane*) circulaire de 12 cm de diamètre. Les propriétés réfléchissantes du plan de masse permettent de modifier le diagramme de rayonnement de l'antenne, et font du plan de masse un bouclier contre les multitrajets. Un fichier de calibration précise (caractéristiques de gain de l'antenne et position de son centre de phase) est disponible. Son tarif est de l'ordre de 300€ ;
- une antenne Novatel GPS-702-GG, dédiée aux applications de topographie. L'antenne d'un diamètre inférieur à une dizaine de centimètres, est équipée d'un plan de masse circulaire de 18 cm. Ce plan de masse est usiné selon un procédé déposé comportant notamment des fentes découpées en spirales utilisées pour guider les signaux reçus, et des ouvertures autour de ces fentes afin de réduire la diffraction des signaux dans l'antenne. L'antenne dispose d'un fichier de calibration précise. Le modèle équivalent en monofréquence, GPS-701-GG, était tarifé à 600€ ;
- une antenne géodésique Leica AT504. Il s'agit d'une antenne « choke ring » : l'antenne d'une dizaine de cm de diamètre est protégée par bouclier formé de cylindres métalliques concentriques. Ces cylindres, dont le plus grand atteint 40 cm de diamètre, sont usinés dans un seul bloc de métal conducteur, et font office de bouclier contre les multitrajets. Cette antenne dispose d'un fichier de calibration précise. Le prix d'origine (4000€) donne un ordre de grandeur sur les tarifs du matériel géodésique.

Le matériel choisi permet de comparer des approches variées : une antenne centimétrique sans protection particulière (antenne CTi), une antenne multimentrique dotée d'une protection simple sous la forme d'un plan de masse plat, et deux solutions commerciales dotées d'antennes décimétriques couplées à des boucliers aux designs avancés.

Enfin, une station haut de gamme Spectra Precision SP80 (Figure II-15) a été utilisée pour établir des performances étalon. Il s'agit d'une station tout-en-un (le récepteur est intégré avec l'antenne) polyvalente, compatible avec GPS, GLONASS, BeiDou et Galileo, dotée de 240 canaux et capable d'échantillonner jusqu'à 20 Hz.



a) Carte PEGASE



b) Antenne patch CTi



c) Antcom G3Ant-52AT1



d) Novatel GPS-702-GG



e) Leica AT504



f) Station SP80

Figure II-15 Matériel GNSS utilisé lors de l'évaluation expérimentale

II.3.2. PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

Un site d'essai de l'IGN a été sélectionné pour procéder à l'évaluation du matériel. Ce site, installé sur le toit du bâtiment de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) à Champs-sur-Marne (France), comporte plusieurs avantages. Le bâtiment jugé immobile, et les environs immédiats sont dégagés permettant une très bonne visibilité du ciel. Par ailleurs, il est équipé d'une station de référence du Réseau GNSS Permanent (RGP) français, appelée MLVL. Le RGP est un réseau de plus de 530 stations GNSS déployées à travers la France et géré par l'IGN et ses partenaires. L'objectif du RGP est de fournir des stations de référence permettant aux usagers français un rattachement, par le biais d'un calcul relatif, aux repères de référence national (RGF93) ou régionaux (RGAF09, RGFG95, RGR92, RGM04, ou RGSPM06). Les données du RGP sont accessibles gratuitement et librement. Enfin, le site d'essai comporte des piliers avec des marqueurs dont les coordonnées, comme celle de la station de référence, sont connues dans le RGF93 (Figure II-16).



Figure II-16 Site d'essai avec les piliers référencés

Le RGF93, ou Réseau Géodésique Français 1993, est le repère de référence national, il succède en 2001 à la Nouvelle Triangulation de la France (NTF) en tant que système officiel en France métropolitaine. Il est une réalisation de l'*European Terrestrial Reference System 1989* (ETRS89), qui est le système de référence européen comobile avec la plaque tectonique européenne, lui-même correspondant à l'*International Terrestrial Reference System* à l'époque 1989.0. Grâce à ces propriétés, le RGF93 est compatible avec le WGS84 : dans un calcul relatif, si les coordonnées de la station de référence sont connues dans le RGF93, les coordonnées calculées

pour la station de mesure seront obtenues dans le RGF93. Les coordonnées dans le RGF93 peuvent être exprimées sous forme géographique (longitude, latitude et hauteur ellipsoïdale, c'est-à-dire la hauteur par rapport à l'ellipsoïde de référence utilisé pour modéliser la Terre), ou sous forme cartésienne (X,Y,Z). Les coordonnées peuvent également être projetées dans un repère adapté au territoire métropolitain sous la forme de composantes Est, Nord et de hauteur. Deux projections sont associées au RGF93 : la projection Lambert93 et la projection conique conforme 9 zones.

Lors d'une première série d'expérimentation, nommée *E1a*, les antennes ont été installées sur les marqueurs des piliers (Figure II-17), à l'aide d'embases et de mâts permettant de connaître leur hauteur exacte par rapport au marqueur et de garantir leur alignement.



Figure II-17 Installation de l'antenne G3Ant sur un pilier du site d'essai

Les antennes patch n'étant pas compatibles avec ce type de matériel (pas de visserie pour les fixer), deux types d'installées ont été testés : dans un cas, elles ont été fixées sur des supports horizontaux montés sur les mêmes mâts/embases que les autres antennes. Dans un second cas, elles ont été installées sur un support en béton simple, installé sur le site d'essai. Ces antennes n'ayant pas de protection particulière contre les multitrajets, ces deux types d'installations doivent permettre de mettre en évidence leurs effets.

Si toutes les acquisitions n'ont pas pu être réalisées en même temps, elles ont toutefois été menées dans des conditions similaires, par temps clair. Des sessions d'au moins 24 heures, à une fréquence d'acquisition de 1 Hz, ont été enregistrées pour chaque tandem antenne/récepteur.

Une autre expérimentation, notée *E1b*, au protocole similaire à *E1a* a été réalisée avec quelques antennes sélectionnées (patch CTi, G3Ant et GPS-702-GG) et le récepteur U-blox NEO-6T dans des conditions pluvieuses. La fréquence d'acquisition est également de 1 Hz.

Enfin, une autre piste d'implémentation des antennes patch a été étudiée en intégrant directement les antennes dans le béton. Cette expérimentation notée *E1c*, a consisté à insérer l'antenne « plus bas » dans le matériau pour utiliser ses propriétés électromagnétiques absorbantes (ou réfléchissantes) comme bouclier contre les multitrajets (Figure II-18). L'insertion des antennes dans le béton permet également de fixer durablement les antennes. L'expérimentation *E1c* permet ainsi de simuler quelles seraient les performances de petites antennes insérées à même le matériau d'une structure lors de sa construction.

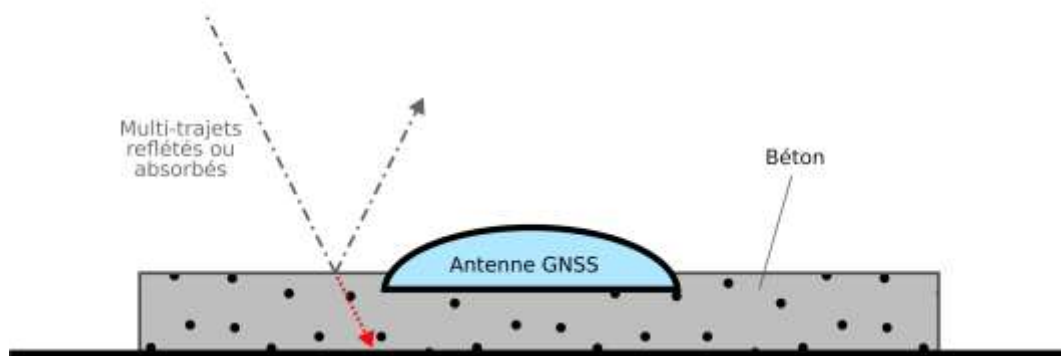


Figure II-18 Schéma d'une antenne insérée dans du béton

Deux dalles de béton de 70x70x5 cm ont été coulées avec du béton traditionnel. Ces dimensions garantissent que l'antenne est entourée par du béton dans toutes les directions horizontales sur une distance égale à au moins une longueur d'onde du signal GPS L1. Deux implémentations ont été testées. Dans la première dalle, après avoir coulé le béton, une antenne patch CTi a été insérée avant qu'il ne sèche, ne laissant que le demi-millimètre supérieur de son dôme en plastique exposé à la surface. Une fois le béton séché, cette antenne ne peut plus être déplacée ni enlevée de la dalle (Figure II-19).



Figure II-19 Antenne incluse dans une dalle de béton

Dans la deuxième dalle (Figure II-20), un cube en polystyrène a été inséré comme espace réservé pour une antenne, ainsi qu'un tuyau permettant d'insérer le câble d'antenne. Après le séchage du béton, le polystyrène est enlevé, le béton est limé pour assurer un bon ajustement à l'antenne, qui a été insérée avec son câble. Dans ce scénario, le matériel GNSS peut être inséré ou retiré à volonté.



Figure II-20 Dalle avec emplacement pour insérer une antenne patch

Les deux dalles ont été installées sur le site d'essai de l'IGN à même le sol (ne pouvant être installées en équilibre sur les piliers avec les marqueurs référencés). Des sessions d'une journée avec temps clair ont été acquises, avec un échantillonnage à 1Hz.

Les données ont été post-traitées avec le logiciel RTKLib en calcul relatif, en utilisant la station MLVL du site d'essai comme référence, offrant une ligne de base inférieure ou égale à un dizaine de mètres avec les piliers. L'utilisation de stations de référence haut de gamme comme celles du RGP n'est pas incompatible avec l'approche « bas coût » étudiée. Avec le déploiement de stations sur ouvrage à bas coût, le nombre de points de mesure peut être multiplié : le prix d'une station de référence haut de gamme revient ainsi à un coup faible par point de mesure.

Le traitement a été effectué avec les paramètres de calcul détaillés dans le paragraphe II.2 (pour la station étalon SP80, les bandes L1 et L2 ont été utilisées). L'intégralité des paramètres du calcul sont détaillés dans l'Annexe I : Paramètres de calcul RTKLib. En complément, les hauteurs d'antennes (hauteur connue du support), leurs fichiers de calibration, et des corrections d'horloges et d'orbites des satellites, ont été utilisés pour diminuer les termes d'erreur dans le calcul (Eq. II-7). Ces corrections sont produites par l'*International GNSS Service* (IGS) à l'aide d'un réseau de stations permanentes pour affiner les informations des paramètres d'orbites et d'horloge que les satellites diffusent. Les corrections utilisées ici sont les corrections « *Rapid* », disponibles gratuitement et librement avec un délai de 24 à 48 heures.

Les séries temporelles produites par RTKLib sont obtenues dans le RGF93, le système dans lequel les coordonnées de la station de référence sont connues. Elles ont été projetées selon les composantes est, nord et verticale à l'aide de la projection Lambert 93.

II.3.3. CRITERES D'EVALUATION

Afin d'évaluer la performance des stations testées, plusieurs critères ont été utilisés pour caractériser la précision, l'exactitude, et la robustesse du calcul. La précision caractérise la reproductibilité d'un résultat, et peut être représentée par la dispersion des séries temporelles. La dispersion est estimée à l'aide des écarts types σ_E , σ_N et σ_V des composantes est, nord et verticale, respectivement. La précision horizontale est estimée grâce à σ_H , calculé à partir de σ_E et σ_N (Eq. II-43).

$$\sigma_H = \sqrt{(\sigma_E)^2 + (\sigma_N)^2} \quad \text{Eq. II-43}$$

L'exactitude représente la justesse entre les mesures effectuées et la réalité. Elle est à distinguer de la précision, car une série de mesures peut être précise mais inexacte, et inversement (Figure II-21).

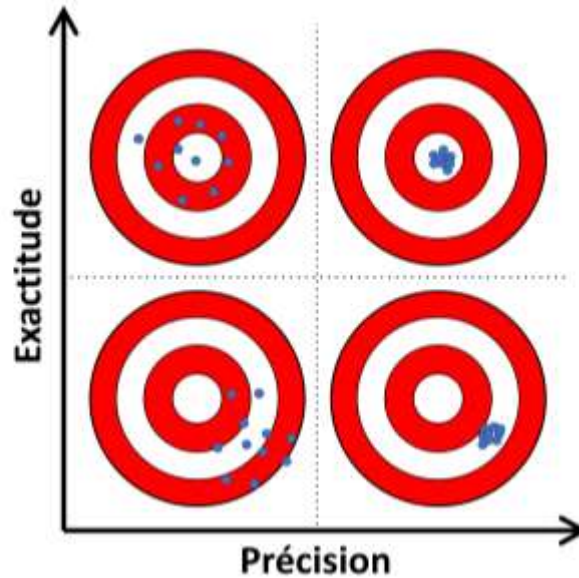


Figure II-21 Illustration des notions de précision et d'exactitude

L'exactitude est estimée sur chaque composante à l'aide de l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error*, RMSE) par rapport aux coordonnées de référence des marqueurs de pylônes. Pour rappel, le $RMSE_x$ d'une série de mesure x dont la valeur réelle est un scalaire x_{ref} s'exprime selon l'Eq. II-44. Les valeurs $RMSE_E$, $RMSE_N$ et $RMSE_V$ sont calculées pour les composantes est, nord et verticale respectivement. De même que pour σ_H , $RMSE_H$ est calculé à partir des valeurs $RMSE_E$ et $RMSE_N$ (Eq. II-45) pour représenter l'exactitude horizontale.

$$RMSE_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - x_{ref})^2}{n}} \quad \text{Eq. II-44}$$

$$RMSE_H = \sqrt{(RMSE_E)^2 + (RMSE_N)^2} \quad \text{Eq. II-45}$$

La valeur du RMSE intègre la dispersion des mesures. Pour l'interprétation des résultats, il est nécessaire de comparer les RMSE aux écarts types : idéalement, il est souhaitable d'avoir une valeur du RMSE qui tend vers l'écart type, ce qui signifie que peu d'erreurs systématiques sont présentes dans la solution (le nuage de point est centré sur la position réelle cible).

La robustesse est caractérisée par le taux de résolution des ambiguïtés (*ambiguity resolution ratio*, ARR). Lors de l'application du filtre de Kalman étendu (cf. paragraphe II.2), les ambiguïtés entières peuvent être jugées comme résolues ou non grâce au « ratio test » de RTKLib à chaque époque de la série temporelle. Si la validation des ambiguïtés n'est pas un gage certain de la précision ou de l'exactitude des positions obtenues, les époques où celles-ci ne sont pas résolues ont une forte probabilité d'être de mauvaise qualité. Elles sont ainsi éliminées, diminuant le nombre de mesures disponibles. L'ARR d'une série temporelle représente le ratio entre le nombre n_{fix} d'époques où les ambiguïtés entières sont résolues et le nombre n total d'époques (Eq. II-46).

$$ARR = \frac{n_{fix}}{n} \quad \text{Eq. II-46}$$

Pour compléter l'évaluation de la robustesse du calcul, le taux de valeurs aberrantes (*outliers*) est calculé sur les époques où la résolution des ambiguïtés est jugée réussie. La détection des valeurs aberrantes est réalisée par la méthode des quartiles sur chaque composante des séries temporelles de position. Dans cette approche, les quartiles q_{25} , q_{50} et q_{75} sont calculés. Les valeurs inférieures au seuil q_{inf} ou supérieures à q_{sup} , définis dans l'Eq. II-47 et l'Eq. II-48 sont considérées comme aberrantes. Pour chaque époque, il suffit que l'une des trois composantes de position soit considérée aberrante pour que l'époque soit considérée aberrante.

$$q_{inf} = q_{25} - 1.5 \times (q_{75} - q_{25}) \quad \text{Eq. II-47}$$

$$q_{sup} = q_{75} + 1.5 \times (q_{75} - q_{25}) \quad \text{Eq. II-48}$$

Les écarts types et RMSE sont calculés sur les séries temporelles dans lesquelles les époques sans résolution des ambiguïtés entières et celles aberrantes ont été retirées.

II.3.4. RESULTATS & DISCUSSIONS

Les conditions de test de l'expérience *E1a* sont proches des conditions idéales pour des applications GNSS. Dans ce scénario, les multitrajets deviennent la principale source d'erreur sur les mesures. Compte tenu de la période de révolution des satellites GPS (11h58) et de la période de rotation de la Terre (23h56), la même géométrie capteur/satellites est obtenue avec une périodicité de 23h56. Les erreurs liées aux multitrajets GPS ont donc une répétabilité de 23h56. Cette répétabilité peut être observée sur des séries temporelles de plusieurs jours (Figure II-22).

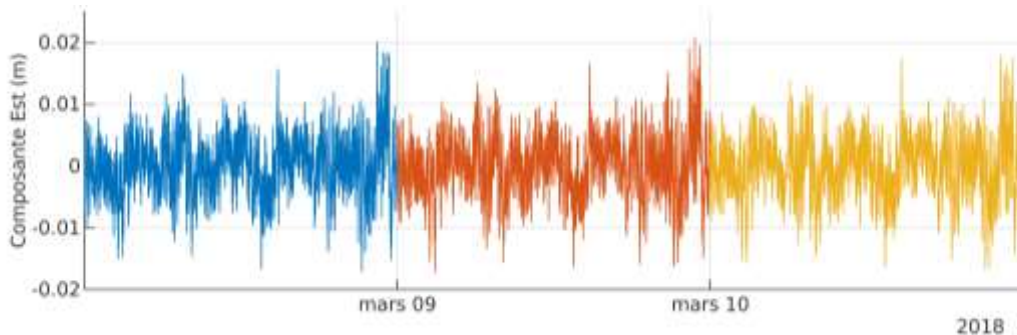


Figure II-22 Composante est d'une acquisition réalisée lors de l'expérimentation *E1a*

La valeur du GDOP moyen pour chaque série réalisée est comprise entre 1,6 et 1,8 : les conditions sont donc optimales.

Les résultats par temps clair (*E1a*) et par temps pluvieux (*E1b*) sont synthétisés dans le Tableau II-2 et le Tableau II-3, respectivement. Enfin, les résultats des essais avec les dalles de béton (*E1c*) sont indiqués dans le Tableau II-4. Les valeurs $RMSE_H$ et $RMSE_V$ n'ont pas été calculées pour les antennes patch directement installées sur ou dans le support en béton, n'ayant pas de référence de position comparable aux autres antennes. Ces valeurs n'ont donc pas été calculées pour *E1b* et *E1c*.

Au niveau des récepteurs, les tests réalisés par temps clair confirment qu'il n'y a pas de différence de performance entre les puces LEA-6T et NEO-6T. En revanche, une différence de performance sensible est mise en avant entre les puces NEO-6T et NEO-6M. Cet écart de performance est attribuable à l'horloge interne moins stable de la puce NEO-6M. Compte du tenu de la similarité des puces et de leur faible écart de prix, ces essais mettent en avant que pour des

applications de précision, l'utilisation d'une puce équipée d'une horloge TCXO est préférable. Le récepteur NEO-6T est ainsi sélectionné comme récepteur optimal.

Au niveau des antennes, les séries obtenues dans les expérimentations *E1a* et *E1b* avec les antennes patch présentent de nettement moins bons résultats qu'avec toutes les autres. La performance de ces antennes se dégrade par ailleurs significativement selon leur type d'installation ou les conditions météorologiques. Ces dégradations illustrent la nécessité d'une protection contre les multitrajets, l'antenne y étant plus fortement exposée en état surélevée ou en conditions pluvieuses (la présence d'eau augmente la réflectance des surfaces environnantes). La faible exactitude des séries calculées s'explique notamment par la mauvaise connaissance du centre de phase des antennes. Ces résultats mettent en avant la nécessité d'utiliser des antennes dotées au minimum d'un bouclier contre les multitrajets et d'une calibration précise de son centre de phase.

Récepteur	Antenne	σ_H (mm)	σ_V (mm)	$RMSE_H$ (mm)	$RMSE_V$ (mm)	ARR (%)	Points aberrants (%)
NEO-6M	CTi (mât)	13,2	28,0	21,0	38,0	99%	2%
NEO-6M	CTi (béton)	8,2	12,2	∅	∅	99%	1%
NEO-6M	G3Ant	6,0	9,2	11,0	18,0	100%	0%
NEO-6M	AT504	3,8	7,1	11,0	12,1	20%	0%
NEO-6T	CTi (mât)	12,4	25,1	20,2	35,0	97%	2%
NEO-6T	CTi (béton)	7,5	11,7	∅	∅	99%	1%
NEO-6T	G3Ant	5,3	7,2	7,1	18,3	100%	0%
NEO-6T	GPS-702	7,0	7,9	9,1	14,8	100%	0%
NEO-6T	AT504	3,9	7,1	8,1	13,8	99%	0%
LEA-6T	CTi (mât)	13,1	33,0	19,2	47,8	98%	3%
LEA-6T	G3Ant	5,2	7,4	7,2	15,9	100%	0%
Station SP80		3,3	6,0	5,6	9,7	100%	0%

Tableau II-2 Synthèse de l'évaluation du matériel par temps clair (E1a)

Récepteur	Antenne	σ_H (mm)	σ_V (mm)	$RMSE_H$ (mm)	$RMSE_V$ (mm)	ARR (%)	Points aberrants (%)
NEO-6T	CTi (béton)	18,0	30,0	∅	∅	76%	12%
NEO-6T	G3Ant	6,6	9,5	∅	∅	99%	0%
NEO-6T	GPS-702	7,2	10,8	∅	∅	99%	0%

Tableau II-3 Synthèse de l'évaluation du matériel par temps pluvieux (E1b)

Récepteur	Antenne	σ_H (mm)	σ_V (mm)	$RMSE_H$ (mm)	$RMSE_V$ (mm)	ARR (%)	Points aberrants (%)
NEO-6T	CTi (coulée)	6,2	10,5	∅	∅	98%	1%
NEO-6T	CTi (amovible)	8,3	12,3	∅	∅	98%	1%

Tableau II-4 Synthèse de l'évaluation des antennes insérées dans les dalles (E1c)

L'insertion de ces antennes dans le béton a permis d'en améliorer significativement la performance, bien que toujours inférieure aux autres antennes. Une précision moindre est observée avec l'antenne amovible, s'expliquant par la présence d'air (et donc de surfaces libres) entre l'antenne et le béton, ainsi que dans le tuyau guidant le câble. Afin de vérifier que le béton entourant les deux antennes ne générerait pas d'effet de masque, le nombre de satellites visibles par ces antennes a été comparé à celui d'une antenne patch externe (Figure II-23). Aucun effet de masque n'est notable. Cela confirme la capacité à utiliser le béton comme bouclier contre les

multitrajets pour ce type d'antennes peu coûteuses, bien que les essais montrent qu'il faut privilégier une insertion lors du coulage du béton plutôt qu'*a posteriori*.

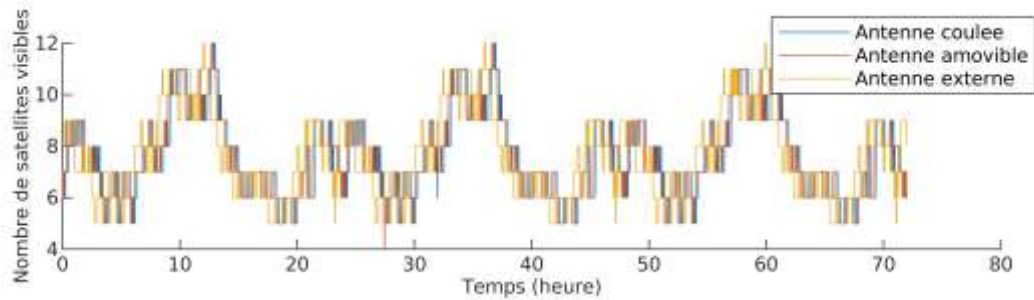


Figure II-23 Nombre de satellites visibles par les antennes patch hors et dans le béton

Les autres antennes, notamment la G3Ant et la GPS-702-GG, présentent des performances très similaires par temps sec comme pluvieux. L'antenne patch quant à elle subit une dégradation importante de sa précision en raison de la formation d'une fine couche d'eau en raison de la pluie, qui entraîne des réflexions et des multitrajets supplémentaires.

Bien que l'antenne géodésique AT504 montre une légère amélioration sur la précision et l'exactitude par rapport aux autres antennes dans l'expérimentation *E1a*, les résultats sont entachés par un ARR faible lors de certaines sessions. Ce faible taux de résolution a été observé et reproduit à plusieurs reprises, et n'a pas pu être justifié autrement que par des défauts d'alimentation ou de compatibilité du matériel. Les trois antennes se différencient principalement par leurs tailles, et la nature des plans de masse et protections incorporées. Il apparaît ainsi que dans le contexte d'un calcul GPS monofréquence à courte ligne de base, l'utilisation de boucliers avancés n'apporte pas de gain notable comparativement à l'utilisation d'un simple plan de masse circulaire. Les techniques de protection avancées présentes sur le matériel topographique ou géodésique ne sont mises à profit qu'avec des récepteurs plus performants. Dans les tandems étudiés, le récepteur utilisé devient donc le facteur limitant de la performance de la station GNSS.

Cette série d'expérimentation permet de proposer une solution matérielle efficace constituée d'un récepteur GPS monofréquence NEO-6T couplé à une antenne de navigation précise comme l'Antcom G3Ant. Cette solution, avec un coût approximatif de 350€, est utilisée pour les prochaines étapes d'évaluation expérimentale.

En parallèle, les performances atteintes à l'aide d'antennes patch insérées dans le béton permettent d'envisager un scénario où des antennes patch peu coûteuses sont insérées dans un ouvrage en construction (éventuellement en surnombre pour prévenir les éventuelles pannes), pour être connectées à un récepteur *a posteriori*. A défaut de pouvoir être utilisées pour un calcul précis de position absolue (absence de calibration précise), cette approche reste pertinente pour la mesure de déplacements.

Les essais ont porté sur la qualification de récepteurs GPS monofréquence, mais depuis, des variantes GNSS monofréquence multi-constellations (U-blox 8) ont été commercialisées. Des écarts minimes de performances sont cependant attendus entre les deux générations : l'utilisation des constellations supplémentaires dans le cadre d'un calcul relatif à courte distance n'a en général qu'un impact faible sur la précision du positionnement (Angrisano et al., [2012]; Dabove et al., [2014]). En revanche, elle offre une robustesse supplémentaire au calcul, le récepteur ayant plus de satellites en vue. Cette robustesse peut se traduire par une solution plus stable dans certains scénarios sur un site avec de nombreux obstacles / masques. Par ailleurs, une nouvelle génération de récepteurs à bas coût arrive sur le marché depuis fin 2019, offrant des acquisitions GNSS multifréquence pour une gamme de prix similaire : une évolution notable des performances est attendue, et devra être étudiée.

II.4. EVALUATION DES MODES ET PARAMETRES DE CALCUL

II.4.1. MODES ET PARAMETRES DE CALCUL EVALUES

RTKlib est un logiciel versatile proposant une multitude de modes et de paramètres de calcul. Deux modes de calcul, « Cinématique » et « Statique » ont été évalués : le mode cinématique n'applique pas de contrainte particulière sur la position de l'antenne, tandis que le mode statique contraint la station à ne pas se déplacer trop rapidement de sa position précédente. L'expression de la matrice transfert F_t^{t+1} et de la matrice de covariance du bruit Q_t^{t+1} utilisées dans le filtre de Kalman étendu sont détaillées dans le Paragraphe II.2 pour le calcul cinématique. Pour le mode statique, F_t^{t+1} est inchangée, et Q_t^{t+1} comme une matrice nulle.

Le mode statique conduit à une solution lissée, et qui peut supprimer complètement les petits déplacements ou rencontrer des difficultés lors de mouvements rapides. A l'inverse, le mode cinématique permet de surveiller des déplacements plus petits et ou plus rapides, et est révélateur de la précision du matériel, mais avec des séries temporelles plus bruitées.

Un premier paramètre de calcul évalué est la méthode de résolution des ambiguïtés entières. Trois méthodes sont possibles : la résolution continue, instantanée, ou celle « résoudre et maintenir » (*fix and hold*, notée R&M). Ces méthodes correspondent à des paramètres spécifiques du filtre de Kalman pour l'estimation des ambiguïtés à chaque époque. La résolution continue correspond à la méthode détaillée dans le Chapitre II.2. La résolution instantanée suit une approche similaire, la différence tenant au fait que les valeurs des ambiguïtés des simples différences $\widehat{\Delta N}_{r_1, r_2}^{s_1}$ ne sont pas estimées à partir des valeurs obtenues à l'étape précédente dans le filtre de Kalman, et sont recalculées de zéro à chaque époque. La méthode « résoudre et maintenir » consiste à appliquer des contraintes très fortes sur les ambiguïtés une fois qu'elles ont été résolues à au moins une époque : les ambiguïtés à une époque t ne peuvent pas s'éloigner significativement des ambiguïtés résolues à $t - 1$. Cette contrainte se traduit dans le filtre de Kalman étendu par une nouvelle expression du vecteur des doubles différences \mathbf{y} , la fonction modèle $\mathbf{h}(x)$, sa matrice Jacobienne $\mathbf{H}(x)$ et la matrice de covariance des résidus \mathbf{R}_t en fonction de la solution $\check{\mathbf{x}}$ de l'itération précédente et d'une contrainte fixe $\sigma_c = 0,001$ cycles :

$$\mathbf{y} = \check{\mathbf{x}} \quad \text{Eq. II-49}$$

$$\mathbf{h}(x) = \mathbf{G}x \quad \text{Eq. II-50}$$

$$\mathbf{H}(x) = \mathbf{G} \quad \text{Eq. II-51}$$

$$\mathbf{R} = \sigma_c^2 \mathbf{I} \quad \text{Eq. II-52}$$

avec :

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{pmatrix} \quad \text{Eq. II-53}$$

Un second paramètre de calcul ajustable est le sens de résolution des ambiguïtés entières. Le filtre de Kalman étendu peut être appliqué aussi bien dans le sens chronologique et dans le sens anti chronologique sur les séries d'observations. Deux approches ont été testées : le calcul avant (*forward*), dans lequel le filtre est utilisé chronologiquement, et le calcul combiné (*combined*). Avec la résolution combinée, le filtre est appliqué deux fois séparément dans chaque

sens, et la solution obtenue combine les deux résolutions trouvées en comblant les solutions manquantes de l'une avec l'autre. Si la résolution combinée est utilisée pour augmenter l'ARR, elle ne peut pas être appliquée sur un calcul temps réel, à la différence de la résolution chronologique simple.

Un troisième paramètre de calcul évalué est la ligne de base. La ligne de base (distance entre la station rover et la station de référence) est un paramètre clé de la précision d'un calcul relatif. La précision du positionnement diminue avec l'augmentation de la ligne de base, avec une dégradation qui s'additionne à la précision intrinsèque du matériel. Cette dégradation est assimilée comme proportionnelle à la ligne de base. Le matériel GNSS commercial est généralement qualifié par une précision intrinsèque, mais également par un terme de dégradation par rapport au niveau de référence, exprimé en ppm. Cette hypothèse de linéarité reste à confirmer pour des récepteurs peu coûteux. Les expériences détaillées dans ce chapitre ne considèrent que des lignes de base courtes : 0km, 2km et 10km.

Enfin, un dernier paramètre de calcul investigué est l'utilisation de corrections d'horloges et d'orbites des satellites. Diverses qualités de corrections sont fournies par des organismes comme l'IGS, qui peuvent être intégrées au calcul pour améliorer les estimations de position et d'horloge des satellites suivis. Trois approches ont été testées : sans correction, avec utilisation des corrections IGS « Rapid » fournies avec 24 à 48 heures de délais, et avec utilisation des corrections IGS « Final », les plus précises, disponibles avec 12 à 18 jours de délais. Compte tenu de l'utilisation des doubles différences et d'une ligne de base courte, il est attendu que ces corrections aient un effet minime sur les positions obtenues. L'évaluation de ce paramètre consiste principalement à valider s'il est possible de se passer de ce type de correction pour un positionnement précis avec la méthode utilisée.

II.4.2. EVALUATION DES MODES ET PARAMETRES DE CALCUL EN SCENARIO FIXE

II.4.2.1. PROTOCOLE EXPERIMENTAL ET EVALUATION

Une première approche consiste à évaluer l'impact des différents modes et paramètres de calcul dans un scénario où l'antenne est laissée fixe. Pour cela, une session de 24h réalisée avec le récepteur NEO-6T durant la série d'essai *E1a* a été considérée, et post-traitée sous RTKlib avec différentes combinaisons des modes et paramètres de calcul détaillés dans le Paragraphe II.4.1. Tous les calculs utilisent la même station de référence MLVL. Cette série de calcul est appelée *E2a*.

Afin d'évaluer les performances d'un calcul avec une ligne de base supérieure, un second site d'essai a été utilisé. Il s'agit d'un espace dégagé situé dans les jardins du château de Champs-sur-Marne (Figure II-24). Bien qu'au niveau du sol, ce site présente un horizon dégagé avec peu d'obstacles visuels, minimisant les masques et les effets de multitrajets. Ce second site d'essai est situé à 2km de la station de référence nommée MLVL. Lors d'une expérimentation *E2b*, l'antenne GNSS fut installée sur un trépied bullé. Une session de 24h fut enregistrée par temps sec, et post-traitée avec la station MLVL utilisée comme référence (ligne de base de 2km).



Figure II-24 Localisation des sites d'essai

Enfin, pour évaluer une troisième ligne de base, les acquisitions utilisées pour la session *E2a* furent réutilisées et post-traitées avec la station de référence nommée SMNE. Cette station fait également partie du RGP, et est située à 10km du site d'essai. Cette série est nommée *E2c*.

L'évaluation des performances est réalisée sur les mêmes critères que ceux utilisés pour l'évaluation du matériel : σ_H , σ_V , $RMSE_H$, $RMSE_V$, ARR et la proportion de points aberrants. Il est noté que pour *E2b* aucune position de référence équivalente à celle utilisée pour le site d'essai de l'IGN n'étant disponible, les valeurs $RMSE_H$ et $RMSE_V$ n'ont pas été calculées.

II.4.2.2. RESULTATS ET PARAMETRES DE CALCULS OPTIMAUX EN SCENARIO FIXE

Une première comparaison a été réalisée sur l'utilisation des corrections d'horloges et d'orbites des satellites. Des calculs avec ou sans les corrections (*Final* et *Rapid*) ont été réalisés avec les lignes de base de 0km, 2km et 10km, en mode cinématique avec une résolution continue et combinée des ambiguïtés.

Il ressort que les écarts (Figure II-25) entre les séries temporelles obtenues sont négligeables dans les trois cas étudiés. Avec le type de calcul choisi, il apparaît donc que l'utilisation de corrections précises d'horloges et d'orbites ne permet qu'une amélioration marginale.

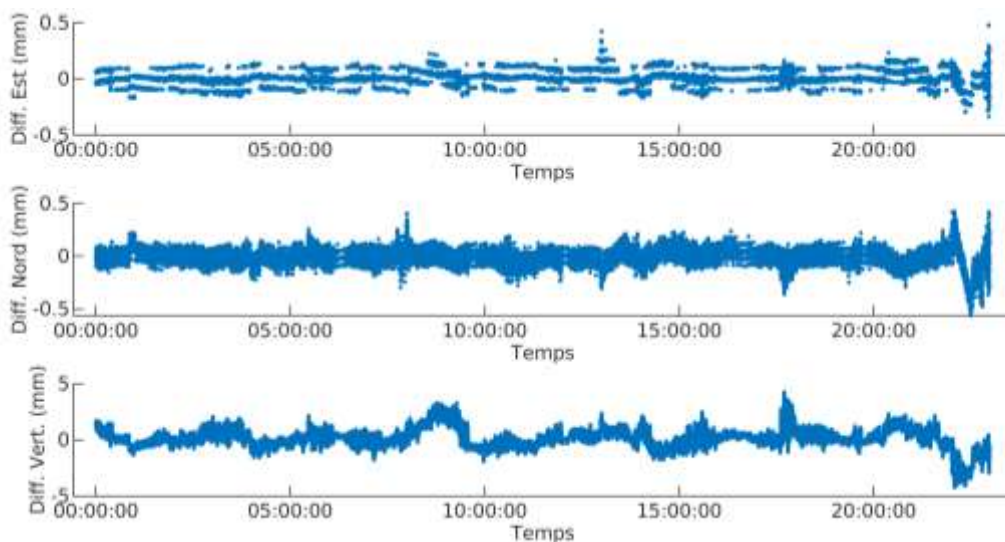


Figure II-25 Différence entre la solution avec et sans les corrections IGS "Final" pour une ligne de base de 0km

Pour la résolution des ambiguïtés entières, il a été rapidement mis en avant que la méthode “instantanée” apparaît comme la moins robuste. Avec un ARR très faible, compris entre 5% et 30% les séries temporelles obtenues sont difficilement exploitables (Figure II-26). Cette faiblesse peut s’expliquer par le matériel simple utilisé : avec peu d’observations (GPS L1), cette méthode de résolution est peu appropriée. L’utilisation du filtre de Kalman pour la résolution des ambiguïtés apparaît donc comme nécessaire.

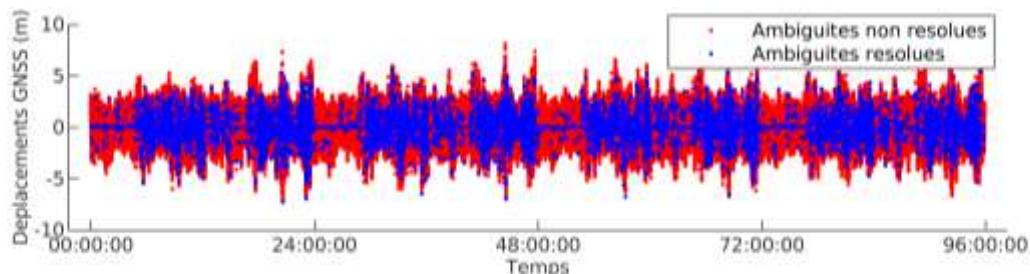


Figure II-26 Série temporelle calculée avec la résolution instantanée

Les différentes combinaisons des modes cinématique et statique, des méthodes de résolution continue et « résoudre et maintenir », et les sens de résolution sens avant et combinés ont été testées avec les différentes lignes de base. Les résultats avec des lignes de base de 0km (E2a), 2km (E2b) et 10km (E2c) sont synthétisés dans le Tableau II-5, le Tableau II-6 et le Tableau II-7, respectivement. En considérant que le mode statique est plus représentatif d’une étude en post-traitement, puisque visant à extraire les composantes lentes et lissées d’un déplacement, il n’a pas été combiné avec le sens de résolution avant qui est représentatif d’un calcul temps réel.

Le site d’essai utilisé pour l’expérimentation E2b ne comporte pas de marqueur de référence comme le site de l’IGN : les RMSE n’ont donc pas été calculés pour cette expérimentation.

Mode	Méthode Rés.	Sens Rés.	σ_H (mm)	σ_V (mm)	$RMSE_H$ (mm)	$RMSE_V$ (mm)	ARR (%)	Points aberrants (%)
Cin.	Cont.	Comb.	4,2	6,5	7,2	18,3	100%	2%
Cin.	Cont.	Avant	4,2	6,5	7,2	18,3	99%	2%
Cin.	R&M	Comb.	4,3	6,6	6,9	18,4	59%	2%
Cin.	R&M	Avant	4,0	6,4	6,9	18,5	61%	8%
Sta.	Cont.	Comb.	1,4	1,1	6,1	13,1	100%	0%
Sta.	R&M	Comb.	0,3	0,3	6,3	16,3	80%	20%

Tableau II-5 Synthèse des résultats avec une ligne de base de 0km (E2a)

Mode	Méthode Rés.	Sens Rés.	σ_H (mm)	σ_V (mm)	$RMSE_H$ (mm)	$RMSE_V$ (mm)	ARR (%)	Points aberrants (%)
Cin.	Cont.	Comb.	4,9	6,8	∅	∅	100%	1%
Cin.	Cont.	Avant	4,9	6,8	∅	∅	100%	1%
Cin.	R&M	Comb.	4,9	6,8	∅	∅	100%	1%
Cin.	R&M	Avant	4,9	6,8	∅	∅	100%	1%
Sta.	Cont.	Comb.	2,3	1,5	∅	∅	100%	2%
Sta.	R&M	Comb.	0,1	0,1	∅	∅	100%	13%

Tableau II-6 Synthèse des résultats avec une ligne de base de 2km (E2b)

Mode	Méthode Rés.	Sens Rés.	σ_H (mm)	σ_V (mm)	$RMSE_H$ (mm)	$RMSE_V$ (mm)	ARR (%)	Points aberrants (%)
Cin.	Cont.	Comb.	14,5	22,1	15,1	32,7	98%	7%
Cin.	Cont.	Avant	14,5	22,1	15,1	32,9	96%	7%

Cin.	R&M	Comb.	15,3	22,7	15,9	32,7	100%	8%
Cin.	R&M	Avant	15,3	22,7	15,9	32,8	98%	8%
Sta.	Cont.	Comb.	8,3	6,3	9,3	25,0	98%	9%
Sta.	R&M	Comb.	0,4	1,2	5,2	23,6	99%	40%

Tableau II-7 Synthèse des résultats avec une ligne de base de 10km (E2c)

Il est observé que le calcul en mode statique lisse fortement les séries temporelles obtenues. Contrairement au cas du calcul dynamique où les valeurs de σ_H et σ_V sont proches des valeurs $RMSE_H$ et $RMSE_V$ associées, en mode statique elles sont grandement inférieures dans la plupart des scénarios. Cela signifie que la précision est significativement plus forte que l'exactitude, et que la solution comporte principalement des erreurs systématiques. Ce phénomène est particulièrement marqué lorsque le calcul utilise la méthode "résoudre et maintenir", qui produit une droite pratiquement lisse en solution (Figure II-27). Cet écart est potentiellement trompeur, car malgré la précision apparente, la position réelle n'est pas mieux estimée qu'avec un calcul cinématique. Il a d'ailleurs été observé que les calculs ont convergé parfois vers des positions différentes, rendant difficile l'utilisation de séries temporelles calculées en mode statique.

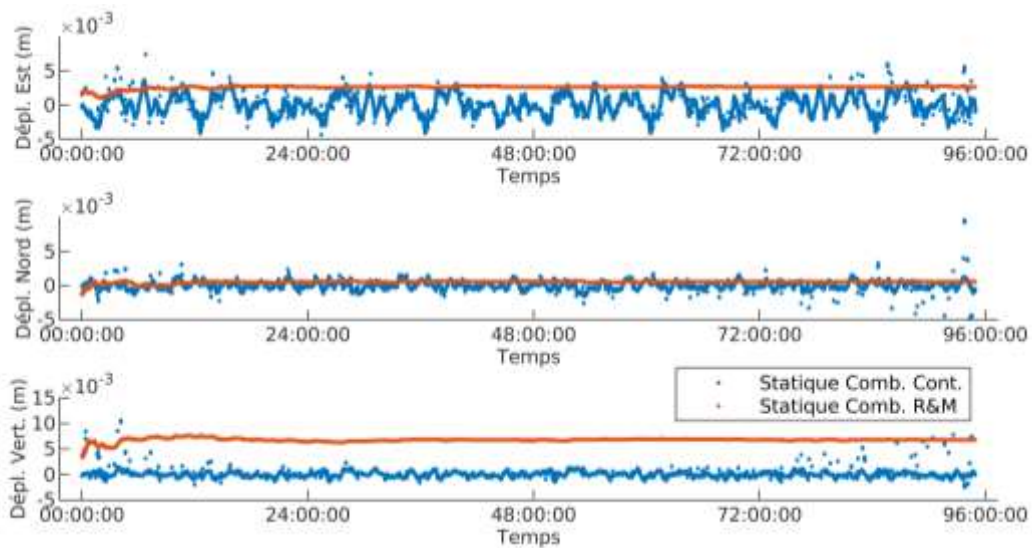


Figure II-27 Comparaison de deux calculs en mode statique

L'utilisation d'un filtrage avant ou combiné n'a pas entraîné d'impact significatif sur la précision ou l'exactitude du positionnement dans les essais menés. Une faible baisse du taux de résolution des ambiguïtés a été notée dans certains cas (Tableau II-7) lors de l'utilisation de la résolution à sens avant par rapport à la résolution combinée. C'est un résultat notable pour les applications en temps réel, dans lesquelles seule la méthode de résolution à sens avant peut être appliquée. Néanmoins, ces résultats seront à confirmer dans des scénarios dynamiques, où la résolution peut être plus complexe en raison des mouvements de l'antenne.

La méthode "résoudre-et-maintenir", pourtant initialement incorporée au logiciel spécifiquement pour les récepteurs à bas coût, ne s'avère pas plus efficace que la résolution continue. Au mieux les résultats se sont avérés quasi identiques, et pour les sessions avec une ligne de base de 0km, des pertes importantes de la résolution des ambiguïtés ont été observées avec cette méthode (Figure II-28). Étonnement, ces pertes n'ont pas été observées avec le calcul à 10km de ligne de base qui utilise pourtant les mêmes observations. La résolution continue apparaît comme l'approche la plus efficace.

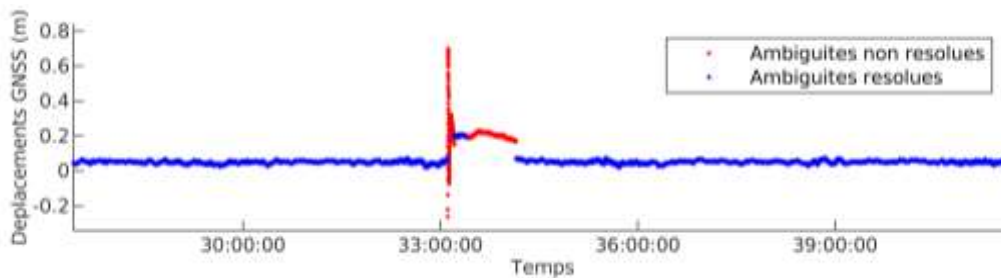


Figure II-28 Exemple de perte de résolution des ambiguïtés avec la méthode R&M

Enfin, concernant la ligne de base, la précision, l'ARR et le taux de points aberrants se sont révélés très proches entre les calculs à 0km (E2a) et à 2km (E2b). Ces résultats tendent à confirmer une dégradation négligeable dans les premiers kilomètres de ligne de base. Une dégradation nette peut en revanche être observée avec la ligne de base à 10km (E2c) sur tous les critères. Cette dégradation était attendue. A partir des résultats obtenus en mode cinématique avec une résolution continue et combinée selon les différentes lignes de base, il est possible d'estimer la dégradation de la précision de la solution testée selon la ligne de base : 1ppm en horizontal, et 2ppm en vertical.

Ces résultats permettent de dresser un premier portrait des paramètres de calcul optimaux : un calcul en mode cinématique, avec une résolution des ambiguïtés entières continue et une ligne de base comprise entre 0km et 2km. A ce stade, aucune différence significative n'a pu être révélée entre une résolution combinée et une résolution chronologique des ambiguïtés entières.

II.4.3. EVALUATION DES MODES ET PARAMETRES DE CALCUL EN SCENARIOS DYNAMIQUES

L'évaluation en scénario fixe a permis de procéder à une sélection du matériel le plus efficient pour un positionnement précis et robuste, et de dégager des paramètres de calcul optimaux. L'évaluation en scénario dynamique a pour objectif de confirmer quels modes et paramètres de calcul doivent être appliqués, et d'estimer quels phénomènes peuvent être observés avec la solution proposée selon leur amplitude ou leur fréquence.

II.4.3.1. DETECTION DE DEPLACEMENTS : PROTOCOLES ET CRITERES D'EVALUATION

Il a été montré dans le Paragraphe II.1 que de nombreuses approches ont été proposées pour évaluer la capacité de solutions GNSS à caractériser des mouvements oscillants ou à observer de changements de comportements oscillants. Cependant, peu d'études se sont intéressées à valider leur capacité à détecter des déplacements quasi-instantanés de faible amplitude. Ce genre de déplacement est pourtant révélateur sur un ouvrage de l'apparition d'endommagement fort ou d'une rupture d'un élément, notamment dans un contexte de haute surveillance. L'objectif de ces essais est de vérifier la capacité de la station à bas coût sélectionnée à observer un petit déplacement quasi-instantané selon les paramètres de calcul utilisés.

Deux protocoles expérimentaux ont été réalisés pour évaluer les déplacements horizontaux et verticaux. Dans une première série de manipulations E3a, une règle graduée métallique (graduation au demi-millimètre) est fermement fixée sur un support en béton horizontal situé à environ 2m de la station de référence MLVL (Figure II-29). L'antenne est fixée sur une embase bullée calée contre la règle métallique, et un point de référence est choisi sur une graduation.



Figure II-29 Dispositif expérimental E3a

Avant chaque session, l'antenne est laissée immobile pendant 30 minutes sur le point de référence choisi, avant d'être déplacée de façon répétée sur des distances de 20cm, 10cm, 5cm, 2cm et 1cm dans la même direction. Après une série de cinq déplacements, l'antenne est ramenée à son point de référence. En chaque déplacement, l'antenne est laissée immobile pour une durée définie. Cinq durées ont été testées : 10 minutes, 5 minutes, 2 minutes, 1 minute et 30s, ce qui amène à un total de 25 déplacements pour chaque taille de déplacement testé. Le minutage de chaque déplacement a été noté.

Le même protocole a été appliqué une nouvelle fois, avec des déplacements horizontaux de 1cm, 8mm, 6mm, 4mm et 2mm, et avec des pauses de 1 minute et 30s (au total, 10 déplacements par taille de déplacement).

Dans une deuxième série d'expérimentations *E3b*, l'antenne est installée sur un trépied avec un mât gradué (graduation au millimètre) et bullé, situé à 5m de la station de référence. La hauteur de l'antenne est alors modifiée avec des pas fixes de 10cm, 5cm, 2cm, 1.5cm et 1cm. Pour chaque pas, cinq déplacements séparés de pauses de 1 minute puis de 30s ont été réalisés.

Pour toutes les manipulations effectuées, l'échantillonnage est fixé à 1Hz.

Un test de détection automatisé a été proposé pour vérifier si les déplacements peuvent être identifiés précisément dans le temps. La dérivée de la composante est pour *E3a* et verticale pour *E3b* ont été calculées, puis filtrées à l'aide d'un moyenne glissante sur une fenêtre de cinq mesures (5s). La détection repose sur un dépassement de seuil de la dérivée : lorsque la dérivée dépasse ce seuil, une marche est détectée (Figure II-30). Si cette marche correspond à déplacement qui a été imposé et noté, le test est considéré comme réussi pour ce déplacement. Si aucune marche n'est détectée pour un déplacement connu, il est considéré comme un échec. La valeur du seuil a été choisie empiriquement comme la valeur la plus faible pour laquelle aucun faux positif (détection de marches en raison du bruit) n'est observable.

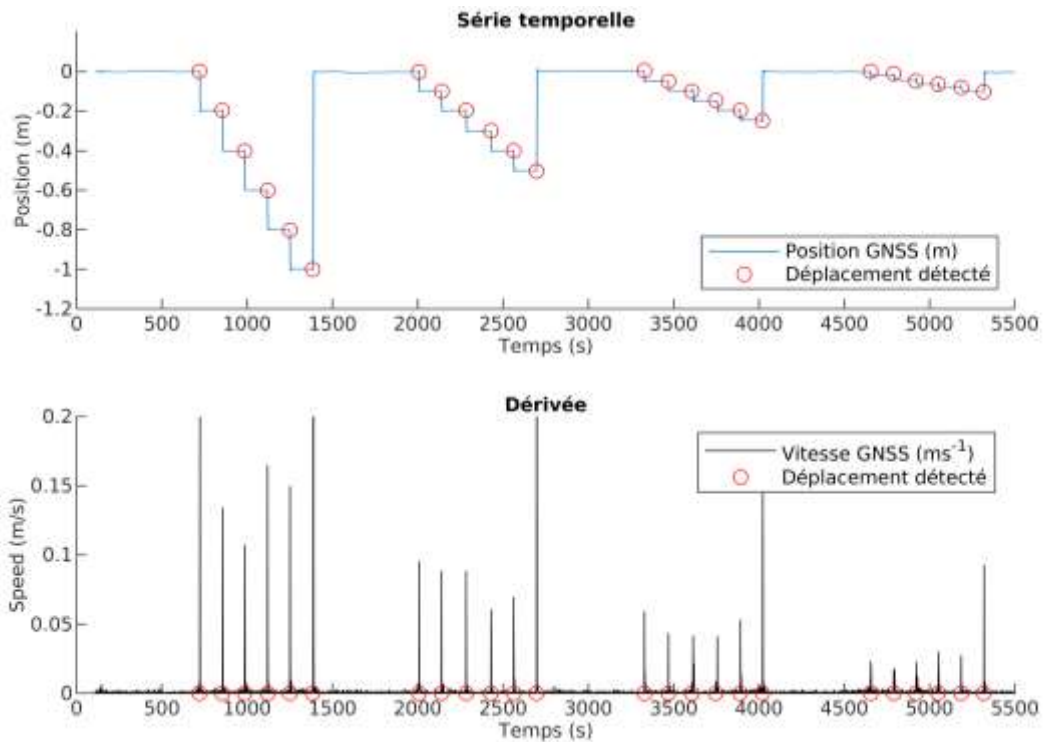


Figure II-30 Détection automatisée de déplacements sur les séries temporelles par la dérivée (E3a)

II.4.3.2. OSCILLATIONS : PROTOCOLES ET CRITERES D'EVALUATION

Afin d'évaluer la capacité de la station GNSS proposée à suivre des mouvements oscillants, un dispositif inspiré du système utilisé par Nicketopoulou et al., [2003] et de Breuer et al., [2008] a été utilisé. Ce dispositif consiste en un bras métallique installé sur un servomoteur tournant, dont le signal est contrôlé et enregistré par une carte Arduino (Figure II-31). Un servomoteur est un type de moteur asservi, dont il est possible de contrôler précisément la position (angulaire) ou la vitesse. Dans cette série d'expérimentation, la position angulaire est contrôlée, avec un échantillonnage de 5Hz. L'antenne GNSS est installée d'un côté du bras de façon à faire réaliser au centre de l'antenne des arcs de cercle horizontaux de rayon R . Le côté opposé du bras est lesté de façon à ne pas créer de déséquilibre, et le boîtier contenant le servomoteur est fermement ancré à une embase bullée.



Figure II-31 Dispositif expérimental constitué d'un bras tournant mis en mouvement par un servomoteur

Lors d'une série d'expérimentations *E4a*, l'antenne a premièrement été fixée sur l'embase. Une session d'acquisition d'une heure a été utilisée pour calculer la position de l'axe de rotation. Le boîtier du servomoteur a ensuite été installé sur l'embase, et l'antenne fixée sur le bras

métallique à une distance $R = 9,5 \text{ cm}$ de l'axe de rotation. L'antenne a été mise en mouvement selon des arcs de cercles contrôlés par le servomoteur. Des mouvements de périodes et d'amplitudes différentes ont été imposés à l'antenne : l'antenne ne réalisant pas de cercles complets, l'amplitude correspond à la distance maximale entre les deux extrémités du mouvement. L'amplitude peut donc être contrôlée en réalisant des angles plus ou moins grands avec le servomoteur (avec une amplitude crête à crête maximale de 19cm pour un angle de 180°), ou en changeant le rayon R . Deux séries ont été testées : une série avec un mouvement d'une amplitude de 60 s et une amplitude de 15 cm, une seconde avec une période de 10 s et une amplitude de 10 cm. Des séries d'une heure ont été réalisées, et post-traitées en mode cinématique en variant les paramètres de calcul utilisés. Toutes les séries GNSS sont acquises à une fréquence de 1 Hz.

Les mesures d'angles du servomoteur ont été utilisées pour créer un signal de référence à partir de l'azimut initial du bras, de sa longueur, et de la position calculée du centre de rotation (Figure II-32). Ce signal de référence a ensuite été recalé dans le temps à partir de la première oscillation.

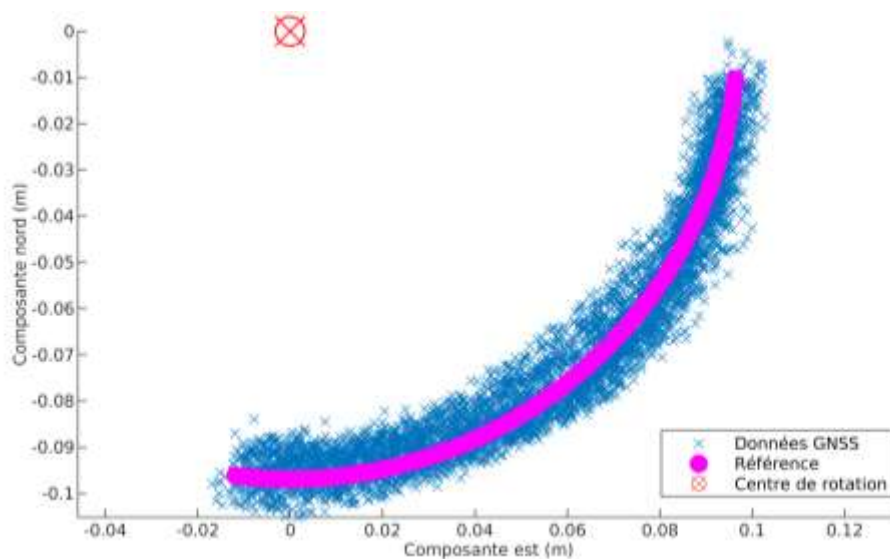


Figure II-32 Comparaison du signal GNSS et de la référence du servomoteur dans E4a

L'évaluation repose sur plusieurs critères : le $RMSE_H$ entre les séries GNSS et la série de référence, l'ARR, et le rayon moyen r calculé (distance moyenne des points au centre de rotation).

Lors d'une seconde d'expérimentation E4b, un protocole similaire fut appliqué pour générer des oscillations avec des amplitudes comprises entre 5 cm et 6 mm, et des fréquences observées sur le signal de référence comprises en 0,01 Hz et 0,25 Hz. Les séries ont été post-traitées en mode cinématique, avec une résolution combinée et continue pour des lignes de base de 0km et 10km. L'évaluation de la qualité des séries est faite dans le domaine fréquentiel. Les transformées rapides de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT) ont été calculées pour chaque combinaison pour la série GNSS et la série de référence (Figure II-33). Les pics des fréquences principales sont comparés : si un écart inférieur à 3% entre la référence et la série GNSS est observé, la détection est considérée comme réussie pour le signal imposé.

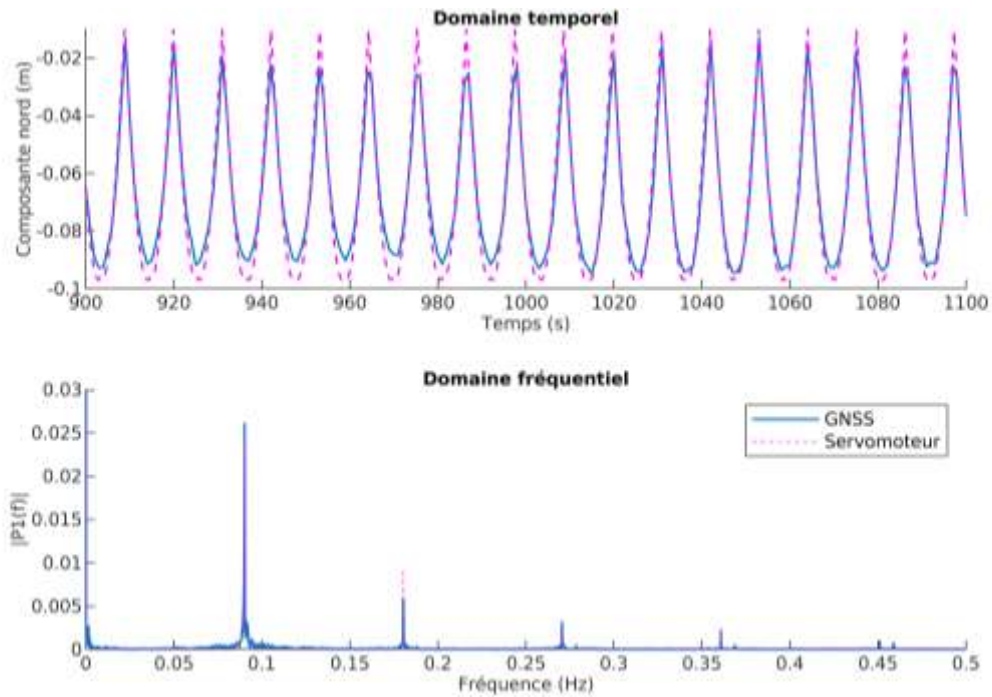


Figure II-33 Comparaison dans le domaine temporel et fréquentiel d'une série GNSS avec la référence générée à partir du servomoteur

II.4.3.3. RESULTATS ET PARAMETRES OPTIMAUX POUR LE SUIVI DYNAMIQUE

Lors des essais *E3a* sur les déplacements abrupts horizontaux, une attention particulière a été portée sur le taux de résolution des ambiguïtés entières. Les données de la première session (déplacements de 20cm à 1cm) ont été post-traitées avec divers paramètres de calcul, et un ARR global a été calculé (Tableau II-8). Le choix de cette session se justifie par le fait que les plus grands déplacements sont les plus susceptibles d'engendrer une perte de la résolution des ambiguïtés entières.

Ligne de base	Méthode de Résolution	Sens de Résolution	ARR (%)
0km	Continue	Combinée	100%
		Avant	100%
	Résoudre et maintenir	Combinée	99%
		Avant	78%
10km	Continue	Combinée	98%
		Avant	98%
	Résoudre et maintenir	Combinée	86%
		Avant	67%

Tableau II-8 ARR durant la manipulation *E3a*

La méthode de résolution continue apparaît une nouvelle fois comme la plus robuste, avec peu de différences sur le taux de résolution des ambiguïtés entre une résolution combinée ou avant. L'approche « résoudre et maintenir » moins robuste avec un ARR plus faible, particulièrement en résolution chronologique simple.

Les résultats des tests de détection de déplacements horizontaux (*E3a*) sont synthétisés dans le Tableau II-9 et le Tableau II-10.

Paramètres de calcul			Nombre de déplacements détectés (/25)					Total (/125)
Ligne de base	Méthode Rés.	Sens Rés.	20cm	10cm	5cm	2cm	1cm	
0km	Cont.	Comb.	25	25	25	25	25	125

10km	R&M	Avant	24	25	25	25	24	123
		Comb.	25	25	25	25	25	125
		Avant	20	20	20	20	19	99
	Cont.	Comb.	25	25	25	25	23	123
		Avant	20	25	24	24	22	115
	R&M	Comb.	24	25	23	25	16	113
Avant		15	15	14	15	14	73	

Tableau II-9 Synthèse du test de détection des déplacements horizontaux (E3a) de 20cm à 1cm

Paramètres de calcul			Nombre de déplacements détectés (/10)					Total (/50)
Ligne de base	Méthode Rés.	Sens Rés.	1cm	8mm	6mm	4mm	2mm	
0km	Cont.	Comb.	10	10	9	8	4	41
		Avant	10	9	8	6	5	38
	R&M	Comb.	9	9	6	1	0	25
10km	Cont.	Comb.	9	8	3	0	0	20

Tableau II-10 Synthèse du test de détection des déplacements horizontaux (E3a) de 1cm à 2mm

Les mesures révèlent que, quelle que soit la ligne de base choisie, la résolution continue est la méthode de résolution la plus adaptée pour le suivi de petits déplacements. Avec une ligne de base de 0 km, la résolution continue et combinée a pu détecter avec un important taux de succès les déplacements allant jusqu'à 4 mm, tandis que la résolution à sens chronologique (avant) a pu détecter des déplacements de 6 mm. Cela signifie qu'avec une station de référence très proche d'un ouvrage, aussi bien une approche post-traitement qu'une approche temps réel devraient être capables de détecter des déplacements abrupts infracentimétriques. Avec une ligne de base supérieure (10 km), les plus petits mouvements régulièrement détectés par la résolution combinée sont de l'ordre de 8mm et du centimètre pour la résolution avant. La détection de mouvements infracentimétriques se limite dans ce cas à une approche en post-traitement. La résolution « résoudre et maintenir » s'est avérée particulièrement instable, et n'apparaît donc pas pertinente pour ce genre d'applications.

Les résultats de la détection des déplacements verticaux (E3b) sont synthétisés dans le Tableau II-11. La résolution combinée et la résolution avant sont capables de détecter des sauts de 1.5 cm et 2 cm avec une ligne de base de 0 km. Pour la détection de déplacements verticaux, il convient donc d'utiliser la ligne de base la plus courte possible, la précision de la détection se dégradant significativement lorsque celle-ci augmente.

Pour le suivi des mouvements oscillants, les résultats de l'expérimentation E4a sont synthétisés dans le Tableau II-12 et le Tableau II-13. Compte tenu des résultats obtenus dans les expérimentations E2 et E3, la méthode « résoudre et maintenir » n'a pas été davantage investiguée.

Paramètres de calcul			Nombre de déplacements détectés (/10)					Total (/50)
Ligne de base	Méthode Rés.	Sens Rés.	10cm	5cm	2cm	1.5cm	1cm	
0km	Cont.	Comb.	10	10	9	9	7	45
		Avant	10	10	9	7	6	42
10km	Cont.	Comb.	10	10	8	6	4	38
		Avant	10	9	6	4	4	33

Tableau II-11 Synthèse du test de détection des déplacements verticaux (E3b)

Ligne de base	Méthode Rés.	Sens Rés.	$RMSE_H$ (mm)	Rayon estimé r (mm)	Différence rayon (mm)	ARR (%)
0km	Cont.	Comb.	7.1	93	-2	99%
		Avant	8.0	93	-2	97%
10km	Cont.	Comb.	12.2	92	-3	97%
		Avant	12.1	91	-4	95%

Tableau II-12 Résultats de l'expérimentation E4a avec des oscillation de 60s/15cm

Ligne de base	Méthode Rés.	Sens Rés.	$RMSE_H$ (mm)	Rayon estimé r (mm)	Différence rayon (mm)	ARR (%)
0km	Cont.	Comb.	7.0	94	-1	99%
		Avant	7.9	93	-2	98%
10km	Cont.	Comb.	12.9	91	-4	96%
		Avant	13.5	90	-5	96%

Tableau II-13 Résultats de l'expérimentation E4a avec des oscillation de 10s/10cm

Pour les deux sessions, les approches combinées et « avant » obtiennent des résultats similaires, que ce soit pour le $RMSE_H$, l'estimation du rayon et l'ARR. Toutes les méthodes obtiennent des résultats satisfaisants et une précision en accord avec celle trouvée lors des essais en scénario fixe. Le principal facteur discriminant est simplement l'augmentation de la ligne de base, diminuant la précision du calcul.

Il est alors nécessaire d'évaluer les performances dans le domaine fréquentiel. Les données de l'expérimentation E4b ont été post-traitées avec une résolution continue combinée et avec une ligne de base de 0km puis 10km. Les résultats du test d'identification des pics de fréquence (à 3% près) sont détaillés respectivement dans le Tableau II-14 et le Tableau II-15. L'analyse fréquentielle étant généralement réalisée *a posteriori* sur des échantillons, la méthode combinée semble la plus pertinente pour le traitement GNSS, celle-ci s'étant régulièrement montrée autant voire plus performante que les autres.

Freq. Pics	5cm	3cm	2cm	1.5cm	1cm	8mm	6mm
0.01Hz	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
0.05Hz	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
0.1Hz	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
0.2Hz	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
0.25Hz	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗

Tableau II-14 Succès de l'identification des oscillations selon leur amplitude et leur période (E4b), traitement avec ligne de base de 0km

Freq. Pics	5cm	3cm	2cm	1.5cm	1cm	8mm	6mm
0.01Hz	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
0.05Hz	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
0.1Hz	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
0.2Hz	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
0.25Hz	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗

Tableau II-15 Succès de l'identification des oscillations selon leur amplitude et leur période (E4b), traitement avec ligne de base de 10km

Avec une ligne de base de 0km, la solution proposée a été capable de détecter des oscillations de 0,25 Hz avec une amplitude de 1 cm. Tout mouvement avec une amplitude inférieure n'a en revanche pas pu être détecté. Avec une ligne de base de 10 km, la détection se limite à des amplitudes de 1,5 cm.

Il ressort de cette série d'expérimentations que les meilleurs paramètres de calcul à utiliser pour traiter les données issues de la station bas coût proposée sont : un calcul en mode

cinématique, avec une résolution continue et combinée des ambiguïtés entières, et une ligne de base inférieure ou égale à 2 km. Avec cette solution GNSS, des précisions horizontale et verticale de 4 mm et 7 mm peuvent être obtenues. La solution proposée s'est avérée capable de détecter des mouvements abrupts horizontaux et verticaux de 4 mm et 8 mm, et de qualifier des oscillations avec une amplitude centimétrique pour une fréquence de 0,25 Hz. Ce type de solution efficiente économiquement affiche des performances confirmant sa capacité à suivre le comportement d'ouvrages d'art.

II.5. SYNTHÈSE

Dans ce chapitre ont été présentés les résultats d'une série d'expérimentations visant à sélectionner et qualifier une solution GNSS à bas coût compatible avec les applications de surveillance d'ouvrages.

La technique du calcul relatif en post-traitement a été sélectionnée en se basant sur des critères de performance et pertinence. D'une part, cette approche permet d'obtenir relativement aisément une précision infracentimétrique malgré un matériel modeste, pour peu que des conditions appropriées (ligne de base courte) soient respectées. D'autre part, le déploiement d'une station de référence et l'obtention des séries temporelles dans un référentiel local ou régional plutôt que global ne semblent pas être incompatibles avec les scénarios opérationnels.

L'évaluation de plusieurs combinaisons de récepteurs et antennes en scénario fixe a permis de montrer l'importance de la protection des antennes contre les effets des multitrajets. Il a néanmoins été noté que dans le contexte de la méthode choisie (calcul monofréquence à courte ligne de base avec un récepteur à bas coût), l'utilisation d'une protection simple sous la forme d'un plan de masse apportait des résultats similaires à ceux obtenus avec des antennes équipées de protections significativement plus avancées. L'évaluation a permis de sélectionner un tandem antenne-récepteur optimal, constitué d'une puce GPS L1 et d'une antenne de navigation précise, capable d'obtenir une précision infracentimétrique pour un coût relativement faible.

La seconde partie des expérimentations s'est concentrée sur les différents modes et paramètres de calcul utilisés, portant sur la résolution des ambiguïtés entières, la ligne de base et l'utilisation de corrections précises des orbites et horloges des satellites. Une première évaluation en scénario fixe a permis de réaliser une première sélection des paramètres optimaux. Deux séries d'évaluations dynamiques, inspirées d'une revue des protocoles expérimentaux réalisée dans le Paragraphe II.1, ont été effectuées afin de tester la station GNSS et les paramètres de calculs sélectionnés pour la détection de mouvements abrupts et la qualification d'oscillations. Cette série d'expérimentations a permis de designer les paramètres de calcul optimaux, et de constater les performances de la solution proposée, ces dernières permettant d'envisager une utilisation d'une solution similaire pour les applications de surveillance en génie civil. Une synthèse de ces résultats est présentée dans Manzini et al., [2018]b.

Ces résultats expérimentaux se cantonnent néanmoins à un contexte optimal d'utilisation du matériel (ligne de base très courte, pas de perturbations, pas de masques, conditions connues). La validation de la performance et surtout de l'intérêt du déploiement de capteurs GNSS à bas coût nécessite l'étude d'un déploiement opérationnel *in situ*. Pour y répondre, le Chapitre III s'intéresse aux cas du pont de Brotonne et du pont d'Aquitaine sur lesquels ont été déployés des réseaux de capteurs GNSS à bas coût dans le but d'en compléter le suivi géométrique.

III. INSTRUMENTATION D'OUVRAGES D'ART PAR RESEAUX DE CAPTEURS GNSS A BAS COUT

Ce chapitre propose une étude des résultats tirés de l'instrumentation par réseaux de capteurs GNSS de deux ouvrages d'art, le pont de Brotonne et le pont d'Aquitaine, en France, dont l'équipement a été commandé par leur exploitant respectif, le conseil départemental de Seine Maritime et la Direction Interdépartementale des Routes Atlantique (DIRA). Le déploiement d'une quinzaine de capteurs sur chaque ouvrage a été rendu possible par l'utilisation d'une station GNSS à bas coût, le Geocube, dont les composants GNSS (récepteur et antenne) sont similaires aux composants testés dans le Chapitre II. Ces instrumentations font partie des premières exploitant des dispositifs opérationnels à base de capteurs sans fil GNSS à bas coût pour la surveillance d'ouvrages stratégiques en France.

Ces deux ouvrages ont subi des réparations ces dernières années, et font l'objet d'une surveillance renforcée. Dans ce contexte, l'utilisation de stations GNSS a vocation à fournir des séries temporelles denses permettant à la fois le suivi d'éléments particuliers des ouvrages (tablier, pylônes, joints) et le suivi géométrique global.

Après la validation expérimentale de solutions GNSS à bas coût réalisée dans le Chapitre II, l'objectif de ce chapitre est d'en tester les performances et l'intérêt lors d'un déploiement opérationnel. Ce chapitre propose une présentation succincte des ouvrages et des solutions GNSS déployées, une revue des données disponibles par ouvrage (instrumentation traditionnelle en place, disponibilité des données), ainsi qu'une analyse des données acquises. Une étude est réalisée en regroupant les données de capteurs GNSS par parties d'ouvrages, et en les confrontant à des données de capteurs de référence et aux comportements connus des ouvrages. Elle aboutit à la validation des phénomènes pouvant être suivis par de tels capteurs, et teste leur aptitude à être déployés dans des applications de surveillance structurale. Enfin, les caractéristiques globales des jeux de données des deux instrumentations sont étudiées afin de comparer leur exploitation selon le type d'ouvrage instrumenté et la disposition des capteurs déployés.

III.1. SOLUTION GNSS DEPLOYEE : LE GEOCUBE

Les réseaux de capteurs GNSS déployés sur les deux ouvrages présentés dans ce chapitre sont constitués de capteurs Geocubes (Figure III-1). Le Geocube est un capteur intelligent (Chapitre I.2.3) développé depuis 2006 par le Laboratoire d'Opto-électronique, de Métrologie et d'Instrumentation (LOEMI) de l'IGN afin de proposer une solution de capteurs en réseau capables d'effectuer une surveillance topographique précise.



Figure III-1 Capteur Geocube

Le capteur comporte trois modules :

- un module « GNSS », qui est constitué d'un récepteur monofréquence GPS U-Blox LEA 6T (cf. Chapitre II) et d'une antenne interne basique de type « patch ». Afin d'améliorer la protection contre les multi-trajets, un plan de masse (environ 8x8 cm) est installé sous l'antenne. Le récepteur collecte les observations GNSS, et produit des fichiers d'observation binaires au format UBX ;
- un module de gestion, qui pilote les différentes tâches réalisées par le capteur. Ce microcontrôleur assure notamment la gestion de l'énergie au sein du capteur, pouvant appliquer différents régimes d'économie d'énergie selon l'alimentation disponible, et éviter l'endommagement des composants internes. Le module de gestion contrôle l'enregistrement et la transmission des données acquises par le Geocube, et peut les interrompre en cas de dépassement des valeurs de valeurs de température limites (-40°C à 65°C). Enfin, le module assure la gestion du temps GPS au sein du capteur, permettant la synchronisation des capteurs qui y sont connectés ;
- un module radio, qui permet au capteur de communiquer avec les autres éléments du réseau. Il comporte notamment une puce XBEE pour la communication basse consommation (radio, wi-fi), et sert à la transmission des données et d'informations sur l'état du capteur, mais également à la réception de paramètres ou de mises à jour du logiciel embarqué (aspect capteur intelligent).

Les Geocubes déployés fonctionnent comme un réseau maillé : tous les capteurs sont au même niveau du réseau, ce qui leur permet de fonctionner à la fois comme émetteurs de données et comme routeurs. Ainsi, si un Geocube n'est pas en capacité de transmettre ses données vers le nœud principal du réseau auquel il appartient, il est possible de téléverser ses données vers un autre Geocube qui les transmettra lui vers le nœud principal, ou à défaut un autre Geocube : on parle de transmission par rebonds. Ce dispositif est automatisé : une fois le réseau déployé, les voies de transmission et rebonds sont organisés automatiquement pour permettre la collecte des données par le nœud principal. Cette approche permet d'étendre la taille des réseaux possible et

le contournement d'obstacles, mais limite le flux de données pouvant être transférées sur le réseau.

Deux approches différentes ont été réalisées en ce qui concerne le nœud principal du réseau. Dans le cas de l'instrumentation initiale du pont de Brotonne, le nœud principal est assuré par un module coordinateur. Ce module assure la collecte des observations GNSS de différents capteurs, la gestion du réseau, et réalise un traitement GNSS relatif. Les séries temporelles produites sont alors transférées vers un serveur distant pour le stockage et permettant leur affichage et leur téléchargement par les utilisateurs. Dans le cas du pont d'Aquitaine, ce coordinateur a été remplacé par un système de collecteur (baptisé Geoport), chargé uniquement du transfert de données entre les Geocube et un serveur distant sur lequel sont effectués les calculs GNSS et la gestion du réseau. Le traitement est ainsi déporté de l'ouvrage.

Le traitement GNSS est réalisé par le logiciel dédié G3GPS, qui applique un calcul relatif à l'aide des observations des Geocube de mesure et au minimum une station de référence. Le traitement est réalisé en temps réel, au fur et à mesure que les données collectées arrivent au coordinateur ou au serveur distant effectuant le calcul. Le positionnement repose sur une première estimation de la position des capteurs à l'aide de la technique des triples différences, ou de méthodes traditionnelles (RTKLib), puis les séries temporelles sont réalisées par la méthode des doubles différences, le logiciel réestimant les ambiguïtés à chaque époque à partir de la position courante. Le détail du traitement et des paramètres utilisés est détaillé par Benoît, [2014].

III.2. INSTRUMENTATION DU PONT DE BROTONNE

III.2.1. PRESENTATION DE L'OUVRAGE

Le pont de Brotonne (Brault et al., [1976]) est un pont à haubans en béton précontraint, dont la construction s'est achevée en 1977 après 4 ans de travaux (Figure II-1). Il enjambe la Seine pour relier Le Havre à Rouen. La longueur totale de l'ouvrage est 1278 m. La travée centrale, qui s'élève jusqu'à 50 m au-dessus du niveau de la Seine, est constituée de voussoirs entièrement en béton précontraint assemblés par encorbellement, pour une longueur de 320 m. La travée était la plus grande au monde lors de sa construction. Il s'agit d'une méthode innovante pour l'époque, qui lui vaut aujourd'hui encore d'être qualifiée de prototype. Les deux pylônes atteignent une hauteur de 125 m et portent les haubans disposés en éventail dans le plan médian de la chaussée. Le commanditaire et exploitant de l'ouvrage est le département de la Seine Maritime. Environ 10000 véhicules, dont 10% de poids de lourds, empruntent le pont de Brotonne chaque jour (France 3, [2018]).



Figure III-2 pont de Brotonne (source : Wikimedia, par Pline – Travail personnel, CC BY-SA 3.0)

Quelques années après sa construction, le tablier du pont a été renforcé par précontrainte additionnelle en raison d'une prise en compte insuffisante du fluage du béton. L'ouvrage fait alors l'objet d'une surveillance régulière, initialement afin de suivre les déformations du tablier et des pylônes vis-à-vis des phénomènes de fluage. Une attention particulière est portée à la culée sud de l'ouvrage, des tassements ayant été mesurés depuis 1987 par suivi topographique. La vitesse de tassement est actuellement de l'ordre de 3 à 4 mm par an. L'origine de ces tassements peut être liée à la présence d'une nappe souterraine sous la culée, d'une couche de tourbe, ou à une sensibilité au marnage de la Seine à proximité. La culée est équipée d'appareils d'appuis permettant de relever l'ouvrage de 7 à 8 mm tous les deux ans par injection de silicone.

Des inspections détaillées ont mis en avant la présence de fissures dans plusieurs piles de l'ouvrage et d'un ferrailage insuffisant dans les piles principales sous les pylônes. Depuis 2010, des travaux de renforcement ont été réalisés sur les piles p8, p11 et p12, puis p9, p10, et p13 depuis 2017. Ces travaux comportent notamment le comblement des fissures extérieures, la pose de ceintures en béton armé dans les piles, et l'installation de bandes en composites de carbone à l'intérieur et l'extérieur des piles soumises à des effets thermiques insuffisamment pris en compte à la conception.

En parallèle, en 2013, les études menées sur l'ouvrage ont conduit au remplacement des appareils d'appui, au changement des joints de chaussée et à une modification de l'évacuation des eaux et du système d'assainissement.

III.2.2. INSTRUMENTATION EN PLACE ET DONNEES DISPONIBLES

L'ouvrage a été équipé (hors du cadre de cette thèse) à partir de mai 2017 d'un réseau de 12 stations Geocube situées sur des éléments caractéristiques de la structure (Figure III-3), dont :

- 1 station au sommet de chacun des deux pylônes (P1 et P2) ;
- 2 stations au centre du tablier central, situées de part et d'autre de la chaussée (côté amont et aval) ;
- 2 stations entourant le joint de chaussée entre le viaduc d'accès et la travée principale, situées au centre du joint ;
- 4 stations entourant le joint entre la culée sud et le viaduc d'accès, réparties en deux paires situées de part et d'autre de la chaussée ;

- 1 station située sur le viaduc d'accès, au centre de la chaussée, au nord du joint précédent.

Le réseau est doté d'une station de référence située sur la rive droite (côté nord) de la Seine, de sorte que les lignes de base avec les stations sur le pont soient comprises entre 500 m et 1500 m. L'échantillonnage des données GNSS est fixé à 30s (0.033Hz). Une présentation du réseau déployé est proposée dans Manzini et al., [2018]a.

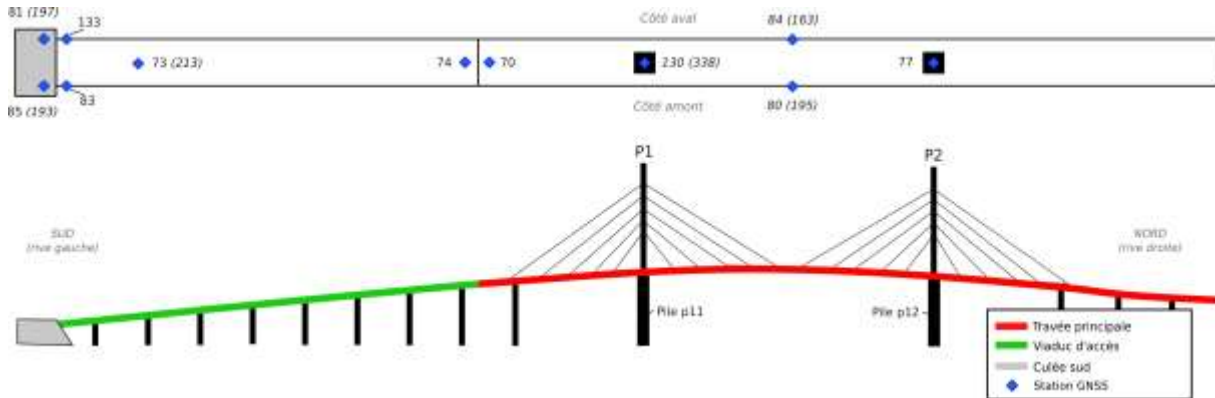


Figure III-3 Plan d'installation des capteurs sur le pont de Brotonne

Suite à de multiples défaillances durant le dernier trimestre 2018, une interruption totale des données a été observée entre janvier 2019 et avril 2019, date à laquelle le coordinateur ainsi que plusieurs stations ont été remplacés. La liste des capteurs remplacés est détaillée dans le Tableau III-1. A noter qu'à partir de cette « seconde phase » de l'instrumentation GNSS, les températures mesurées au niveau des capteurs GNSS par des sondes internes ont également été collectées.

N° capteur avant panne	N° capteur de remplacement
73	213
80	195
81	197
84	163
85	193
130	338

Tableau III-1 Liste des capteurs remplacés sur le pont de Brotonne

Une station météo a également été installée sur l'ouvrage, et enregistre des données ambiantes avec un échantillonnage fixé à 30 minutes. La station météo est équipée d'un anémomètre, d'une girouette, d'un pluviomètre, d'un hygromètre, d'un thermomètre (température de l'air), et d'un capteur d'ensoleillement mesurant l'intensité lumineuse non directionnelle. Cette station est intégrée au système Geocube en place, permettant la synchronisation et la collecte des données.

Afin de valider les réparations entreprises depuis 2010, les piles p11 et p12 (situées respectivement sous les pylônes P1 et P2) ont été instrumentées par le Cerema à l'aide de convergencemètres laser et de sondes de température (type PT100). Ces sondes ont été réparties entre les deux piles selon différentes orientations, et installées à différentes profondeurs depuis l'extérieur ou l'intérieur des piles. Les sondes T_{p1} , T_{p2} , T_{p11} et T_{p12} ont été installées à 7 cm de profondeur dans le matériau de la pile depuis l'intérieur, et les sondes T_{p3} , T_{p4} , T_{p5} , T_{p6} , T_{p14} , T_{p15} , T_{p16} et T_{p17} à 7 cm depuis l'extérieur. La sonde T_{p7} a été installée à 25 cm de profondeur (au milieu du matériau) et la sonde T_{p13} à l'intérieur de la pile. Les enregistrements de température correspondants ont un échantillonnage de 30 minutes.

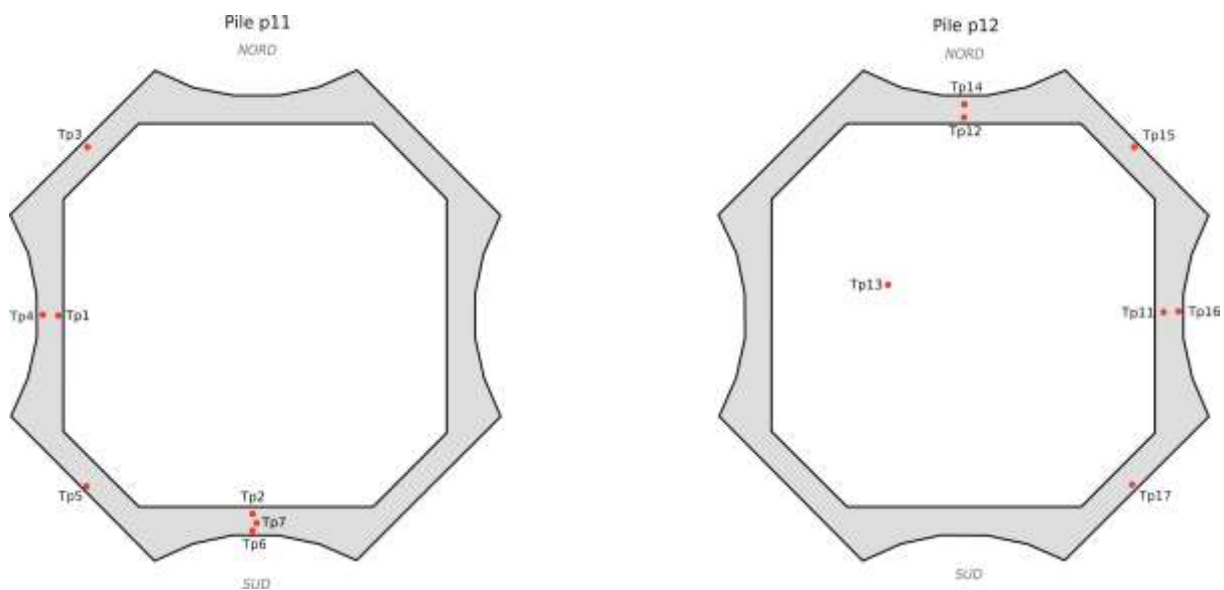


Figure III-4 Instrumentation des piles du pont de Brotonne

D'autres mesures de température ont été effectuées par le Cerema à l'aide de sondes insérées dans le hourdis supérieur et inférieur du caisson du tablier à proximité de la culée sud afin d'effectuer une estimation du gradient vertical dans le tablier (Figure III-5). Ces mesures ont été réalisées avec un échantillonnage de 4h.

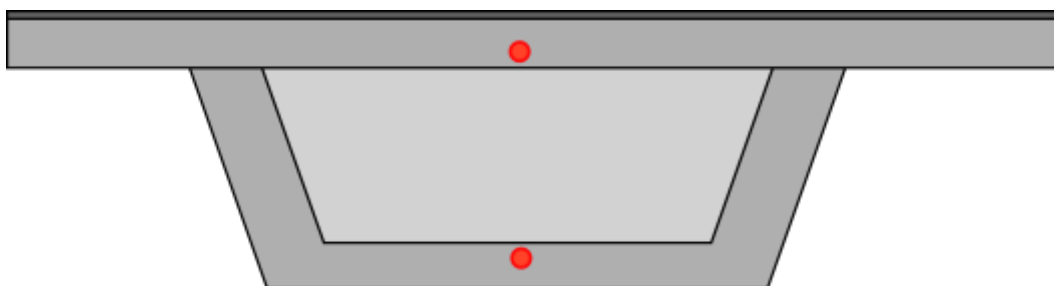


Figure III-5 Instrumentation des hourdis à proximité de la culée sud du pont de Brotonne

Les différents jeux de données n'ont pas un recouvrement total. La Figure III-6 et la Figure III-7 synthétisent pour quelles journées au moins 50% des données (par rapport au maximum théorique permis par leur échantillonnage respectif) sont disponibles par capteur.

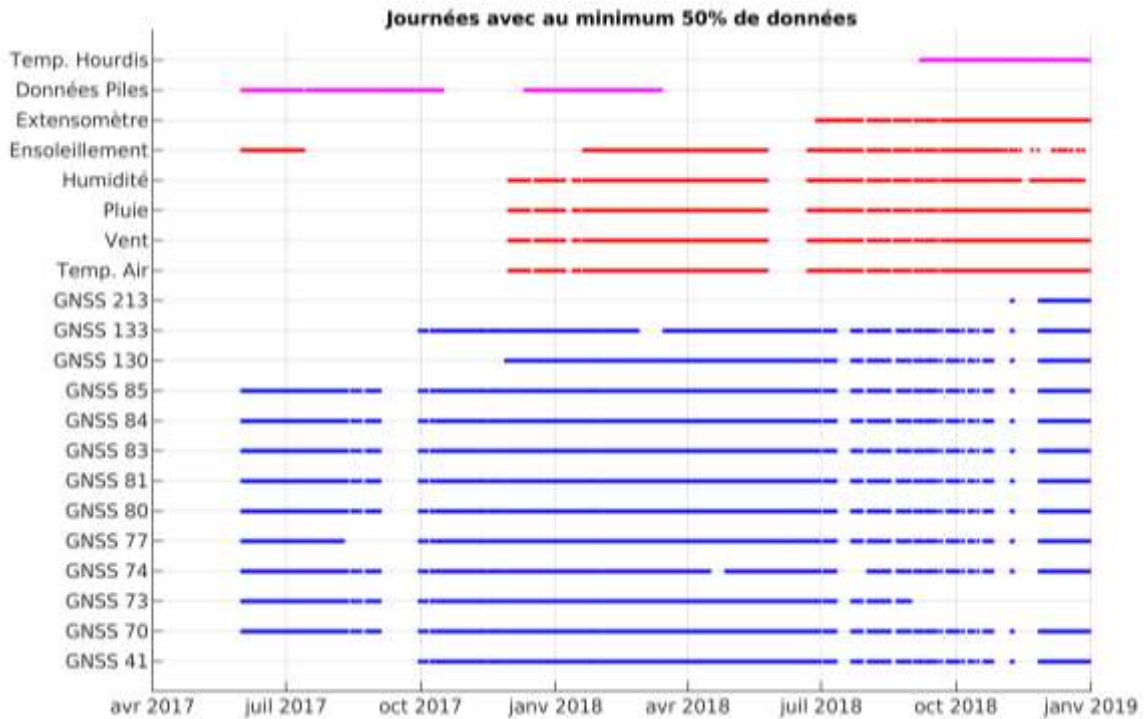


Figure III-6 Journées avec au moins 50% de données disponibles par capteur sur le pont de Brotonne (de mai 2017 à janvier 2019)

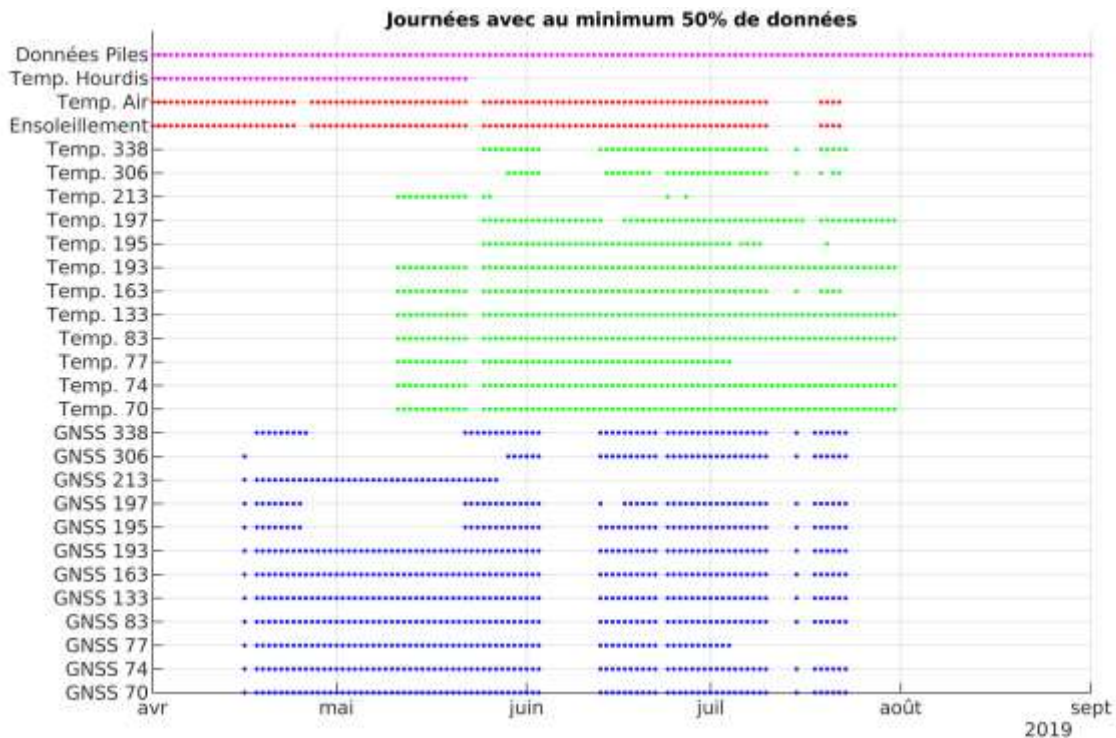


Figure III-7 Journées avec au moins 50% de données disponibles par capteurs sur le pont de Brotonne (d'avril 2019 à février 2019)

Les données des instrumentations filaires des piles et des hourdis n'ont été collectées que par intervalles, mais présentent une grande régularité dans chacun des intervalles d'acquisition. A l'inverse, les données acquises à l'aide du réseau Geocube présentent des irrégularités importantes, avec de nombreuses journées comportant moins de la moitié des mesures attendues. Cette faiblesse s'explique par le cumul de deux phénomènes :

- la non résolution des ambiguïtés entières. Comme montré dans le Chapitre II, même avec une ligne de base très courte et des conditions ambiantes optimales (météo dégagée, pas d'obstacles), des pertes allant de 1% à 5% des données ont pu être observées selon les paramètres de calcul. Dans le contexte de l'instrumentation, avec des conditions météorologiques variables et des obstacles à proximité, il est crédible d'attendre des pertes au moins aussi fréquentes ;
- l'utilisation d'une communication sans-fil basse consommation, qui s'avère moins robuste qu'une instrumentation filaire et peut entraîner des pertes dans la transmission. Une mauvaise liaison avec un capteur peut en affecter plusieurs en raison de la communication par rebonds, et peut même affecter le traitement de tous les capteurs s'il s'agit de la référence.

Cette double faiblesse est un témoin de la jeunesse des deux technologies exploitées, respectivement des GNSS à bas coût et des réseaux de capteurs sans-fil à basse consommation, le matériel et les logiciels déployés faisant partie des premières générations dans le domaine du génie civil. Ces premiers constats laissent espérer des optimisations futures avec le gain d'expérience des intervenants et le déploiement d'autres réseaux de ce type.

Néanmoins, les irrégularités dans les séries GNSS ne sont pas nécessairement limitantes pour leur exploitation. Par exemple, avec un échantillonnage fixé à 30s, si un capteur fournit des données en moyenne toutes les 120s celui-ci affichera un taux de données de 25%, mais ses mesures permettront quand même de suivre des phénomènes horaires, quotidiens ou saisonniers. Afin de rendre mieux compte de la répartition des données, les écarts de temps entre deux mesures de toutes les séries GNSS ont été compilés et synthétisés en histogrammes dans la Figure III-8 et la Figure III-9, respectivement pour la première et la seconde phase de l'instrumentation GNSS.

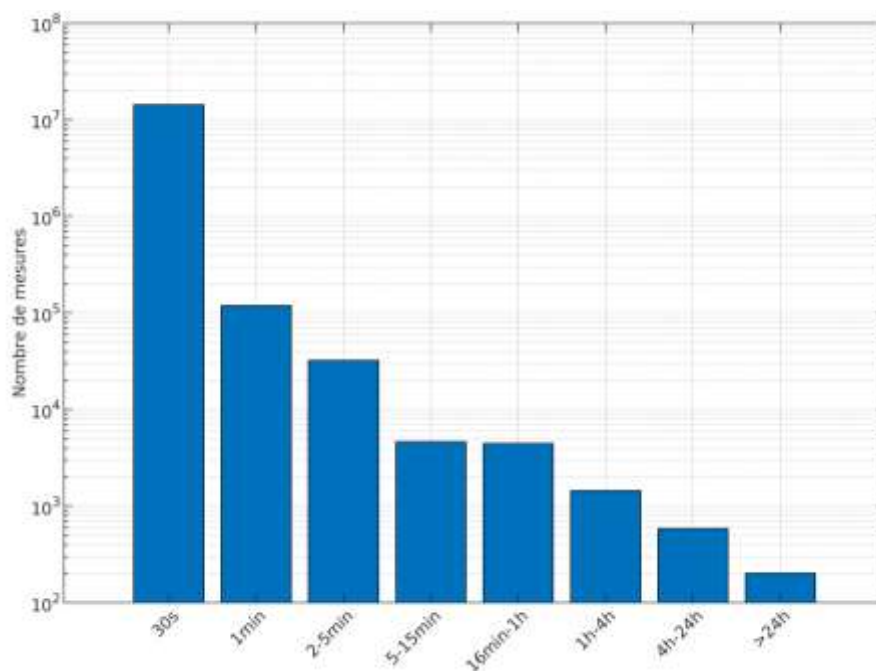


Figure III-8 Histogramme des intervalles de temps entre deux mesures de l'ensemble du réseau Geocube du pont de Brotonne (de mai 2017 à janvier 2019)

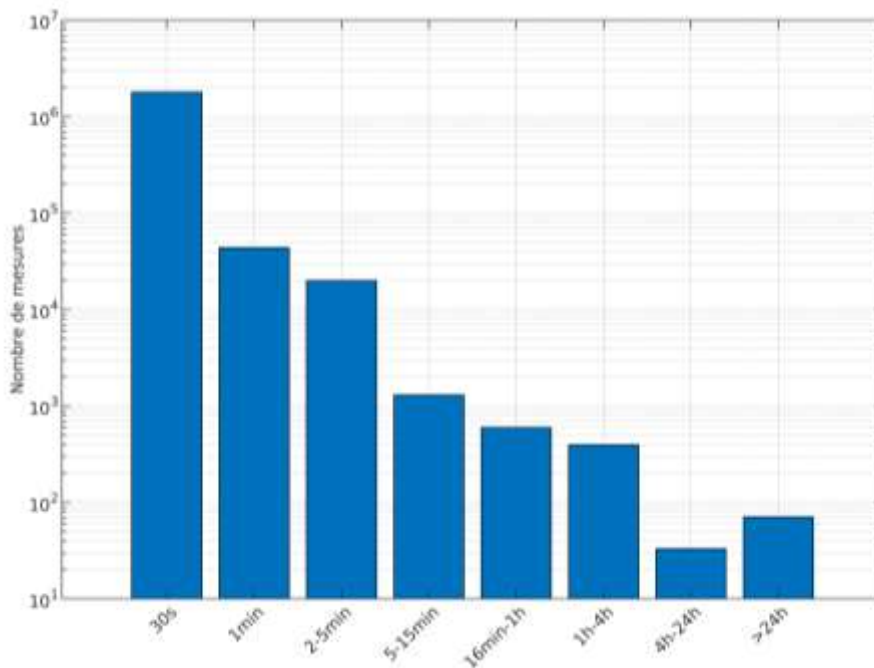


Figure III-9 Histogramme des intervalles de temps entre deux mesures de l'ensemble du réseau Geocube du pont de Brotonne (d'avril 2019 à août 2019)

Pour la première phase, les intervalles entre deux mesures de 30s (échantillonnage du système) représentent 99% des données, et ceux compris entre 30s de 5 minutes en représentent environ 99.9%. Surtout, l'occurrence des interruptions est inversement proportionnelle à leur durée. En comparaison, pour la seconde phase, les intervalles de 30s représentent une proportion plus faible (environ 96% des données), ce qui signifie que les intervalles de longueur anormale (supérieure à 30s) sont environ 3 fois plus nombreux. De plus, les intervalles supérieurs à 24h y sont nettement plus fréquents proportionnellement aux autres valeurs. Ainsi, avec de plus nombreuses interruptions anormales, les données issues de la seconde phase seront plus difficilement exploitables que celles de la première.

Enfin, un modèle du pont réalisé à l'aide du logiciel PCP est disponible. Le logiciel PCP (Ponts Construits par Phase) est un logiciel de calcul à barres avec prise en compte du phasage de construction et des déformations différées du béton (fluage scientifique) qui a été développé par le SETRA (Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements), devenu Cerema DTecITM. Dans le contexte du pont de Brotonne, la modélisation de l'ouvrage sous PCP a été réalisée à des fins de vérification et de validation du dimensionnement de l'ouvrage. Ce modèle peut être utilisé pour prédire les déplacements aux nœuds du modèle engendrés par des variations de température appliquées à l'ensemble ou une partie des éléments.

Dans le cadre de ces travaux, peu de données thermiques sont disponibles sur la durée en dehors de celles des piles principales. Par conséquent, il est difficilement envisageable de prédire de façon précise les températures et gradients présents dans les différentes parties de l'ouvrage. L'utilisation du modèle PCP de l'ouvrage s'est donc limitée à l'utilisation de températures homogènes, de façon à modéliser la partie de la réponse de l'ouvrage due à la dilatation ou la contraction thermique de ses éléments.

III.2.3. ETUDE DES SERIES GNSS PAR PARTIES D'OUVRAGE

En raison de leur échantillonnage fixé à 30s, de surcroît irrégulier (Figure III-8, Figure III-9), et de leur précision intrinsèque, les Geocubes n'ont pas vocation à être utilisés dans une analyse vibratoire. Afin d'améliorer la lisibilité et l'exploitabilité des données pour le suivi de phénomènes plus lents (horaires, quotidiens, saisonniers), les séries temporelles des capteurs ont été filtrées et rééchantillonnées. Le traitement suivant a été appliqué :

- les interruptions inférieures à 6h ont été complétées par interpolation linéaire. La limite de 6h a été sélectionnée car elle permet de ne pas significativement modifier le profil des mouvements journaliers, représentant un quart de la période en question ;
- les mesures sur chaque composante ont été lissées à l'aide d'un filtre médian en fenêtre glissante d'une heure. Le choix d'une fenêtre d'une heure permet un lissage des données tout en conservant les phénomènes horaires ;
- les données ont été rééchantillonnées à 5 minutes. Ce rééchantillonnage a été choisi pour harmoniser les mesures : dans les données d'origine, les interruptions de 5 minutes ou moins correspondent à 99.9% des intervalles entre mesures. De plus, l'utilisation de données irrégulières et échantillonnées à 30s n'apparaît pas utile compte tenu du filtre avec une fenêtre horaire appliqué. Enfin, ce rééchantillonnage permet de diminuer par un facteur dix le volume de données manipulés.

Ce filtrage a été jugé pertinent compte tenu des résultats obtenus dans les paragraphes suivants. Sauf mention contraire, ce filtrage a été appliqué sur les données présentées et traitées dans la suite de ce mémoire.

III.2.3.1. COMPORTEMENT DES PYLONES

Les Geocube 77 et 130 ont été installés aux sommets du pylône nord et du pylône sud, respectivement (Figure III-10). Les séries temporelles de ces deux capteurs sont comparées dans la Figure III-11. Le jeu de données du capteur 130 ne commence qu'à partir de décembre 2017, celui-ci ayant été déployé en remplacement d'un capteur antérieur dont les données n'ont pas été collectées.

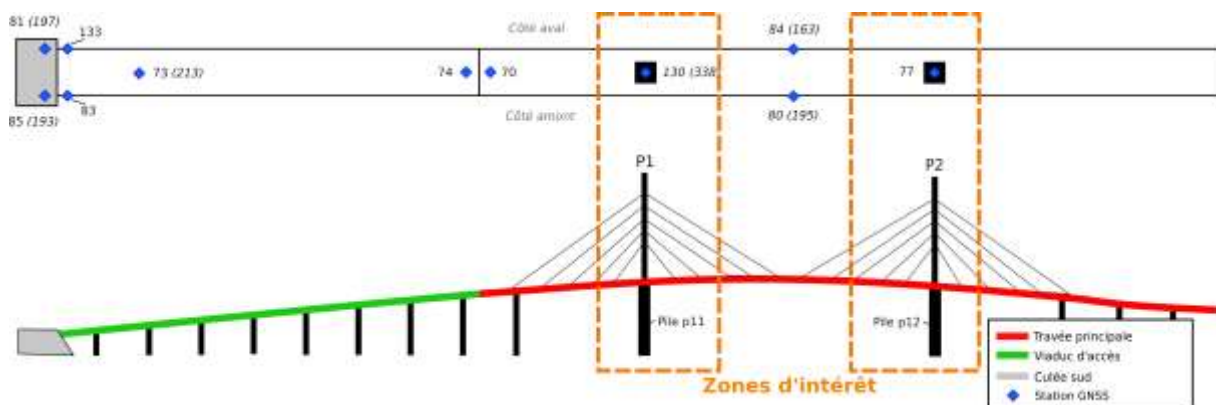


Figure III-10 Identification des capteurs installés sur les pylônes du pont de Brotonne

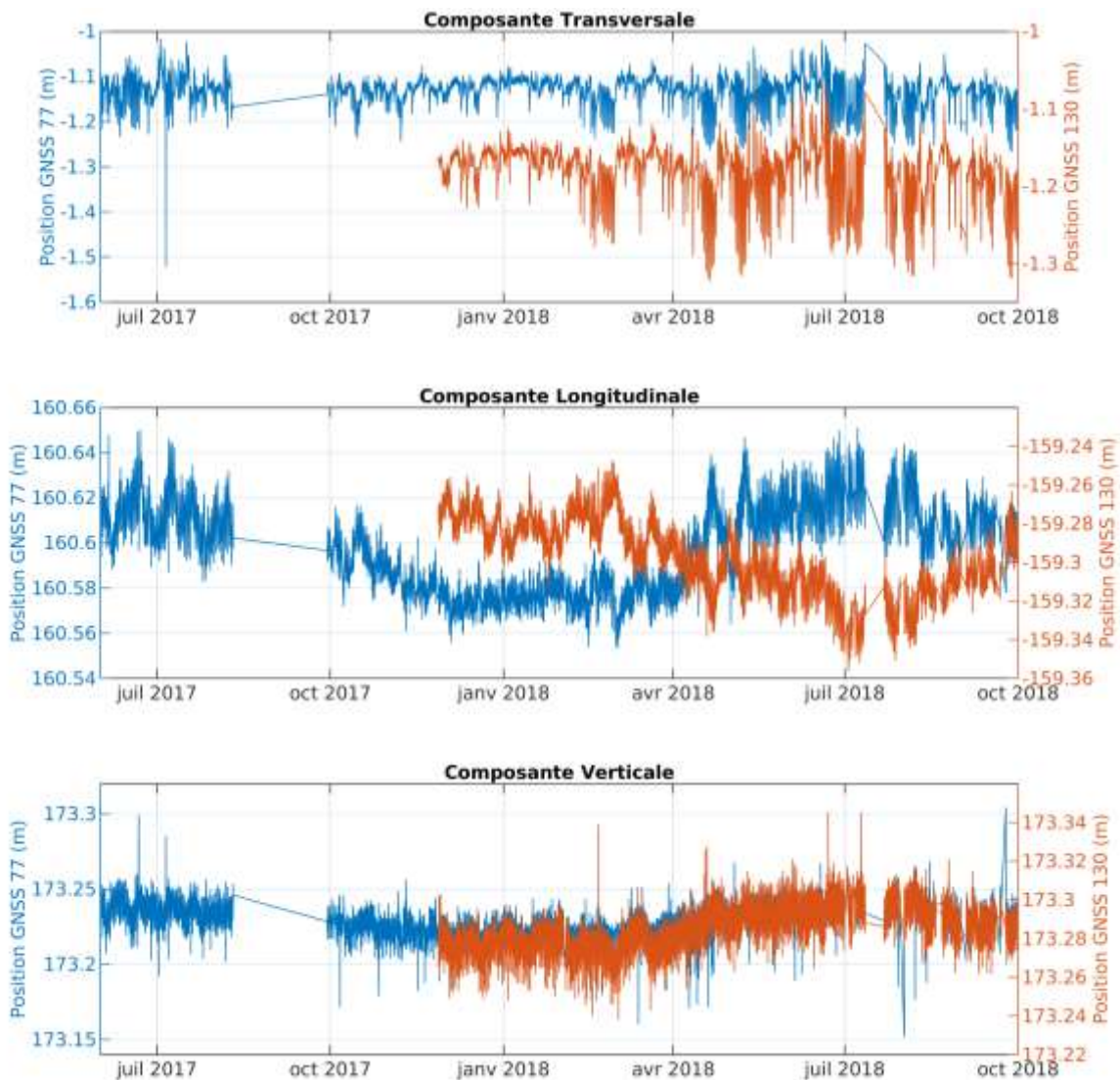


Figure III-11 Séries temporelles des Geocube sur les pylônes du pont de Brotonne

Les composantes transversale et verticale des deux capteurs sont très fortement corrélées, tandis que la composante longitudinale apparaît globalement anticorrélée.

Les déplacements verticaux comportent des mouvements quotidiens faibles, mais une tendance saisonnière est décelable sur les deux capteurs sous la forme d'une sinusoïde de périodicité annuelle. Ce comportement saisonnier peut être attribué à la dilatation thermique du matériau des pylônes : avec l'augmentation des températures, la dilatation du béton des pylônes et des haubans permet à ceux-ci de s'élever d'environ 2 cm l'été par rapport à l'hiver. Par ailleurs, le retour à des valeurs moyennes semblables aux périodes similaires des années 2017 et 2018 (juillet, octobre) est visible sur ces séries. Ceci confirme l'absence de dérive et donc l'aptitude du positionnement absolu pour le suivi des phénomènes saisonniers.

Les comportements transversaux des deux pylônes sont pratiquement identiques. Aucune tendance saisonnière n'est décelable, mais des comportements journaliers variés apparaissent. Certaines journées ne présentent que des déplacements de l'ordre de quelques centimètres, tandis que d'autres voient apparaître des déplacements allant jusqu'à 15 cm d'amplitude (crête à crête). Ces déplacements peuvent être imputés à la présence d'un gradient thermique transversal dans les piles principales. Ce gradient est un gradient de surface, généré par l'exposition au soleil : l'ouvrage étant principalement orienté selon l'axe nord-sud, la composante transversale est essentiellement est-ouest. Le matin, le soleil chauffe le flanc est des deux piles, le béton en surface se dilate et les piles entraînent un mouvement de rotation des pylônes qui sont posés dessus :

ceux-ci vont alors s'incliner vers l'ouest. Au cours de la journée, le soleil passe à l'ouest, et la chauffe de la face ouest s'oppose puis inverse le gradient, et les pylônes s'inclinent vers l'est.

Cette relation entre le gradient thermique et les mouvements transversaux peut être vérifiée à l'aide des mesures de température dans les deux piles sous les pylônes. On propose la valeur ΔT_{ouest}^{est} calculée à partir des sondes extérieures (Eq. III-1). Bien que cette valeur ne soit qu'une estimation du gradient de surface des pylônes, on observe une relation pratiquement linéaire entre ΔT_{ouest}^{est} et les déplacements des pylônes (Figure III-12, Figure III-13), confirmant l'hypothèse sur la nature de leur comportement, et donc l'aptitude des GNSS à les suivre.

$$\Delta T_{ouest}^{est} = T_{p,16} - T_{p,4} \quad \text{Eq. III-1}$$

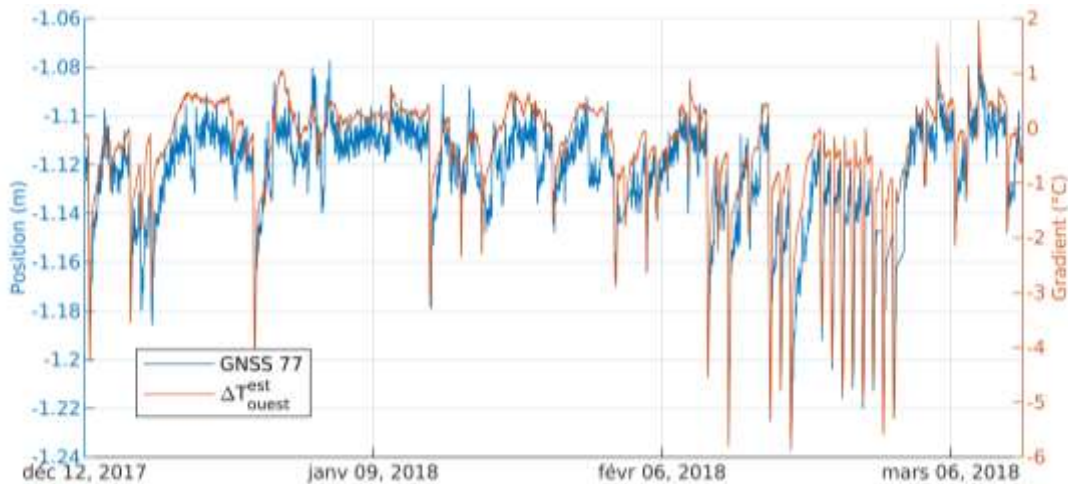


Figure III-12 Comportement du pylône nord comparé au gradient thermique est-ouest

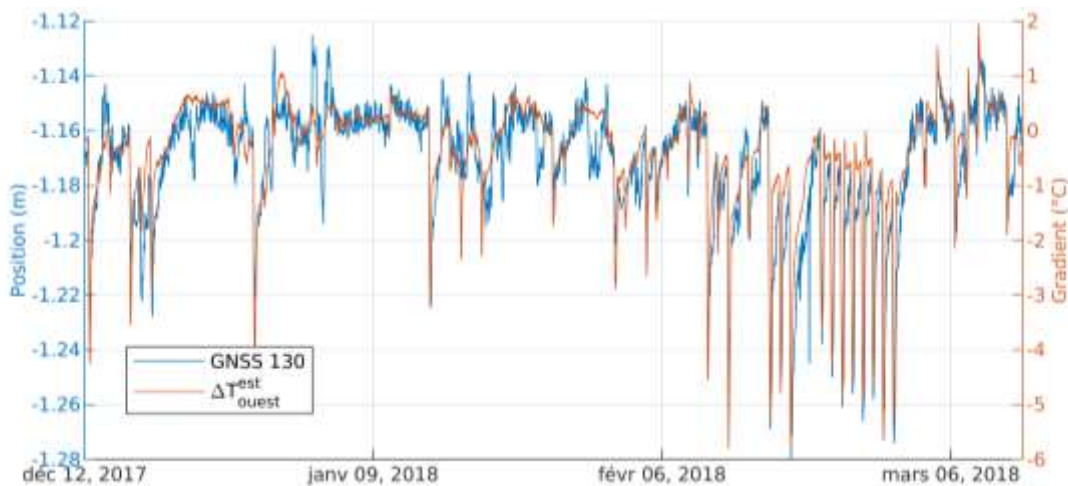


Figure III-13 Comportement du pylône sud comparé au gradient thermique est-ouest

Afin de quantifier la linéarité de cette relation, on s'intéresse à la corrélation entre les déplacements observés et ΔT_{ouest}^{est} . On propose d'utiliser le coefficient de Pearson $C_p(X, Y)$ pour qualifier la corrélation linéaire entre deux séries x et y , avec σ_x et σ_y leurs écarts types respectifs (Eq. III-2) (Artusi et al., [2002], Benesty et al., [2009]). Le coefficient de Pearson est un indicateur de corrélation normalisé dont les valeurs sont comprises dans l'intervalle $[-1; 1]$: les valeurs de 1, -1 et 0 correspondent respectivement à une relation linéaire positive, une relation linéaire négative, et l'absence de relation linéaire entre les deux séries. La valeur du coefficient de corrélation est sujette à des interprétations variées (Cohen, [1988]; Mao et al., [2018]; T. H. Yi et al., [2013]a), on propose les paliers suivants :

- des valeurs supérieures à 0,6, 0,8 et 0,9 pour considérer deux séries comme corrélées, fortement corrélées et très fortement corrélées, respectivement ;
- des valeurs inférieures à -0,6, -0,8 et -0,9 pour considérer deux séries comme anticorrélées, fortement anticorrélées et très fortement anticorrélées, respectivement.

$$C_p(x, y) = \frac{cov(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad \text{Eq. III-2}$$

Les déplacements transversaux des capteurs 77 et 130 apparaissent comme très fortement corrélés avec ΔT_{ouest}^{est} , avec des coefficients de Pearson de 0,91 et 0,90, respectivement.

Afin d'étudier l'inertie du phénomène, on propose de calculer la fonction de corrélation de Pearson entre les déplacements du pylône sud et le gradient thermique est-ouest (Figure III-14). Les valeurs maximales sont atteintes pour une latence (*lag*) quasi-nulle (0h-1h), indiquant une inertie très faible entre les valeurs de température mesurées et les déplacements, corroborant l'hypothèse du phénomène superficiel.

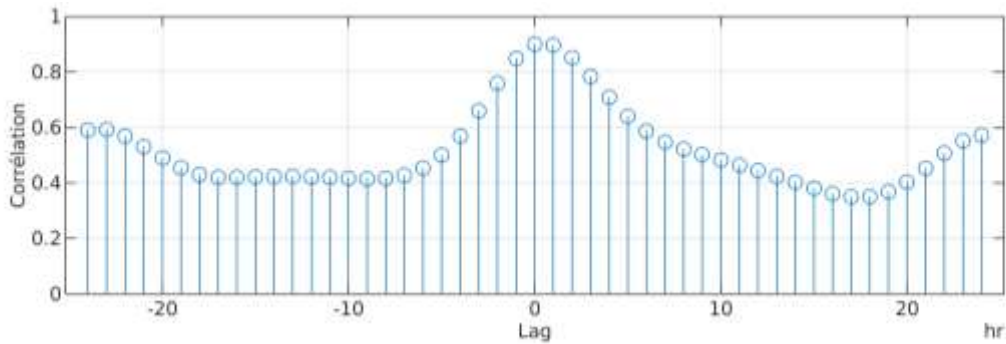


Figure III-14 Fonction de corrélation de Pearson entre les déplacements transversaux du capteur 130 et le gradient thermique est-ouest

Les déplacements longitudinaux présentent une relation plus complexe (Figure III-15). Si la relation d'anticorrélation est nette à partir d'avril 2018 (début du printemps), elle est en revanche plus difficile à discerner durant l'hiver 2017/2018. Pour vérifier son évolution, le coefficient de Pearson a été calculé par intervalles d'une journée et d'une semaine entre les deux séries (Figure III-16, Figure III-17).

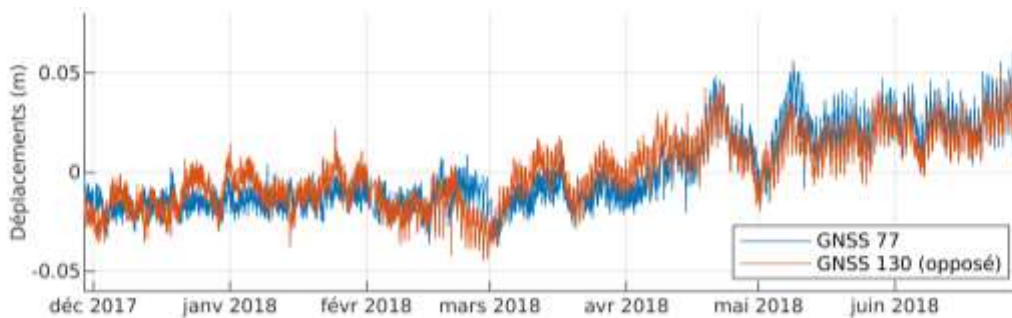


Figure III-15 Comparaison des déplacements longitudinaux des pylônes du pont de Brotonne

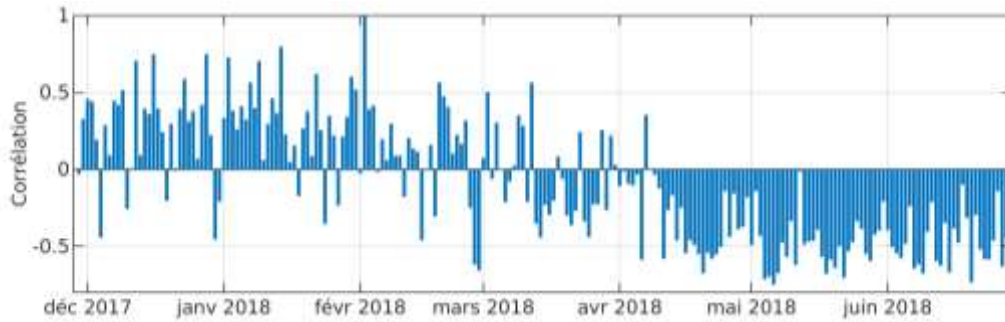


Figure III-16 Coefficient de Pearson quotidiens entre les déplacements longitudinaux des capteurs 77 et 130

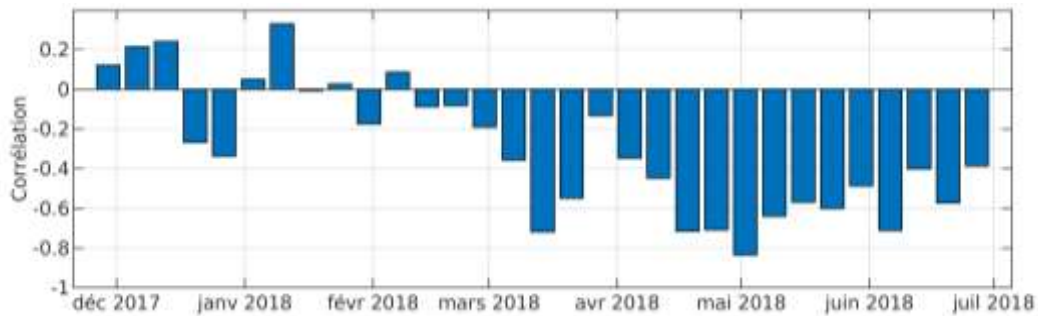


Figure III-17 Coefficient de Pearson hebdomadaires entre les déplacements longitudinaux des capteurs 77 et 130

L'étude des corrélations met en avant la relation complexe entre le comportement des deux pylônes, et les nombreux phénomènes les affectant. Durant l'hiver, les deux séries sont peu corrélées, et le sens de corrélation est variable, alors qu'à partir du printemps celles-ci restent anticorrélées de façon stable. Ce changement s'explique par le fait que les mouvements des pylônes sont affectés par la réponse thermique des autres éléments de l'ouvrage (tablier, câbles). Ces effets génèrent des mouvements opposés sur les deux pylônes en raison de leur positionnement symétrique autour du tablier central, ce qui se vérifie sur les composantes saisonnières et oscillations quotidiennes opposées durant le printemps/été 2018. En revanche, les journées d'hiver ayant des variations quotidiennes plus faibles, les mouvements thermiques induits sont plus faibles. Le comportement des sommets des pylônes devient alors significativement affecté voire dominé par d'autres phénomènes météorologiques (charge statique du vent, chauffe du flanc sud par le soleil, qui eux auront tendance à être corrélés positivement, s'opposant à la relation d'anticorrélation décrite précédemment) ou par des gradients locaux.

Afin de vérifier cette hypothèse, on propose d'étudier la distance entre les deux pylônes : celle-ci est essentiellement fonction de leur composante longitudinale. L'utilisation de la distance entre les deux pylônes doit permettre d'effacer les effets de vent et d'ensoleillement affectant les pylônes. Ces effets étant corrélés entre les deux pylônes, et les pylônes ayant les mêmes dimensions, leur impact devrait être similaire entre les deux pylônes et ne devrait donc pas changer la distance les séparant. On compare cette distance à la température T_p^{moy} , qui représente la valeur moyenne des sondes des deux piles (Figure III-18).

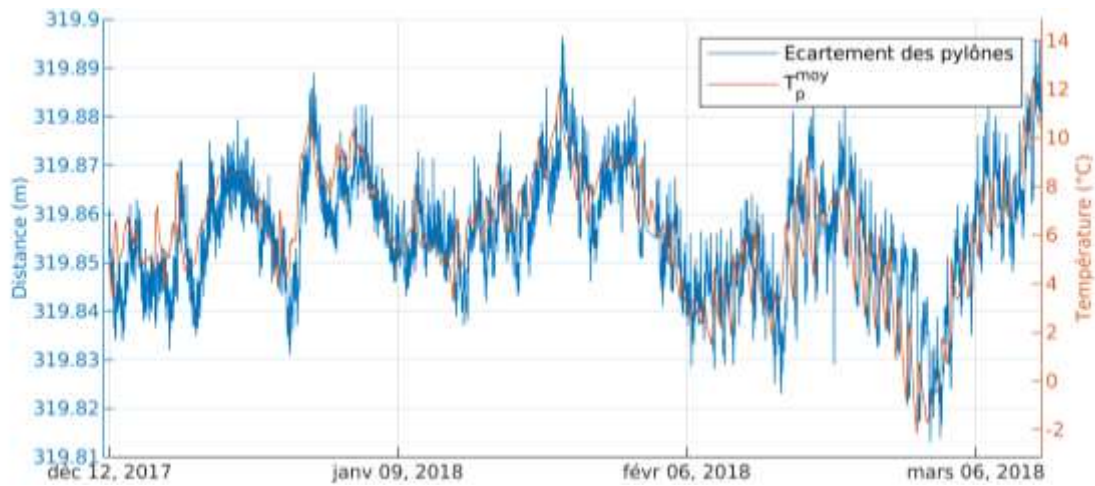


Figure III-18 Comparaison de l'écartement des pylônes du pont de Brotonne avec la température moyenne des piles

L'écartement des pylônes apparaît visuellement comme fortement corrélé à T_p^{moy} , mais un déphasage est visible. Pour estimer le déphasage inhérent à l'inertie du phénomène, on étudie la fonction de corrélation de Pearson des deux séries.

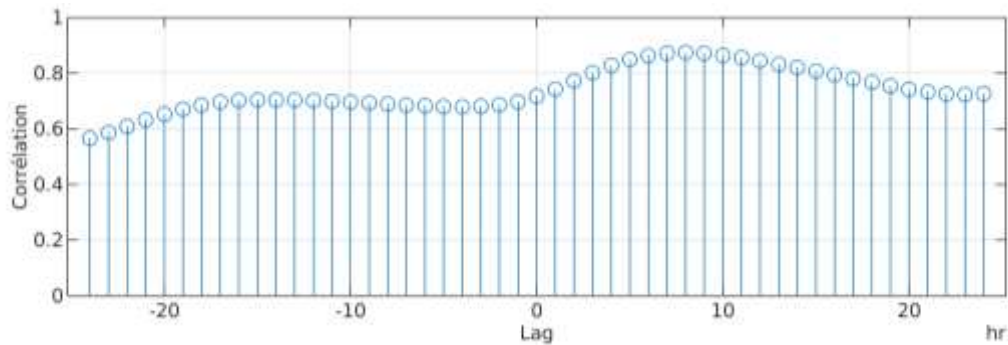


Figure III-19 Fonction de corrélation entre l'écartement des pylônes du pont de Brotonne avec la température moyenne des piles

La corrélation maximale (0.86) est atteinte pour un déphasage de 8h, permettant d'estimer l'inertie du phénomène thermique. Cette inertie importante peut être attribuée à l'épaisseur du béton et la présence d'air (isolant) dans les éléments de l'ouvrage, notamment le tablier. Ce déphasage peut ainsi être appliqué à T_p^{moy} afin de représenter plus distinctement la relation avec l'écartement (Figure III-20).

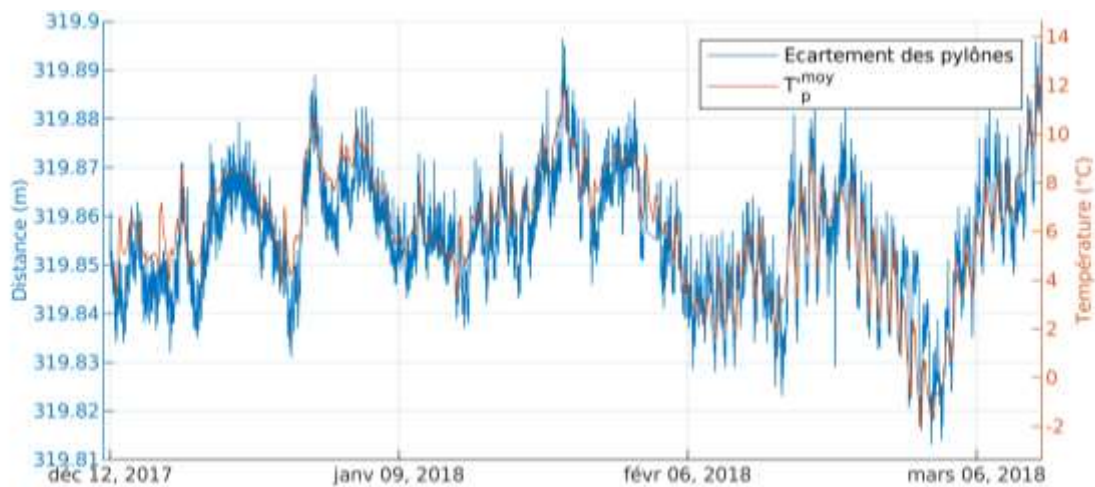


Figure III-20 Comparaison de l'écartement des pylônes du pont de Brotonne avec la température moyenne des piles (après recalage temporel)

Afin de valider l'amplitude des mouvements observés par GNSS, une estimation de leur amplitude à partir du modèle PCP de l'ouvrage est réalisée. A partir des mesures de température de l'air (Figure III-21), on propose d'appliquer une variation globale de température de 25°C de la structure dans le modèle PCP pour représenter les effets saisonniers sur la structure. Des points du modèle à proximité des positions des capteurs sont sélectionnés. Avec une variation de 25°C, des déplacements longitudinaux et verticaux de 5,1 cm et 1,9 cm, respectivement, sont prédits par le modèle.

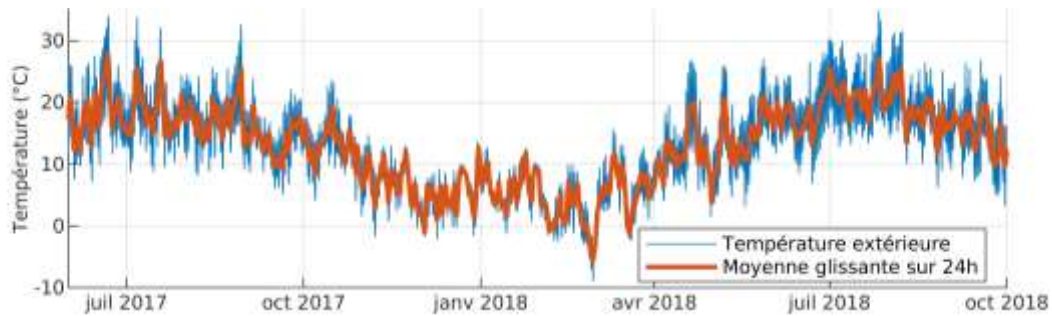


Figure III-21 Variations de température de l'air à proximité du pont de Brotonne (données Météo-France)

Afin de réduire le rôle des gradients locaux et journaliers dans les séries GNSS, les mesures du capteur 77 acquises entre 4h et 6h du matin sont isolées. Ce créneau horaire correspond à la période journalière présentant le plus grand écart de temps avec la dernière période de chauffe de l'ouvrage par le soleil, et où les effets des gradients générés par les variations quotidiennes sont donc les plus faibles. Les moyennes de ces tranches horaires pour les composantes longitudinale et verticale sont représentées dans la Figure III-22.

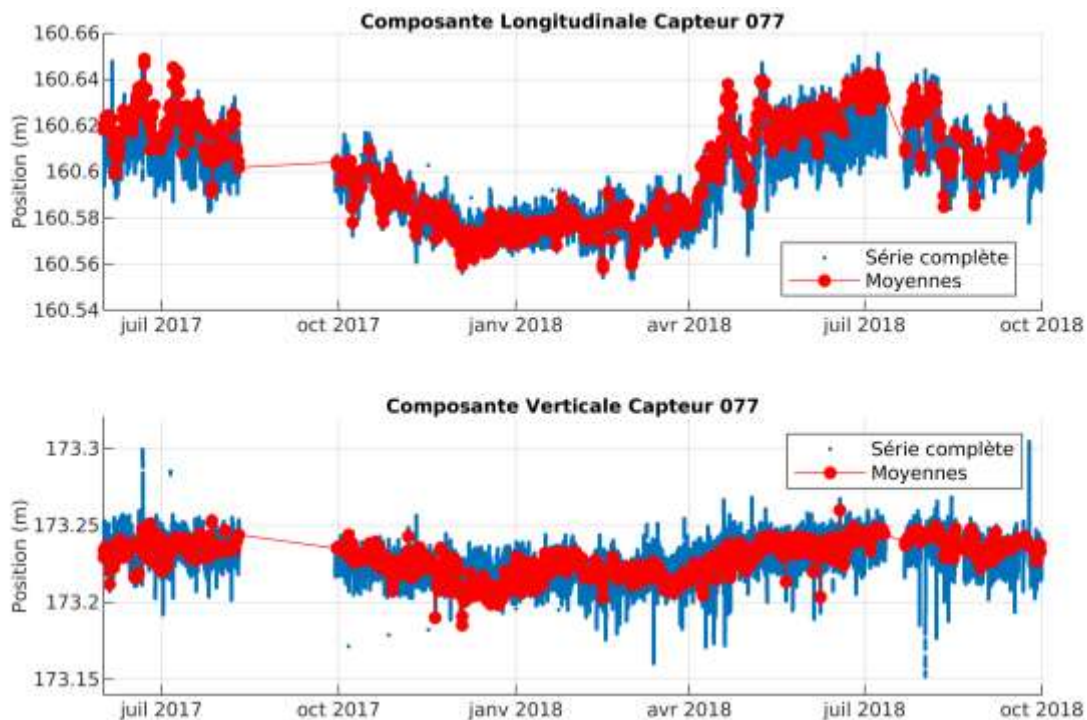


Figure III-22 Positions enregistrées entre 4h et 6h du matin pour le capteur 77

Des amplitudes de 7 cm et 3.5 cm peuvent être constatées sur les déplacements longitudinaux et verticaux, respectivement : ces valeurs sont plus fortes que celles prédites avec le modèle PCP (5,1 cm et 1,9 cm). En prenant en compte que le modèle PCP utilisé ne prend ni en compte les gradients dans la structure ni d'autres effets extérieurs, et que l'estimation d'une différence température saisonnière de 25°C est approximative, ces valeurs confirment l'ordre de grandeur des séries obtenues par GNSS.

III.2.3.2. COMPORTEMENT DES JOINTS DE CHAUSSEE

Le joint reliant le viaduc d'accès à la travée principale est un élément critique de l'ouvrage (Figure III-23). Il est instrumenté par la paire de capteurs 70 et 74, situés autour de celui-ci au centre de la chaussée. Leurs séries temporelles sont représentées dans la Figure III-24.

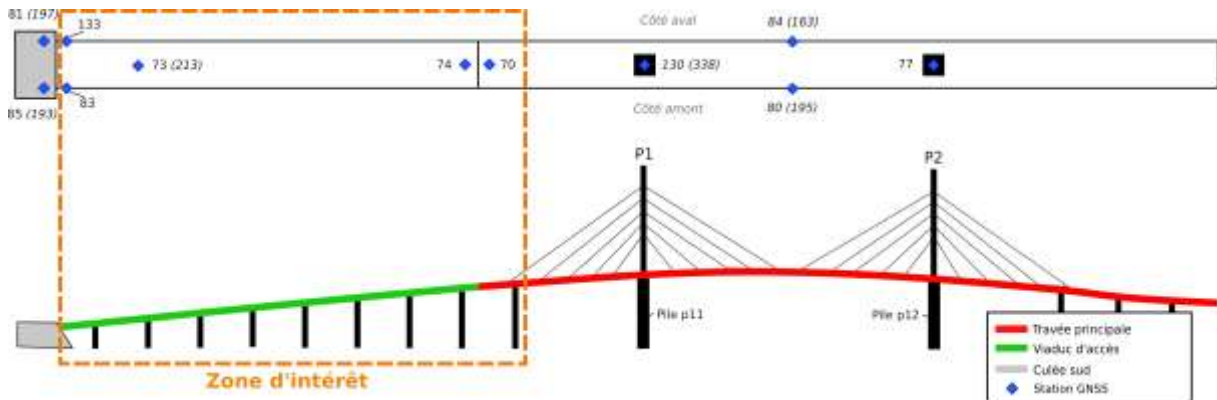


Figure III-23 Identification des capteurs situés sur le viaduc d'accès et autour du joint avec le tablier principal

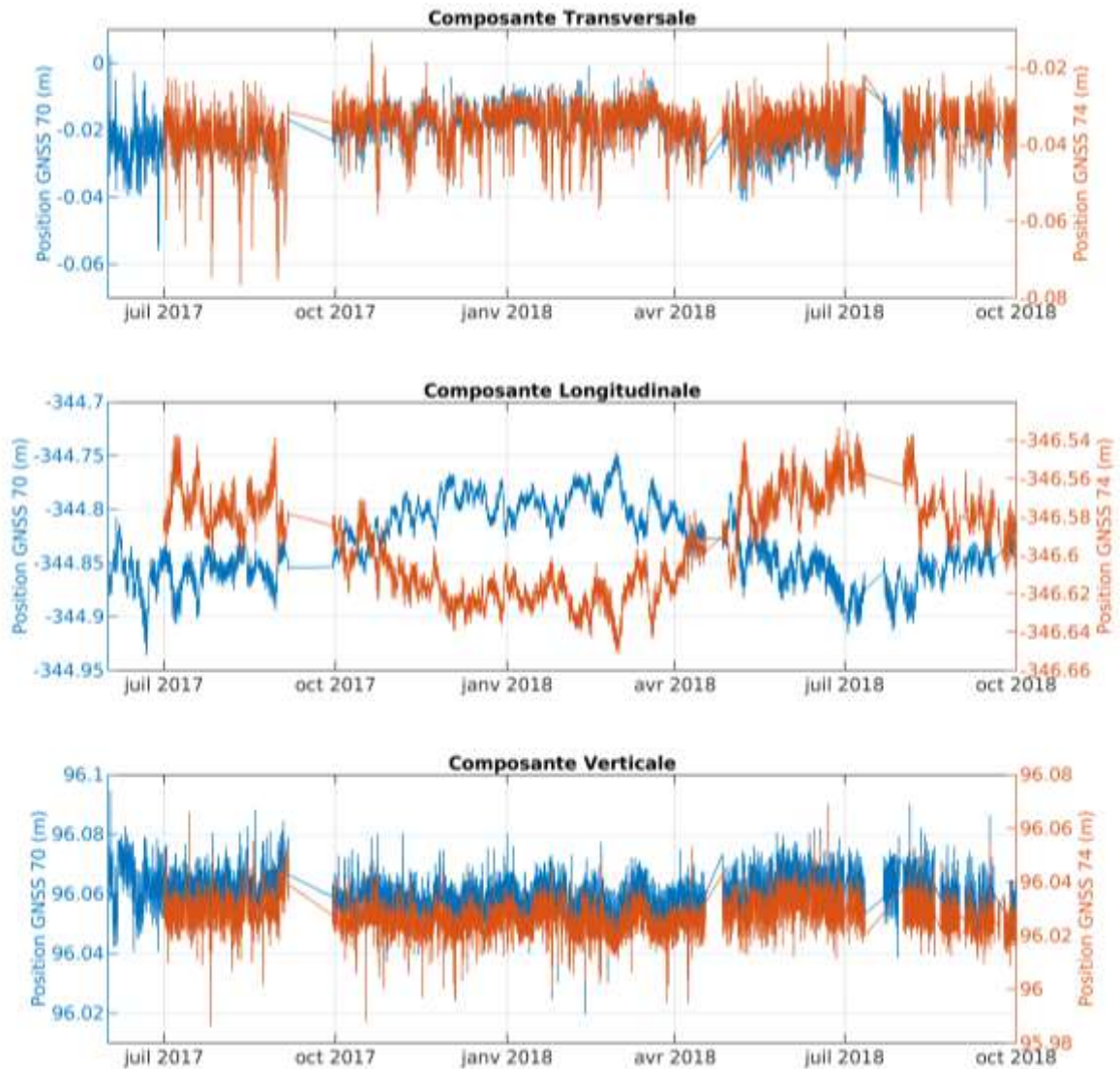


Figure III-24 Séries temporelles des capteurs 70 et 74

En dépit du fait que le viaduc d'accès et le tablier principal puissent être considérés comme des ouvrages indépendants, la construction semblable des deux éléments induit des

comportements comparables et fortement corrélés. Les composantes transversale et verticale des deux capteurs sont similaires. Pour les deux capteurs, aucune tendance saisonnière ne peut être observée sur les mouvements transversaux, comme attendu : peu de mouvements sont attendus dans cette zone. Une légère surélévation centimétrique peut être notée pendant l'été sur les deux capteurs. Les mouvements irréguliers observés sur la composante transversale peuvent être attribués à des phénomènes de gradients locaux. En l'absence de sondes thermiques adéquates, ces gradients ne peuvent être estimés.

La composante longitudinale des deux capteurs apparaît comme anticorrélée, les mouvements observés par le capteur 70 étant d'une plus grande amplitude (Figure III-25). Cette différence d'amplitude s'explique par le fait que le segment de tablier sur lequel se situe le capteur 70 est plus long que le viaduc d'accès (sur lequel se trouve le capteur 74), les déplacements générés par sa dilatation thermique sont donc plus importants.

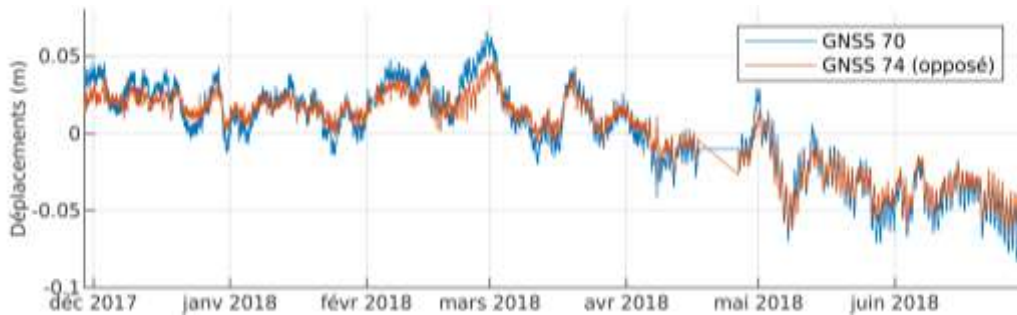


Figure III-25 Comparaison de l'amplitude des déplacements longitudinaux observés par les capteurs 70 et 74

On s'intéresse à l'évolution de la corrélation par intervalles quotidiens (Figure III-26). Similairement aux observations sur les pylônes, la corrélation quotidienne est difficile à interpréter jusqu'au printemps 2018. En raison des faibles variations de température sur une journée, les mouvements quotidiens sont significativement affectés par le bruit des deux capteurs exposés à des multitrajets similaires. En utilisant des intervalles hebdomadaires (Figure III-27), l'anticorrélation entre les deux séries est mise en avant. L'anticorrélation reste plus forte à partir du printemps 2018.

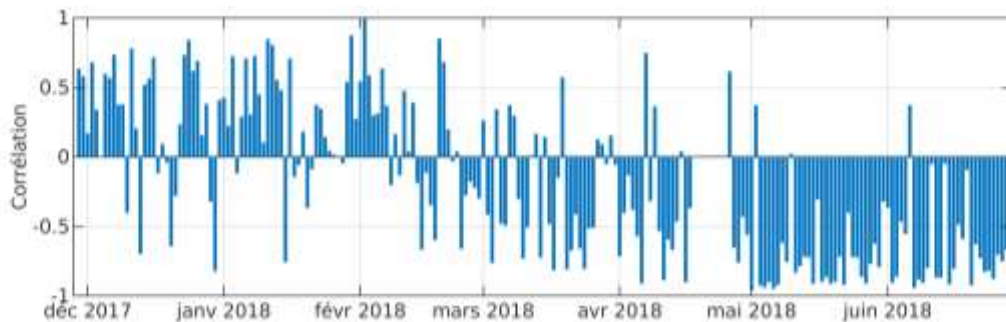


Figure III-26 Coefficient de Pearson quotidiens entre les déplacements longitudinaux des capteurs 70 et 74

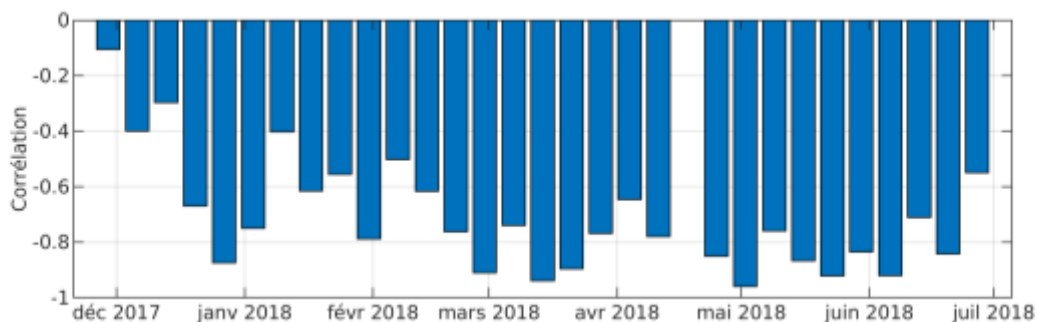


Figure III-27 Coefficient de Pearson hebdomadaires entre les déplacements longitudinaux des capteurs 70 et 74

Les déplacements longitudinaux enregistrés par les deux capteurs sont gouvernés par la dilatation thermique des deux segments de tablier sur lesquels ils se situent. Tous les capteurs situés sur la chaussée affectés par ce phénomène doivent donc être corrélés. On propose de le vérifier avec les données des capteurs 73 et 83, situés à proximité de l'autre extrémité du viaduc d'accès (Figure III-23). La Figure III-28 représente les déplacements normalisés des quatre capteurs pour comparaison visuelle.

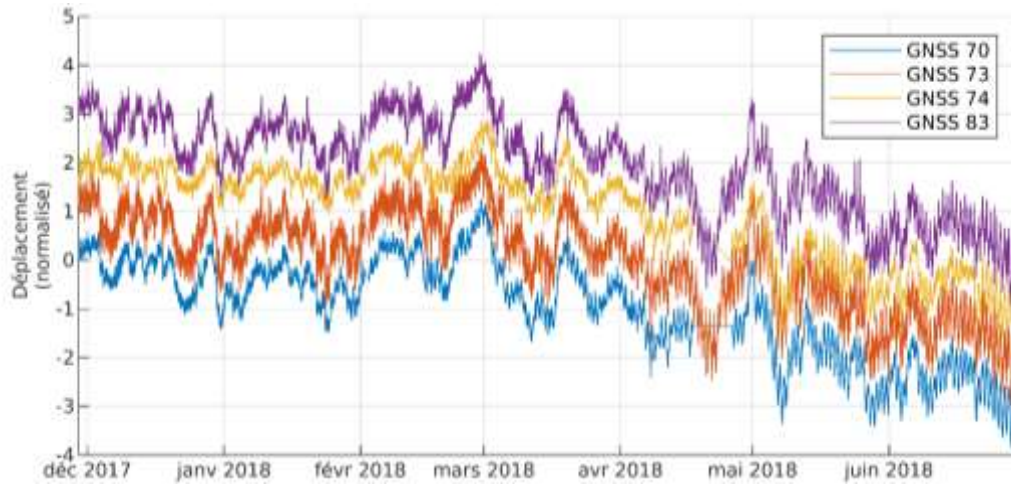


Figure III-28 Comparaison des déplacements longitudinaux (normalisés) des capteurs 70, 73, 74 et 83

Les déplacements longitudinaux des quatre capteurs apparaissent comme dominés par le même phénomène. Afin de valider l'hypothèse du mouvement lié à la dilatation thermique, on compare la distance L_{viaduc}^{GNSS} calculée comme la différence entre les composantes longitudinales des capteurs 74 et 83, et qui représente la longueur du viaduc d'accès, à la température T_p^{moy} (Figure III-29). L'anticorrélation entre les deux séries est nette, et confirme la nature thermique des déplacements observés. L_{viaduc}^{GNSS} est par ailleurs comparable à la distance entre les deux pylônes (Figure III-20), les deux étant fortement corrélées à T_p^{moy} avec un déphasage différent, les pylônes ayant une inertie thermique plus faible.

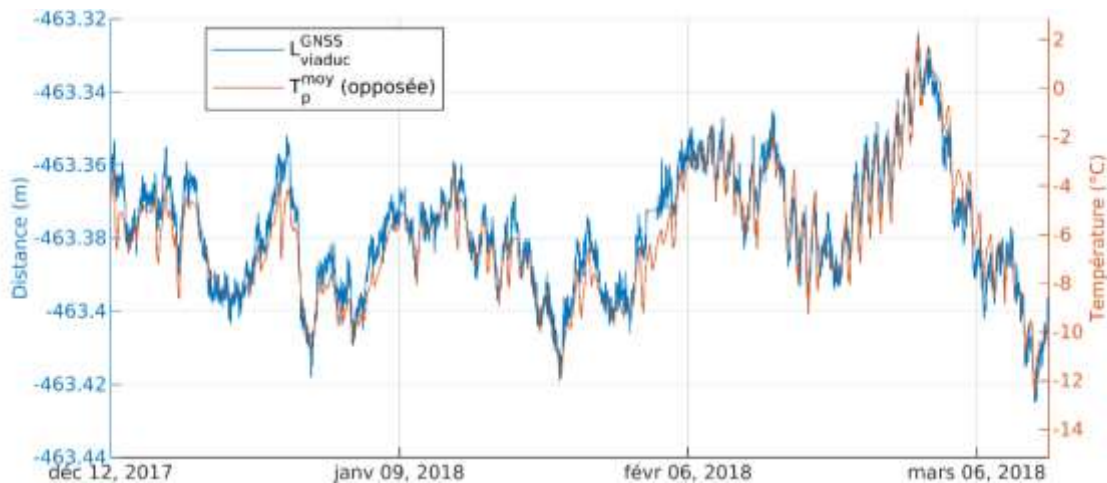


Figure III-29 Comparaison de la longueur estimée du viaduc d'accès à la température moyenne des piles

Bien que la corrélation puisse être utilisée pour confirmer les tendances sur les séries temporelles GNSS, elle ne confirme pas l'exactitude des amplitudes observées. La dilatation thermique est supposée linéaire à travers le matériau déformé : pour une variation de température donnée, le déplacement des points du matériau en réponse est alors proportionnel à leur distance du point fixe de l'élément étudié. Dans le cas étudié, les capteurs 73, 74 et 83 sont installés sur le viaduc d'accès et le capteur 70 sur la travée principale : ces deux éléments sont

entourés de joints de dilatation, ce qui signifie que leurs extrémités sont mobiles. Pour la composante longitudinale, on fait l'hypothèse que le point fixe est alors situé au centre de ces éléments. Pour chaque capteur, la distance au centre de leur segment de chaussée respectif a été calculée, et est comparée à l'amplitude (Figure III-30) et à l'écart type (Figure III-31) des séries temporelles sur la période décembre 2017 – juillet 2018. L'amplitude d'une série temporelle est ici définie comme la différence entre le 1^{er} et le 99^{ème} percentiles de la série.

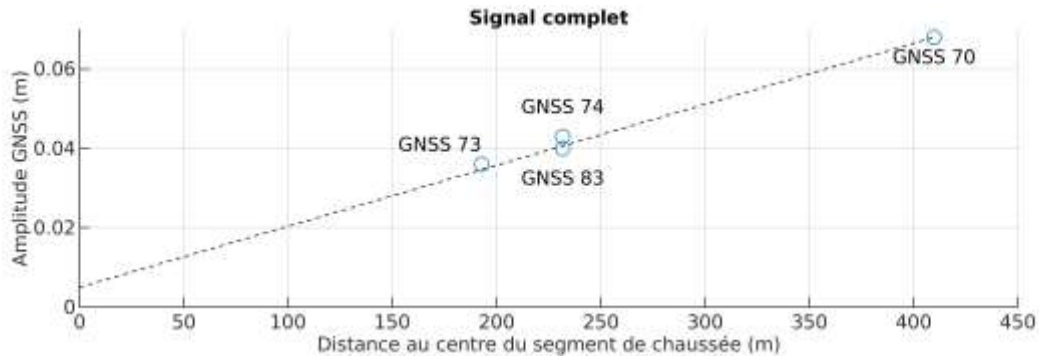


Figure III-30 Amplitude des séries GNSS comparées à leur distance au point fixe de leur chaussée

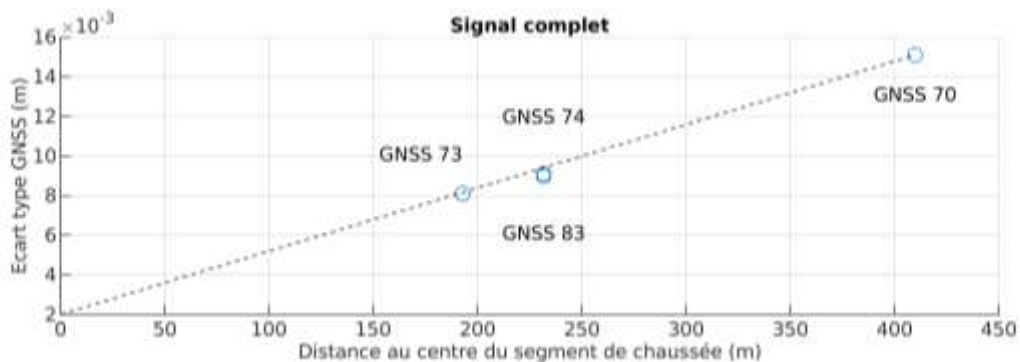


Figure III-31 Ecart type des séries GNSS comparés à leur distance au point fixe de leur chaussée

Une relation linéaire est observable entre les différents capteurs, aussi bien sur l'amplitude que l'écart type, mais celle-ci comporte dans les deux cas une ordonnée positive à l'origine. Cet écart peut être attribué au bruit des mesures GNSS, ainsi que d'autres effets à plus court terme pouvant affecter leurs mouvements (gradients locaux, chargement de l'ouvrage). Pour le vérifier, le signal a été séparé en deux composantes (Figure III-32) : une composante dite « lente », qui est obtenue en appliquant un filtre médian glissant sur 72h, et une composante rapide qui représente le résidu de la différence entre le signal complet et le signal lent. La composante lente est alors nettoyée des effets quotidiens et a priori d'une majorité du bruit GNSS.

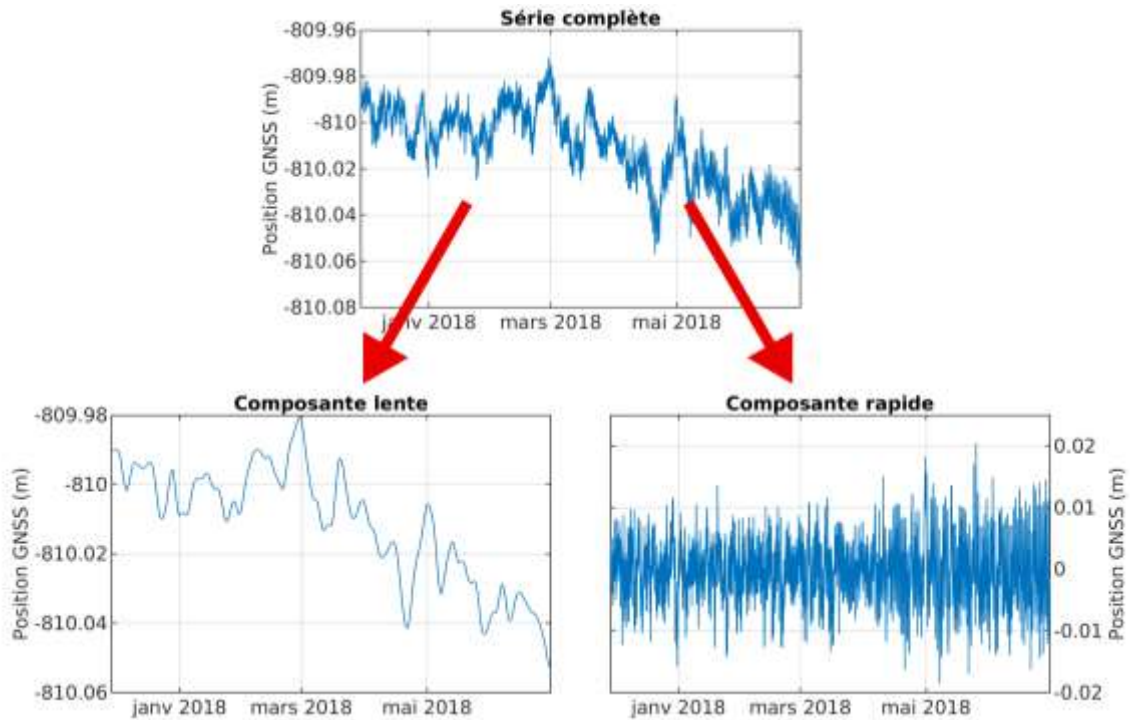


Figure III-32 Séparation d'un signal en deux composantes, lente et rapide

La comparaison des amplitudes (Figure III-33) et des écarts types (Figure III-34) des séries avec les distances aux points fixes est alors appliquée sur les composantes lentes. L'ordonnée à l'origine est supprimée dans les deux cas, confirmant la nature thermique des mouvements et la capacité des GNSS à suivre ces mouvements.



Figure III-33 Amplitude des séries GNSS (composante lente) comparées à leur distance au point fixe de leur chaussée

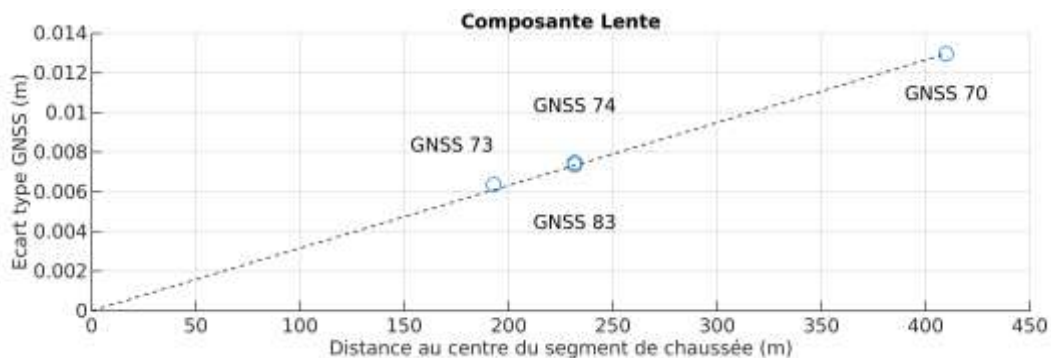


Figure III-34 Ecart type des séries GNSS (composante lente) comparées à leur distance au point fixe de leur chaussée

Enfin, similairement à ce qui a été réalisé avec les données du pylône 77, les déplacements longitudinaux des capteurs 70 (Figure III-35) et 74 (Figure III-36) entre 4h et 6h du matin sont isolés afin de les comparer aux résultats du modèle PCP.

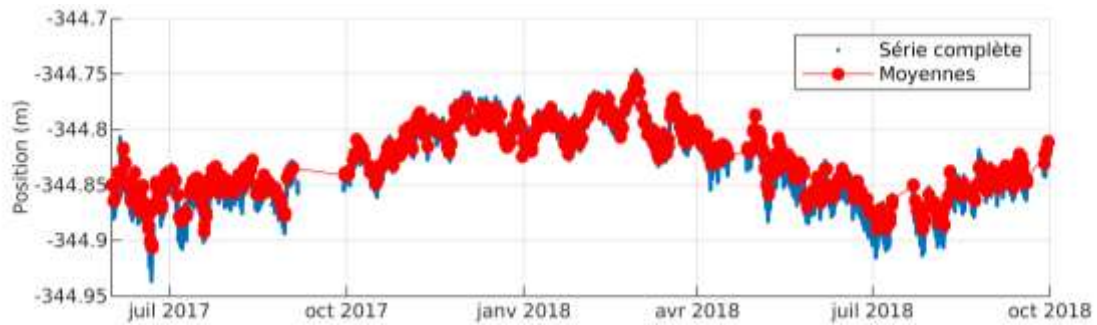


Figure III-35 Positions enregistrées entre 4h et 6h du matin pour le capteur 70



Figure III-36 Positions enregistrées entre 4h et 6h du matin pour le capteur 74

Des amplitudes d'environ 10 cm et 7 cm peuvent être observées sur les séries des capteurs 70 et 74, respectivement. Pour les extrémités du tablier (capteur 70) et du viaduc (capteur 74), le modèle PCP prédit respectivement des amplitudes de 9,1 cm et 7,0 cm. Ces valeurs sont en accord avec les observations.

III.2.3.3. COMPORTEMENT DE LA CULEE SUD

La partie fixe de la culée sud est équipée par les capteurs 81 et 85, installés de part et d'autre de la chaussée (Figure III-37), et dont les séries temporelles sont représentées dans la Figure III-38.

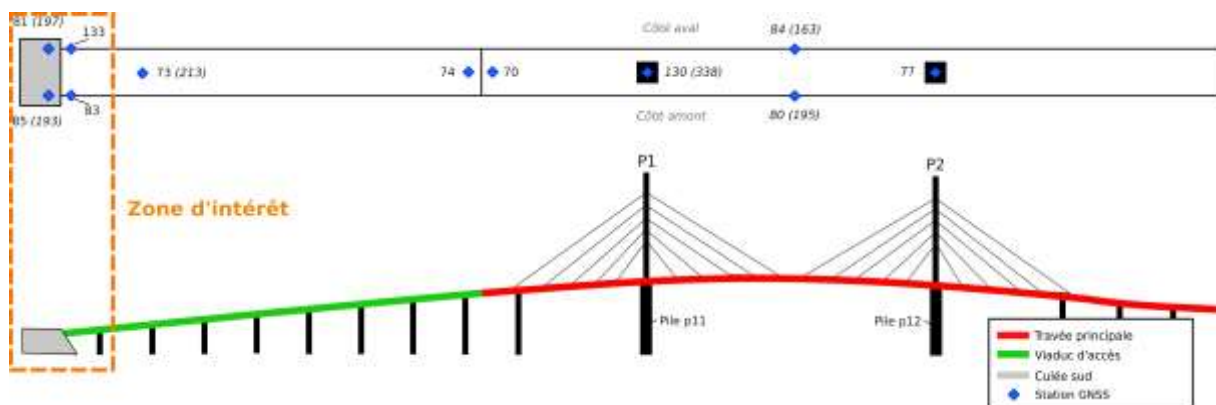


Figure III-37 Identification des capteurs installés sur la culée sud du pont de Brotonne

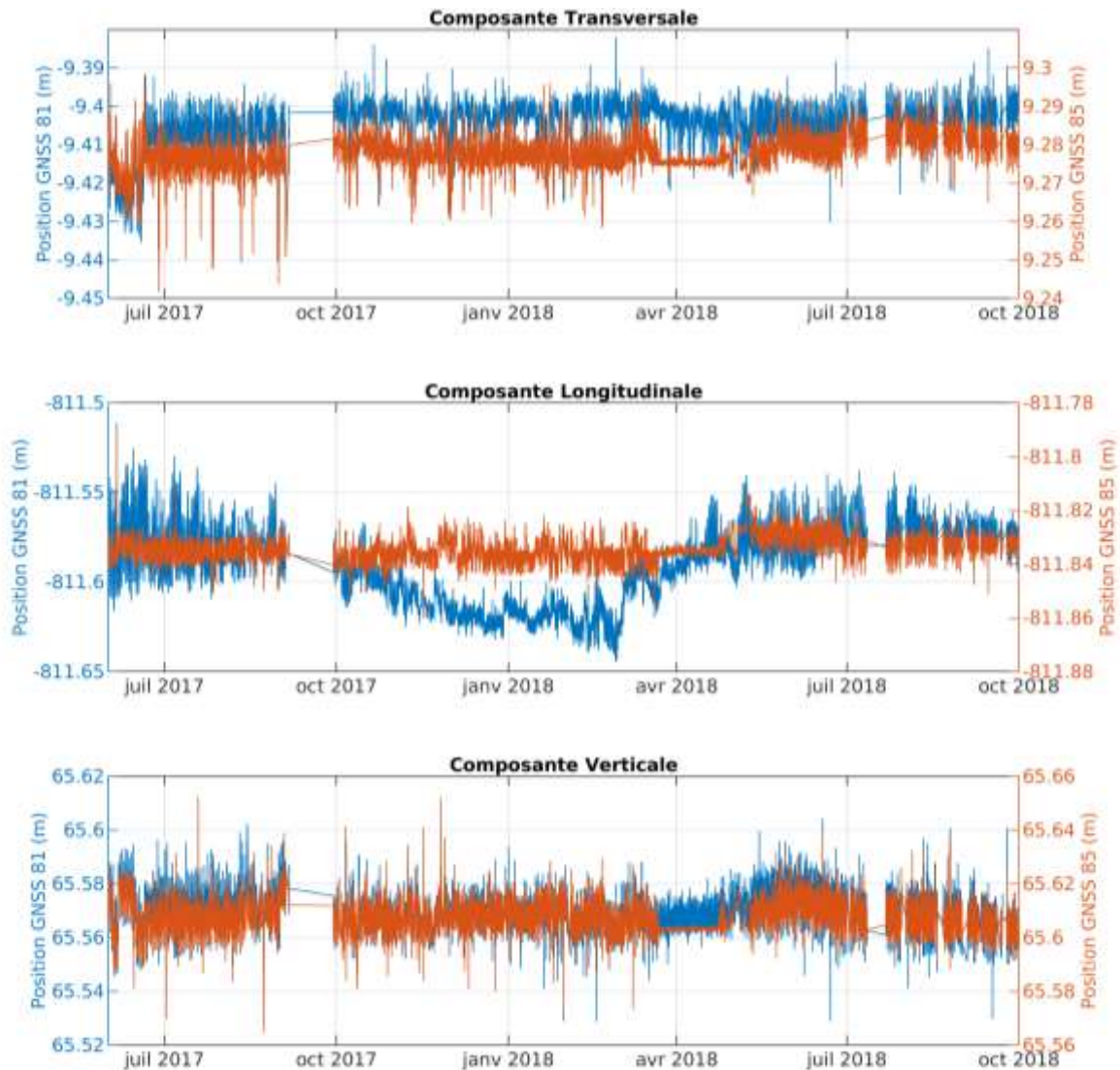


Figure III-38 Séries temporelles des capteurs 81 et 85

L'interprétation des séries des capteurs est rendue difficile à cause de plusieurs problèmes rencontrés durant l'instrumentation :

- Les données du capteur 81 présentent des déplacements anormaux. La composante longitudinale du capteur (notamment) montre à la fois des déplacements quotidiens d'une amplitude trop importante et des mouvements saisonniers, alors que seuls d'éventuels mouvements de tassement sont attendus. Il s'est avéré, lors d'une inspection sur place, que le support du capteur avait été fixé sur une partie supposée solidaire de la culée, mais en réalité rattachée aux rambardes du viaduc d'accès (mobile).
- Courant mars-avril 2018, les données du capteur 85 présentent un profil avec très peu de déplacements (écart type millimétrique sur la période). Ce profil est d'ailleurs très différent du capteur 81 sur la même période. Ce comportement est a priori imputable à un changement ou un problème dans l'algorithme de calcul sur cette période. Les données étant traitées par le coordinateur sur site, qui a par la suite rencontré une panne, les observations (fichiers source) n'ont pas pu être collectées pour refaire un calcul sur cette période.

L'étude de la composante lente du capteur 85 (Figure III-39) ne permet pas de conclure quant au suivi de l'affaissement de la culée. Les multiples interruptions et problèmes rencontrés, ainsi que la panne et le remplacement de nombreux éléments du réseau perturbent

significativement l'exploitabilité des données. En l'état, l'utilisation de stations GNSS à bas coût sur ouvrage ne peut être validée pour le suivi de déplacements de quelques millimètres. L'utilisation de séries plus longues, avec un déplacement total plus important, permettront de confirmer ou infirmer la capacité des capteurs Geocube pour le suivi de tassement.

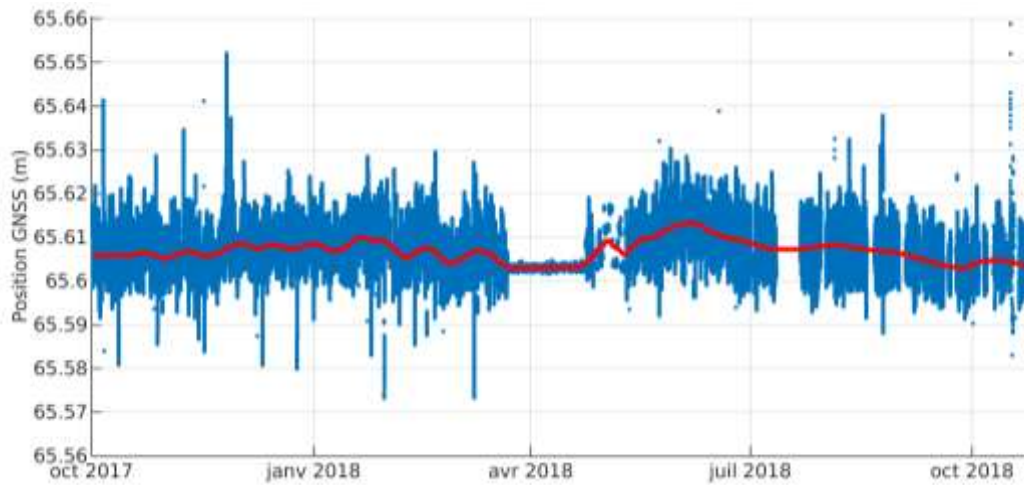


Figure III-39 Déplacements verticaux du capteur 85

III.2.3.4. COMPORTEMENT DU TABLIER

Le tablier central de l'ouvrage a été équipé en son centre de deux capteurs, le 80 et le 84, situés de part et d'autre de la chaussée (Figure III-40). Leurs séries temporelles sont représentées dans la Figure III-41.

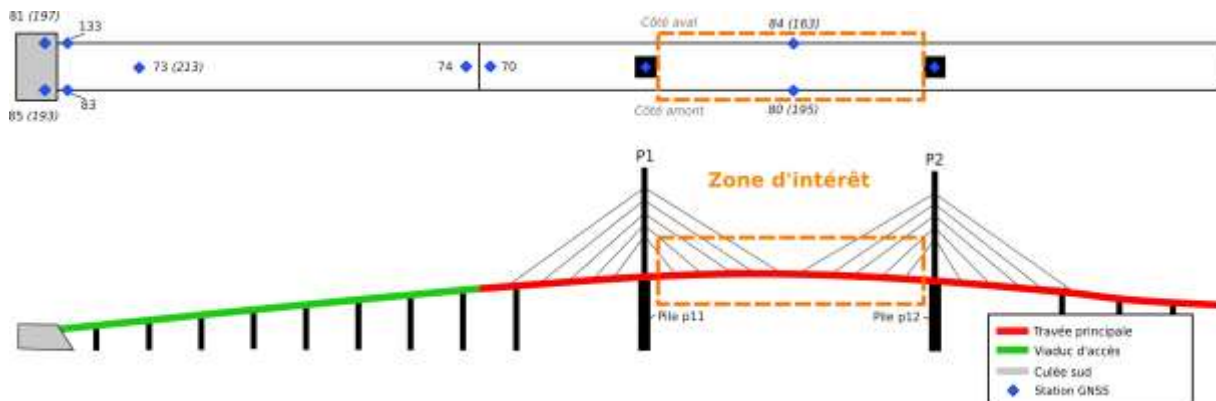


Figure III-40 Identification des capteurs installés sur le tablier central du pont de Brotonne

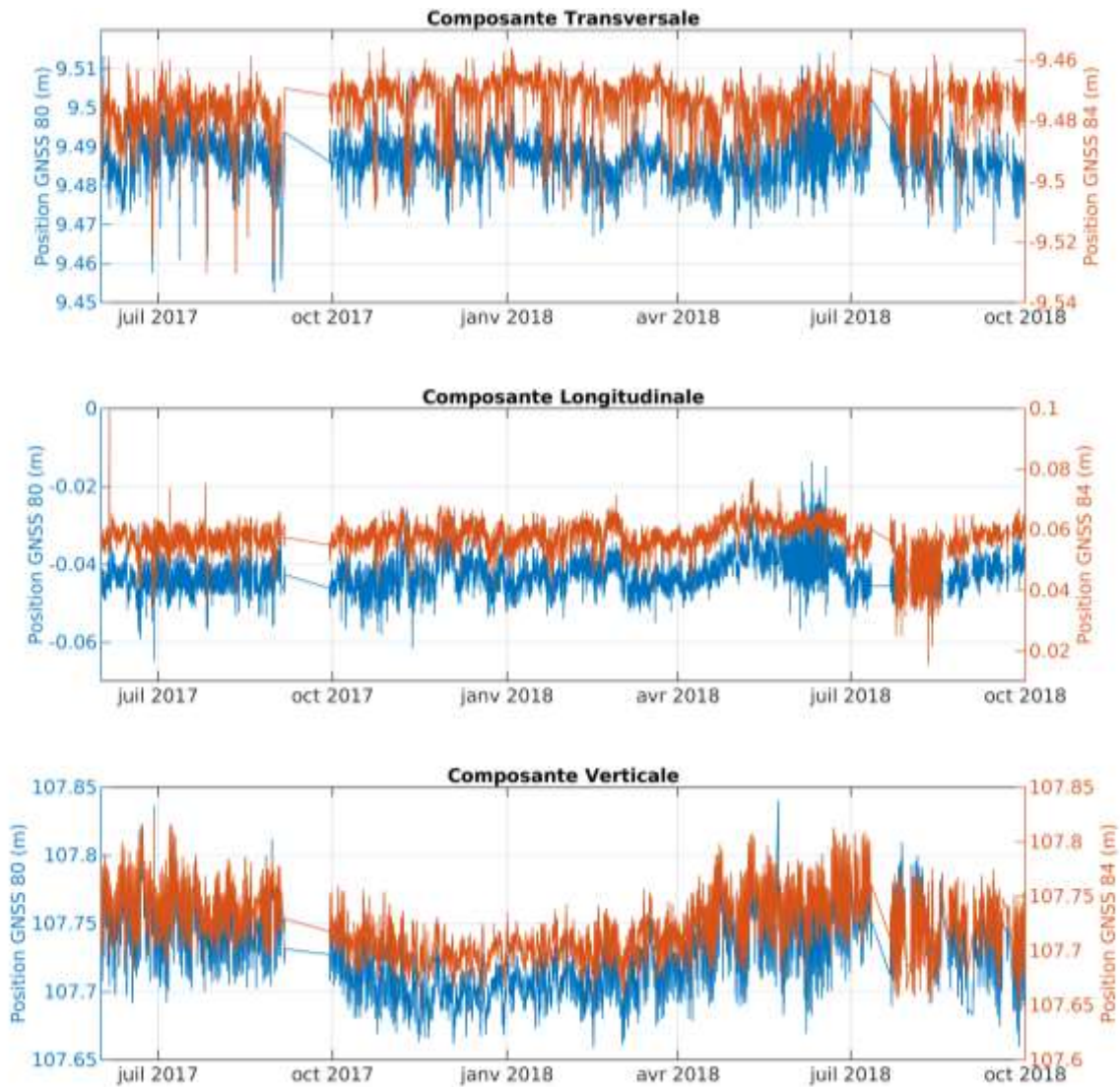


Figure III-41 Séries temporelles des capteurs 80 et 84

Sur la composante transversale, aucune tendance annuelle particulière ne peut être mise en avant. Le signal des deux capteurs comporte des mouvements journaliers et irréguliers d'amplitude généralement faible. Cependant, la série du capteur 84 comporte plus d'irrégularités que celle du capteur 80. L'amplitude importante et la nature brève de ces mouvements interpellent. Plusieurs hypothèses sont envisagées : le bruit (généralisé par le passage de véhicules, des multitrajets n'affectant qu'un des deux capteurs), les turbulences du vent affectant le support du capteur, ou la présence de gradients locaux. En l'état, la source ne peut être formellement identifiée.

La composante longitudinale des deux capteurs ne comporte pas non plus de tendance saisonnière. Les déplacements y sont faibles, mais apparaissent comme assez fortement corrélés de juin 2017 à mai 2018. En revanche, à partir de mi-mai jusqu'à mi-juin 2018, le comportement relatif des deux capteurs change : les données du capteur 80 montrent des oscillations quotidiennes beaucoup plus fortes. Ce comportement s'inverse sur la période de fin juillet-août 2018, où le capteur 84 montre cette fois des déplacements significativement plus forts que le capteur 80. A la suite de ces deux périodes, les deux capteurs semblent reprendre un comportement similaire.

Après enquête auprès de l'exploitant de l'ouvrage, il s'avère que ces périodes correspondent à des interventions réalisées sur l'ouvrage. La période 25 mai au 19 juin correspond au transfert d'échafaudages et de treuils au centre du tablier coté amont (ajout de poids), tandis que la période

du 24 juillet au 19 août correspond à l'arrivée de l'ensemble des équipements du côté aval au centre du tablier. Ces interventions ont donc généré un changement des séries GNSS respectivement sur le capteur côté amont (80) et aval (84), que ce soit par la production de mouvements ou vibrations supplémentaires, ou la génération de masques (et donc de bruit).

Enfin, sur la composante verticale, les deux capteurs apparaissent là aussi comme très fortement corrélés. Comme pour l'étude des pylônes, une composante saisonnière peut être observée sous la forme d'une sinusoïde de périodicité annuelle, avec retour à des valeurs similaires d'une année sur l'autre. Les capteurs présentent des variations quotidiennes variables, ces dernières étant plus fortes durant l'été et plus faibles en hiver. Ce comportement, déjà observé sur d'autres capteurs de l'ouvrage, est caractéristique de la réponse thermique de la structure. Les déplacements verticaux du capteur 84 sont comparés à T_p^{moy} (Figure III-42).



Figure III-42 Comparaison des mouvements verticaux du capteur 84 et de la température moyenne des piles

La fonction de corrélation de Pearson des deux séries est étudiée (Figure III-43). Aucune relation de corrélation nette ne peut être observée même en prenant une inertie allant jusqu'à 24h.

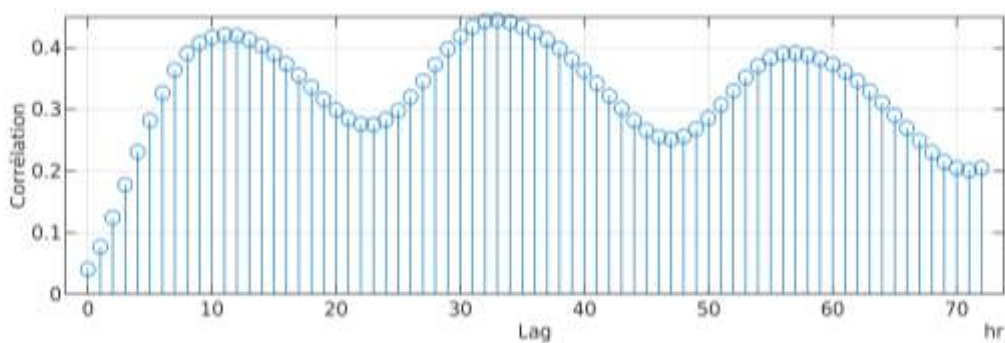


Figure III-43 Fonction de corrélation entre les mouvements verticaux du capteur 84 et de la température moyenne des piles

Afin de séparer les effets des gradients thermiques présents dans le tablier de sa dilatation thermique globale, les déplacements verticaux du capteur 80 observés entre 4h et 6h du matin sont isolés (Figure III-44).



Figure III-44 Déplacements verticaux du capteur 80 et moyenne des mesures entre 4h et 6h du matin

La série obtenue peut alors être comparée à la composante lente de la température météo locale T_{meteo} (Figure III-45). Il est ainsi possible de confirmer la présence d'une composante pouvant être attribuée aux variations saisonnières de température, et par conséquent à la dilatation thermique globale du tablier.

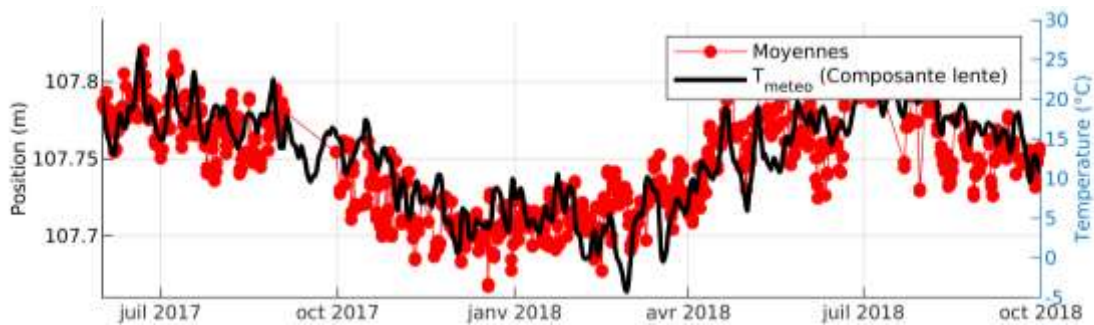


Figure III-45 Comparaison des positions enregistrées entre 4h et 6h du matin avec les variations thermiques saisonnières

En parallèle, l'amplitude des mouvements verticaux saisonniers observés est comparée à la prédiction du modèle PCP pour le centre du tablier : 9 cm observés contre 5,8 cm prédits. A la différence des comparaisons faites sur les pylônes et au niveau du joint viaduc/tablier, l'écart est relativement fort entre les observations et la prédiction du modèle PCP. Les résultats obtenus dans les précédents cas indiquent pourtant que l'utilisation de 25°C comme variation de température saisonnière dans l'ouvrage est une approximation correcte. Ainsi, malgré la sélection des données sur une plage horaire matinale, les effets des gradients ne sont pas complètement effacés.

Les déplacements verticaux du tablier étant majoritairement attribués à la présence de gradients thermiques, les données des capteurs situés dans les hourdis supérieur et inférieur à proximité de la culée sud ont été utilisées pour estimer $\Delta T_{hourdis}$, qui représente la différence de température entre le hourdis supérieur et le hourdis inférieur à proximité de la culée sud. Cette valeur est comparée aux déplacements du capteur 80 (Figure III-46). La corrélation entre les deux séries apparaît comme faible.

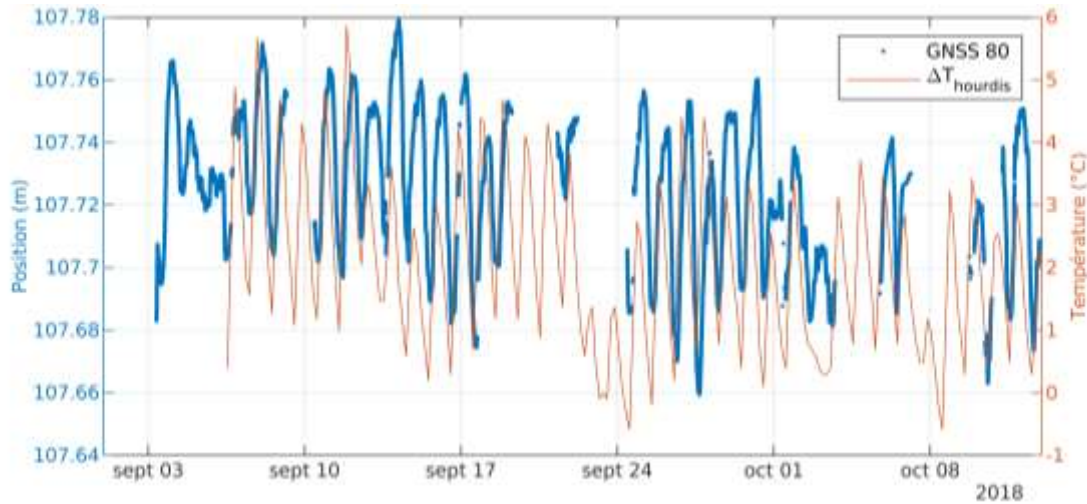


Figure III-46 Comparaison des mouvements verticaux du capteur 80 et du gradient vertical

En l'absence de relation nette avec les valeurs T_p^{moy} et $\Delta T_{hourdis}$, on propose d'étudier la relation de la série avec plusieurs températures caractéristiques : le gradient thermique est/ouest ΔT_{ouest}^{est} , le gradient thermique nord/sud ΔT_{sud}^{nord} (Eq. III-3) la moyenne des températures des sondes extérieures $T_{p,ext}^{moy}$ (Eq. III-4), la moyenne des températures des sondes intérieures $T_{p,int}^{moy}$ (Eq. III-5) et le gradient entre les sondes externes et internes ΔT_{ext}^{int} , calculé comme la différence de $T_{p,int}^{moy}$ et $T_{p,ext}^{moy}$.

$$\Delta T_{sud}^{nord} = T_{p,14} - T_{p,6} \quad \text{Eq. III-3}$$

$$T_{p,ext}^{moy} = moy(T_{p,3}, T_{p,4}, T_{p,5}, T_{p,6}, T_{p,14}, T_{p,15}, T_{p,16}, T_{p,17}) \quad \text{Eq. III-4}$$

$$T_{p,int}^{moy} = moy(T_{p,1}, T_{p,2}, T_{p,11}, T_{p,12}) \quad \text{Eq. III-5}$$

La comparaison avec les déplacements verticaux du tablier est étudiée en calculant le maximum de la valeur des fonctions de corrélation avec les séries temporelles des capteurs 80 et 84 (Tableau III-2).

Température	Corrélation max. avec capteur 80	Corrélation max. avec capteur 84
ΔT_{ouest}^{est}	0,22	0,26
ΔT_{sud}^{nord}	0,27	0,25
$T_{p,ext}^{moy}$	0,43	0,46
$T_{p,int}^{moy}$	0,36	0,39
ΔT_{ext}^{int}	0,69	0,70

Tableau III-2 Corrélation entre les températures caractéristiques et les déplacements verticaux du tablier

Les déplacements sont corrélés uniquement au gradient ΔT_{ext}^{int} . Ce gradient est un indicateur des effets engendrés par l'inertie thermique de l'ouvrage, en comparant les températures en extérieur du béton (dont les faces chauffées par le soleil) et le béton en intérieur. Le gradient ΔT_{ext}^{int} est comparé aux déplacements du capteur 84 dans la Figure III-47, et la fonction de corrélation entre les deux séries est représentée dans la Figure III-48.

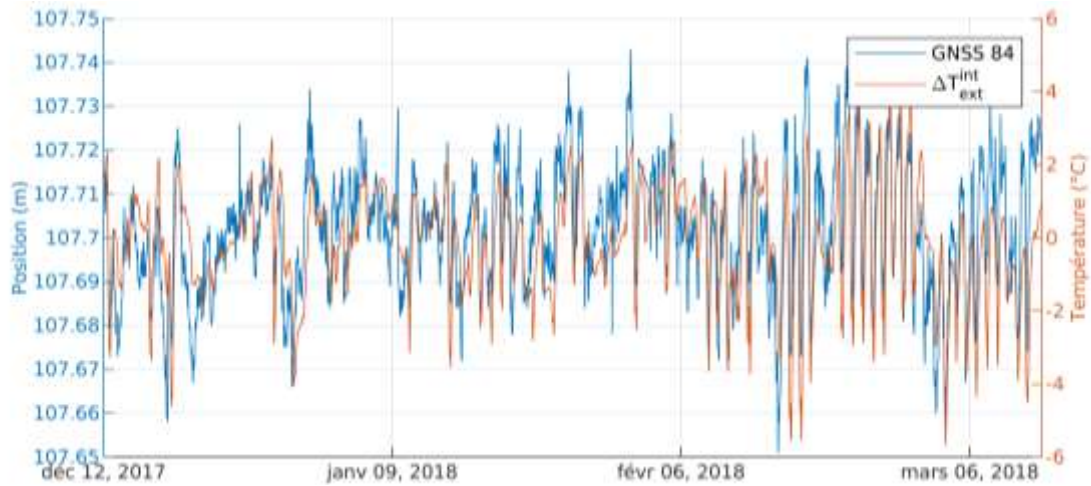


Figure III-47 Comparaison des mouvements verticaux du capteur 84 et du gradient du béton des piles

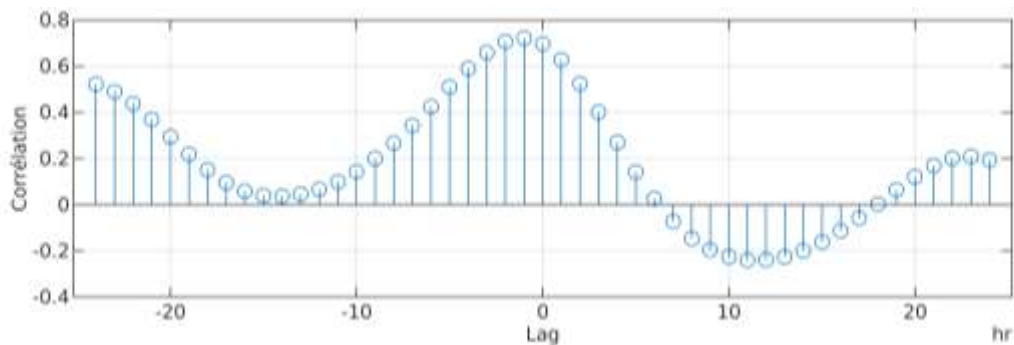


Figure III-48 Fonction de corrélation entre les déplacements du capteur 84 et le gradient du béton des piles

III.2.4. ANALYSE DU COMPORTEMENT GLOBAL DE L'OUVRAGE

L'étude des données issues de capteurs GNSS regroupées par zones d'intérêt a permis de vérifier leur capacité à fournir des données pertinentes et exploitables pour observer et suivre les caractéristiques des ouvrages. Afin d'illustrer la réponse globale observée par les capteurs sur le pont de Brotonne, une carte de corrélation (coefficient de Pearson) entre toutes les séries temporelles GNSS acquises est représentée dans la Figure III-49. Les composantes transversales, longitudinales et verticales sont dénommées X, Y et Z, respectivement.

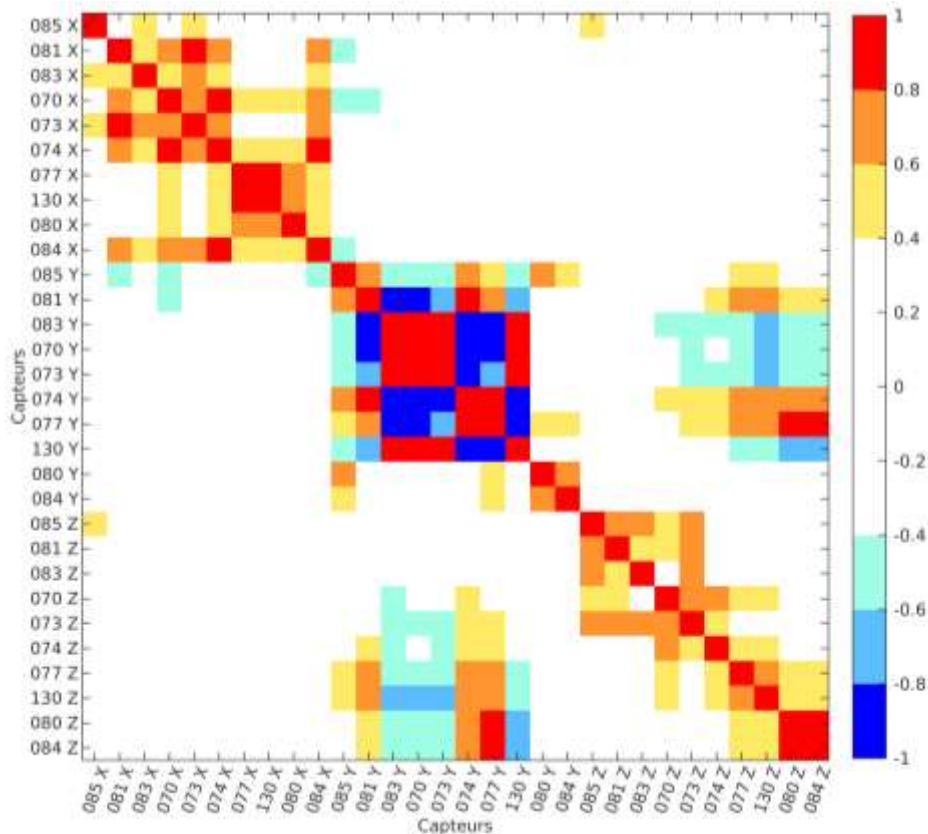


Figure III-49 Carte de corrélation des capteurs GNSS du pont de Brotonne

A partir de cette carte de corrélation, il est possible d'isoler plusieurs groupes de corrélation distincts :

- un groupe constitué des déplacements transversaux de la majorité des capteurs, qui présentent des corrélations positives modérées à fortes. La présence de ce groupe peut se justifier par la présence de déplacements faibles sur la plupart des capteurs (sauf pylônes), l'absence de tendance saisonnières, et la présence de gradients transversaux le long du tablier ;
- un groupe formé des déplacements longitudinaux de l'ensemble des capteurs, à l'exception des capteurs 80 et 84. Ce groupe peut s'expliquer par les phénomènes de dilatation thermique (variation quotidienne et saisonnière) détaillés dans les paragraphes suivants. Les capteurs 80 et 84 ne présentent quant à eux pas de tendance sur cette composante ;
- un groupe composé des déplacements verticaux de la plupart des capteurs, ceux-ci étant plus fortement corrélés entre eux si ceux-ci sont situés sur le viaduc d'accès (et donc de faibles déplacements) ou sur le tablier principal, et dont les mouvements ont été imputés à des effets thermiques ;
- un groupe constitué des déplacements longitudinaux de la plupart des capteurs et des déplacements verticaux des capteurs situés sur le tablier principal. Cette relation s'explique par la relation aux effets thermiques et variations saisonnières des deux groupes précédents.

Afin de vérifier l'impact des variations saisonnières, la même carte de corrélation est réalisée sur les composantes lentes et rapides des signaux (Figure III-50).

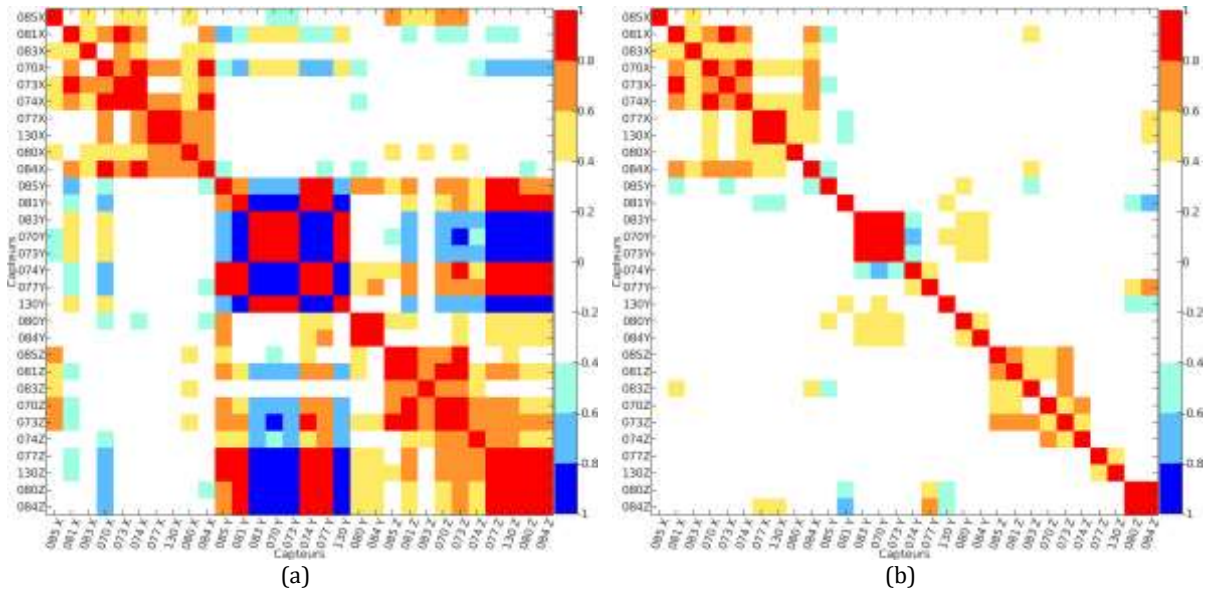


Figure III-50 Cartes de corrélation des composantes lente (a) et rapide (b) des séries GNSS du pont de Brotonne

Le rôle prédominant de la composante lente pour les corrélations entre les composantes longitudinales ou verticales est alors mis en évidence avec de fortes corrélations entre capteurs. Dans le cas de la composante rapide, seuls les capteurs proches présentent des corrélations nettes. Plusieurs facteurs sont néanmoins à prendre en compte :

- en retirant la composante lente filtrée du signal, le bruit n'est pas affecté, le rapport signal sur bruit de toutes les composantes est donc diminué, affectant la corrélation entre les mesures ;
- seuls les effets quotidiens sont présents dans le signal, or il a été montré que plusieurs phénomènes présentent une inertie différente, certains pouvant être reliés à une même température mais avec un déphasage différent. Le coefficient de corrélation ne prend ici pas en compte ces déphasages.

Afin d'illustrer la relation entre les déplacements observés et les données thermiques, les cartes de corrélation entre les séries GNSS et les données des sondes de température sont représentées dans la Figure III-51 (sur les séries complètes et les composantes lentes et rapides de tous les capteurs).

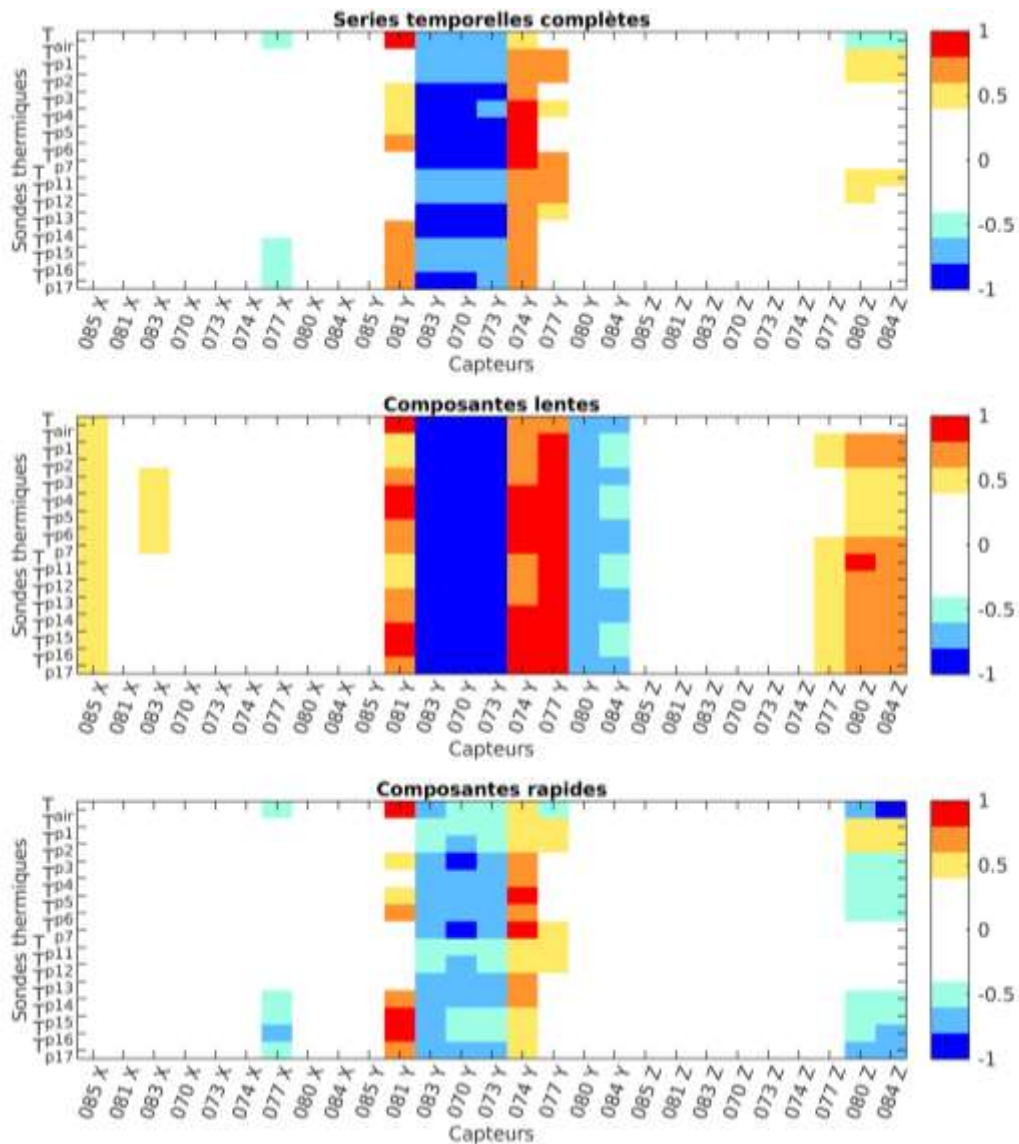


Figure III-51 Cartes de corrélation entre données GNSS et températures du pont de Brotonne

Similairement à ce qui a été observé sur les cartes de corrélations entre GNSS, la composante saisonnière joue un rôle important dans la corrélation aux capteurs : des coefficients plus forts et plus nombreux sont observables en ne prenant que les composantes lentes. Seules les composantes longitudinales des capteurs du viaduc d'accès et du joint tablier-viaduc sont corrélées sur les composantes lentes et rapides. Les déplacements longitudinaux des capteurs 77, 80 et 84 ne présentent des corrélations que sur leurs composantes lentes, tandis que les déplacements verticaux des capteurs 80 et 84 présentent une opposition entre les corrélations des composantes rapides et lentes. Ces relations illustrent l'impact de l'inertie thermique différente selon les parties de l'ouvrage et qui a été observé dans les paragraphes précédents.

Afin d'essayer d'isoler les termes thermiques des différentes séries, les données de l'ensemble des capteurs GNSS sont décomposées par analyse en composante principale (ACP). L'ACP est réalisée sur des données centrées et utilise un algorithme de décomposition en valeurs singulières (*singular value decomposition*, SVD). Les composantes principales sont triées de façon décroissante selon les valeurs propres de la matrice de corrélation du jeu de données. Pour le pont de Brotonne, les quatre premières composantes, dénotées PC1, PC2, PC3 et PC4, comportent des variations saisonnières et quotidiennes (Figure III-52).

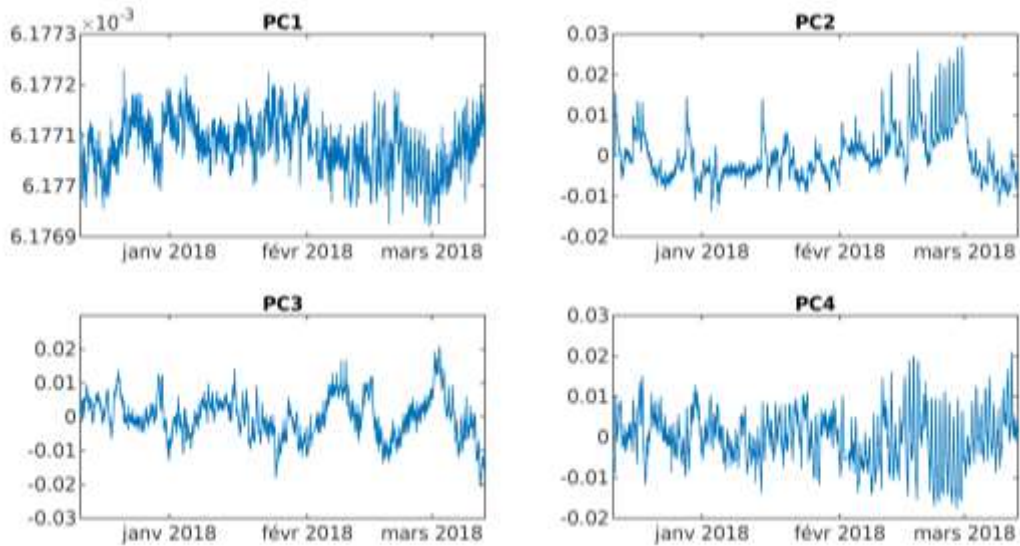


Figure III-52 Composantes principales PC1, PC2, PC3 et PC4 (sens de lecture) des séries GNSS du pont de Brotonne

Après une recherche à l'aide des fonctions de corrélation avec les différentes températures et gradients étudiés précédemment, ces quatre composantes peuvent être associées respectivement aux valeurs T_{ext}^{moy} , ΔT_{ouest}^{est} , T_{int}^{moy} , et ΔT_{ext}^{int} (Figure III-53), caractéristiques de différents phénomènes thermiques dans l'ouvrage (inerties différentes, gradients).

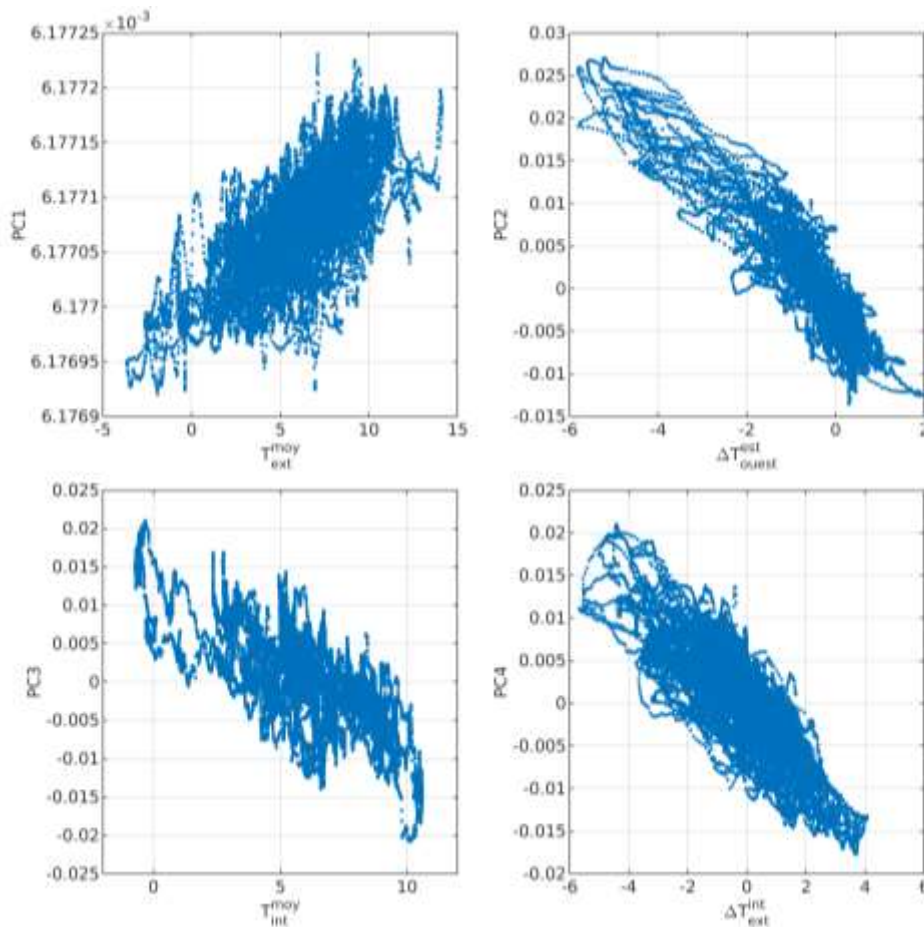


Figure III-53 Relation des composantes principales du pont de Brotonne avec des grandeurs thermiques caractéristiques

Cette étude a permis de tester la capacité du réseau de capteurs GNSS à bas coût déployé sur le pont de Brotonne à identifier les déplacements de différents éléments caractéristiques de

l'ouvrage, comme les mouvements du viaduc d'accès, du tablier ou des pylônes. L'utilisation de données de température dans les matériaux de l'ouvrage a permis de justifier les phénomènes observés en les associant à des températures et gradients caractéristiques, validant la capacité de suivi du réseau sur plus d'un an de données. L'étude globale des séries a mis en avant les relations entre capteurs et l'impact important de l'inertie thermique de la structure.

Pour valider ces résultats, un jeu de données acquis sur le pont d'Aquitaine est étudié selon la même approche.

III.3. INSTRUMENTATION DU PONT D'AQUITAINE

III.3.1. PRESENTATION DE L'OUVRAGE

Le pont d'Aquitaine (Figure III-54) est un pont suspendu en acier de 1767 m de long reliant les villes de Bordeaux et Lormont en France. Achevé en 1967, il est composé d'un viaduc d'accès de 1014 m, d'un massif d'ancrage de 39 m (rive gauche), de trois travées suspendues : une travée principale centrale de 394 m et deux travées symétriques de 143 m ; et enfin d'un massif d'ancrage de 35 m à l'est (rive droite). La travée centrale et la travée rive droit sont jointes, la travée rive gauche est quant à elle indépendante. Le pont comporte deux paires de pylônes encastrés et souples en béton armé d'une hauteur de 103 m.



Figure III-54 pont d'Aquitaine (source : Wikipedia, Olivier Mougel, CC-BY-SA 3.0)

Initialement conçu avec une chaussée de 14 m de large accueillant quatre voies, la chaussée a été progressivement élargie à 16 m pour cinq voies de circulation en 1982 en supprimant les trottoirs, puis à 21 m pour accueillir six voies en 2006, grâce au déportement des pistes cyclables vers l'extérieur. L'ouvrage accueillait plus de 100000 véhicules par jour en 2012, dont 6% de poids lourds (DIRA, [2013]).

En parallèle des travaux liés à l'élargissement de la chaussée en réponse à l'augmentation du trafic routier de la région, le pont fait l'objet d'une surveillance attentive et d'opérations de maintenance et de réparation régulières depuis 40 ans. En 1979, une inspection détaillée de l'ouvrage avait permis de constater quatorze ruptures de fils affectant les torons extérieurs de plusieurs câbles. Une inspection conduite en 1983 sur la suspension de l'ouvrage avait attesté de l'évolution des désordres : au total, 68 ruptures de fils dénombrées, leur nombre ayant été multiplié par cinq en quatre ans. En 1986, la protection anticorrosion des câbles est refaite. En 1993, une nouvelle inspection détaillée dénote un total de 178 ruptures de fils : bien que l'évolution des désordres soit visible, cela représente moins de 1% du nombre total de fils de la suspension, l'état de la structure n'est donc à ce stade pas jugé « alarmant ». Suite à ce constat, le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées propose la mise en place d'un dispositif permanent de surveillance de rupture de fils.

Suite à une auscultation électromagnétique réalisée en 1996 et à un suivi acoustique s'étalant de 1996 à 1998, l'ouvrage est passé temporairement sous le régime de haute surveillance, et il est décidé de procéder au remplacement de sa suspension (Godart et al., [2001]) : les travaux s'étaleront de 2000 à 2006.

Depuis, plusieurs opérations de réparation ont été réalisées en 2010 suite à un incident routier ayant arraché un joint de chaussée, et en 2012 suite à de fortes pluies ayant entraîné des dégradations sur les joints. L'ouvrage fait par ailleurs l'objet d'opérations de maintenance régulières, entraînant sa fermeture plusieurs nuits ou journées par an.

III.3.2. INSTRUMENTATION EN PLACE ET DONNEES DISPONIBLES

Le pont d'Aquitaine a été équipé (hors du cadre de cette thèse) à partir de février 2019 d'un réseau de 14 capteurs Geocube situés sur différents éléments de l'ouvrage (Figure III-55) et reliés par radio :

- 6 capteurs installés sur la travée centrale, déployés par paires de part et d'autre de la chaussée : TCam, TCav, TCRGam, TCRGav, TCRDam, TCRDav (respectivement Travée Centrale amont et aval, Travée Centrale Rive Gauche amont et aval, Travée Centrale Rive Droite amont et aval) ;
- 2 capteurs situés au centre de la travée droite, TRDam et TRDav (Travée Rive Droite amont et aval) ;
- 2 capteurs situés au centre de la travée gauche, TRGam et TRGav (Travée Rive Gauche amont et aval) ;
- 2 capteurs installés au sommet du pylône droit, PRDam et PRDav (Pylône Rive Droite amont et aval) ;
- 2 capteurs installés au sommet du pylône gauche, PRGam et PRGav (Pylône Rive Gauche amont et aval).

La station de référence (doublée) est installée sur un bâtiment (supposé fixe) de la Direction Interdépartementale des Routes Atlantique situé à quelques centaines de mètres à l'est de l'ouvrage, de sorte que toutes les stations de mesure soient situées à moins d'un kilomètre de la référence.

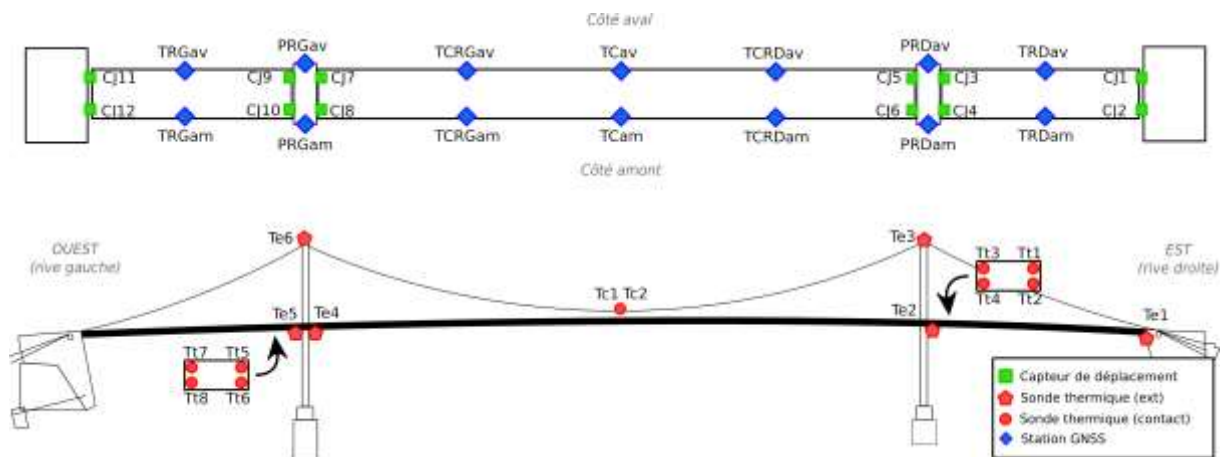


Figure III-55 Plan d'installation des capteurs sur le pont d'Aquitaine

Le système Geocube déployé sur le pont d'Aquitaine se distingue de celui déployé initialement sur le pont de Brotonne par plusieurs caractéristiques : l'échantillonnage des séries GNSS est fixé à 60s et tous les capteurs Geocube collectent la température à l'aide d'une sonde embarquée. Enfin, le coordinateur déployé sur site et chargé de collecter et traiter les données est ici remplacé par deux collecteurs chargés de transférer les données sur un serveur distant sur lequel le traitement GNSS est effectué.

L'ouvrage est également équipé de capteurs plus conventionnels dans le cadre de sa surveillance (Figure III-55) :

- 2 sondes de température (type PT100 classe A) installées au niveau des câbles de suspension, notées $T_{c(1,2)}$;
- 8 sondes de température de contact (type PT100 classe A) installées à l'intérieur du tablier sur les éléments métalliques à proximité des pylônes, notées $T_{t(1...8)}$;
- 6 sondes céramiques de température externes (type PT100 classe A), notées $T_{e(1...6)}$;
- 12 capteurs laser (EDS-C 30, Dimetix) mesurant les déplacements entre les travées et les pylônes.

Les données obtenues par les différentes sondes de température sont fortement corrélées, comme cela est illustré dans la Figure III-56. Il apparaît que les valeurs T_t^{moy} , T_c^{moy} et T_e^{moy} , moyennes respectives des sondes $T_{t(1...8)}$, $T_{c(1,2)}$ et $T_{e(1...6)}$. T_t^{moy} et T_e^{moy} sont très proches, tandis que T_c^{moy} présente une tendance saisonnière similaire mais avec des oscillations quotidiennes plus faibles.

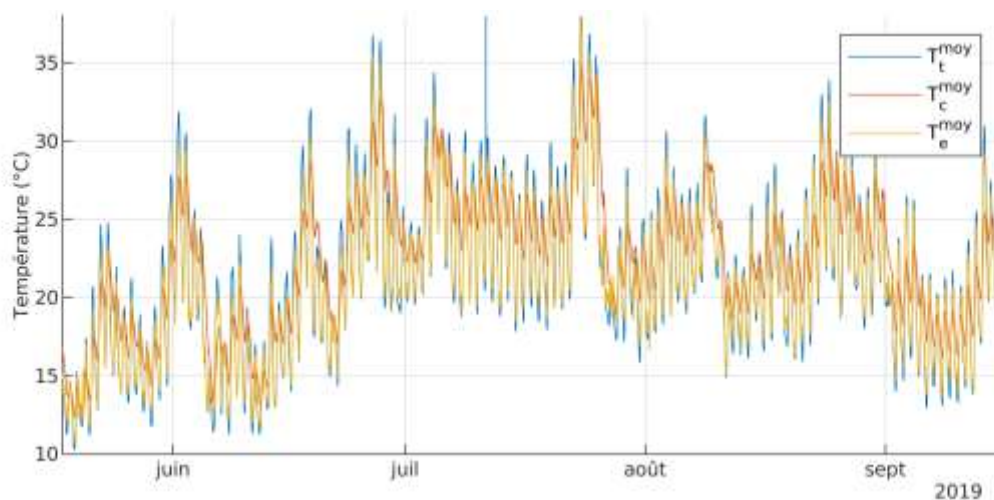


Figure III-56 Comparaison des moyennes des différents types de sondes thermiques du pont d'Aquitaine

Enfin, les deux massifs d'ancrage sont également équipés d'inclinomètres mono-axiaux et de capteurs de déplacement à palpeur SR-IS/50 Solartron LVDT pour le suivi des sellettes de déviations. Toutes les mesures de l'instrumentation sont échantillonnées à 10 minutes.

La Figure III-57 synthétise pour quelles journées au moins 50% des mesures (par rapport au nombre maximum possible permis par l'échantillonnage) sont disponibles pour les différents capteurs. Le réseau a subi une panne globale de février à mai 2019, l'essentiel des données exploitables s'étale de mai 2019 à septembre 2019. Certains capteurs, comme ceux des pylônes, ont rencontré des interruptions significatives, notamment en août.



Figure III-57 Journées avec au moins 50% de données disponibles par capteur sur le pont d'Aquitaine

De façon similaire à ce qui a été observé sur les données du pont de Brotonne, les données issues du réseau Geocube sont plus irrégulières que les données de l'instrumentation traditionnelle, en raison des faiblesses liées au calcul GNSS et à la transmission sans fil. Les écarts de temps entre deux mesures de toutes les séries GNSS ont été compilés et synthétisés dans la Figure III-58. En comparaison avec les données de Brotonne, les intervalles supérieurs à l'échantillonnage imposé sont plus fréquents, représentant plus de 10% des intervalles de mesure. Ces irrégularités sont un témoin des difficultés de liaison radio entre les capteurs : les distances entre les capteurs sont plus importantes que sur le pont de Brotonne, et les pylônes du pont d'Aquitaine sont des obstacles plus massifs et donc plus difficiles à franchir.

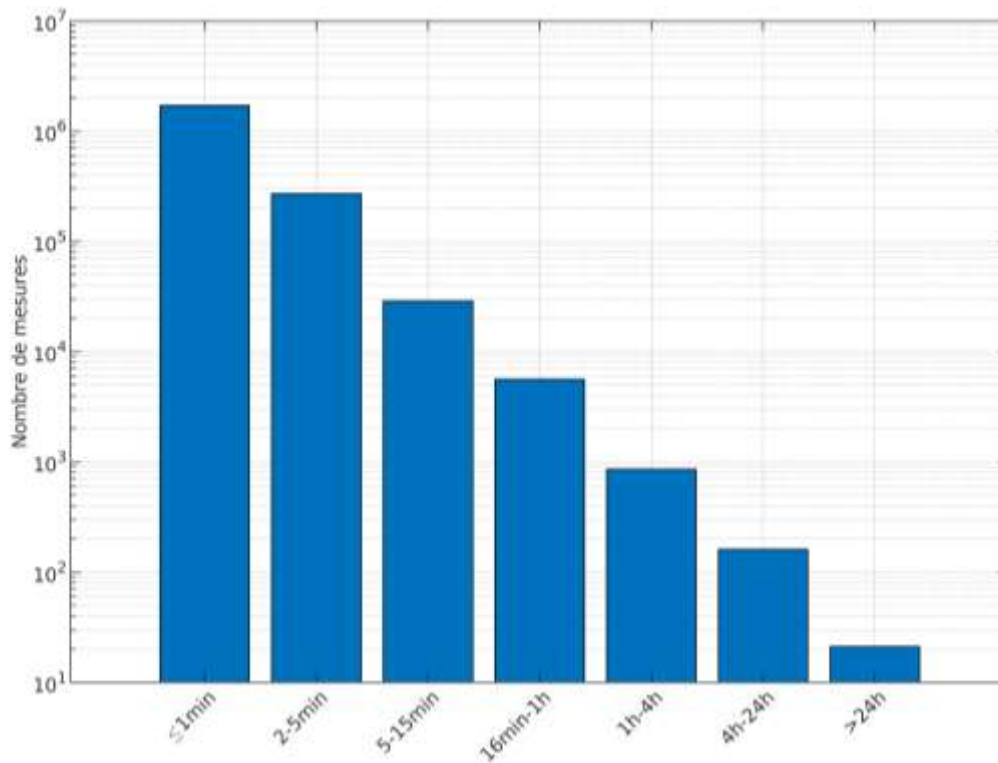


Figure III-58 Histogramme des intervalles entre deux mesures du réseau Geocube sur le pont d'Aquitaine

III.3.3. ETUDE DU CALCUL EFFECTUE PAR G3GPS

Les observations acquises par les Geocube sur le pont d'Aquitaine ont pu être récupérées au format standard RINEX, permettant le traitement par un logiciel tiers. Afin d'en évaluer la performance, le traitement par G3GPS a été comparé au traitement RTKLib à l'aide d'observations collectées sur un intervalle de deux semaines. Celles-ci ont été post-traitées avec le logiciel RTKLib en utilisant les modes et paramètres de calcul sélectionnés dans le Chapitre II. Les deux calculs utilisent une station de référence différente :

- le calcul sous G3GPS utilise un Geocube situé à moins d'un kilomètre de l'ouvrage comme référence ;
- le calcul RTKLib utilise la station CUBX du RGP, située à 3 km de l'ouvrage, et constituée d'un récepteur multifréquence et d'une antenne « choke ring ».

Le matériel utilisé comme référence par G3GPS est plus modeste, mais la ligne de base est significativement plus courte, et représente un scénario opérationnel de déploiement d'un réseau Geocube. Les déplacements observés par deux capteurs installés sur la travée principale sont comparés dans la Figure III-59 et la Figure III-60, représentant les données acquises par les capteurs TCam et TCRGam, respectivement. Une rotation a été appliquée sur les séries temporelles pour les faire correspondre à l'orientation de l'ouvrage (composantes transversale, longitudinale et verticale), et les séries ont été lissées à l'aide d'un filtre médian glissant sur 1h.

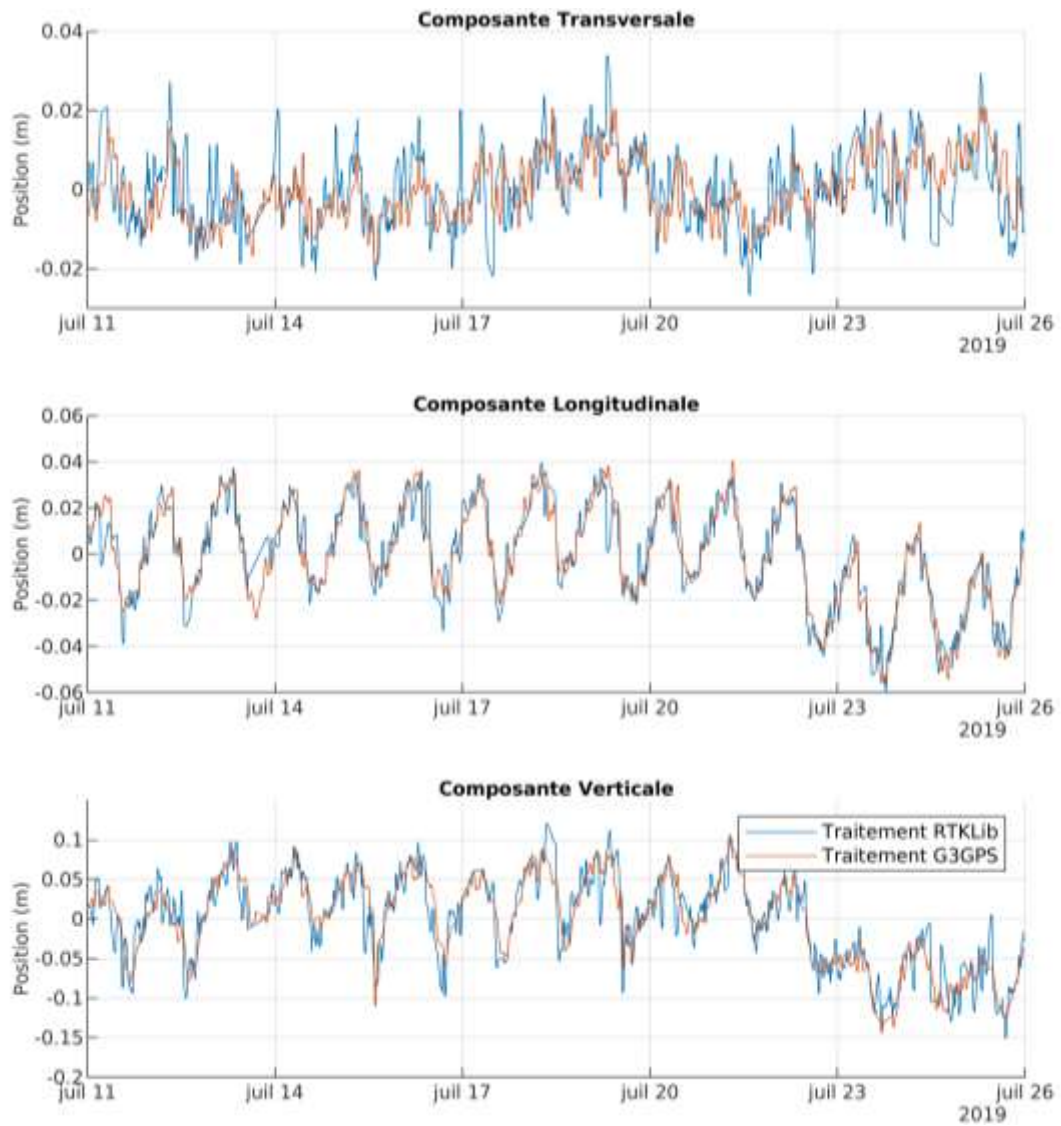


Figure III-59 Comparaison des résultats d'un traitement par G3GPS et par RTKLib pour un capteur situé sur le pont d'Aquitaine (TCam)

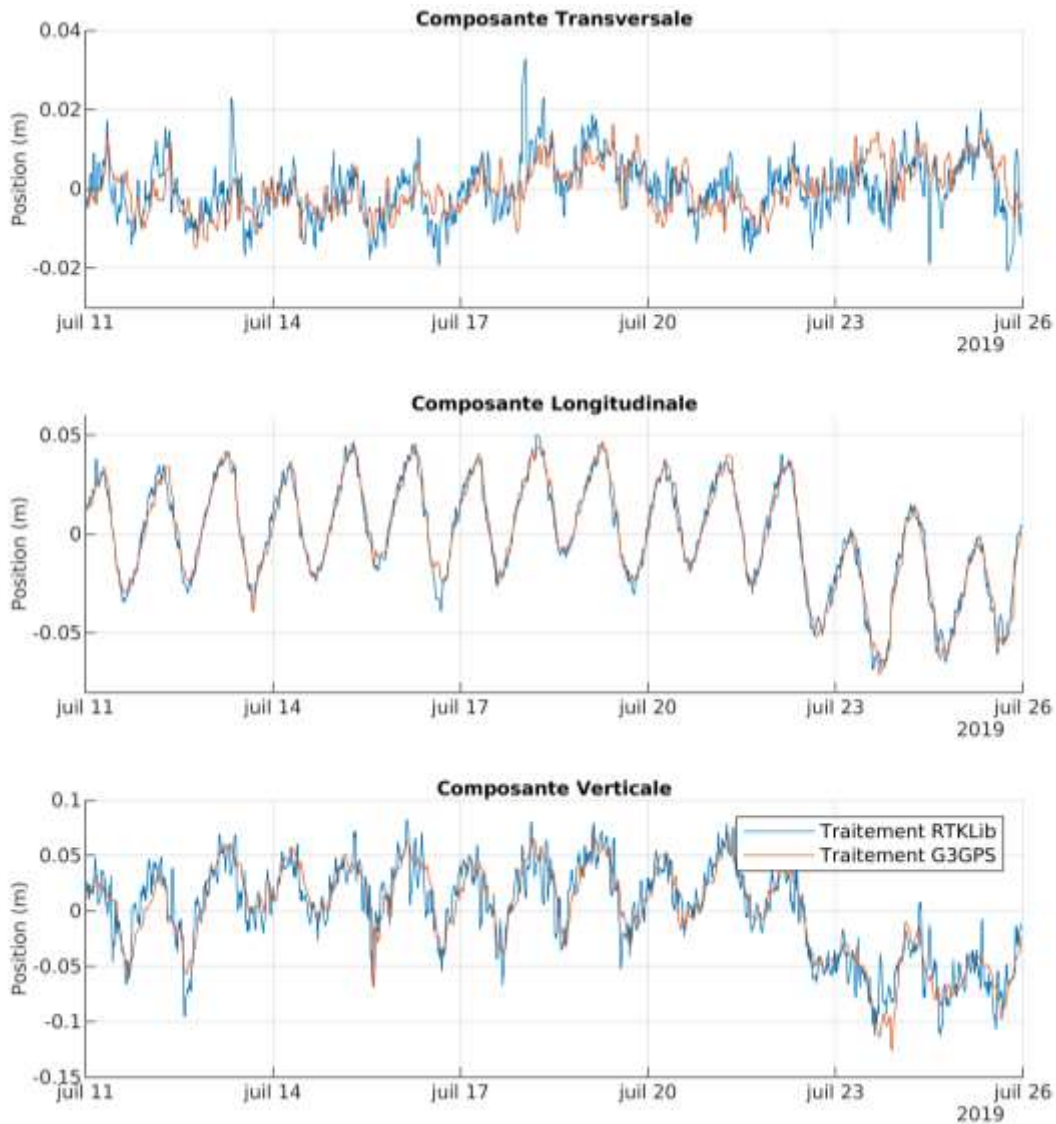


Figure III-60 Comparaison des résultats d'un traitement par G3GPS et par RTKLib pour un capteur situé sur le pont d'Aquitaine (TCRGam)

La comparaison des séries temporelles montre que les deux calculs font ressortir les mêmes tendances et variations quotidiennes, et que le calcul sous G3GPS semble fournir des séries plus faiblement bruitées. Compte tenu des résultats obtenus avec RTKLib durant l'évaluation expérimentale, la solution G3GPS apparaît pertinente.

Il a été noté dans les paragraphes III.2.2 et III.3.2 que les données issues des réseaux Geocube comportaient des interruptions allant du saut d'une mesure à plusieurs heures d'interruption, celles-ci pouvant être attribués à la non-résolution des ambiguïtés entières et à la liaison sans fil. Les données d'observations RINEX (donc avant le traitement GNSS) peuvent également être utilisées pour isoler l'origine des données manquantes : les observations manquantes peuvent être attribuées à une défaillance matérielle (transmission ou panne du capteur).

Il est possible de calculer α_{obs} le rapport entre N_{obs} le nombre d'observations acquises et N_{max} le nombre maximal permis par l'échantillonnage fixé, et α_{sol} le rapport entre N_{sol} le nombre de points disponibles pour lesquels les ambiguïtés entières ont été résolues et N_{max} . Enfin, il est possible de calculer α_{sol}^{obs} , qui représente la proportion d'observations pour lesquelles une solution a été calculée (Eq. III-6). Sont comptabilisés pour G3GPS tous les points disponibles dans

la solution fournie sont comptabilisés, et pour RTKLib, tous les points dont la solution est considérée comme résolue.

$$\alpha_{obs} = \frac{N_{obs}}{N_{max}}, \quad \alpha_{sol} = \frac{N_{sol}}{N_{max}}, \quad \alpha_{sol}^{obs} = \frac{N_{sol}}{N_{obs}} \quad \text{Eq. III-6}$$

Ces ratios ont été calculés pour les deux logiciels à l'aide des différents capteurs disponibles durant la période étudiée, et sont présentés dans le Tableau III-3.

Capteur	α_{obs}	α_{sol}^{obs} RTKLIB	α_{sol} RTKLIB	α_{sol}^{obs} G3GPS	α_{sol} G3GPS
TRGam	0,95	0,58	0,56	0,79	0,75
TRGav	0,96	0,40	0,38	0,71	0,68
PRGav	0,97	0,86	0,83	0,77	0,75
TCRGam	0,96	0,71	0,68	0,74	0,71
TCRGav	0,96	0,66	0,64	0,67	0,65
Tcam	0,95	0,34	0,33	0,62	0,59
Tcav	0,95	0,23	0,22	0,54	0,51
TCRDam	0,96	0,59	0,57	0,72	0,70
TCRDav	0,97	0,59	0,57	0,67	0,65
PRDav	0,81	0,84	0,69	0,88	0,72
TRDam	0,96	0,59	0,57	0,80	0,76
TRDav	0,96	0,57	0,55	0,73	0,70

Tableau III-3 Comparaison des taux de résolution de G3GPS et RTKLib

Il apparait ainsi que, à l'exception du capteur PRDav situé en sommet de pylône, pour tous les autres capteurs le taux d'observations manquantes, et imputables à des problèmes matériels ou de liaison, est de l'ordre de 5%. Pour les deux logiciels de calcul, le plus fort taux de pertes de données « exploitables » liées au traitement a lieu au centre du tablier (capteurs TCam et TCav), qui sont les capteurs qui observent notamment les plus grands déplacements verticaux. Hormis ces deux capteurs, le taux de résolution est globalement de 70% à 80% pour le traitement G3GPS et de 60% pour RTKLib. Ces résultats confortent la pertinence et l'efficacité du logiciel de traitement G3GPS.

III.3.4. ETUDE DES SERIES GNSS PAR PARTIES DE L'OUVRAGE

Dans un contexte similaire à l'étude des données du pont de Brotonne, le filtrage présenté dans le Chapitre III.2.3 a été appliqué aux données acquises sur le pont d'Aquitaine.

III.3.4.1. COMPORTEMENT DU TABLIER

Le tablier du pont d'Aquitaine est équipé de 10 stations Geocube, dont 8 installées sur le segment de chaussée constitué de la travée centrale et de la travée droite : TRDam, TRDav, TCRDam, TCRDav, TCam, TCav, TCRGam et TCRGav. Les capteurs TRGam et TRGav sont installés au centre de la travée gauche (Figure III-61).

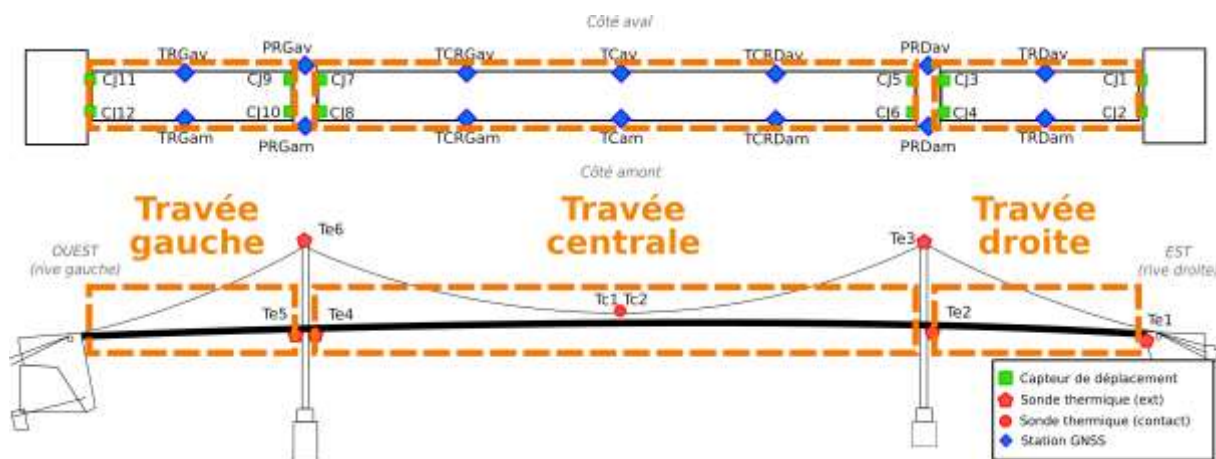


Figure III-61 Identification des capteurs installés sur les travées du pont d'Aquitaine

Les séries temporelles acquises par la paire de capteurs TCam et TCav, situés au centre de la travée centrale, sont représentées dans la Figure III-62.

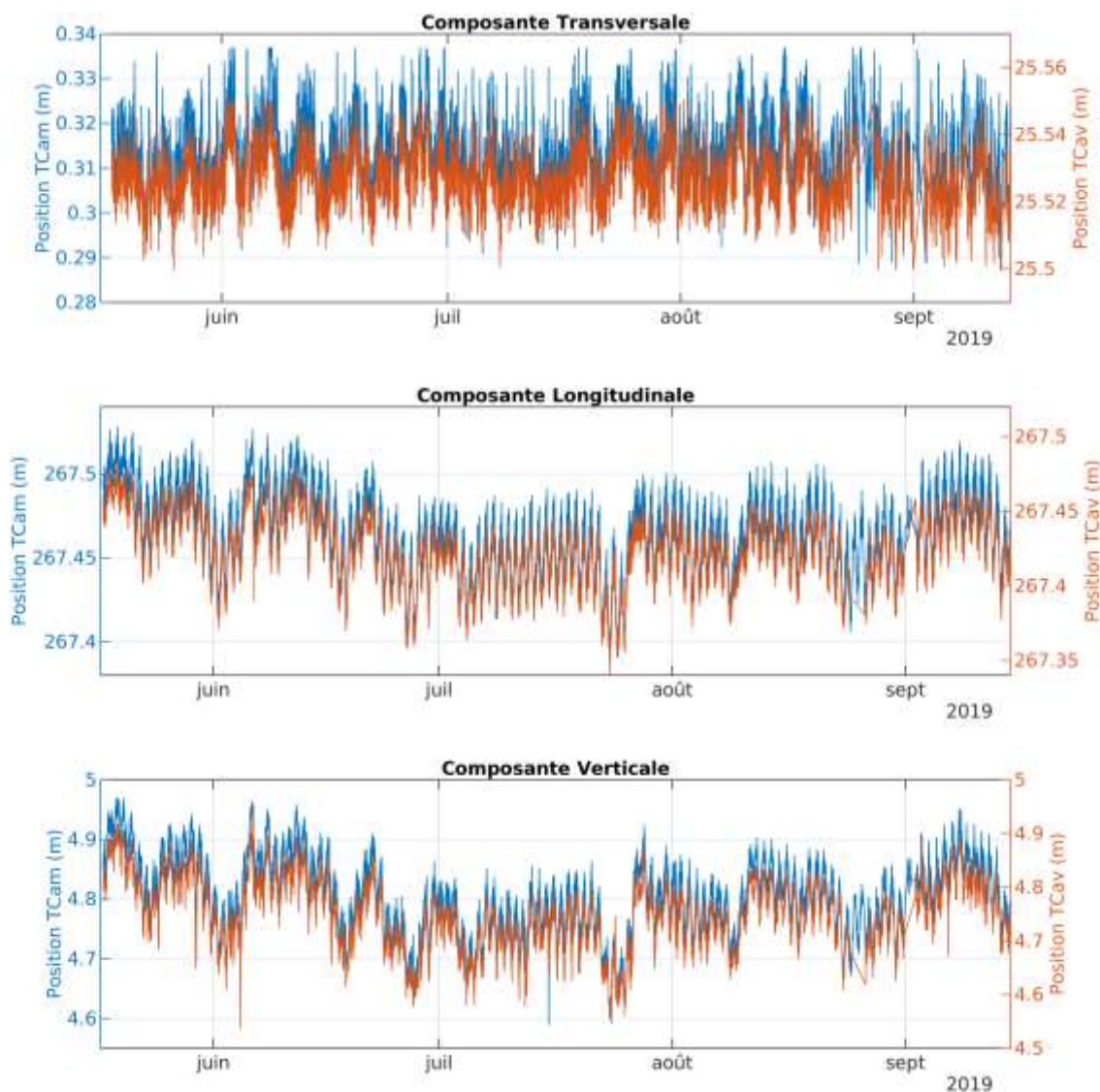


Figure III-62 Séries temporelles des capteurs TCam et TCav

Les trois composantes sont équivalentes entre les deux capteurs, ce qui est attendu compte tenu de leur proximité et de leur disposition symétrique sur l'ouvrage. La composante

transversale des deux capteurs ne présente pas de tendance nette ou de changement dans les mouvements quotidiens.

La composante longitudinale des deux capteurs présente des variations quotidiennes d'amplitude (crête à crête) comprise entre 5 cm et 10 cm, et des variations plus lentes. En raison de la durée du jeu de données (5 mois), il est difficile de les qualifier de saisonnières comme pour celles observées sur le pont de Brotonne étant donné qu'il n'est pas possible de vérifier un cycle annuel.

La composante verticale des deux capteurs présente quant à elle des variations quotidiennes comprises entre 10 cm et 15 cm. Surtout, elle est très fortement corrélée avec les déplacements longitudinaux. Pour le vérifier, la Figure III-63 représente les déplacements verticaux du capteur TCam en fonction de ses déplacements longitudinaux.

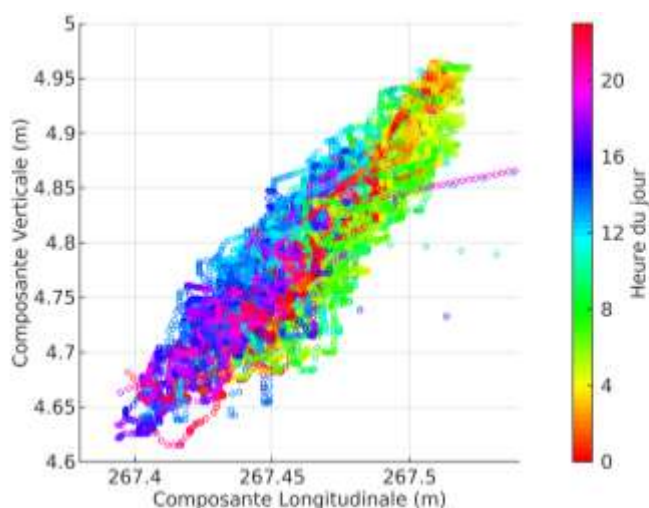


Figure III-63 Corrélation des déplacements verticaux et longitudinaux du capteur TCam

Les mouvements longitudinaux et verticaux de la travée centrale sont en effet imputables aux effets thermiques de l'ouvrage. L'augmentation de la température du tablier entraîne sa dilatation, et donc des déplacements longitudinaux (éloignement du massif d'ancrage de la rive droite), tandis que la dilatation des câbles et suspentes entraîne le rapprochement des pylônes et un abaissement du tablier. Tous ces éléments étant métalliques, leur inertie est donc proche, et les composantes par conséquent fortement corrélées. La corrélation (coefficient de Pearson) aux moyennes de températures T_t^{moy} , T_c^{moy} , et T_e^{moy} permet de vérifier cette relation (Tableau III-4). Les déplacements longitudinaux sont très fortement anticorrélés à T_t^{moy} et T_e^{moy} , confirmant les mouvements liés à la température globale de l'ouvrage, tandis que les déplacements verticaux sont plus fortement anticorrélés à T_c^{moy} , attestant du rôle de la dilatation des câbles dans les mouvements verticaux du tablier. La comparaison entre les déplacements de TCam et T_e^{moy} (très forte anticorrélation pour les deux composantes) est représentée dans la Figure III-64. Globalement, la corrélation demeure légèrement plus faible sur la composante verticale, celle-ci étant également affectée par le trafic sur le tablier.

Capteur	Composante	T_t^{moy}	T_c^{moy}	T_e^{moy}
TCam	Longitudinale	-0,98	-0,86	-0,97
TCam	Verticale	-0,90	-0,92	-0,91
TCav	Longitudinale	-0,98	-0,85	-0,97
TCav	Verticale	-0,86	-0,92	-0,87

Tableau III-4 Coefficients de Pearson entre les déplacements de TCam et TCav avec les moyennes des sondes de température

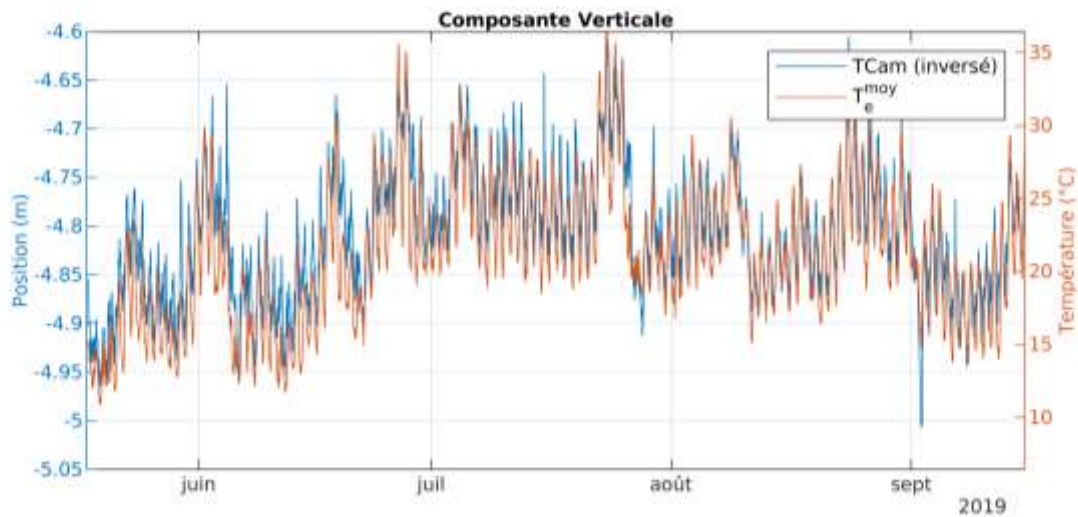
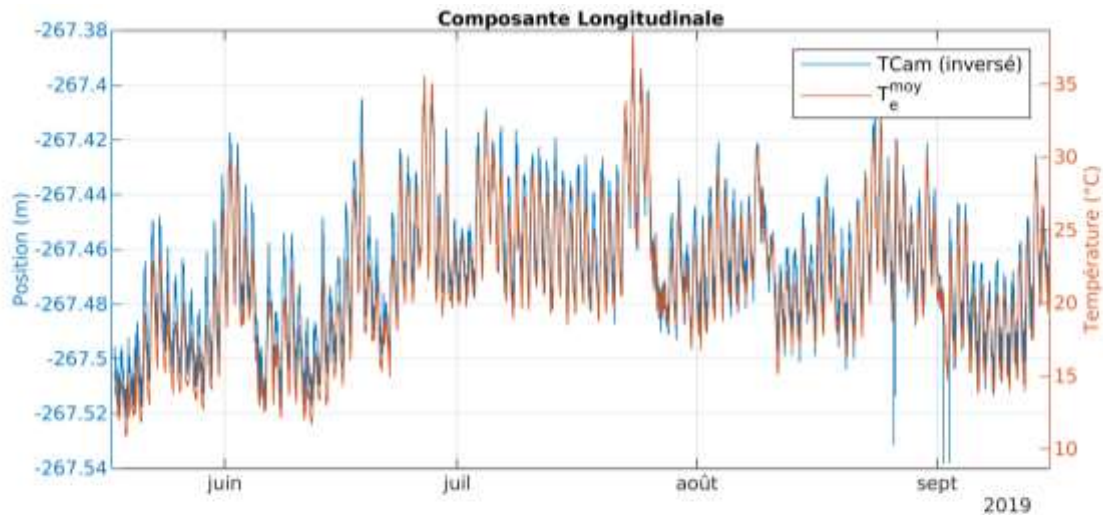


Figure III-64 Comparaison des déplacements de TCam avec la température moyenne des sondes externes

Après avoir étudié une paire de capteurs situés sur la travée centrale de l'ouvrage, on propose d'étudier les séries de capteurs situées sur les deux travées latérales. Les capteurs TRDam et TRDav sont situés au centre de la travée droite, jointive de la travée centrale ; tandis que les capteurs TRGam et TRGav sont situés au centre de la travée gauche, disjointe. Les travées droite et gauche sont symétriques, avec des points d'ancrages opposés. Par conséquent, des déplacements similaires sont attendus sur la composante verticale, et opposés sur la composante longitudinale. L'étude des séries temporelles des capteurs TRDam et TRGam permet de confirmer les comportements attendus (Figure III-65).

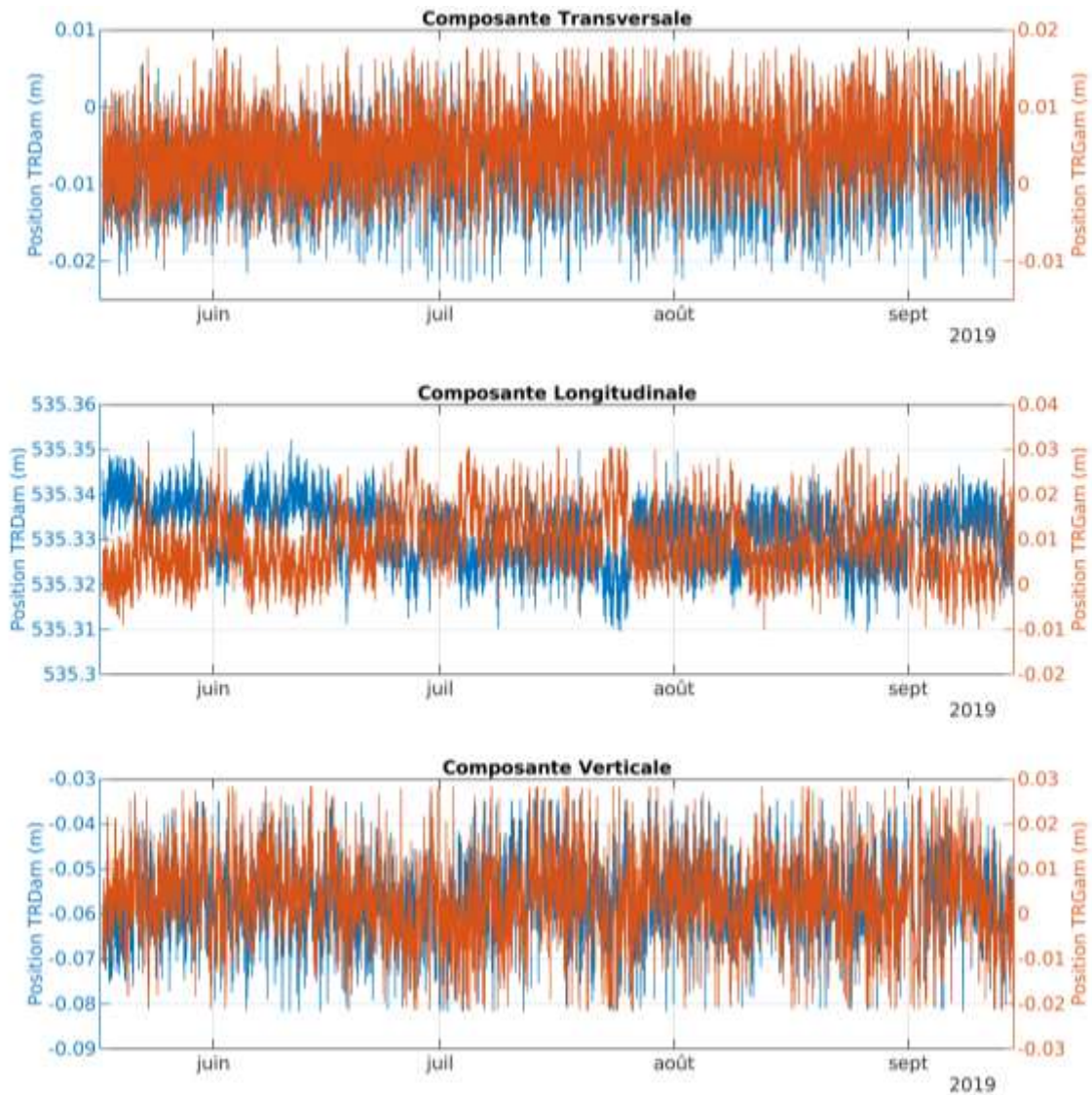


Figure III-65 Séries temporelles TRDam et TRGam

A la différence des capteurs TCam et TCav, la composante verticale n'est pas corrélée avec la composante longitudinale pour les capteurs des travées gauche et droite (Figure III-66). Cette différence s'explique par deux phénomènes : la plus faible portée des poutres de rigidité, et au fait que l'allongement des câbles (ancrés aux extrémités de l'ouvrage) se concentre au niveau de la travée centrale. Les effets thermiques sont donc moindres sur les composantes verticales de ces capteurs.

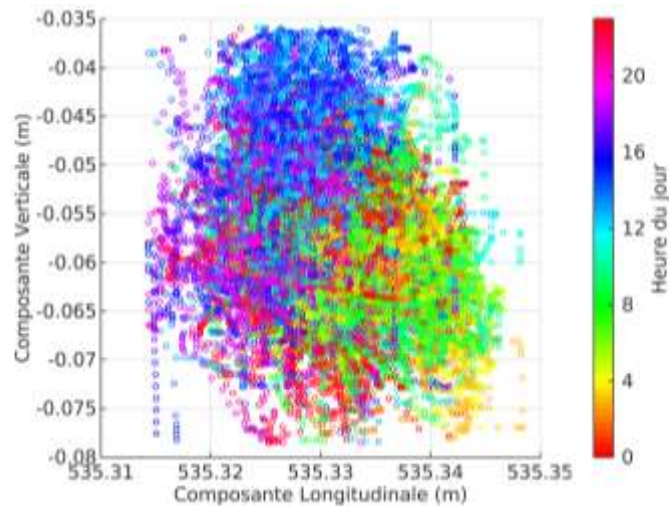


Figure III-66 Comparaison des déplacements verticaux et longitudinaux du capteur TRDam

Il est possible de valider cette hypothèse en comparant les déplacements verticaux des cinq capteurs situés du côté amont de la chaussée, ceux-ci étant représentés sous forme normalisée dans la Figure III-67. Comme observé sur les tandems sélectionnés précédemment, seuls les capteurs situés sur la travée centrale présentent un comportement pouvant être corrélé aux données des sondes de température.

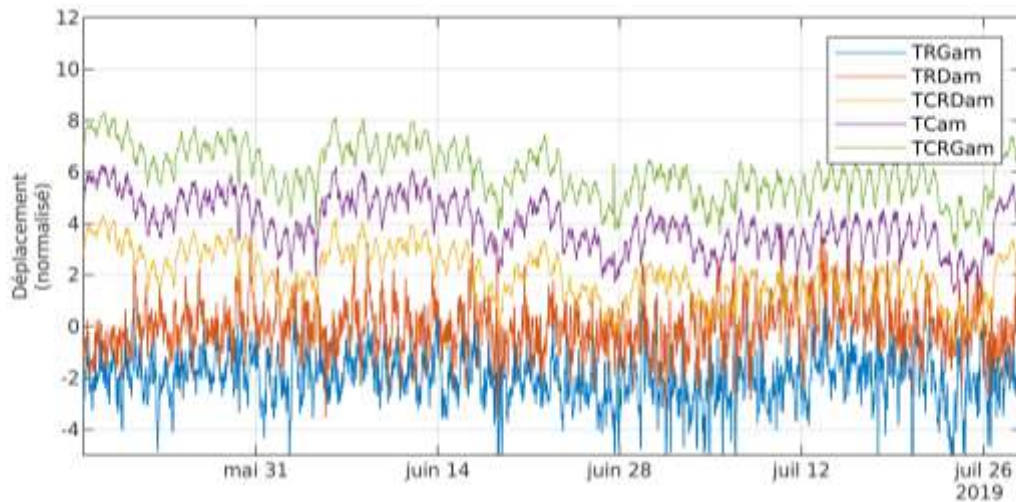


Figure III-67 Comparaison des déplacements verticaux (normalisés) des capteurs du tablier

Afin de vérifier le suivi de la réponse thermique le long du tablier, les déplacements longitudinaux normalisés enregistrés par ces cinq capteurs sont représentés dans la Figure III-68. Les déplacements des capteurs sont fortement corrélés (ou anticorrélés pour le TRGam), en accord avec la nature linéaire des phénomènes de dilatation thermique. Les capteurs TRGam et TRDam apparaissent comme significativement plus bruités : ceux-ci étant plus proches de leur point d'ancrage, l'amplitude des mouvements et donc le rapport signal sur bruit y sont plus faibles.

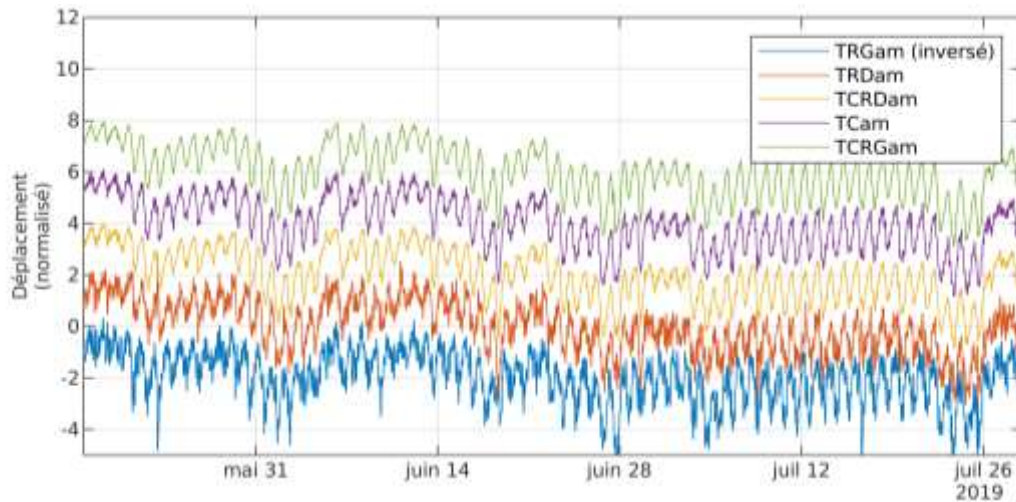


Figure III-68 Comparaison des déplacements longitudinaux (normalisés) des capteurs du tablier

Dans une approche similaire à ce qui a été réalisé sur les données du pont de Brotonne (Paragraphe III.2.3.2, Figure III-30), l'amplitude des séries temporelles a été calculée (différence entre le 1^{er} et le 99^{ème} percentile) pour le signal complet et la composante lente des différents capteurs sur le tablier. Ces amplitudes sont comparées à la distance des capteurs au point d'ancrage correspondant à leur travée (Figure III-69). Le capteur TRDav n'a pas été inclus en raison de coupures trop importantes dans les données.

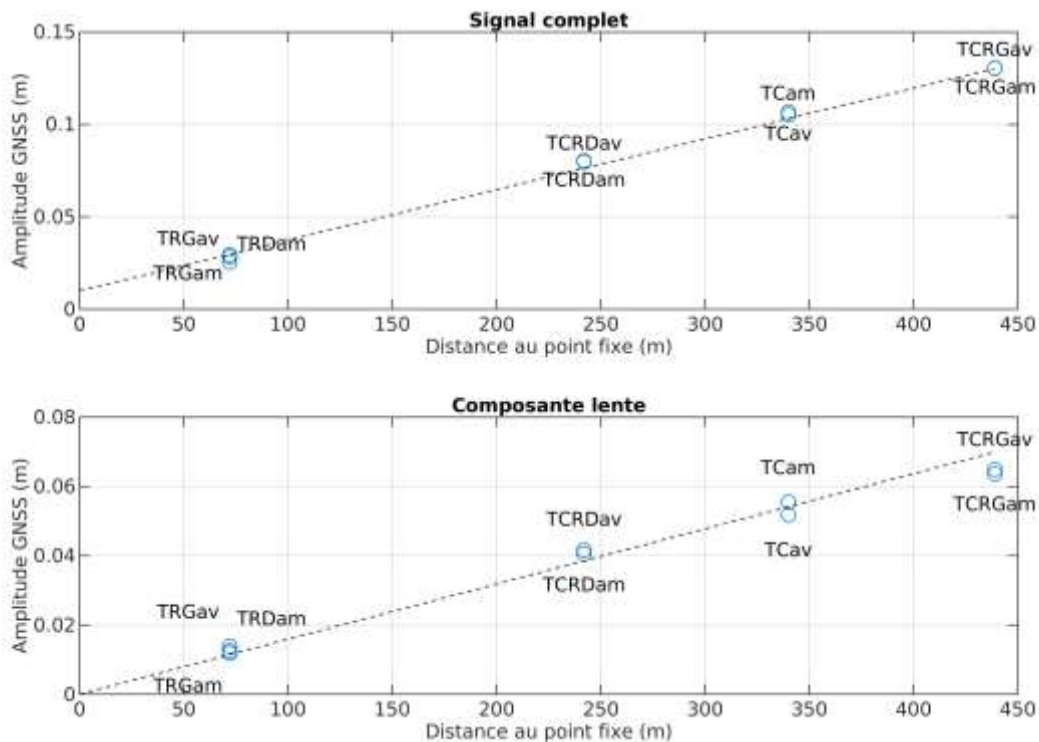
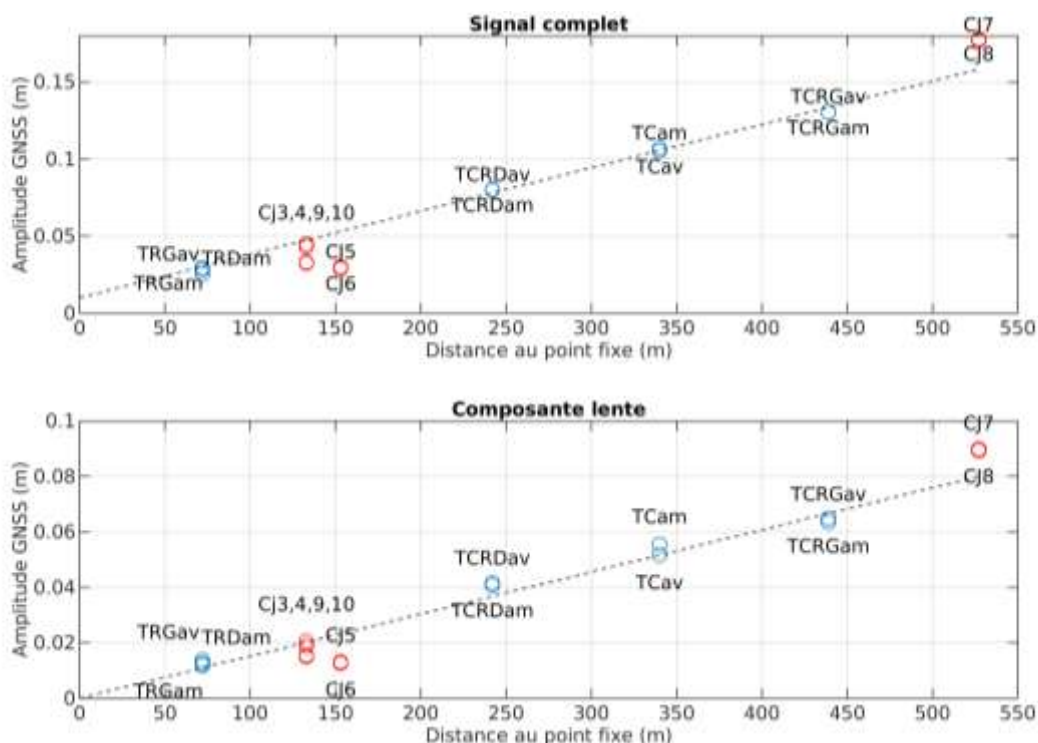


Figure III-69 Amplitude des déplacements longitudinaux GNSS sur le tablier du pont d'Aquitaine

Similairement à ce qui a été observé sur le pont de Brotonne, il existe une relation linéaire entre la distance au point fixe et l'amplitude des mouvements. La relation linéaire du signal complet comporte une ordonnée à l'origine pouvant être attribuée au bruit GNSS et des effets à plus court terme (gradients locaux, chargement de l'ouvrage). Cette ordonnée à l'origine est supprimée en utilisant la composante lente des signaux. Cette relation confirme l'aptitude des capteurs déployés à suivre le comportement thermique de l'ouvrage le long de son tablier, aussi bien sur le profil des séries que les amplitudes estimées.

Une validation supplémentaire peut être réalisée en comparant ces amplitudes aux mesures des capteurs de déplacement situés sur les pylônes. Le même traitement est appliqué sur les capteurs Cj3, Cj4, Cj5, Cj6, Cj7 et Cj8, et les résultats sont comparés dans la Figure III-70.



Globalement, les résultats obtenus par les capteurs de déplacement sont en accord avec les déplacements observés par GNSS. Quelques variations peuvent être notées dans les mesures des capteurs laser :

- les déplacements mesurés par les capteurs Cj9 et Cj10, situés du côté gauche du pylône gauche, sont plus faibles que la tendance estimée par GNSS ;
- les déplacements mesurés par les capteurs Cj7 et Cj8, pourtant sur le même pylône, sont plus forts que la tendance GNSS ;
- les déplacements observés par les capteurs Cj5 et Cj6 sont plus faibles que ceux de Cj3 et Cj4, pourtant sur le même pylône et le même segment jointif de route.

Ces différences peuvent être imputées aux mouvements des pylônes. En cas de mouvements longitudinaux des pylônes au niveau des travées, les mesures des capteurs de déplacement se retrouvent affectées (Figure III-71), à la différence des mesures GNSS. Ce phénomène met en avant l'intérêt du positionnement par satellites, les capteurs GNSS pouvant être plus facilement exploités pour mettre en avant la relation linéaire entre les déplacements.

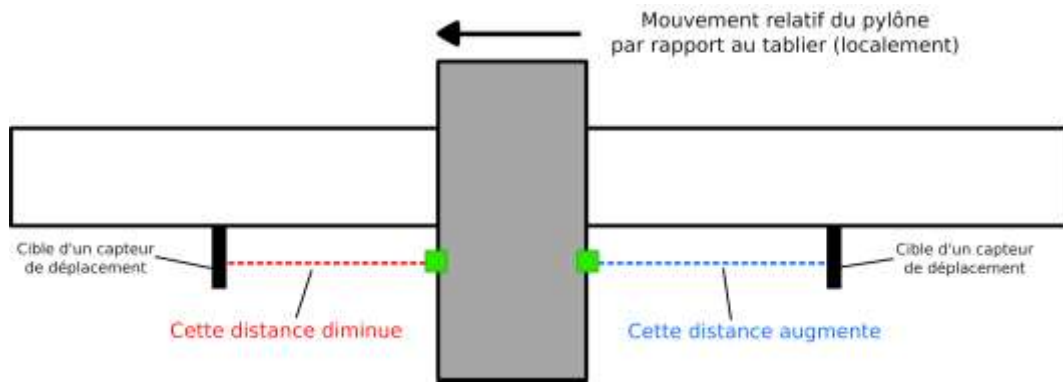


Figure III-71 Impact du déplacement des pylônes sur les mesures des capteurs de déplacement

III.3.4.2. COMPORTEMENT DES PYLONES

Les pylônes ont été équipés au total de deux paires de capteurs : PRDam et PRDav sur le pylône côté rive droite, PRGam et PRGav sur le pylône côté rive gauche (Figure III-72).

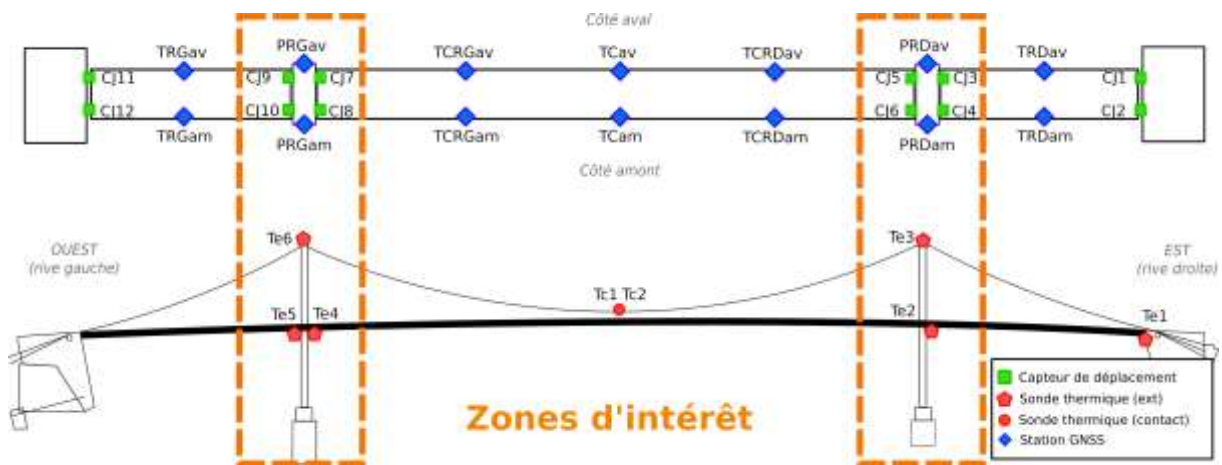


Figure III-72 Identification des capteurs installés sur les pylônes du pont d'Aquitaine

Les séries temporelles de plusieurs d'entre eux présentent néanmoins des coupures importantes (trois semaines pour PRGav, un mois pour PRDam, presque trois mois pour PRGam). En raison de la symétrie de l'ouvrage, des comportements similaires sont attendus sur les composantes transversales et verticales, et opposés sur la composante longitudinale. Les séries temporelles des capteurs PRDav et PRGav, situés du côté aval au sommet des pylônes rive droite et rive gauche, respectivement, sont représentées dans la Figure III-73.

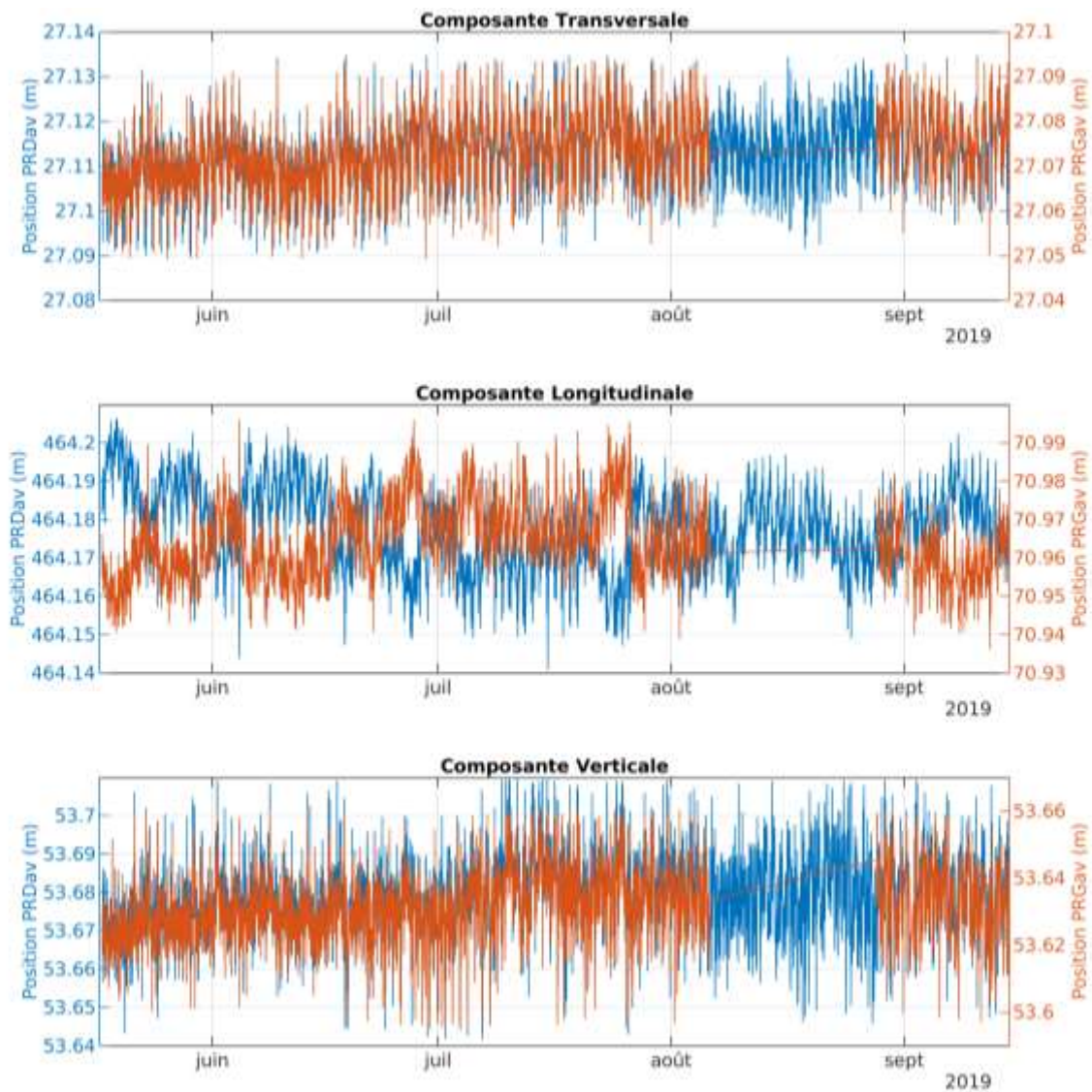


Figure III-73 Séries temporelles des capteurs PRDav et PRGav

Comme attendu, les déplacements transversaux et verticaux des deux capteurs sont pratiquement identiques, tandis que les mouvements longitudinaux présentent une relation anticorrélée. Les deux séries présentent un coefficient de Pearson global de $-0,75$, traduisant une anticorrélation nette. Les nombreuses interruptions dans les données des capteurs limitent l'étude de l'évolution de la corrélation par intervalles quotidiens ou hebdomadaires (Figure III-74, Figure III-75). Les journées et semaines apparaissent globalement comme anticorrélées, avec des valeurs plus faibles pour les périodes avec de plus faibles oscillations. La présence de mouvements longitudinaux confirme l'hypothèse faite dans le Paragraphe III.3.4.1 pour expliquer les observations faites sur les capteurs de déplacement laser.

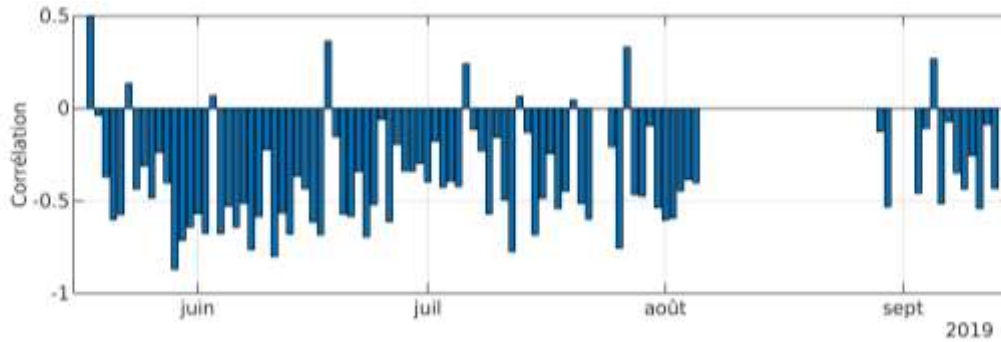


Figure III-74 Coefficient de Pearson quotidiens entre les déplacements longitudinaux des capteurs PRDav et PRGav

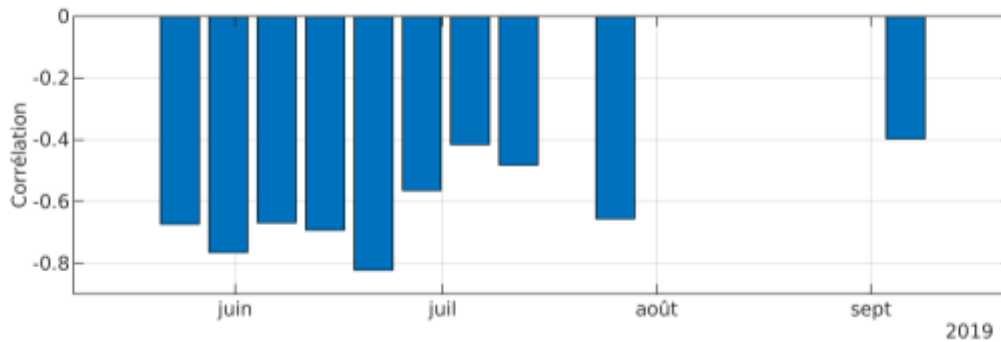


Figure III-75 Coefficient de Pearson hebdomadaires entre les déplacements longitudinaux des capteurs PRDav et PRGav

Afin d'identifier la nature thermique des mouvements, les coefficients de Pearson sont calculés entre les mouvements des capteurs PRDav et PRGav et les températures T_t^{moy} , T_c^{moy} , et T_e^{moy} (Tableau III-5).

Capteur	Composante	T_t^{moy}	T_c^{moy}	T_e^{moy}
PRDav	Transversale	0,65	0,49	0,64
	Longitudinale	-0,84	-0,85	-0,85
	Verticale	0,19	0,04	0,19
PRGav	Transversale	0,66	0,52	0,66
	Longitudinale	0,79	0,86	0,80
	Verticale	0,19	0,05	0,18

Tableau III-5 Coefficients de Pearson entre les déplacements de PRDav et PRGav avec les moyennes des sondes de température

Les composantes longitudinales présentent une forte relation avec la température : ce comportement peut s'expliquer par les mouvements des travées, « poussant » les pylônes avec leur dilatation. Les composantes transversales apparaissent comme modérément corrélées à la température. Ces relations peuvent s'expliquer par un phénomène d'échauffement différentiel des pylônes similaire à celui observé sur le pont de Brotonne : l'ouvrage étant orienté est-ouest, les pylônes voient leur flanc sud chauffé par le soleil, entraînant des déplacements dans l'axe nord-sud (et donc transversaux). Aucune estimation de gradient dans le matériau des pylônes n'est disponible, mais les variations de températures quotidiennes permettent de rendre partiellement compte de ce phénomène d'échauffement en surface, d'où la corrélation modérée détectée. Enfin, la composante verticale des deux capteurs n'apparaît pas corrélée avec les données de température. Les mouvements verticaux des pylônes peuvent être principalement imputés à la dilatation thermique de leur béton et éventuellement à la charge de l'ouvrage, mais aucune mesure de référence n'est disponible pour ces informations.

Dans une optique similaire à ce qui a été réalisé sur le tablier du pont de Brotonne (Paragraphe III.2.3.4), on propose de comparer la moyenne des séries temporelles acquises pour le capteur PRDav sur la tranche horaire de 4h à 6h du matin. Celles-ci sont comparées à la

composante lente de la température T_t dans la Figure III-76. Comme observé sur les séries temporelles complètes, la composante longitudinale apparaît logiquement anticorrélée à la composante lente de T_t . L'interprétation des deux autres composantes est un peu plus compliquée : les deux laissent apparaître une légère tendance saisonnière, avec une augmentation faible sur les mois de juin juillet, avant une certaine stabilité. Néanmoins, l'intervalle étudié n'étant que de 4 mois, il est en l'état difficile de relier ces mouvements à des variations saisonnières de température.

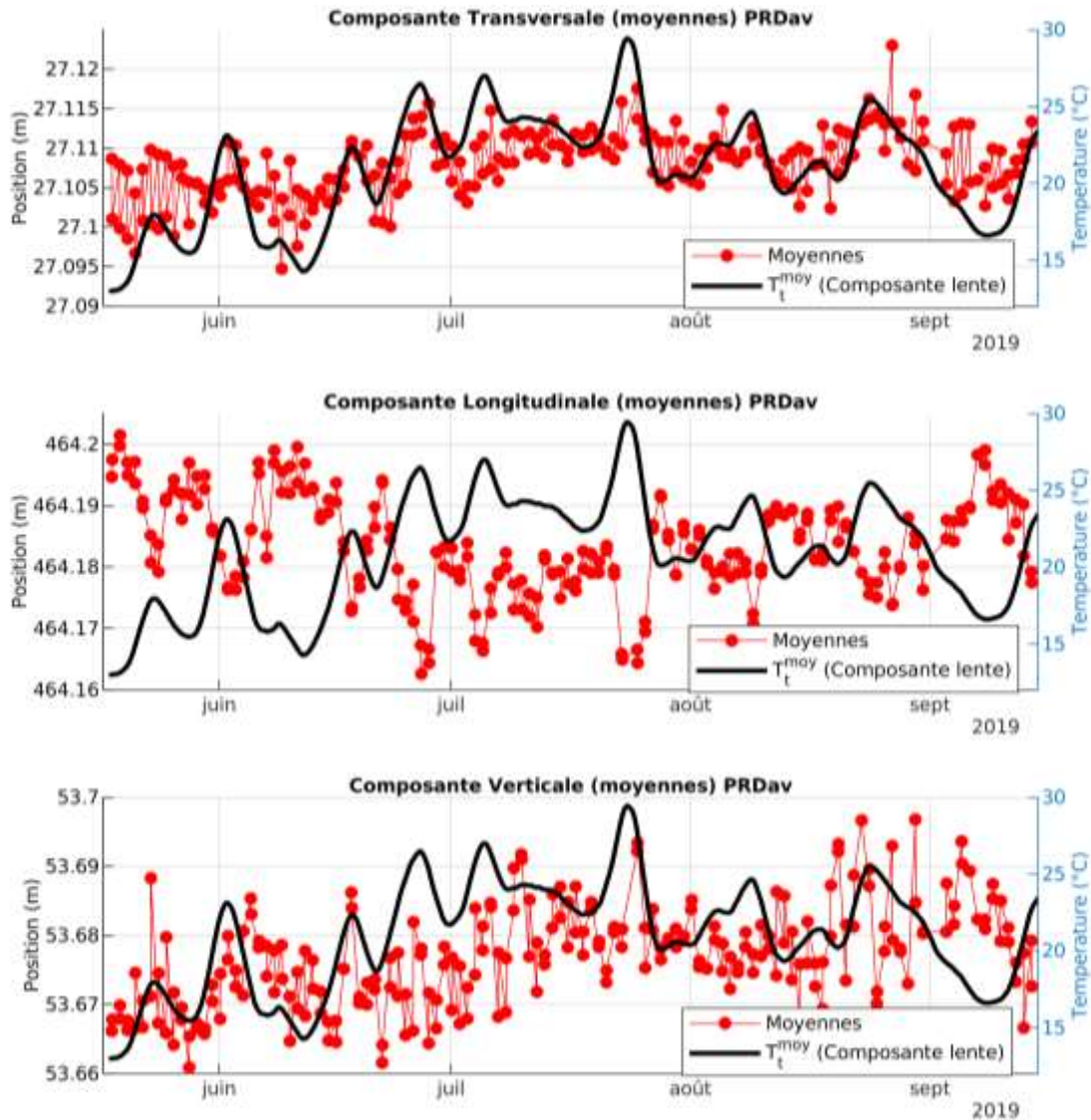


Figure III-76 Comparaison des déplacements du capteur PRDav entre 4h et 6h du matin avec la moyenne des températures de contact

III.3.5. ANALYSE DU COMPORTEMENT GLOBAL DE L'OUVRAGE

Il ressort qu'en accord avec les observations faites sur le pont de Brotonne, les capteurs GNSS à bas coût déployés sur le pont d'Aquitaine se sont avérés efficaces pour l'identification des déplacements des éléments caractéristiques de l'ouvrage. Les mouvements du tablier ont pu être reliés à la réponse thermique de l'ouvrage, et la comparaison aux capteurs traditionnels a permis de mettre en avant l'intérêt du positionnement absolu, les GNSS mettant plus aisément en avant la relation linéaire entre les déplacements observés que les capteurs traditionnels.

Afin d'étudier la réponse globale observée sur l'ouvrage, les cartes de corrélation entre capteurs GNSS sont réalisées avec les séries complètes (Figure III-77) et avec les composantes lentes et rapides (Figure III-78).

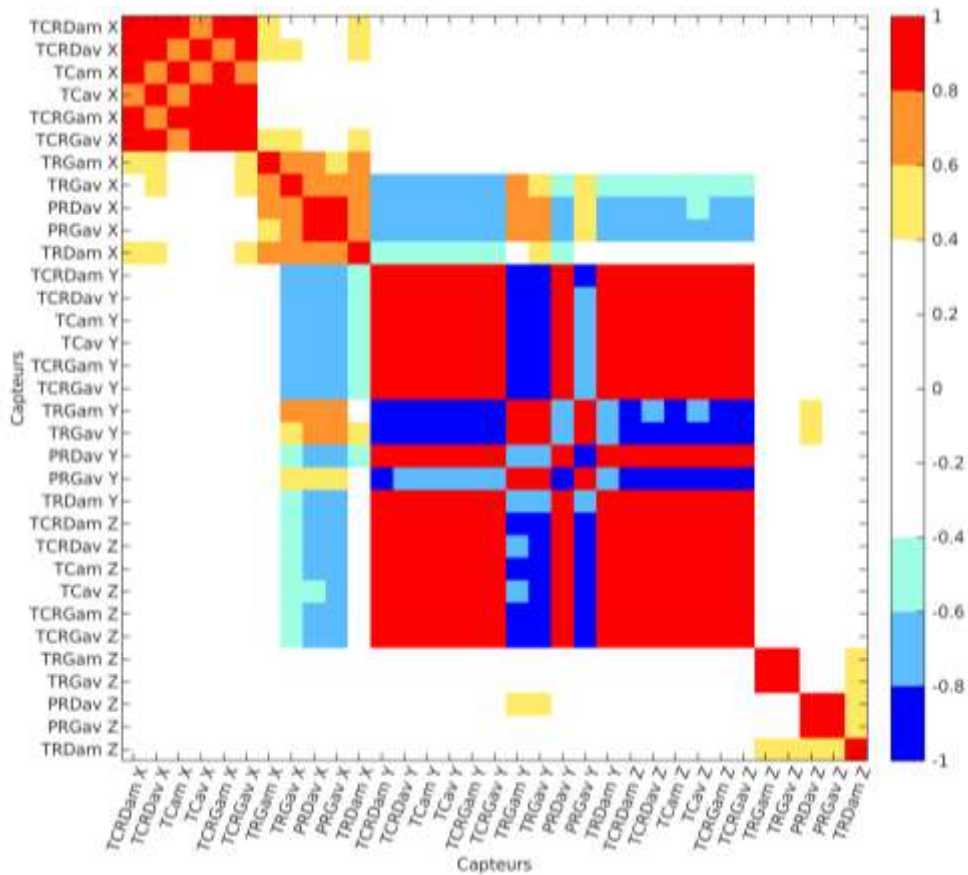


Figure III-77 Carte de corrélation des capteurs GNSS du pont d'Aquitaine

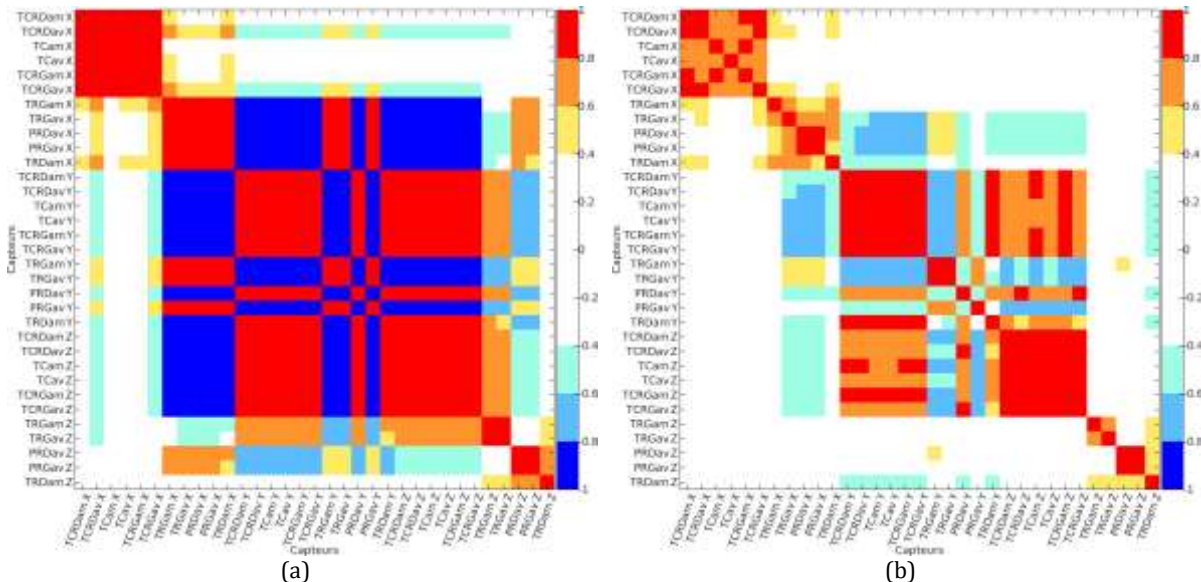


Figure III-78 Cartes de corrélation des composantes lentes (a) et rapides (b) des séries GNSS du pont de Brotonne

A l'instar de ce qui a été observé sur le pont de Brotonne, à partir des corrélations entre les séries complètes (Figure III-77), plusieurs groupes de composantes corrélées se distinguent :

- un groupé très fortement corrélé composé des composantes longitudinales de l'ensemble des capteurs et des composantes verticales des capteurs sur la travée centrale (TCRDam, TCRDav, TCam, TCav, TCRGam et TCRGav). Ce groupe illustre les mouvements liés à la dilatation thermique de l'ouvrage. Comme observé dans le paragraphe III.3.4.1, les déplacements verticaux de la travée centrale sont fortement corrélés aux déplacements longitudinaux ;

- un groupe composé des déplacements transversaux sur les travées externes et les pylônes. Ce groupe est également modérément corrélé au groupé précédent. Les mouvements qui y sont observés peuvent être attribués à des effets thermique ayant une inertie différente du groupe précédent (cf. paragraphe III.3.4.2) ;
- un groupe constitué des composantes transversales des capteurs situés sur la travée centrale : on remarquera le comportement indépendant dans les composantes transversales de la travée centrale par rapport aux travées latérales.

L'étude des corrélations entre les composantes lentes et rapides des capteurs (Figure III-78) permet de mettre en avant le rôle des effets saisonniers (fortes corrélations sur les composantes lentes). Surtout, à la différence du cas du pont de Brotonne, une majorité des corrélations sont conservées (bien qu'amoindries) sur les composantes rapides. Plusieurs facteurs expliquent cette différence entre les deux ouvrages :

- il y a une plus forte redondance dans les capteurs du pont d'Aquitaine, ceux-ci étant tous installés par paires. Néanmoins, le pont de Brotonne comporte lui aussi des groupes de capteurs installés sur des éléments communs (quatre capteurs sur le viaduc d'accès, deux paires sur la culée sud, une paire sur le joint viaduc/tablier, une paire au centre du tablier), et peu de groupes sont visibles sur les composantes rapides ;
- les mouvements observés sur le pont d'Aquitaine ont globalement une plus forte amplitude, améliorant le ratio signal sur bruit ;
- à l'exception des massifs d'ancrage, le pont d'Aquitaine est un ouvrage entièrement métallique. En plus de l'inertie thermique plus faible de l'acier par rapport au béton, les différents éléments de l'ouvrage (tablier, pylônes, suspension) ont des inerties plus proches. Les réponses des différents éléments ont donc un déphasage faible.

Afin de visualiser les relations entre les déplacements et les températures de l'ouvrage, les cartes de corrélation entre les données thermiques et les déplacements GNSS sont représentées dans la Figure III-79.

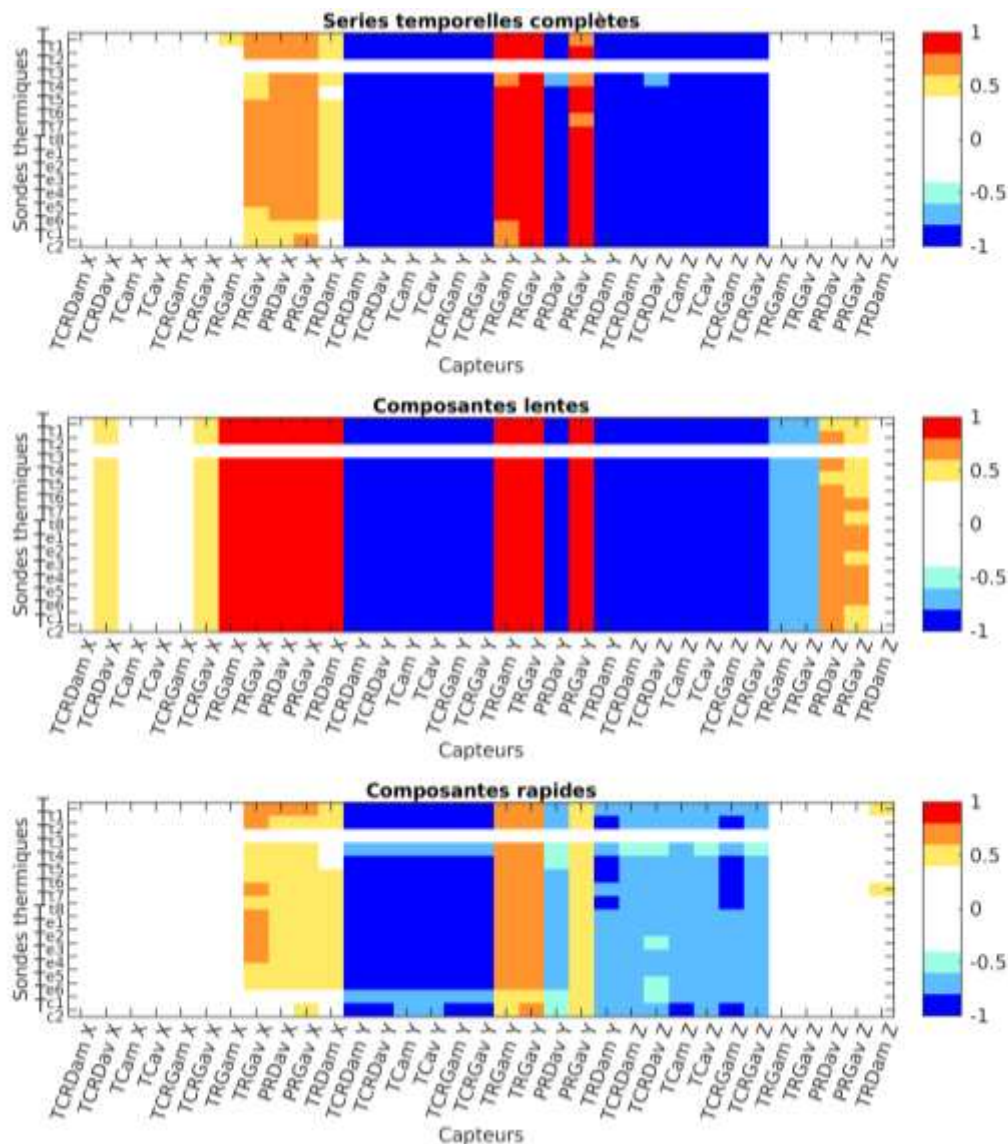


Figure III-79 Cartes de corrélation GNSS/températures du pont d'Aquitaine

Les résultats sont en accord avec les observations faites précédemment : certains déplacements (les deux premiers groupes discernés) sont fortement corrélés à toutes les températures, tandis que les déplacements transversaux de la travée centrale et les déplacements verticaux des piles et travées latérales ne peuvent être reliés à des températures.

A l'instar de ce qui a été réalisé sur le pont de Brotonne, une analyse en composantes principales est appliquée sur l'ensemble des séries GNSS. Les quatre premières composantes sont étudiées (Figure III-80).

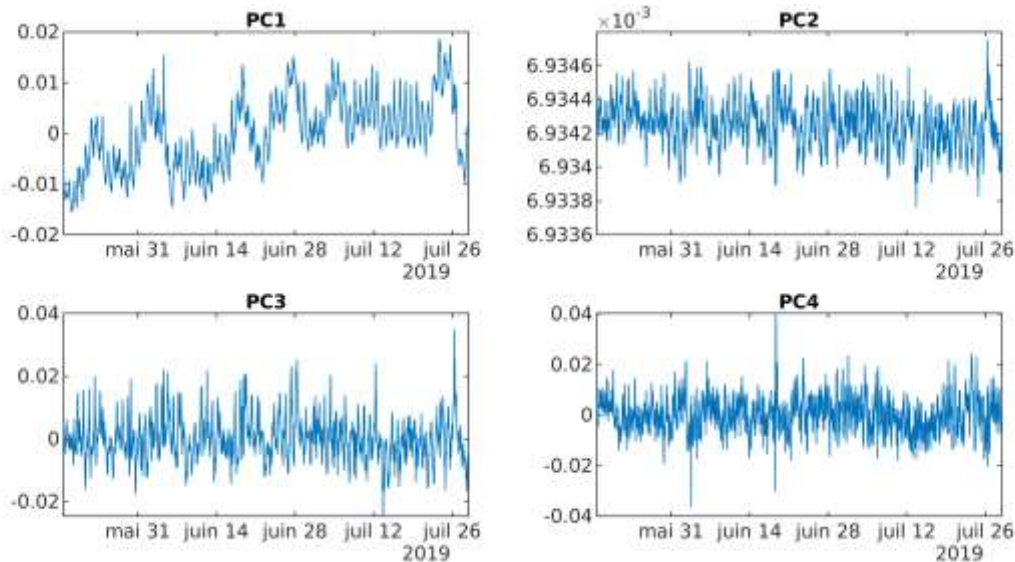


Figure III-80 Composantes principales PC1, PC2, PC3 et PC4 des séries GNSS du pont d'Aquitaine

Après une recherche à l'aide des fonctions de corrélation, seule la première composante principale peut être directement reliée à T_e^{moy} (Figure III-81), et correspond aux mouvements liés à la dilatation thermique du tablier (mouvements longitudinaux et verticaux). Il s'agit d'une composante dominante sur l'ensemble des observations du réseau GNSS, de nombreux capteurs étant fortement corrélés à T_e^{moy} . Pour les autres composantes, la difficulté à les relier à des phénomènes thermiques peut s'expliquer par le fait que la plupart des mesures de températures sont corrélées entre elles. Comme observé dans la Figure III-79, si beaucoup de capteurs sont fortement corrélés à la plupart des sondes de température, d'autres ne sont corrélés à aucune. On ne dispose donc pas de l'information nécessaire pour identifier le phénomène source, qu'il s'agisse d'un effet thermique ou extérieur (trafic, vent).

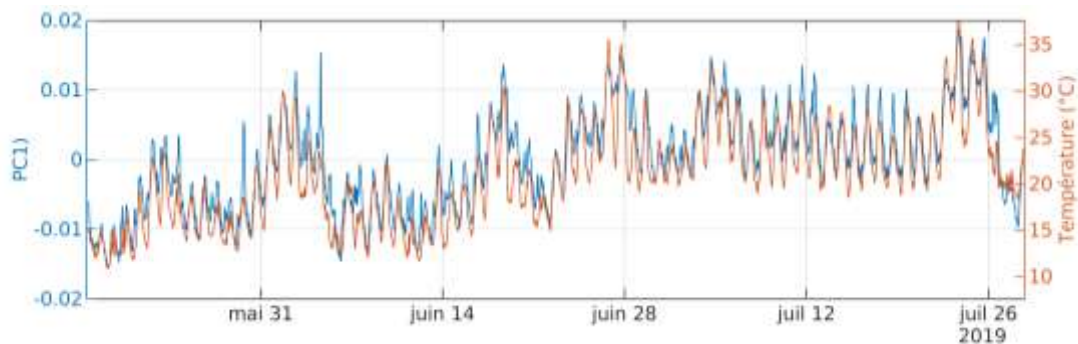


Figure III-81 Comparaison entre la première composante principale des données du pont d'Aquitaine et la température moyenne des sondes externes

III.4. SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

Dans ce chapitre, les données issues de l'instrumentation de deux ouvrages d'art par des réseaux de capteurs GNSS à bas coût ont été utilisées pour valider leur utilisation pour des applications de surveillance structurale.

L'étude de la disponibilité des données a permis de mettre en avant les faiblesses d'une technologie encore jeune dans le domaine de la surveillance, cumulant les pertes de données liées à la liaison sans fil entre capteurs et celles liées au calcul GNSS avec du matériel modeste (GPS monofréquence). L'analyse des observations collectées par le réseau et la comparaison à un

traitement réalisé avec RTKLib a permis d'observer que la majorité des pertes étaient imputables au traitement GNSS, et de valider la performance du logiciel de calcul (G3GPS) utilisé.

L'étude de capteurs groupés par parties d'ouvrages et la comparaison à des données de capteurs de référence ont permis de tester la performance des capteurs et de confirmer l'exploitabilité des séries temporelles obtenues. Sur le pont de Brotonne, la réponse thermique de l'ouvrage au niveau du tablier principal, du viaduc d'accès et des pylônes a pu être identifiée et reliée à des estimations de la température moyenne de l'ouvrage et à des gradients localisés. Sur le pont d'Aquitaine, les mouvements des trois travées et des pylônes ont pu être identifiés, les mouvements des travées pouvant être directement reliés aux données thermiques disponibles et à des mesures acquises par des capteurs de déplacement traditionnels. Leur potentiel a été également mis en avant à travers l'étude de grandeurs caractéristiques (écartement entre deux pylônes, taille d'un élément de chaussée) sur le pont de Brotonne, et le suivi de mouvements longitudinaux absolus sur le pont d'Aquitaine, ces grandeurs étant autrement complexes à suivre par des méthodes traditionnelles.

L'étude globale des corrélations linéaires entre les données GNSS et thermiques a permis de mettre en valeur d'une part les nombreuses relations existantes entre les différents mouvements observés, et d'autre part la nature différente des ouvrages et de leur instrumentation. Le pont de Brotonne présente une inertie thermique plus forte et plus variable entre ses éléments (câbles métalliques, tablier et pylônes en béton), avec des relations plus faibles entre les différents capteurs, mais dispose de données thermiques plus variées grâce à l'instrumentation du béton en plusieurs profondeurs. Le pont d'Aquitaine présente de plus nombreuses relations linéaires entre capteurs grâce à la symétrie de la disposition des capteurs et une inertie thermique plus faible, mais dispose de données thermiques moins variées malgré une plus grande dispersion.

Dans les deux cas, la présence de relations linéaires entre les séries temporelles acquises laisse entrevoir la possibilité de formuler des modèles de comportement pour les points instrumentés. En l'absence de modèles physiques détaillés disponibles, l'utilisation d'outils par apprentissage est une piste pertinente pour établir des modèles prédictifs pour les différents capteurs. Ces modèles auront pour objectif, après validation, de fournir un comportement de référence, en vue de détecter automatiquement d'éventuelles anomalies sur les séries temporelles.

IV. ANALYSE DES DONNEES DE RESEAUX DE CAPTEURS GNSS POUR LA DETECTION D'ANOMALIES

Les chapitres précédents ont permis d'évaluer les performances de solutions GNSS à bas coût en conditions expérimentales, puis lors d'un déploiement opérationnel sur deux ouvrages d'art. Un enjeu de l'exploitation des données issues de ces capteurs est de détecter des modifications du comportement d'un ouvrage instrumenté. Pour y parvenir, ce chapitre propose d'étudier le potentiel d'outils d'apprentissage pour proposer des modèles de régression des déplacements enregistrés par les réseaux de capteurs GNSS déployés sur ouvrages. Différents outils conventionnels sont considérés, comprenant notamment les modèles linéaires, autorégressifs, ainsi que des outils avancés comme les réseaux de neurones artificiels. Les performances sont comparées au travers d'une étude de sensibilité selon les entrées et l'intervalle d'apprentissage imposés. Une stratégie d'exploitation des modèles des différents capteurs est alors proposée afin d'aider à isoler les capteurs liés à une anomalie du signal enregistré.

IV.1. CONTEXTE

Une première grande famille des méthodes de recherche d'anomalie pour la surveillance structurale repose sur l'utilisation d'un modèle mécanique fin de la structure (méthodes *model-driven*, cf. Paragraphe I.2.1). Le recours à un modèle nécessite généralement une connaissance fine des différents éléments de l'ouvrage, des matériaux, et des données environnementales ou d'exploitation permettant l'établissement du modèle et sa vérification. Ce type de modèle, complexe à mettre en œuvre, est alors utilisé pour générer un comportement de référence des éléments de l'ouvrage ou à défaut normaliser les données obtenues.

Comme il a été souligné dans l'étude des données acquises par les réseaux Geocube du pont de Brotonne (Paragraphe III.2) et du pont d'Aquitaine (Paragraphe III.3), une partie des déplacements observés par les capteurs GNSS a pu être reliée à des phénomènes thermiques (dilatation des matériaux, gradients), ces derniers justifiant au moins partiellement les comportements enregistrés. Dans ce contexte, l'utilisation d'un modèle mécanique (Figure IV-1) apparaît comme une piste intéressante pour détecter des anomalies dans les données GNSS par comparaison entre les données enregistrées et les prédictions du modèle. Dans le cadre des deux ponts présentés dans le Chapitre III, l'utilisation de ce type de modèle n'a pas été possible. Par ailleurs, les données thermiques, environnementales ou d'exploitation disponibles dans cette étude ne permettent pas en l'état d'envisager la constitution de ce genre de modèle.



Figure IV-1 Fonctionnement d'un modèle mécanique prédictif des déplacements suivis par GNSS

Les méthodes basées uniquement sur des données de l'instrumentation sont considérées pour l'exploitation des données acquises sur les deux ouvrages. Ce constat est rejoint par le fait que, dans le contexte de ces travaux visant à prouver l'intérêt d'une instrumentation reposant sur des capteurs GNSS à bas coût, on ne cherche pas à recourir à l'établissement souvent complexe d'un modèle mécanique pour en exploiter les résultats. En parallèle, l'étude globale des données acquises sur les deux ponts étudiés a mis en avant les nombreuses relations de corrélation entre les données acquises par les capteurs GNSS sur chaque ouvrage. La présence de ces relations encourage à étudier la piste de modèles de régression entre les données des capteurs GNSS, éventuellement complétées par les données environnementales disponibles (Figure IV-2). Cette approche vise à pallier l'absence d'une connaissance fine du comportement mécanique de l'ouvrage en suivant une logique de causalité entre les conditions auxquelles est soumis un ouvrage, et les effets observés sur les capteurs. Autrement dit, un ensemble déterminé de conditions environnementales et d'exploitation entraîne une réponse donnée de l'ouvrage, qui se traduit par des déplacements observables par les capteurs GNSS. L'objectif est alors de procéder à l'apprentissage du comportement d'un capteur par rapport à la configuration des autres capteurs du réseau.



Figure IV-2 Fonctionnement d'un modèle de régression par apprentissage

La finalité de cette approche est de générer, quand cela est possible, un modèle de comportement pour chaque capteur du réseau, qui pourra alors être utilisé pour la détection d'anomalies. Pour y parvenir, plusieurs outils de régression par apprentissage sont considérés dans la suite de ce chapitre.

IV.2. OUTILS DE REGRESSION PAR APPRENTISSAGE

Ce paragraphe suivant présente plusieurs outils courants de régression par apprentissage. Un intérêt particulier est donné à la famille des réseaux de neurones artificiels, ceux-ci constituant une approche innovante et dont l'utilisation apparaît pertinente pour modéliser les relations souvent non-linéaires constatées dans le Chapitre III.

IV.2.1. MODELES LINEAIRES

Le modèle linéaire est un des outils de régression les plus simples (Bingham et al., [2010]; Izenman, [2013]; Rao et al., [1995]; Rencher et al., [2008]). Un modèle linéaire multivarié (*multivariate linear regression*, MLR) exprime une série temporelle cible $y(t)$ comme une combinaison linéaire à m entrées $x_i(t)$ ($i = 1, \dots, m$) avec les coefficients constants β_i , et un terme d'erreur $\varepsilon_{lin}(t)$. L'Eq. I-1 présente la formulation d'un modèle linéaire multivarié dans le cas d'une série discrète définie sur un intervalle de temps $[t_1, t_2, \dots, t_k]$.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad \text{Eq. IV-1}$$

avec :

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} y(t_1) \\ \dots \\ y(t_k) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 & x_1(t_1) & \dots & x_m(t_1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_1(t_k) & \dots & x_m(t_k) \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \vdots \\ \beta_m \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon(t_1) \\ \vdots \\ \varepsilon(t_k) \end{pmatrix}$$

La recherche des termes du vecteur $\boldsymbol{\beta}$ est le plus souvent réalisée par la méthode des moindres carrés (*least squares*, LS), qui vise à minimiser l'expression $\|\mathbf{Y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}\|^2$ (carrés des résidus), et permet d'exprimer les paramètres optimaux $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ en fonction des observations \mathbf{X} et \mathbf{Y} (Eq. IV-2) (Fox, [2015]; Rao et al., [2008]).

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{Y} \quad \text{Eq. IV-2}$$

La méthode des moindres carrés est néanmoins particulièrement sensible à la présence de points extrêmes ou aberrants n'ayant pas été retirés des séries temporelles utilisées. L'approche itérative des moindres carrés pondérés (*Weighted Least Squares*, WLS) vise à compenser cette faiblesse en introduisant des poids \mathbf{W} sur les observations en entrée du modèle (Huber, [2004]; Welsch, [1977]). Après une initialisation (généralement faite avec des poids égaux), les poids \mathbf{W}^l sont recalculés à chaque itération l , généralement à partir d'une fonction des résidus. Les paramètres $\boldsymbol{\beta}^{l+1}$ sont alors mis à jours (Eq. IV-3).

$$\hat{\beta}^{l+1} = (X'W^lX)^{-1}X'W^lY \quad \text{Eq. IV-3}$$

Le processus est alors répété itérativement jusqu'à convergence.

IV.2.2. MODELES AUTOREGRESSIFS ET MOYENNES MOBILES

Une autre approche est celle des modèles permettant d'exprimer une observation $y(t)$ comme fonction des observations précédentes $y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n)$. Les modèles de type ARMA(p,q) (*AutoRegressive Moving Average*) combinent des processus autorégressifs et de moyennes mobiles, exprimant $y(t)$ respectivement comme une combinaison linéaire des p observations précédentes, et comme les q fluctuations précédentes autour de sa moyenne (Box et al., [2015]; Choi, [2012]; Rojas et al., [2008]).

Les modèles ARMA ne sont cependant applicables que dans le cas de séries stationnaires, c'est-à-dire dont la moyenne et la variance sont constantes. L'étude des séries temporelles réalisée dans le Chapitre III montre que la majorité des données acquises ne respectent pas ces conditions. Les modèles ARIMA(p,d,q) (*AutoRegressive Integrated Moving Average*) introduisent une différenciation d'ordre d pour éliminer les tendances présentes dans la série temporelle étudiée (Harvey, [1990]; Shumway et al., [2000]). L'expression modèle ARIMA(p,d,q) d'une observation $y(t)$ est présentée dans l'Eq. IV-4, avec α_i et θ_j les paramètres des processus autorégressifs et en moyennes mobiles, respectivement, Δ^d la différenciation d'ordre d , et $\varepsilon(t)$ le résidu de $y(t)$.

$$\Delta^d y(t) = \sum_{i=1}^p \alpha_i \Delta^d y(t-i) + \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon(t-j) + \varepsilon(t) \quad \text{Eq. IV-4}$$

Les modèles de type ARMA/ARIMA ne réalisent la prédiction de $y(t)$ qu'à partir des observations précédentes. Or, il a été mis en avant dans le Chapitre III que la majorité des séries temporelles étudiées ici sont fortement affectées par les conditions environnementales et n'ont pas été normalisées. Surtout, l'objectif de cette étude est de proposer une approche de détection d'anomalies basée sur les relations entre les séries temporelles des différents capteurs. Pour cela, on propose d'utiliser les modèles exogènes ARIMAX(p,d,q) (*AutoRegressive Integrated Moving Average Exogenous*), qui intègrent un modèle linéaire des m observations $x_k(t)$ (Eq. IV-5) (G. Wang et al., [2003]).

$$\Delta^d y(t) = \sum_{i=1}^p \alpha_i \Delta^d y(t-i) + \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon(t-j) + \sum_{k=1}^m \beta_k x_k(t) + \varepsilon(t) \quad \text{Eq. IV-5}$$

L'apprentissage de ces modèles est aussi généralement réalisé par la technique des moindres carrés.

IV.2.3. MACHINES A VECTEURS SUPPORT

Les machines à vecteurs supports, ou séparateurs à vaste marge (SVM) forment une classe de techniques d'apprentissage avancées adaptées à des problèmes complexes ne pouvant être résolus avec les outils traditionnels (Müller et al., [1997]; Schölkopf, [1998]; Suykens, [2001]; Suykens et al., [1999]; L. Wang, [2005]). Les SVM ont été développés comme une généralisation des classifieurs linéaires, permettant de traiter de cas non-linéaires et à forte dimensionnalité. Initialement développés pour des problèmes de classification, leur utilisation s'est généralisée aux problèmes de régression.

Le traitement de problèmes non-linéaires par SVM revient à transformer l'espace dans lequel les données d'entrées sont contenues (espace à m dimensions pour m données d'entrée x_m) en un espace de plus grande dimension dans lequel il est supposé qu'une solution linéaire

existe. Cette transformation est réalisée à l'aide de fonctions noyaux (Hofmann, [2006]; Schölkopf, [2001]). Dans le cas d'une utilisation des SVM pour une régression, cela revient à exprimer $y(t)$ en fonction de $x(t)$ à l'aide d'un jeu de n transformations non-linéaires g_n prédéterminées, des poids ω_n , de biais b et de l'erreur $\varepsilon(t)$ (Eq. IV-6).

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i g_i(x(t)) + b + \varepsilon(t) \quad \text{Eq. IV-6}$$

IV.2.4. RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

L'étude présentée dans le Chapitre III a mis en avant plusieurs caractéristiques des relations entre les observations des différents capteurs pour les séries temporelles acquises sur les deux ouvrages instrumentés par réseaux de Geocubes :

- des relations de corrélation entre des capteurs instrumentant différentes parties des ouvrages, traduisant des relations partiellement linéaires ;
- des inerties différentes, se traduisant par un déphasage entre les mouvements quotidiens, notamment sur le pont de Brotonne ;
- des régimes quotidiens variables.

Dans ce contexte, les réseaux de neurones artificiels, par leur capacité à modéliser des comportements non-linéaires et variables, apparaissent comme des candidats pertinents et innovants pour proposer des modèles par apprentissage des déplacements observés par GNSS sur ouvrages.

IV.2.4.1. PRINCIPES ET FONCTIONNEMENT

Les réseaux de neurones artificiels (*Artificial Neural Networks*, ANN), aussi appelés perceptrons multicouches (*Multi Layer Perceptron*, MLP), constituent une famille large d'outils d'apprentissage polyvalents, pouvant être appliqués dans des approches supervisées ou non, et pour des applications de classification comme de régression (Du et al., [2013], [2014]; Hassoun et al., [1995]; Murtagh, [1991]).

Les ANN sont conçus à base de cellules appelés neurones, ou perceptrons (Figure IV-3) (Rosenblatt, [1958]; Stephen, [1990]). Un perceptron est une combinaison non-linéaire réalisée en plusieurs étapes : les entrées $x_m(t)$ sont combinées linéairement (poids w_i et une constante b_k pour un neurone numéroté k), et la résultante est injectée dans une fonction d'activation. Cette fonction d'activation peut remplir deux critères particuliers :

- la fonction d'activation n'a pas besoin d'être une fonction linéaire. Cela permet au perceptron d'être utilisé comme un outil de régression non-linéaire. Il est en revanche important de connaître la dérivée de cette fonction de transfert pour l'optimisation du réseau. On peut utiliser des fonctions type sigmoïde, tangente hyperbolique, ReLU, fonction d'Heaviside, etc...
- la fonction d'activation peut être une fonction à seuil, c'est-à-dire avec une sortie logique fixée à des valeurs comme 0 ou 1.

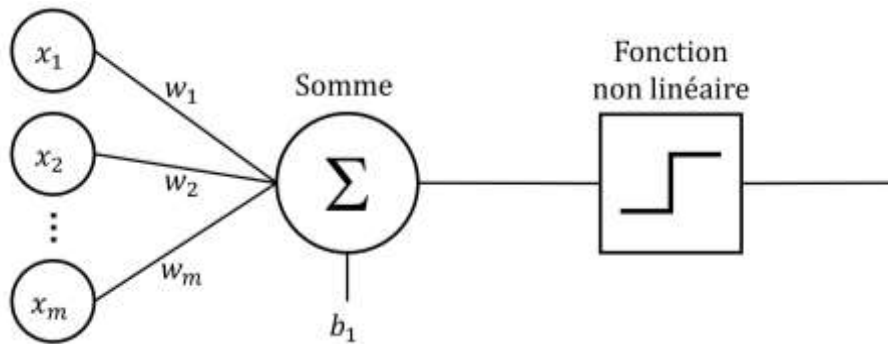


Figure IV-3 Schéma d'un neurone artificiel

Ces attributs permettent aux neurones d'ingérer et de produire des signaux aussi bien sous la forme de fonctions continues que de fonctions discontinues.

Les ANN mettent à profit les propriétés de ces cellules unitaires en les agencant sous la forme de réseaux dans lesquels elles sont disposées soit en parallèle (dans une même couche où elles reçoivent les mêmes entrées), soit en série (sur plusieurs couches, où les sorties d'une couche sont utilisées en entrée de la suivante). Cette imbrication permet aux ANN de modéliser des relations plus complexes que les outils traditionnels. Les ANN sont généralement construits de la façon suivante (Figure IV-4) :

- une couche d'entrée (*input layer*), dont les neurones ingèrent les entrées X du modèle. Dans des applications de régression, ces neurones servent généralement à normaliser les données. Cette couche comporte autant de neurones que d'entrées utilisées ;
- une ou plusieurs couche(s) cachée(s) (*hidden layers*), dont les neurones constituent le cœur du modèle par apprentissage. Pour un réseau à une couche cachée, tous les neurones du réseau sont en parallèle. Pour un réseau à deux couches cachées où plus, les neurones à partir de la deuxième couche ne reçoivent jamais de données réelles, seulement les sorties déjà transformées des couches précédentes. On parle d'apprentissage profond (*deep learning*) dans ce dernier cas ;
- une couche de sortie (*output layer*), qui recale les sorties de la couche précédente pour produire un modèle de la cible Y du modèle.

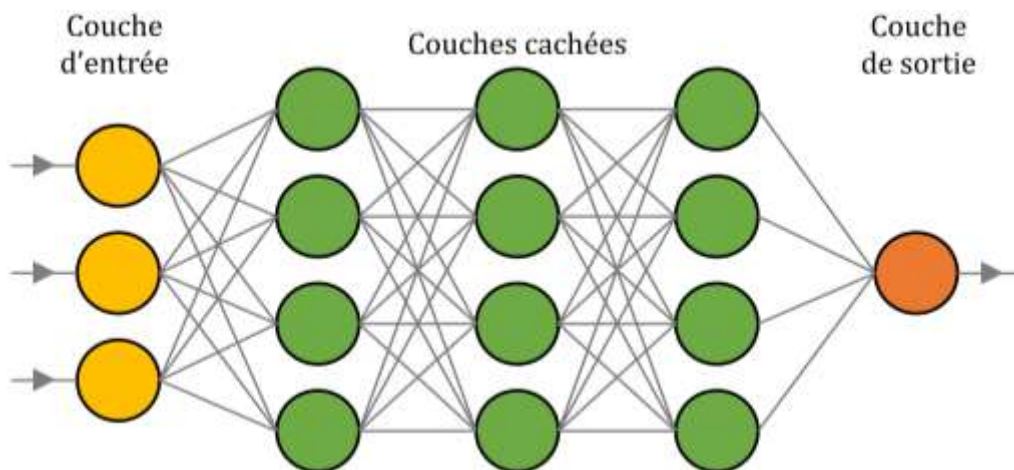


Figure IV-4 Schéma d'un réseau de neurones artificiels

Plus un réseau comporte de neurones et de couches, mieux il peut modéliser des relations complexes. Théoriquement, un ANN est capable d'approximer toute fonction continue sous condition qu'il dispose du nombre approprié de neurones. Cependant, tout problème ne peut être résolu simplement en augmentant le nombre de neurones du réseau. D'une part, l'augmentation

de la taille d'un réseau implique une augmentation drastique du nombre de paramètres (poids) à ajuster, nécessitant une augmentation du volume d'observations utilisées dans l'apprentissage. D'autre part, un nombre trop important de neurones entraîne le risque de surapprentissage (cf. Paragraphe IV.3.3.3). Globalement, les principaux facteurs limitants de l'utilisation de réseaux de neurones profonds sont liés à la réalisation de l'apprentissage.

IV.2.4.2. APPRENTISSAGE

Après la sélection de l'architecture d'un réseau (nombre et types de neurones, nombre de couches), l'apprentissage supervisé permet d'ajuster les poids w_i et b_0 des combinaisons linéaires des différents neurones. La méthode généralement utilisée pour les ANN est la rétropropagation du gradient (Goh, [1995]; Hecht-Nielsen, [1992]). Cette méthode consiste à optimiser une fonction-coût $C(w_1, \dots, w_i, b_1, \dots, b_j)$, dont la valeur est déterminée par l'écart entre la sortie d'un réseau et les observations sur un intervalle d'apprentissage. La fonction C peut être représentée comme un hyperplan de dimension égale au nombre de poids total ($i + j$) du réseau : l'optimisation revient à trouver le minimum de cet hyperplan. Le système étant complexe (dimension élevée, non-linéarité), la recherche du minimum passe par l'estimation du gradient local $\vec{\nabla}C$ (Eq. IV-7), et par l'ajustement des poids du réseau à partir de $\vec{\nabla}C$, ces poids étant généralement initialisés aléatoirement.

$$\vec{\nabla}C = \begin{pmatrix} \frac{\partial C}{\partial w_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial C}{\partial w_i} \\ \frac{\partial C}{\partial b_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial C}{\partial b_j} \end{pmatrix} \quad \text{Eq. IV-7}$$

Afin d'illustrer l'approche utilisée, on propose de s'intéresser dans la suite de ce paragraphe au cas simple d'un réseau à plusieurs couches mais avec un seul neurone par couche (Figure IV-5), et de se concentrer sur l'estimation des poids de la dernière couche L .

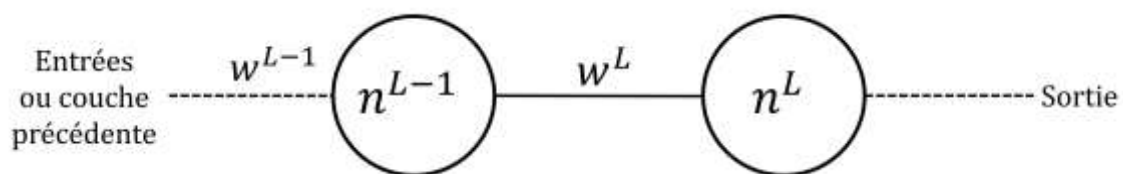


Figure IV-5 Schéma d'un réseau de neurones artificiels simple

Dans ce paragraphe, la notation suivante est utilisée :

- L représente le nombre de couches du réseau. L'appartenance d'un élément à une couche L est exprimée par l'utilisation d'exposants ;
- n^L la sortie d'un neurone de la couche L ;
- z^L la combinaison linéaire du neurone n^L ;
- f^L la fonction d'activation du neurone n^L ;
- $y(t)$ l'observation cible que le réseau cherche à modéliser ;
- $C(t)$ la fonction-coût. Pour des raisons de clarté, les paramètres $w_1, \dots, w_i, b_1, \dots, b_j$ ne sont pas explicités.

L'erreur quadratique est utilisée ici comme fonction-coût (Eq. IV-8).

$$C(t) = (n^L(t) - y(t))^2 \quad \text{Eq. IV-8}$$

A partir de l'expression de n^L (Eq. IV-9), on exprime $\frac{\partial C}{\partial w^L}$ à partir de dérivées connues ou estimables (Eq. IV-10).

$$n^L(t) = f^L(z^L(t)) = f^L(w^L n^{L-1}(t) + b^L) \quad \text{Eq. IV-9}$$

$$\frac{\partial C(t)}{\partial w^L} = \frac{\partial C(t)}{\partial n^L(t)} \frac{\partial n^L(t)}{\partial z^L(t)} \frac{\partial z^L(t)}{\partial w^L} \quad \text{Eq. IV-10}$$

Les dérivées partielles $\frac{\partial C(t)}{\partial n^L(t)}$, $\frac{\partial n^L(t)}{\partial z^L(t)}$, et $\frac{\partial z^L(t)}{\partial w^L}$ sont exprimées respectivement dans l'Eq. IV-11, l'Eq. IV-12, et l'Eq. IV-13.

$$\frac{\partial z^L(t)}{\partial w^L} = n^{(L-1)}(t) \quad \text{Eq. IV-11}$$

$$\frac{\partial n^L(t)}{\partial z^L(t)} = f'(z^L(t)) \quad \text{Eq. IV-12}$$

$$\frac{\partial C(t)}{\partial n^L(t)} = 2(n^L(t) - y(t)) \quad \text{Eq. IV-13}$$

Lorsque l'expression de la dérivée f'^L est connue, il est alors possible d'exprimer $\frac{\partial C}{\partial w^L}$ en fonction de termes connus (Eq. IV-14).

$$\frac{\partial C(t)}{\partial w^L} = n^{(L-1)}(t) \cdot f'^L(z^L(t)) \cdot 2(n^L(t) - y(t)) \quad \text{Eq. IV-14}$$

Avec une approche similaire, il est possible d'exprimer $\frac{\partial C}{\partial b^L}$ (Eq. IV-15).

$$\frac{\partial C(t)}{\partial b^L} = f'^L(z^L(t)) \cdot 2(n^L(t) - y(t)) \quad \text{Eq. IV-15}$$

L'expression de $\vec{\nabla} C(t)$ dans ce cas simplifié est alors connue (Eq. IV-16).

$$\vec{\nabla} C(t) = \begin{pmatrix} \frac{\partial C(t)}{\partial w^L} \\ \frac{\partial C(t)}{\partial b^L} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n^{(L-1)}(t) \cdot f'^L(z^L(t)) \cdot 2(n^L(t) - y(t)) \\ f'^L(z^L(t)) \cdot 2(n^L(t) - y(t)) \end{pmatrix} \quad \text{Eq. IV-16}$$

Cependant, l'expression de $\vec{\nabla} C(t)$ pour chaque observation est peu significative. $\vec{\nabla} C$ est alors calculé en moyennant ses composantes sur l'intervalle d'apprentissage $[t_1, t_2, \dots, t_k]$ (Eq. IV-17).

$$\vec{\nabla C} = \begin{pmatrix} \frac{\partial C}{\partial w^L} \\ \frac{\partial C}{\partial b^L} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{\partial C(t_i)}{\partial w^L} \\ \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{\partial C(t_i)}{\partial b^L} \end{pmatrix} \quad \text{Eq. IV-17}$$

La mise à jour des poids $\mathbf{W}_i = \{w^L, b^L\}$ à l'itération i peut alors être exprimée en fonction du gradient obtenu et d'un coefficient d'apprentissage μ_0 (Eq. IV-18). La valeur de ce coefficient influe sur la vitesse d'apprentissage : plus μ_0 est faible, plus les ajustements de \mathbf{W}_i sont lents, mais une valeur trop élevée entraîne le risque de manquer le minimum de la fonction-coût en le « dépassant », et d'entraîner des itérations supplémentaires.

$$\mathbf{W}_{i+1} = \mathbf{W}_i - \mu_0 \vec{\nabla C} \quad \text{Eq. IV-18}$$

Afin d'optimiser le taux d'apprentissage, au lieu d'imposer une valeur fixe, μ_0 peut être calculé comme l'inverse de la matrice des dérivées secondes de la fonction coût (Eq. IV-19), de façon à exprimer la tendance du gradient.

$$\mu_0 = (\nabla^2 C)^{-1} \quad \text{Eq. IV-19}$$

Cet exemple peut être étendu au cas d'un réseau à plusieurs neurones par couche, toujours pour le cas de la dernière couche L . Les expressions générales des termes du gradient sont obtenues (Eq. IV-20, Eq. IV-21). On utilise une notation à l'aide des indices I, J pour positionner les éléments w^L, b^L, z^L, n^L dans le réseau, avec :

- J la position du neurone sur la couche L ;
- I la position du neurone précédent (en entrée) sur la couche $L - 1$.

$$\frac{\partial C}{\partial w_{I,J}^L} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{\partial C(t_i)}{\partial w_{I,J}^L} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k n_i^{L-1}(t_i) \cdot f'^L(z_J^L(t_i)) \cdot 2(n_J^L(t_i) - y(t_i)) \quad \text{Eq. IV-20}$$

$$\frac{\partial C}{\partial b_J^L} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{\partial C(t_i)}{\partial b_J^L} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k f'^L(z_J^L(t_i)) \cdot 2(n_J^L(t_i) - y(t_i)) \quad \text{Eq. IV-21}$$

Le gradient selon les poids de la dernière couche L s'exprime dans ce cas-là comme indiqué ci-après :

$$\vec{\nabla C} = \begin{pmatrix} \frac{\partial C}{\partial w_{I,J}^L} \\ \vdots \\ \frac{\partial C}{\partial b_J^L} \\ \vdots \end{pmatrix} \quad \text{Eq. IV-22}$$

Cette approche peut être généralisée à l'ensemble des couches cachées du réseau, et permettre la mise à jour les poids du réseau (Eq. IV-18). L'approche de la rétropropagation du gradient est cependant coûteuse en ressources et temps de calcul. A cela s'ajoute la nécessité d'utiliser un volume conséquent de données pour l'apprentissage. Pour alléger cette étape, une

approche consiste à diviser le jeu de données d'apprentissage en échantillons plus petits, généralement avec une répartition aléatoire :

- un jeu d'entraînement, sur lequel la rétropropagation du gradient est opérée à partir duquel les poids du réseau ajustés ;
- un jeu de validation, sur lequel le modèle obtenu est appliqué. C'est sur ce jeu de données qu'est validée la convergence de l'apprentissage basée sur un seuil de la fonction-coût, ou à défaut, que l'arrêt anticipé de l'apprentissage est décidé ;
- un jeu de test, sur lequel le modèle est également appliqué. Ce jeu ne sert ni pour la rétropropagation du gradient ni pour l'arrêt de l'apprentissage. Les résultats du modèle sur ce jeu (fonction-coût, nombre de neurones actifs) servent à l'utilisateur pour vérifier la qualité de l'apprentissage du modèle ou pour comparer deux modèles entre eux.

La mise à jour des poids du réseau est répétée itérativement jusqu'à la convergence, c'est-à-dire l'obtention d'un gradient nul, ou bien au déclenchement d'un arrêt anticipé de l'apprentissage.

IV.2.4.3. TYPES DE RESEAUX TESTES

Afin de tester la meilleure stratégie pour prendre en compte les phénomènes d'inertie et de déphasage entre les séries acquises (cf. Chapitre III.2.3), plusieurs types de réseaux de neurones ont été testés :

- les réseaux de neurones à propagation avant (*feed-forward neural network*, FFNN) (Fine, [2006]; Svozil et al., [1997]). Il s'agit d'une des formes les plus classiques des réseaux de neurones, dont l'architecture correspond à celle détaillée dans la Figure IV-4. Avec un FFNN, $Y(t)$ est modélisée à l'aide de $X(t)$;
- les réseaux de neurone avec latence (*time-delay neural network*, TDNN) (Peddinti et al., [2015]). Ces réseaux font partie des réseaux de neurone à propagation avant et se distinguent par le fait que le réseau incorpore une latence d dans les entrées, et modélise $Y(t)$ en fonction de $X(t - 1), \dots, X(t - d)$;
- les réseaux de neurones récurrents (*recurrent neural network*, RNN) (Connor et al., [1994]; Dorffner et al., [1996]; Tsoia et al., [1997]; J.-S. Zhang et al., [2000]). Ces réseaux ont une structure similaire aux réseaux à propagation avant, néanmoins les couches incorporent une relation de récurrence (Figure IV-6). Chaque neurone reçoit en entrée, en plus des sorties des neurones de la couche précédente, sa propre valeur de sortie à l'époque précédente. Cette approche introduit une notion de mémoire dans le réseau, sans avoir à introduire une notion de délais dans les entrées.

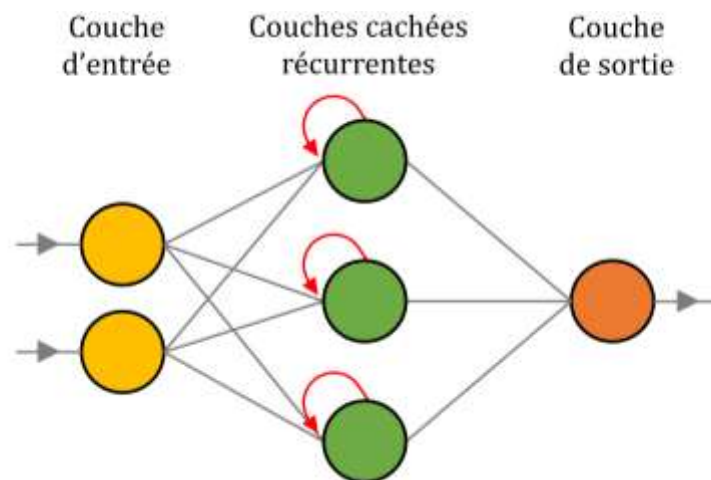


Figure IV-6 Schéma d'un réseau de neurones récurrents

IV.3. ETUDE DE MODELES DE REGRESSION DES SERIES ACQUISES PAR LES RESEAUX DE CAPTEURS GNSS

Ce paragraphe présente une comparaison de différentes méthodes de régression mises en œuvre dans des scénarios variés pour la modélisation des comportements enregistrés par les capteurs GNSS sur ouvrages d'art. Un intérêt particulier est porté à la sélection des paramètres des réseaux de neurones artificiels.

IV.3.1. DONNEES UTILISEES

Les instrumentations du pont de Brotonne et du pont d'Aquitaine présentées dans le Chapitre III constituent deux bassins de données pour l'entraînement et l'application de modèles de régression. L'analyse se concentre sur le jeu de données du pont de Brotonne pour l'étude de modèles de régression car celui-ci s'étale sur une période significativement plus longue malgré des interruptions. Surtout, la comparaison globale des séries acquises sur les deux ouvrages a mis en avant des relations plus complexes (corrélations plus faibles, déphasages) entre les séries du pont de Brotonne, à la différence des nombreuses relations linéaires observées pour le pont d'Aquitaine. Ces relations plus complexes seront l'occasion de montrer les limites des modèles linéaires classiques par rapport à des outils avancés comme les réseaux de neurones artificiels.

Afin d'éviter les perturbations qui pourraient être imputées à des changements de capteurs, seules les données de la première instrumentation du pont de Brotonne (de mai 2017 à janvier 2019) sont considérées ici, cette phase comportant significativement plus d'acquisitions et moins d'irrégularités (Figure III-8) que la seconde (de avril à juillet 2019). Pour chacune des applications présentées dans la suite de ce chapitre, les séries temporelles ont été découpées en intervalles de plusieurs mois (dont les bornes seront précisées ultérieurement) de façon à ce que les données utilisées présentent le moins d'interruptions possibles. Enfin, les données GNSS sont filtrées et rééchantillonnées selon la démarche détaillée dans le Paragraphe III.2.

Les mesures de températures dans les piles ne présentent qu'un recouvrement assez faible avec les données des capteurs GNSS pendant la période où elles sont les plus régulières pendant la première phase d'instrumentation (Figure III-6). De plus, les caractéristiques (amplitudes, déphasages) de ces mesures sont fortement liées à l'ouvrage étudié et à la localisation des sondes : les résultats de leur exploitation seraient difficiles à généraliser à l'étude d'autres ouvrages. Il a été choisi de leur préférer les données environnementales, présentant par ailleurs un recouvrement plus important avec les données GNSS. L'utilisation des données environnementales seules, est en accord avec l'approche consistant à utiliser des capteurs aisés à déployer et à bas coût.

Parmi les données environnementales, la composante lente des mesures de température a été calculée et ajoutée à la liste des données disponibles. Pour exploiter au mieux les mesures d'ensoleillement unidirectionnelles $s(t)$ enregistrées par la station météo, on souhaite estimer le flux solaire reçu par les différentes faces exposées de l'ouvrage de l'ouvrage. Cette estimation ne prenant pas en compte les propriétés réflectrices ou absorbantes des matériaux, on la représente sous la forme d'une grandeur baptisée charge solaire normale (CSN). Plusieurs éléments ont été générés pour estimer les CSN des faces de l'ouvrage :

- le vecteur solaire $\vec{S}(t)$, qui représente la position du soleil dans la sphère céleste dans le repère de l'ouvrage à l'instant t (Figure IV-7). Les vecteurs unitaires du repère sont notés \vec{u}_x , \vec{u}_y et \vec{u}_z (pour rappel, le repère du pont de Brotonne est un repère direct dont le vecteur \vec{u}_x pointe approximativement vers l'est) ;
- cinq faces fictives (Figure IV-8), supposées représentatives de l'orientation des faces exposées des différents éléments de l'ouvrage ;
- une surface x_+ normale à \vec{u}_x , d'orientation positive ;

- une surface x_- normale à \vec{u}_x , d'orientation négative ;
- une surface y_+ normale à \vec{u}_y , d'orientation positive ;
- une surface y_- normale à \vec{u}_y , d'orientation négative ;
- une surface z_+ normale à \vec{u}_z , d'orientation positive.

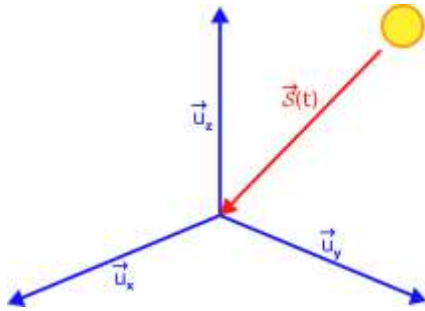


Figure IV-7 Illustration du vecteur solaire

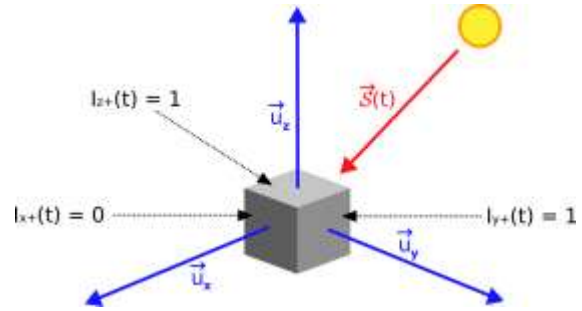


Figure IV-8 Représentation des surfaces fictives et de leur exposition au soleil

A partir de $\vec{S}(t)$, il est possible de déterminer pour chaque face fictive f son illumination $I_f(t)$, avec $I_f(t) = 1$ si la face est éclairée et $I_f(t) = 0$ si elle ne l'est pas (Figure IV-8). Il est alors possible de calculer $CSN_f(t)$ à l'aide du vecteur unitaire \vec{u}_f normal à la face f et orienté dans le sens d'exposition correspondant (Eq. IV-23, Figure IV-9). Pour les faces x_+, x_-, y_+, y_- et z_+ , \vec{u}_f prend les valeurs $\vec{u}_x, -\vec{u}_x, \vec{u}_y, -\vec{u}_y$ et \vec{u}_z , respectivement.

$$CSN_f(t) = s(t) \cdot I_f(t) \cdot \frac{\vec{u}_f \cdot \vec{S}(t)}{\|\vec{S}(t)\|} \quad \text{Eq. IV-23}$$

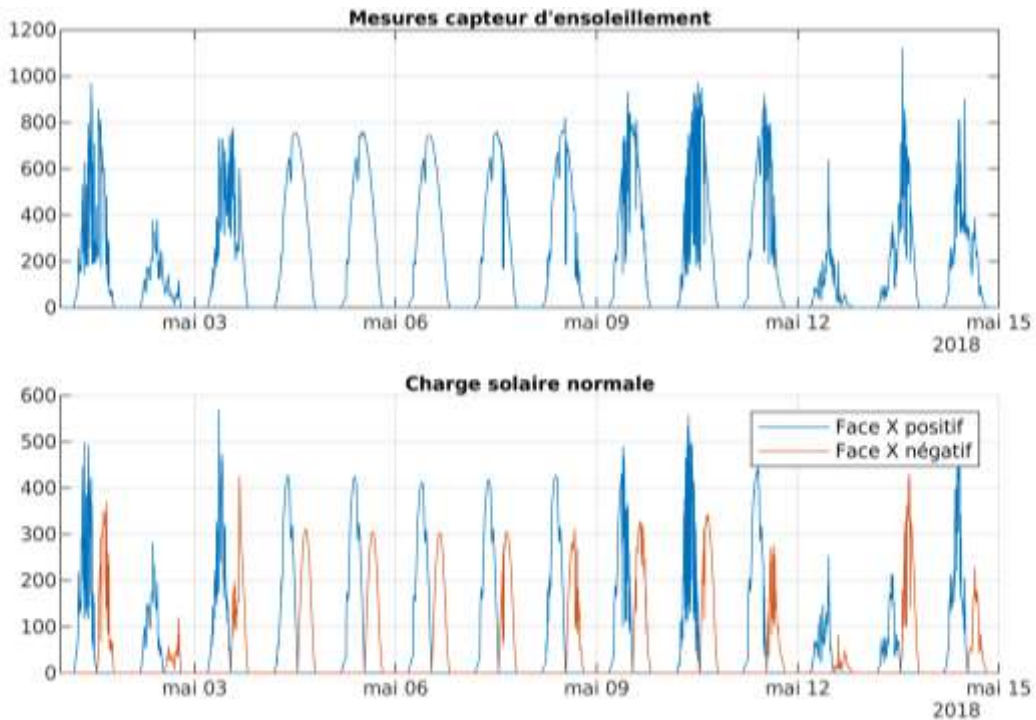


Figure IV-9 Exemple de calcul des charges solaires normales pour les faces virtuelles X positif et X négatif

En parallèle, des données de température ambiante d'une station Météo-France située à proximité sont disponibles (données SYNOP, échantillonnées à 3h). Des mesures de rayonnement

lumineux à la surface du sol sont disponibles par le biais de la mission satellite HelioClim-3, avec une résolution spatiale de 5km et un échantillonnage de 15 minutes. Ces données montrent une forte similarité avec les données acquises sur ouvrage (Figure IV-10, Figure IV-11). Dans la suite du chapitre, il sera proposé dans certains scénarios de substituer ces données externes aux données environnementales acquises sur l'ouvrage pour bénéficier d'un plus grand recouvrement avec les données GNSS.

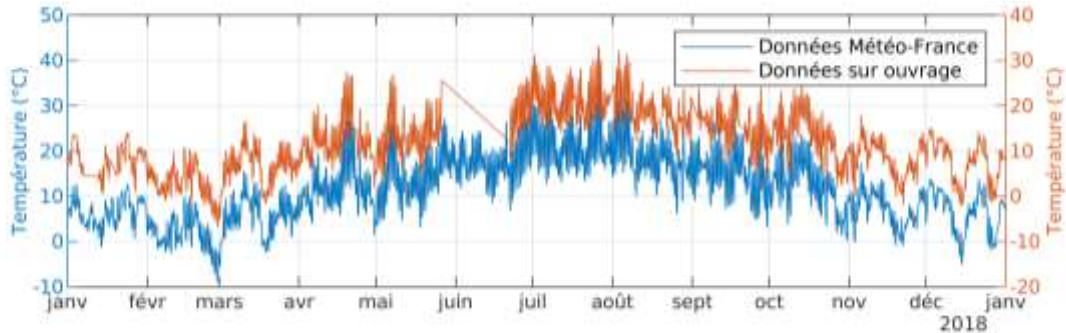


Figure IV-10 Comparaison des données de température sur ouvrage et Météo-France

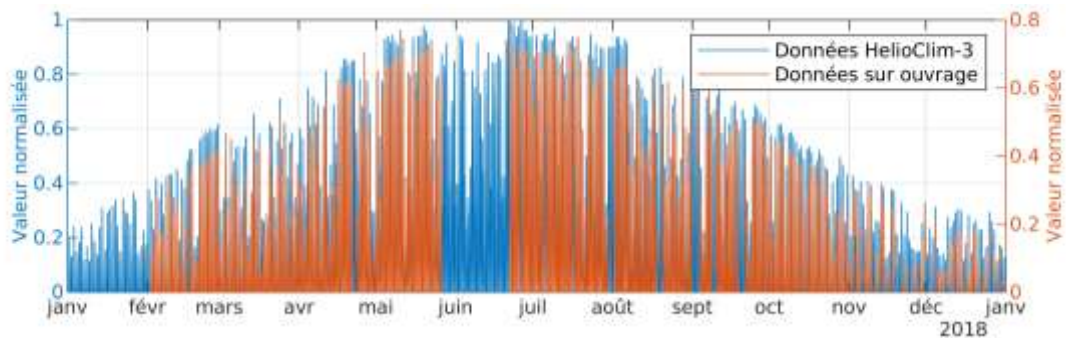


Figure IV-11 Comparaison des données d'ensoleillement sur ouvrage et HelioClim-3

IV.3.2. CRITERES D'EVALUATION D'UNE REGRESSION

L'évaluation de la performance de modèles régressifs repose sur l'étude du résidu $r(t)$ obtenu entre les prédictions et les observations sur un intervalle jugé sain. Deux approches courantes visent à quantifier le résidu sur cet intervalle à l'aide du RMSE (Eq. II-44) ou de l'erreur moyenne absolue (*Mean Absolute Error*, MAE) (Eq. IV-24).

$$\text{Pour } n \text{ mesures considérées, } MAE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |r(t_k)| \quad \text{Eq. IV-24}$$

La MAE est souvent préférée au RMSE en raison de la sensibilité de ce dernier aux valeurs aberrantes ou aux anomalies de courte durée (Chai et al., [2014]). Néanmoins, les modèles régressifs étudiés dans ce chapitre ont vocation à être utilisés pour détecter des anomalies dont la nature, l'occurrence et la périodicité ne sont pas connues : celles-ci peuvent être relativement courtes en comparaison de la taille des séries temporelles. Il est donc choisi d'utiliser le RMSE pour qualifier les modèles testés, et donner plus de poids aux anomalies, même courtes.

Afin de mieux rendre compte de l'évolution du résidu au cours du temps, et pour permettre son exploitation par la suite, le résidu est moyenné sur des intervalles réguliers. Etant donné la capacité des stations GNSS utilisées à observer précisément les mouvements quotidiens des deux ouvrages étudiés dans le Chapitre III, on propose d'utiliser des intervalles de 24 heures. Pour chaque intervalle i , on calcule le RMSE noté $RMSE_i^{24h}$ (Figure IV-12).

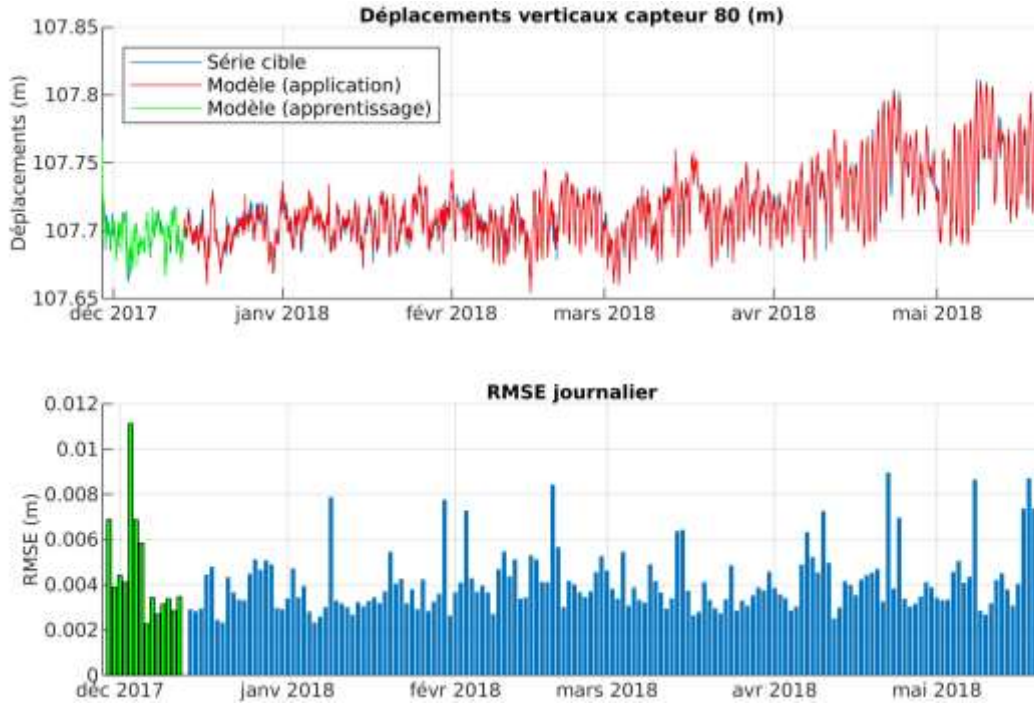


Figure IV-12 Représentation d'un modèle donné (haut) et du calcul de RMSE par intervalles associé (bas)

Pour qualifier la performance d'un modèle, on propose les indicateurs μ_R et σ_R , respectivement la moyenne (Eq. IV-25) et l'écart type (Eq. IV-26) des valeurs $RMSE_i^{24h}$.

$$\text{Pour } n \text{ journées considérées, } \mu_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n RMSE_i^{24h} \quad \text{Eq. IV-25}$$

$$\text{Pour } n \text{ journées considérées, } \sigma_R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (RMSE_i^{24h} - \mu_R)^2} \quad \text{Eq. IV-26}$$

L'indicateur μ_R a vocation à représenter la performance globale du modèle. Compte tenu des amplitudes variables des différentes séries temporelles acquises, cette valeur est à comparer avec la dispersion (écart type) $\sigma(Y)$ de la série cible modélisée. La valeur σ_R quant à elle vise à représenter la stabilité de la performance du modèle, et sa régularité à modéliser la réponse quotidienne de l'ouvrage. Dans certains scénarios, il peut être préférable de disposer d'un modèle globalement moins efficace qu'un autre (μ_R plus fort), mais plus régulier (σ_R plus faible).

IV.3.3. AJUSTEMENT ET PARAMETRAGE DANS LE CAS DES RESEAUX DE NEURONES

Au-delà des différents types de réseaux testés (FFNN, TDNN, RNN), il existe de nombreux paramètres, propres à la structure d'un réseau ou à l'algorithme d'apprentissage, pouvant être ajustés. Certains paramètres clés sont considérés dans ce paragraphe, afin de sélectionner une approche optimale pour l'utilisation des réseaux de neurones artificiels et leur comparaison dans le Paragraphe IV.3.4 à d'autres méthodes de régression.

IV.3.3.1. ARCHITECTURE

L'architecture d'un réseau est définie par son type, le nombre et la disposition des neurones dans celui-ci : nombre de couches cachées, et nombre de neurones par couches. Un des objectifs dans la conception d'un réseau est de trouver le plus petit réseau capable de produire un modèle satisfaisant. La réduction de la taille d'un réseau facilite la phase d'apprentissage en réduisant le volume de données et le temps de traitement nécessaires.

Il n'existe pas de règle fixe pour définir le nombre de neurones et de couches nécessaires pour construire un réseau de neurones. Néanmoins, il existe quelques conventions empiriques pour initialiser ces paramètres :

- pour le nombre de couches cachées, il est recommandé de commencer au plus simple (avec une seule couche), puis de l'augmenter progressivement. Si l'ajout d'une couche n n'apporte pas d'amélioration significative, il est en général peu utile de poursuivre, et on peut limiter le réseau à $n - 1$ couches ;
- il est régulièrement suggéré que le nombre de neurones compris dans une couche n soit compris entre le nombre de neurones de la couche précédente et celui de la couche suivante.

Un critère supplémentaire pour le cas des TDNN est à prendre en compte : le délai d des entrées sélectionnées. Un délai plus grand permet au réseau de neurones de prendre en compte une plus grande antériorité des entrées, mais multiplie également leur nombre, rendant l'apprentissage plus long.

L'architecture du réseau de neurones pour un problème donné reste dépendante des entrées, sorties, de leur nombre et éventuellement de la taille de l'intervalle d'apprentissage. Cette étude n'aboutira pas à la sélection d'une architecture unique pour l'ensemble des réseaux applicables sur les différents capteurs GNSS déployés sur ouvrage. L'objectif est ici de sélectionner un type de réseau optimal, et d'établir un périmètre des réseaux à utiliser : plusieurs couches cachées sont-elles nécessaires ? Faut-il des réseaux comprenant peu ou beaucoup neurones par couche ?

IV.3.3.2. ALGORITHME D'APPRENTISSAGE

L'entraînement d'un réseau de neurones par la rétropropagation du gradient implique le calcul d'éléments volumineux et complexes, notamment des matrices des dérivées partielles secondes (matrices Hessiennes) de la fonction coût. L'optimisation de l'apprentissage au niveau des ressources et du temps de calcul est un enjeu important pour leur applicabilité. Plusieurs algorithmes existent pour optimiser l'apprentissage. Deux d'entre eux sont évalués ci-après : la méthode Levenberg-Marquardt (LM) et la Régularisation Bayésienne (RB).

La méthode LM (Lera et al., [2002]; Yu et al., [2011]) a pour objectif de conserver la vitesse d'apprentissage (en nombre d'itérations) de la rétropropagation du gradient classique sans avoir besoin de calculer les matrices Hessiennes utilisées pour la mise à jour des poids (Eq. IV-19). Cette approche se base sur l'hypothèse qu'une matrice Hessienne \mathbf{H} peut être exprimée selon la matrice des dérivées partielles \mathbf{J} (matrice Jacobienne) correspondante (Eq. IV-27), plus facile à calculer.

$$\mathbf{H} = \mathbf{J}'\mathbf{J} \quad \text{Eq. IV-27}$$

La mise à jour des paramètres \mathbf{W}_i à l'itération i peut alors être exprimée en fonction de la matrice Jacobienne \mathbf{J} correspondante, d'une matrice d'erreur \mathbf{E} , et du coefficient d'apprentissage μ_i (Eq. IV-28).

$$\mathbf{W}_{i+1} = \mathbf{W}_i - (\mathbf{J}'\mathbf{J} + \mu_i \mathbf{I}d)^{-1} \mathbf{J}'\mathbf{E} \quad \text{Eq. IV-28}$$

La valeur de μ_i est ajustée au cours d'une itération : une valeur de base (généralement comprise entre 0.1 et 10) est définie. Si une première mise à jour des poids \mathbf{W}_{i+1} n'entraîne pas de diminution de la fonction-coût, μ_i est alors multiplié par un coefficient positif fixe (généralement 10), et la mise à jour recalculée. L'opération est répétée jusqu'à la diminution de la fonction-coût. La mise à jour \mathbf{W}_{i+1} obtenue est alors conservée, et μ_i est divisé par un coefficient positif fixe (généralement 10) et conservé pour l'itération suivante.

La méthode RB (Burden et al., [2008]a; Doan et al., [2004]) est dérivée de la méthode LM, et suit la même approche globale d'optimisation. Elle repose sur le théorème de Bayes, qui permet

d'exprimer la probabilité $P(A_i|B)$ en fonction des probabilités de l'évènement B et des évènements mutuellement exclusifs et collectivement exhaustifs A_j (Eq. IV-29).

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{\sum_j P(B|A_j)P(A_j)} \quad \text{Eq. IV-29}$$

Dans cette approche, la fonction de coût C calculée sur un intervalle de k observations pour un réseau doté de l paramètres peut être réécrite en fonction des paramètres w_l et de deux coefficients α et β . (Eq. IV-30). On note $\hat{y}(t)$ la série modélisée par le réseau.

$$C(w_1, \dots, w_l) = \beta \sum_{i=1}^k (\hat{y}(t_i) - y(t_i))^2 + \alpha \sum_{j=1}^l w_j^2 \quad \text{Eq. IV-30}$$

Cette expression revient à séparer les sources d'erreur contribuant à la fonction coût, avec E_y les incertitudes sur les données (Eq. IV-31) et E_w les erreurs des poids (Eq. IV-32).

$$E_y = \sum_{i=1}^k (\hat{y}(t_i) - y(t_i))^2 \quad \text{Eq. IV-31}$$

$$E_w = \sum_{j=1}^l w_j^2 \quad \text{Eq. IV-32}$$

En appliquant le précepte de l'inférence bayésienne, il est possible d'estimer la probabilité d'un paramètre du réseau utilisé d'être effectif, c'est-à-dire non nul, et donc d'estimer le nombre de paramètres effectifs optimal. Le calcul de cette estimation est détaillé par Burden et al., [2008]b. L'estimation du nombre de paramètres optimaux permet de diminuer les risques de surapprentissage. La fonction-coût intégrant les paramètres du réseau, ceux-ci sont donc également automatiquement minimisés. Cependant, la fonction coût ne représente plus uniquement la précision du modèle \hat{y} obtenu, par conséquent le jeu de validation n'est plus utilisé.

IV.3.3.3. CRITERE D'ARRET DE L'ENTRAINEMENT

L'entraînement des réseaux de neurones étant un processus itératif, il est nécessaire d'en définir des critères d'arrêt. En particulier, il est nécessaire d'éviter le surapprentissage, un phénomène auquel les réseaux de neurones sont particulièrement sensibles. Le surapprentissage entraîne une très bonne modélisation de la série d'apprentissage mais une mauvaise généralisation, en plus d'un entraînement inutilement prolongé. L'utilisation d'un jeu de validation permet généralement de vérifier si un réseau est en surapprentissage. Un exemple est illustré dans la Figure IV-13, montrant qu'à partir de la 7^{ème} itération de l'entraînement d'un réseau quelconque, la fonction de coût continue à être améliorée sur le jeu d'entraînement mais pas sur les autres jeux de données.

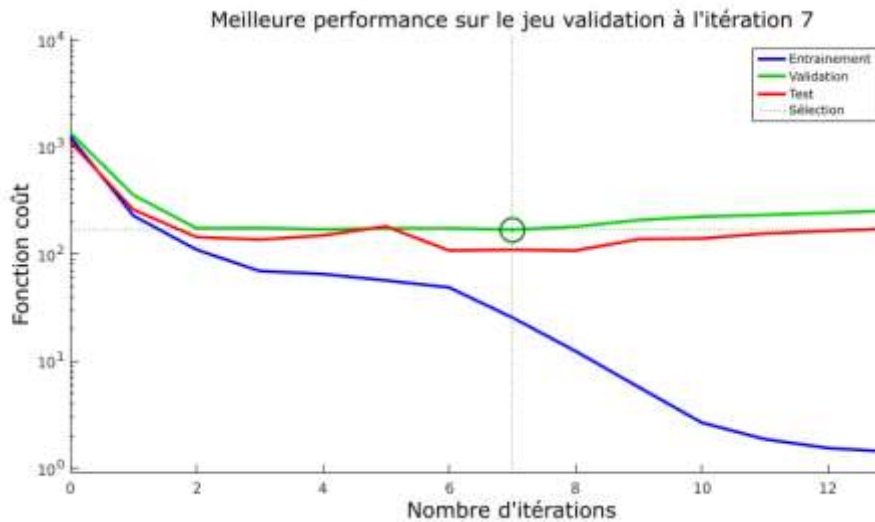


Figure IV-13 Exemple de surapprentissage d'un réseau de neurones

Plusieurs stratégies basées sur le calcul de la fonction-coût sur le jeu de validation permettent de déclencher l'arrêt de l'entraînement :

- l'utilisation d'un objectif prédéterminé, sous la forme d'un seuil sur la fonction-coût en dessous duquel l'entraînement s'arrête. Cette approche revient à arrêter l'apprentissage quand le réseau atteint une performance souhaitée ;
- l'arrêt par échec de l'amélioration. La fonction-coût est calculée sur le jeu de validation, et à partir d'un nombre n fixé d'itérations où la fonction coût n'a pas diminué, l'entraînement est stoppé. Ce critère revient à détecter si le système atteint un minimum, absolu ou local.

Néanmoins, comme expliqué dans le Paragraphe IV.3.3.2, ces critères ne sont pas forcément pertinents avec l'utilisation de la régularisation bayésienne. D'autres critères, applicables aussi bien avec la méthode LM que la méthode RB sont disponibles :

- l'utilisation d'un objectif sur le gradient : si la norme du gradient passe en dessous d'un seuil prédéterminé, l'apprentissage s'arrête. Cette approche revient à détecter la convergence du système, la tolérance étant égale au seuil imposé ;
- l'arrêt sur le coefficient d'apprentissage : la valeur de μ_i étant mise à jour selon le succès ou l'échec d'une itération, il est possible de lui imposer une valeur maximale à partir de laquelle l'entraînement s'arrête. Ce critère est un équivalent à l'arrêt par échecs de l'amélioration, mais en prenant en compte l'inertie de l'amélioration (puisque μ_i est transmis d'une itération à la suivante), et est calculé sur le jeu d'entraînement ;
- l'arrêt sur un nombre d'itérations prédéterminé.

Il est possible que le critère d'arrêt optimal varie selon les entrées et sorties d'un modèle testé. L'objectif de leur comparaison sera de vérifier si, en les laissant tous actifs, certains sont plus récurrents ou plus efficaces.

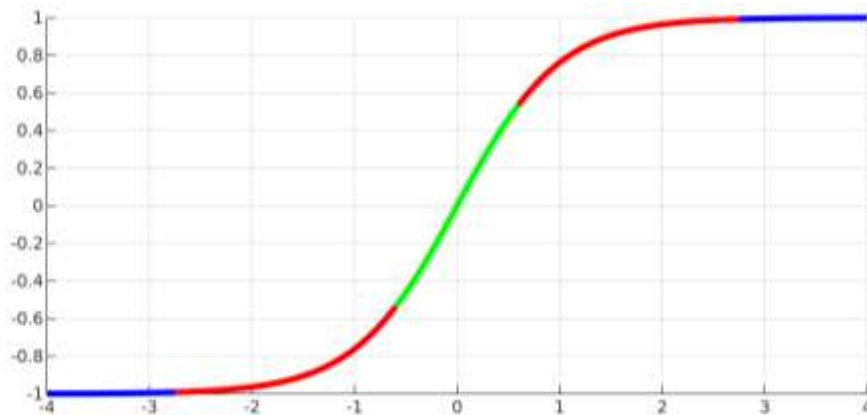
IV.3.3.4. FONCTION D'ACTIVATION

La fonction d'activation d'un neurone détermine sa sortie à partir de la combinaison linéaire entrante. Il s'agit d'un élément clé des réseaux de neurones artificiels, puisque les fonctions d'activation sont responsables de leur non-linéarité. Bien qu'il soit possible d'assigner des fonctions d'activation différentes aux neurones d'un même réseau voire d'une même couche, l'intérêt dans le cas des réseaux étudiés (FFNN, TDNN, RNN) reste à démontrer. Ainsi, les cas étudiés utiliseront des réseaux de neurones où la fonction d'activation est utilisée pour l'ensemble des neurones des couches cachées. Deux fonctions d'activation courantes sont étudiées ci-après.

La fonction tangente hyperbolique \tanh (Eq. IV-33) est une fonction d'activation de référence (Karlik et al., [2011]; Sibi et al., [2013]), régulièrement utilisée aussi bien pour des applications de régression que de classification.

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad \text{Eq. IV-33}$$

La fonction \tanh permet de produire des réponses quasi-linéaires, non-linéaires, et à seuils : elle comporte ainsi un seuil négatif et un seuil positif (Figure IV-14).



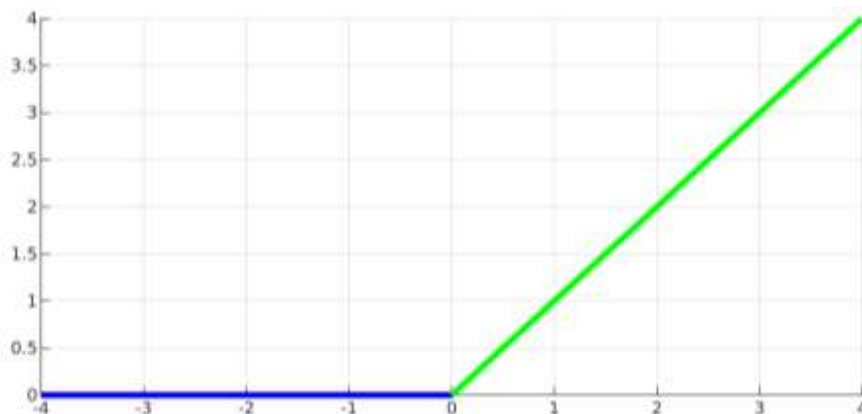
(vert : réponse quasi-linéaire, rouge : réponse non-linéaire, bleu : seuil)

Figure IV-14 Représentation de la fonction tangente hyperbolique

Ces caractéristiques permettent à la fonction \tanh de modéliser des comportements complexes et variés. La présence de deux seuils entraîne néanmoins quelques limites à son application, notamment si le jeu de données d'application comporte des variations plus grandes que sur le jeu d'entraînement : la fonction peut saturer alors qu'un comportement linéaire est observé.

La seconde fonction d'activation envisagée, particulièrement courante pour les réseaux à apprentissage profond, est la fonction $ReLU$ (*Rectified Linear Unit*) (Hahnloser et al., [2000]; Maas et al., [2013]; Nair et al., [2010]). Cette fonction est linéaire sur l'intervalle $[0, +\infty[$ et non-linéaire sur l'intervalle $]-\infty, 0[$, la fonction étant nulle pour tous les valeurs négatives (Eq. IV-34, Figure IV-15).

$$ReLU(x) = \max(0, x) \quad \text{Eq. IV-34}$$



(bleu : réponse linéaire, vert : seuil)

Figure IV-15 Représentation de la fonction ReLU

A défaut de proposer une réponse aussi complexe que la fonction \tanh , la fonction $ReLU$ permet de propager n'importe quelle valeur positive. Il a été observé que l'utilisation de la fonction $ReLU$ produit des résultats égaux sinon supérieurs à l'utilisation des fonctions traditionnelles tout en minimisant le temps d'apprentissage.

IV.3.3.5. SELECTION DES RESEAUX DE NEURONES OPTIMAUX

Afin de comparer les performances des FFNN, TDNN et RNN, on propose de tester leurs performances pour la régression des comportements de trois capteurs : les déplacements longitudinaux des capteurs 73 et 130 (notés 73Y et 130Y), respectivement sur le viaduc d'accès et le pylône sud, ainsi que les déplacements verticaux du capteur 80 (noté 80Z) au centre du tablier. Les entrées utilisées sont composées de la température ambiante et de sa composante lente, et des cinq CSN (cf. Paragraphe IV.3.1). Le jeu de données utilisé s'étale du 17 février 2018 au 24 mai 2018 (environ 96 jours), de façon à minimiser les interruptions dans les données d'origine (avant filtrage et interpolation), et l'apprentissage est réalisé sur les 30 premiers jours.

Pour les critères d'arrêt, des valeurs génériques ont été utilisées :

- arrêt sur l'objectif de performance (valeur normalisée) : seuil de 10^{-7} ;
- arrêt par échec d'améliorations : 7 échecs consécutifs ;
- arrêt sur la valeur du gradient (valeur normalisée) : seuil de 10^{-7} ;
- arrêt sur le coefficient d'apprentissage : seuil de 10^7 , facteur 10 à l'échec, 0.1 à la réussite ;
- arrêt par le nombre d'itérations : 2000.

Il s'agit d'un cas relativement complexe : l'intervalle d'apprentissage est court, les conditions d'application sont différentes de celles d'apprentissage et la relation entre les données sources et cibles n'est pas directe (données ambiantes contre réponse de l'ouvrage). A titre de comparaison, les résultats d'un modèle MLR appliqué sont présentés dans le Tableau IV-1. On note σ_{cible} l'écart type de la série cible.

Série cible	σ_{cible} (mm)	μ_R (mm)	σ_R (mm)
73Y	15,9	7,6	3,9
80Z	27,1	39,3	23,9
130Y	18,2	27,6	18,1

Tableau IV-1 Résultats d'un modèle MLR à partir de données météorologiques avec un intervalle d'apprentissage court

A l'exception de la modélisation de la série 73Y dont les performances sont acceptables (μ_R^{24h} inférieur à 50% de σ_{cible}), les modèles linéaires obtenus sont inadaptés avec des valeurs de μ_R^{24h} largement supérieures à σ_{cible} . L'objectif est alors de voir quel type de réseau de neurones est le plus efficace dans ces cas complexes.

En parallèle, en plus des types de réseaux (FFNN, TDNN, RNN), plusieurs architectures ont été testées : une architecture à une couche de cinq neurones, à une couche de dix neurones, à deux couches de cinq neurones, et à trois couches de cinq neurones. Ces architectures représentent des réseaux relativement petits et suit la logique utilisée avec des données cibles ayant des profils comparables par Adamowski et al., [2012]. Tous les réseaux utilisent la fonction de transfert \tanh , et l'apprentissage est réalisé avec la méthode RB. Enfin, deux délais ont été testés pour les TDNN : un délai sur 1h (par intervalles de 5 minutes, l'échantillonnage utilisé), noté TDNN_{1h}, et un délai sur 12h (par intervalles de 1h), noté TDNN_{12h}.

Pour chaque type de réseau testé, 15 entraînements distincts ont été réalisés, et le temps moyen t_{moy} d'entraînement a été calculé. Pour chaque architecture, l'indicateur μ_R minimum obtenu et l'indicateur σ_R associé sont présentées dans le Tableau IV-2, le Tableau IV-3 et le Tableau IV-4 pour les séries 73Y, 80Z et 130Y, respectivement.

Etant donné qu'à cette étape l'objectif est de sélectionner une architecture optimale et que l'ajustement d'autres paramètres n'est pas considéré, seule la meilleure performance est ici considérée dans la comparaison.

Type de réseau	Architecture	μ_R (mm)	σ_R (mm)	t_{moy} (s)
FFNN	5	7,9	3,8	2
TDNN _{1h}	5	10,6	4,9	68
TDNN _{12h}	5	15,4	6,8	30
RNN	5	7,2	3,7	111
FFNN	10	9,3	3,1	5
TDNN _{1h}	10	11,9	4,9	375
TDNN _{12h}	10	31,2	15,1	121
RNN	10	8,5	3,2	156
FFNN	5 5	9,5	4,9	4
TDNN _{1h}	5 5	9,2	3,4	82
TDNN _{12h}	5 5	16,3	7,5	43
RNN	5 5	7,8	3,2	115
FFNN	5 5 5	7,7	4,6	11
TDNN _{1h}	5 5 5	8,9	3,1	66
TDNN _{12h}	5 5 5	9,8	4,3	64
RNN	5 5 5	6,8	3,6	228

Tableau IV-2 Modélisation de 73Y par différentes architectures de réseaux de neurones artificiels

Type de réseau	Architecture	μ_R (mm)	σ_R (mm)	t_{moy} (s)
FFNN	5	26,3	15,5	5
TDNN _{1h}	5	30,6	11	111
TDNN _{12h}	5	37,5	18,9	54
RNN	5	26,5	14,2	116
FFNN	10	30,5	20	5
TDNN _{1h}	10	39,6	18,4	287
TDNN _{12h}	10	83,3	58,5	228
RNN	10	25,7	14	125
FFNN	5 5	29	17,3	9
TDNN _{1h}	5 5	30,2	15,8	97
TDNN _{12h}	5 5	32,8	16,1	75
RNN	5 5	23,9	12,1	67
FFNN	5 5 5	28,6	16,1	20
TDNN _{1h}	5 5 5	33,2	16,5	124
TDNN _{12h}	5 5 5	29,5	11,1	99
RNN	5 5 5	22,4	9,9	216

Tableau IV-3 Modélisation de 80Z par différentes architectures de réseaux de neurones artificiels

Type de réseau	Architecture	μ_R (mm)	σ_R (mm)	t_{moy} (s)
FFNN	5	15,3	2,8	2
TDNN _{1h}	5	23	13,7	33
TDNN _{12h}	5	17,8	7	35
RNN	5	11,2	6,4	114
FFNN	10	25,7	13	5
TDNN _{1h}	10	24,4	16	271
TDNN _{12h}	10	40,9	19,8	305

RNN	10	11,9	6,7	369
FFNN	5 5	12,8	4,3	4
TDNN _{1h}	5 5	12,3	6,3	72
TDNN _{12h}	5 5	14,8	6,1	48
RNN	5 5	11,3	4,3	145
FFNN	5 5 5	12	4,2	13
TDNN _{1h}	5 5 5	12,8	6,6	106
TDNN _{12h}	5 5 5	14,4	4,2	91
RNN	5 5 5	10,7	5	185

Tableau IV-4 Modélisation de 130Y par différentes architectures de réseaux de neurones artificiels

Avec la série 73Y, on n'observe pas d'amélioration significative des performances obtenues par les différentes architectures de réseaux de neurones comparativement aux méthodes linéaires. En revanche, avec les séries 80Z et 130Y, des améliorations significatives de la performance peuvent être observées : pour la série 80Z, la valeur de μ_R obtenue par MLR (39,3 mm) peut être diminuée à 22,4 mm à l'aide d'un RNN. Ce résultat est à pondérer avec la comparaison au σ_{cible} de la série (27,1 mm), indiquant que le modèle obtenu demeure peu efficace. Pour la série 130Y, on observe une amélioration importante de l'indicateur μ_R obtenu par MLR (27,6 mm) avec l'utilisation de RNN (jusqu'à 10,7 mm).

Globalement, il apparaît que pour pratiquement chaque architecture de réseau et chaque capteur, les meilleures performances sont obtenues avec des RNN, la seule exception observée étant dans le cas de la série 80Z et avec une architecture à une couche de cinq neurones, le RNN présentant un écart de moins de 1% avec la performance maximale. Les RNN sont le type de réseau le plus performant parmi ceux testés. Concernant l'architecture, des réseaux à cinq et dix neurones par couche ont été testés : l'augmentation du nombre de neurones par couches s'est avérée très pénalisante en temps sans aucun gain notable en performance. L'ajout de couches supplémentaires n'a apporté qu'une amélioration marginale de la performance. L'utilisation de réseaux récurrents simples (peu de neurones, une seule couche) apparaît ainsi comme l'option la plus pertinente.

On évalue alors l'impact de la méthode d'entraînement (RB, LM) et de la fonction de transfert (\tanh , $ReLU$) en appliquant un protocole similaire avec des réseaux à une couche et cinq neurones (Tableau IV-5).

Cible	Entraînement	Fonction	μ_R (mm)	σ_R (mm)	t_{moy} (s)
73Y	LM	\tanh	7,2	2,5	67
	LM	ReLU	8,1	4,2	6
	RB	\tanh	6,9	3,2	38
	RB	ReLU	8,8	4,8	10
80Z	LM	\tanh	23,7	14,4	67
	LM	ReLU	23	16,1	15
	RB	\tanh	25,9	11,7	51
	RB	ReLU	27,9	11,7	16
130Y	LM	\tanh	10,8	4	78
	LM	ReLU	11	5,1	14
	RB	\tanh	9,9	3,9	50
	RB	ReLU	13	6,9	11

Tableau IV-5 Performances de RNN à une couche pour modéliser les séries 73Y, 80Z et 130Y à partir de données météorologiques selon plusieurs paramètres

Les résultats obtenus montrent que :

- les réseaux utilisant la fonction *tanh* obtiennent des performances légèrement supérieures aux réseaux utilisant la fonction *ReLU* ;
- les réseaux utilisant la fonction *ReLU* présentent en revanche un temps d'entraînement beaucoup plus faible ;
- il n'y a pas de différence significative de performance entre les deux méthodes d'entraînement, mais la méthode RB permet un apprentissage plus rapide avec l'utilisation de la fonction *tanh* ;

On souhaite vérifier si les mêmes conclusions peuvent être faites en utilisant des séries GNSS en entrée. Le même protocole est alors appliqué en utilisant plusieurs séries GNSS corrélées à chaque série cible comme entrées des réseaux de neurones. Le jeu de données utilisé est sensiblement plus long (meilleure continuité des séries utilisées), allant du 17 février 2018 au 30 juin 2018 (environ 148 jours). L'intervalle d'apprentissage reste inchangé. Les entrées utilisées pour chaque modèle sont détaillées dans le Tableau IV-6. Il est important de noter que pour chaque série cible, les séries très fortement corrélées ont été exclues (capteurs 70 et 74 pour le capteur 73, capteur 84 pour le capteur 80 et capteur 77 pour le capteur 130), afin d'éviter les cas où des relations linéaires observées entre les séries (cf. Chapitre III) faciliteraient excessivement la génération de modèles.

Cible	Entrées
73Y	77Y, 81Y, 84Y, 130Y, 77Z, 81Z, 84Z, 130Z
80Z	73Y, 77Y, 81Y, 83Y, 130Y, 73Z, 77Z, 81Z, 83Z, 130Z
130Y	73Y, 81Y, 83Y, 84Y, 73Z, 81Z, 83Z, 84Z

Tableau IV-6 Entrées utilisées pour la comparaison de RNN selon leurs paramètres

Les résultats obtenus avec les différents paramètres des RNN sont synthétisés dans le Tableau IV-7.

Cible	Entraînement	Fonction	μ_R (mm)	σ_R (mm)	t_{moy} (s)
73Y	LM	tanh	13,2	6,5	64
	LM	ReLU	8,4	3,8	8
	RB	tanh	15,5	7,4	65
	RB	ReLU	7,7	3,5	5
80Z	LM	tanh	12	6,6	89
	LM	ReLU	9,3	4,9	14
	RB	tanh	9,2	5	84
	RB	ReLU	7,8	3,5	8
130Y	LM	tanh	10,3	4,1	65
	LM	ReLU	6,3	1,7	7
	RB	tanh	12,2	5,5	54
	RB	ReLU	5,1	0,9	4

Tableau IV-7 Performances de RNN à une couche pour modéliser les séries 73Y, 80Z et 130Y à partir de données GNSS selon plusieurs paramètres

Comme observé dans le cas précédent, les entraînements des réseaux utilisant la fonction *tanh* sont notablement plus longs que ceux utilisant la fonction *ReLU*. Surtout, à la différence du cas avec les données environnementales en entrée, les réseaux utilisant la fonction *ReLU* se sont avérés bien plus performants. Cette différence peut en premier lieu paraître surprenante puisque les séries cibles sont identiques dans les deux cas, mais elle peut s'expliquer par le profil des entrées utilisées. La fonction *tanh* possède un « amortissement » entre le domaine linéaire et ses seuils qui la rend plus adaptée à établir les relations entre les variations ambiantes, lentes et déphasées, et les séries GNSS. La fonction *ReLU* est à l'inverse plus efficace pour relier des données GNSS plus fortement corrélées entre elles et avec des caractéristiques (fréquence d'échantillonnage d'origine, bruit) plus proches.

Jusqu'à ce point, seule la performance maximale obtenue par les différents réseaux a été considérée, et ce indépendamment de leur critère d'arrêt. On propose donc d'étudier l'écart type ζ des μ_R^{24h} obtenus par les quinze réseaux entraînés par jeu de paramètres (Tableau IV-8).

Cible	Entraînement	Fonction	ζ (mm) Données ambiantes	ζ (mm) Données GNSS
73Y	LM	tanh	6,3	13,1
	LM	ReLU	9	5,1
	RB	tanh	3,5	36,6
	RB	ReLU	19,4	12,8
80Z	LM	tanh	2,5	39,3
	LM	ReLU	83,1	4,5
	RB	tanh	3	10,9
	RB	ReLU	87,2	2,7
130Y	LM	tanh	10,9	8,2
	LM	ReLU	25,2	24,9
	RB	tanh	3,2	2,3
	RB	ReLU	23,1	6,9

Tableau IV-8 Comparaison de la stabilité des performances obtenues par différents RNN

Des dispersions très importantes peuvent être observées sur les performances obtenues par différents modèles : des RNN avec la même architecture, des paramètres identiques et entraînés sur le même intervalle peuvent offrir des performances largement différentes (Figure IV-16, Figure IV-17).

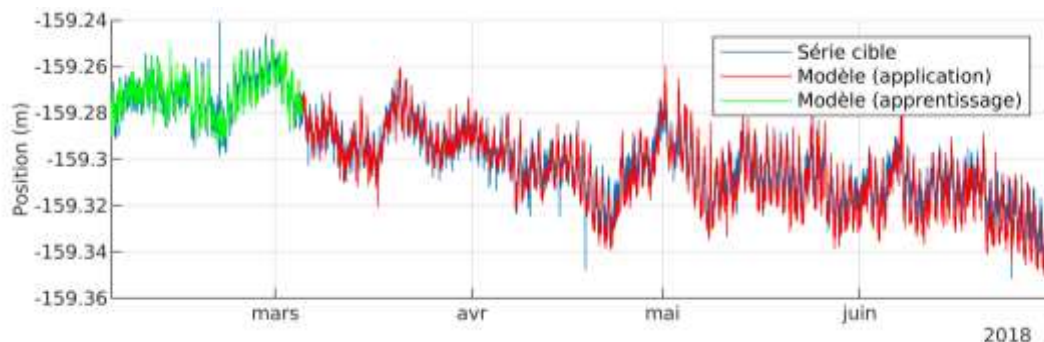


Figure IV-16 Exemple de modèle généré par RNN de la série 73Y avec une valeur de μ_R de 7mm

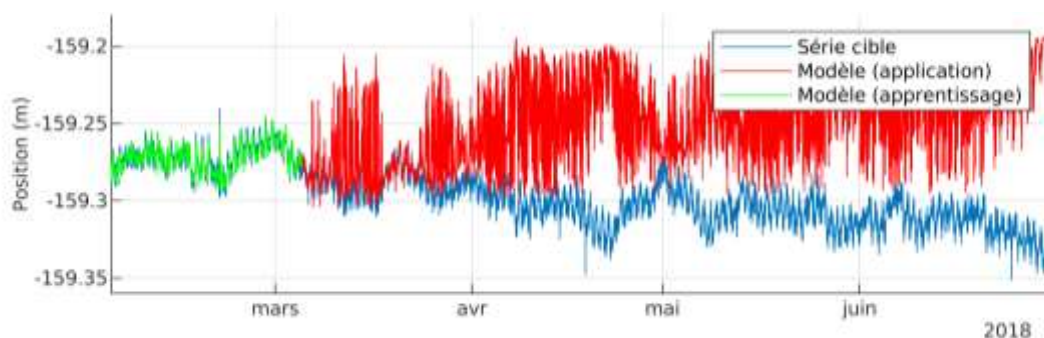


Figure IV-17 Exemple de modèle généré par RNN de la série 73Y avec une valeur de μ_R de plus de 40mm

Ces modèles anormaux sont majoritairement des réseaux pour lesquels l'entraînement n'a pas abouti au déclenchement d'un arrêt anticipé, et s'est arrêté après avoir atteint le nombre maximum d'itérations (2000). Pour le vérifier, on propose de recalculer ζ en éliminant les modèles ayant atteint le maximum d'itérations à l'entraînement (Tableau IV-9) (note : dans certains cas l'écart type n'a pas pu être calculé car un seul ou aucun réseau n'a eu d'arrêt anticipé).

Cible	Entraînement	Fonction	ζ (mm) Données ambiantes	ζ (mm) Données GNSS
73Y	LM	tanh	10,9	∅
	LM	ReLU	3,9	7,5
	RB	tanh	3,2	2,9
	RB	ReLU	21,7	6,9
80Z	LM	tanh	6,3	∅
	LM	ReLU	9	5,1
	RB	tanh	3,5	∅
	RB	ReLU	7,1	8,7
130Y	LM	tanh	2,5	0,3
	LM	ReLU	1,5	4,5
	RB	tanh	3	0,5
	RB	ReLU	∅	2,7

Tableau IV-9 Comparaison de la stabilité des performances obtenues par différents RNN après retrait des réseaux sans arrêt anticipé

La stabilité des performances obtenues est nettement améliorée dans la majorité des cas en ne sélectionnant que les réseaux à arrêt anticipé. Néanmoins, des variations significatives de performance subsistent. On souhaite vérifier si le critère d'arrêt anticipé d'un réseau peut être un indicateur de sa performance : le Tableau IV-10 représente le critère d'arrêt utilisé pour l'entraînement ayant obtenu la meilleure performance.

Cible	Entraînement	Fonction	Critère d'arrêt Données ambiantes	Critère d'arrêt Données GNSS
73Y	LM	tanh	Nombre d'itérations	Nombre d'itérations
	LM	ReLU	Coeff. d'apprentissage	Coeff. d'apprentissage
	RB	tanh	Nombre d'itérations	Coeff. d'apprentissage
	RB	ReLU	Coeff. d'apprentissage	Coeff. d'apprentissage
80Z	LM	tanh	Coeff. d'apprentissage	Nombre d'itérations
	LM	ReLU	Coeff. d'apprentissage	Coeff. d'apprentissage
	RB	tanh	Nombre d'itérations	Coeff. d'apprentissage
	RB	ReLU	Coeff. d'apprentissage	Gradient
130Y	LM	tanh	Coeff. d'apprentissage	Coeff. d'apprentissage
	LM	ReLU	Coeff. d'apprentissage	Coeff. d'apprentissage
	RB	tanh	Coeff. d'apprentissage	Gradient
	RB	ReLU	Coeff. d'apprentissage	Coeff. d'apprentissage

Tableau IV-10 Critères d'arrêt ayant obtenu les meilleures performances

L'arrêt sur le coefficient d'apprentissage est le résultat le plus récurrent, surtout dans les scénarios où les données ambiantes ont été utilisées en entrée, bien qu'il soit loin d'être systématique (environ 70% des cas). En considérant la dispersion des résultats malgré le retrait des réseaux sans arrêt anticipé (Tableau IV-9), il n'est pas possible d'identifier un critère permettant d'anticiper la performance des différents réseaux utilisés.

On recherche un estimateur capable d'anticiper la performance d'un modèle sur le long terme. Deux approches sont étudiées :

- l'estimateur μ_e qui représente la moyenne des RMSE journaliers uniquement sur l'intervalle d'apprentissage (Figure IV-18). Cette approche vise à tester si la précision atteinte lors de l'entraînement est un bon estimateur de la précision d'un réseau sur le long terme ;

- l'estimateur μ_r qui représente la moyenne des RMSE journaliers uniquement sur les premières journées de l'intervalle d'application (15 jours). Cette approche est envisagée car il a été observé que les modèles divergents voient généralement leur précision se dégrader rapidement en dehors de l'intervalle d'apprentissage (un exemple est visible dans la Figure IV-17). On souhaite donc vérifier si un court intervalle de vérification (Figure IV-18) peut être utilisé pour estimer la précision au long terme d'un modèle RNN.

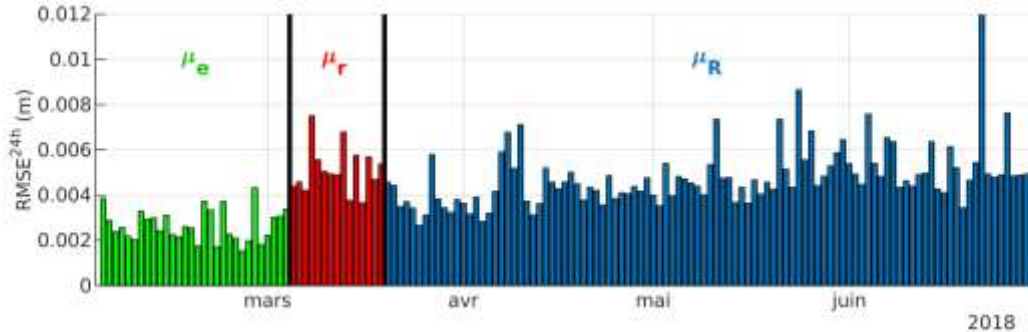


Figure IV-18 Répartition des échantillons utilisés pour le calcul de μ_e , μ_r et μ_R

Les estimateurs μ_e et μ_r des réseaux présentés dans le Tableau IV-7 et dont l'entraînement s'est terminé par un arrêt anticipé sont comparés à l'indicateur μ_R associé dans la (Figure IV-19).

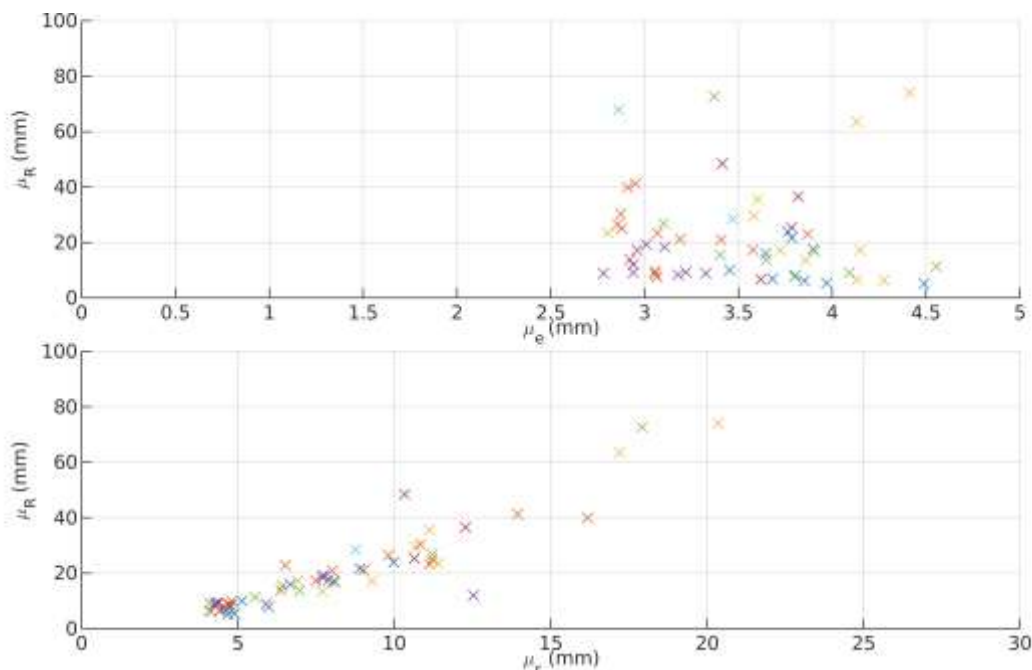


Figure IV-19 Comparaison des estimateurs μ_e (haut) et μ_r (bas) à l'indicateur μ_R (chaque couleur représente une architecture de réseau)

Il s'avère que la valeur μ_e obtenue sur l'intervalle d'apprentissage ne peut être utilisée pour estimer la précision d'un modèle à long terme. En revanche, l'indicateur μ_r estimé sur les 15 premiers jours de la prédiction apparaît comme un bon estimateur de la précision à long terme d'un modèle, malgré les entrées et sorties différentes des modèles considérés. A défaut d'obtenir avec certitude le modèle le plus précis possible, la sélection sur μ_r ressort comme une approche viable pour identifier un réseau parmi les plus précis. De plus, l'utilisation d'un intervalle de vérification relativement court en plus de celui d'apprentissage n'augmente pas drastiquement le volume de données nécessaires à l'élaboration d'un modèle.

Pour la suite de cette étude, on propose alors de dresser le portrait global des réseaux de neurones utilisés : des réseaux de neurones récurrents (RNN) à une seule couche, dont

l'entraînement est réalisé à l'aide de la régularisation bayésienne. Le choix de la fonction de transfert semble conditionné au type d'entrées utilisées : pour des données environnementales uniquement, on préférera la fonction \tanh , tandis que la fonction $ReLU$ sera utilisée pour des modèles prenant en entrée des séries GNSS. Etant donné d'une part que le nombre de neurones optimal peut être variable selon les entrées utilisées et qu'il a été montré que l'ajout d'un surplus de neurones pouvait être pénalisant, et d'autre part qu'il n'a pas été possible de sélectionner un critère d'arrêt optimal, le protocole suivant est proposé :

- pour chaque scénario (entrées et sortie d'un modèle), plusieurs réseaux avec un nombre de neurones compris entre 3 et 10 sont entraînés, environ une dizaine par architecture ;
- les réseaux dont l'entraînement ne s'est pas arrêté de façon anticipée sont éliminés ;
- la valeur de μ_r est calculée sur un intervalle de vérification constitué des 15 premiers jours suivant la fin de l'intervalle d'apprentissage ;
- le réseau avec la valeur de μ_r la plus faible est sélectionné.

Ce protocole est appliqué dans les paragraphes suivants.

IV.3.4. ETUDE DE SENSIBILITE DES OUTILS DE REGRESSION

L'approche des réseaux de neurones artificiels (suivant le protocole détaillé précédemment) est comparée dans ce paragraphe via une étude de sensibilité aux outils de régression suivants :

- un modèle linéaire multivarié (MLR), dont les poids $w(r)$ sont ajustés en fonction des résidus $r(t)$ grâce à une fonction bicarrée (Eq. IV-35), avec comme constante d'ajustement $k = 4,685$, la fonction et la valeurs étant des valeurs courantes justifiées par leur efficacité (Fox et al., [2002]) ;

$$w(r) = \left(1 - \left(\frac{r}{k}\right)^2\right)^2 \text{ si } |r| \leq k, \quad w(r) = 0 \text{ si } |r| > k \quad \text{Eq. IV-35}$$

- un second modèle MLR avec la même fonction, mais dont les entrées incluent un délais d : un série cible $Y(t)$ est modélisée en fonction de $X(t), X(t-1), \dots, X(t-d)$. Cette approche vise à émuler celle des TDNN afin de relier certains comportements observés en différents points de l'ouvrage malgré une inertie différente. On propose de nommer cette approche « *Time Delay Multivariate Linear Regression* » TDMLR. Le modèle utilisé, TDMLR_{12h}, prend en compte un délai maximal de 12h avec un intervalle de 1h (Eq. IV-36) ;

$$\text{Pour le modèle TDMLR}_{12h}, Y(t) = f(X(t), X(t-1h), \dots, X(t-12h)) \quad \text{Eq. IV-36}$$

- un modèle ARIMAX(1,1,1) (Eq. IV-5) ;
- un modèle SVM comportant une fonction noyau linéaire, dont l'optimisation est réalisée par la méthode *Sequential Minimal Optimization* (SMO) (Flake et al., [2002]; Keerthi et al., [2002]), et noté SVM_{lin} ;
- un modèle SVM comportant une fonction noyau gaussienne (ou *radial basis function*, RBF), optimisé avec la méthode SMO, et noté SVM_{RBF}.

Pour les outils avancés comme les modèles ARIMAX ou SVM, il n'a pas été tenté de les optimiser finement selon les scénarios considérés. Leur utilisation vise ici plutôt à donner une référence de leur performance au lecteur avec un paramétrage simple en comparaison à des réseaux de neurones dont les paramètres ont été plus sensiblement affinés mais qui demeurent, dans cette étude, des modèles relativement simples en raison de leur petite taille.

Afin d'évaluer la sensibilité des réseaux de neurones à l'intervalle d'apprentissage, plusieurs scénarios sont étudiés. Les mêmes séries temporelles (73Y, 80Z et 130Y) que celles utilisées dans le Paragraphe IV.3.3.5 sont considérées dans cette analyse. Pour chaque série cible, quatre jeux de données utilisés en entrée sont considérés :

- le scénario n°1 dans lequel les entrées (GNSS uniquement) sont corrélées à la cible ($C_p > 0,6$) (Figure III-49) ;
- le scénario n°2, qui reprend le scénario n°1 mais dont les entrées très fortement corrélées à la cible ($C_p > 0,9$) ont été retirées ;
- le scénario n°3, qui combine le scénario n°2 et des données ambiantes (température et les charges solaires normales) ;
- le scénario n°4, qui n'utilise que des données ambiantes (température et les charges solaires normales).

La liste des entrées utilisées pour chaque scénario est détaillée dans le Tableau IV-11. Les intervalles des jeux de données sont précisés, ceux-ci étant dictés par la disponibilité des données de façon à minimiser les interruptions. La mention CSN regroupe les cinq charges solaires normales calculées (cf. Paragraphe IV.3.1).

Cible	Scénario	Entrées	Intervalle
73Y	n°1	77X, 81X, 83X, 84X, 130X, 77Y, 81Y, 83Y, 84Y, 130Y	03/02/2018 – 30/06/2018
	n°2	77X, 81X, 84X, 130X, 77Y, 81Y, 84Y, 130Y	03/02/2018 – 30/06/2018
	n°3	Température, CSN, 77X, 81X, 84X, 130X, 77Y, 81Y, 84Y, 130Y	17/02/2018 – 24/05/2018
	n°4	Température, CSN	17/02/2018 – 24/05/2018
80Z	n°1	73Y, 77Y, 81Y, 83Y, 84Y, 130Y, 73Z, 77Z, 81Z, 83Z, 84Z, 130Z	03/02/2018 – 30/06/2018
	n°2	73Y, 81Y, 83Y, 73Z, 81Z, 83Z	03/02/2018 – 30/06/2018
	n°3	Température, CSN, 73Y, 81Y, 83Y, 73Z, 81Z, 83Z	17/02/2018 – 24/05/2018
	n°4	Température, CSN	17/02/2018 – 24/05/2018
130Y	n°1	73Y, 77Y, 81Y, 83Y, 84Y, 73Z, 77Z, 81Z, 83Z, 84Z	03/02/2018 – 30/06/2018
	n°2	73Y, 81Y, 83Y, 84Y, 73Z, 81Z, 83Z, 84Z	03/02/2018 – 30/06/2018
	n°3	Température, CSN, 77Y, 77Z	17/02/2018 – 24/05/2018
	n°4	Température, CSN	17/02/2018 – 24/05/2018

Tableau IV-11 Jeux de données utilisés pour l'étude de sensibilité à l'intervalle d'apprentissage

Pour chaque scénario, quatre intervalles d'apprentissage différents ont été utilisés :

- l'intervalle noté Int_1 , de la 1^{ère} à la 30^{ème} journée du jeu de données ;
- l'intervalle noté Int_2 , de la 1^{ère} à la 45^{ème} journée du jeu de données ;
- l'intervalle noté Int_3 , de la 31^{ère} à la 60^{ème} journée du jeu de données ;
- l'intervalle noté Int_4 , de la 31^{ère} à la 75^{ème} journée du jeu de données ;

Pour chaque intervalle, l'indicateur μ_R (représentant la moyenne des RMSE quotidiens) a été calculé pour les modèles générés avec les différents outils de régression détaillés dans le Paragraphe IV.3.2. Le protocole détaillé dans le Paragraphe IV.3.3.5 est utilisé pour la sélection d'un RNN optimal pour chaque intervalle. Les résultats obtenus pour les séries 73Y, 80Z et 130Y sont représentés dans la Figure IV-20, la Figure IV-21 et la Figure IV-22, respectivement.

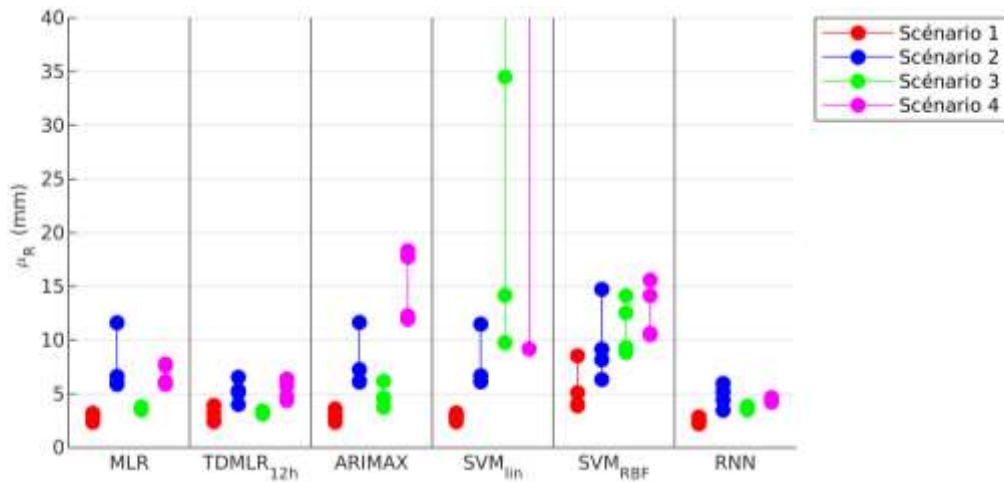


Figure IV-20 Comparaison de modèles de la série 73Y selon différents scénarios et intervalles d'apprentissage

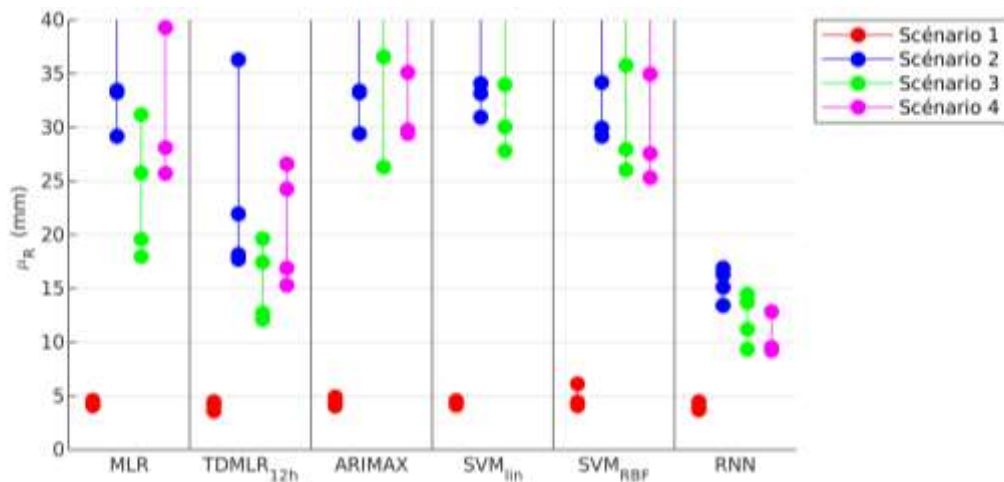


Figure IV-21 Comparaison de modèles de la série 80Z selon différents scénarios et intervalles d'apprentissage

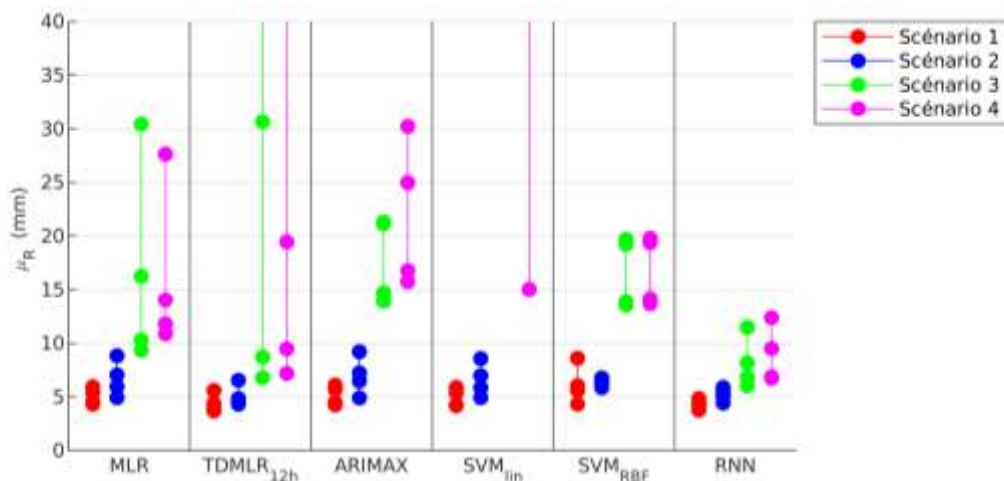


Figure IV-22 Comparaison de modèles de la série 130Y selon différents scénarios et intervalles d'apprentissage

Il est observé que les RNN offrent les performances (μ_R le plus faible) les plus stables selon les quatre intervalles d'apprentissage testés, et globalement les meilleures performances. On peut diviser les différents scénarios en deux cas :

- les cas où la majorité des modèles présentent une stabilité et des performances similaires, pour le scénario n°1 avec les trois séries, le scénario n°2 pour la série 130Y et le scénario n°3 pour la série 73Y ;

- les autres cas où la majorité des modèles sont d'une part significativement moins performants que les RNN, et d'autre part beaucoup moins stables.

Les RNN mènent généralement aux erreurs les plus faibles dans la majorité des scénarios, ou à défaut, parmi les plus faibles. On observe également avec les RNN une dégradation moins importante de leur performance par rapport aux autres outils lors de l'utilisation de données moins fortement corrélées. Dans certains cas, les modèles SVM_{lin} ont rencontré des problèmes de convergence entraînant des erreurs très fortes (scénarios n°3 et n°4 pour le modèle SVM_{lin} des séries 73Y et 130Y). Même en ignorant ces situations, leur performance reste généralement inférieure à celle des RNN. Les RNN sont ainsi globalement beaucoup moins sensibles à la sélection de l'intervalle d'apprentissage et capables d'extraire des relations plus complexes que les autres méthodes.

Néanmoins, l'utilisation d'un seul mois d'apprentissage pour une projection sur plusieurs mois demeure un cas relativement extrême. Selon les bonnes pratiques, l'apprentissage devrait être réalisé sur une période suffisamment longue pour rendre compte des différents comportements saisonniers (par exemple sur un an). Comme, la disponibilité des données sur le pont de Brotonne limite la possibilité de réaliser un tel apprentissage dans le cadre de cette étude, on propose de simuler cet apprentissage en utilisant deux intervalles, situés en été 2017 et en hiver 2017-2018, représentant les conditions météorologiques limites rencontrées par l'ouvrage, pour l'entraînement des modèles. Trois paires d'intervalles notées *Int*₅, *Int*₆ et *Int*₇ sont considérées, de durées totales de 4 semaines, 8 semaines et 16 semaines, respectivement (Tableau IV-12). Lors de l'entraînement, les données des deux intervalles sont jointes.

Intervalle	Echantillon été	Echantillon hiver
<i>Int</i> ₅	02/06/2017 – 16/06/2017	29/11/2017 – 13/12/2017
<i>Int</i> ₆	02/06/2017 – 01/07/2017	29/11/2017 – 28/12/2017
<i>Int</i> ₇	02/06/2017 – 31/07/2017	29/11/2017 – 27/01/2017

Tableau IV-12 Intervalles utilisés pour l'apprentissage saisonnier

En raison de l'indisponibilité des données de température et d'ensoleillement locales durant l'année 2017, celles-ci ont été remplacées par les données Météo-France et HelioClim-3. La série 77Y du capteur GNSS du pylône nord à la série 130Y du pylône sud pour les mêmes raisons.

Les quatre mêmes scénarios ont été considérés. En raison de l'indisponibilité de certains capteurs sur les intervalles utilisés, les entrées peuvent être différentes par rapport à la série de modèles précédente (Tableau IV-13).

Cible	Scénario	Entrées
73Y	n°1	70Y, 74Y, 77Y, 81Y, 83Y, 85Y, 74Z, 77Z, 84Z
	n°2	77Y, 81Y, 85Y, 74Z, 77Z, 84Z
	n°3	Temp, CSN, 77Y, 81Y, 85Y, 74Z, 77Z, 84Z
	n°4	Temp, CSN
80Z	n°1	70Y, 73Y, 74Y, 77Y, 81Y, 83Y, 84Y, 70Z, 73Z, 74Z, 77Z, 81Z, 83Z, 84Z
	n°2	70Y, 73Y, 74Y, 81Y, 83Y, 77Z
	n°3	Temp, CSN, 70Y, 73Y, 74Y, 81Y, 83Y, 77Z
	n°4	Temp, CSN
77Y	n°1	70Y, 73Y, 74Y, 81Y, 83Y, 84Y, 70Z, 73Z, 74Z, 81Z, 83Z, 84Z
	n°2	73Y, 81Y, 77Z
	n°3	Temp, CSN, 73Y, 81Y, 77Z
	n°4	Temp, CSN

Tableau IV-13 Jeux de données utilisés pour l'étude de sensibilité à l'intervalle d'apprentissage

Comme pour les intervalles d'apprentissage 1 à 4, on s'intéresse aux écarts de performance entre les modèles entraînés sur les intervalles *Int*₅, *Int*₆ et *Int*₇. Les modèles sont ensuite appliqués sur un intervalle s'étalant du 29/11/2017 au 30/06/2018, soit environ 213 jours

(moins les 15, 30 et 60 jours utilisés par l'apprentissage avec les intervalles Int_5 , Int_6 et Int_7 , respectivement).

Les valeurs de μ_R obtenues par chaque technique et pour chaque intervalle sont représentées dans la Figure IV-23, la Figure IV-24 et la Figure IV-25 pour les séries 73Y, 80Z et 77Y, respectivement.

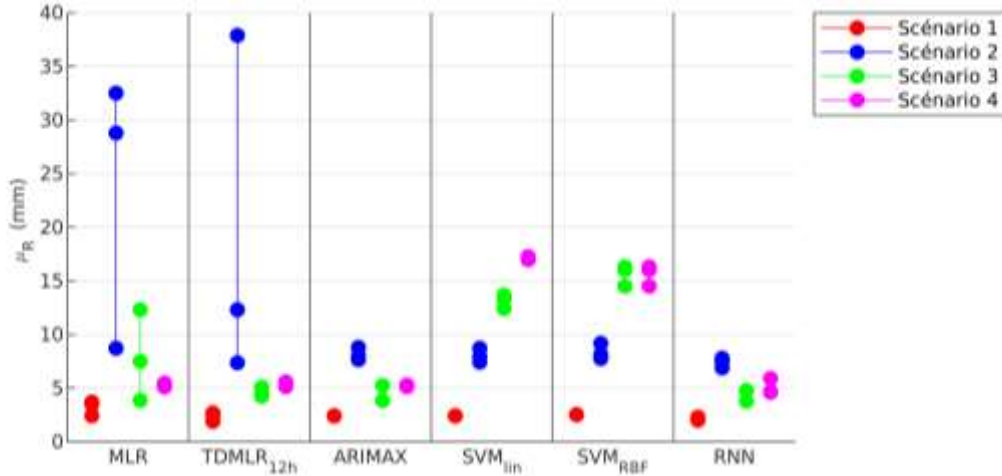


Figure IV-23 Comparaison de modèles la série 73Y selon différents scénarios et intervalles d'apprentissage (2)

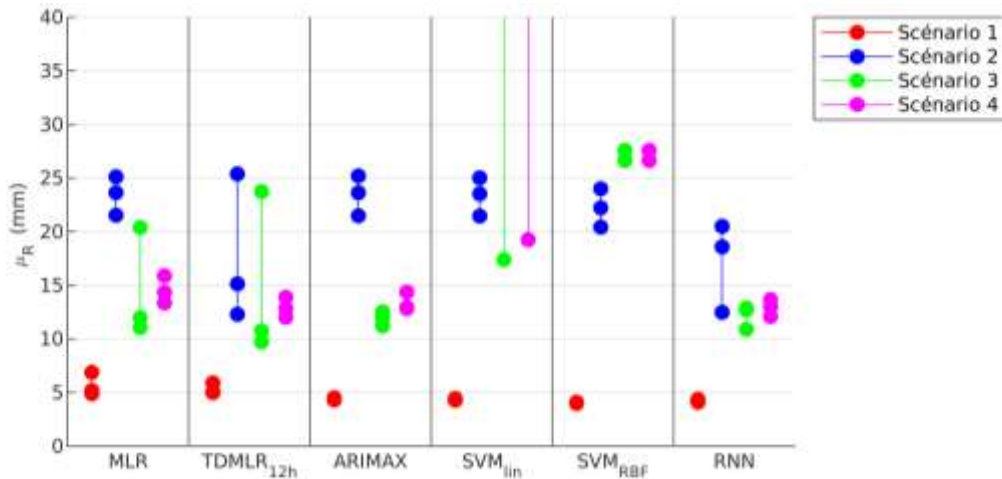


Figure IV-24 Comparaison de modèles de la série 80Z selon différents scénarios et intervalles d'apprentissage (2)

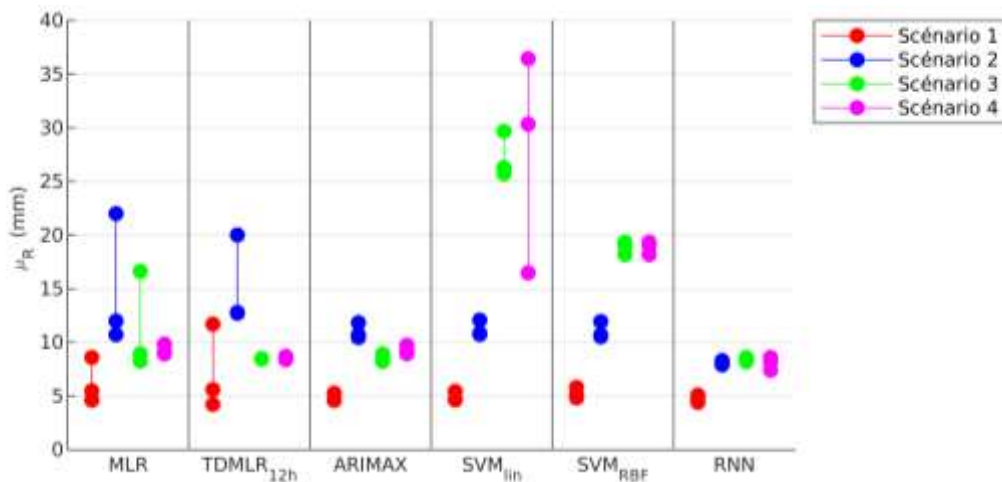


Figure IV-25 Comparaison de modèles de la série 77Y selon différents scénarios et intervalles d'apprentissage

En comparaison avec l'apprentissage réalisé sur des intervalles simples (Figure IV-20, IV-21 et IV-22), les résultats montrent un resserrement des performances et de la stabilité des différents outils dans les Figure IV-23, IV-24 et IV-25. Néanmoins, les méthodes MLR, TDMLR et SVM ont toutes rencontré des irrégularités importantes dans au moins un scénario avec chaque capteur (par exemple sur les jeux n°6 et n°7 pour la modélisation de 73Y). Il est d'ailleurs notable que les « pires » performances (μ_R le plus élevé) n'ont pas toujours été obtenues en utilisant l'intervalle d'apprentissage le plus court. A l'inverse, les méthodes ARIMAX et RNN se sont avérées les plus stables. Cependant, les performances obtenues par les RNN sont dans la quasi-totalité des cas légèrement supérieures.

Ces résultats confirment les conclusions faites précédemment : les RNN représentent la méthode la plus stable face au changement d'intervalle d'apprentissage, en étant capables d'extraire régulièrement un maximum des relations entre séries temporelles même à partir d'intervalles courts. Il ressort également que la méthodologie proposée pour l'utilisation des RNN offre globalement les modèles régressifs les plus performants. L'utilisation d'un intervalle d'apprentissage constitué d'un mois de données en hiver et d'un mois en été (Int_5) semble un bon compromis entre la performance et le volume de données nécessaire.

L'étude des outils de régression sur plusieurs jeux de données a mis en évidence que la performance des RNN était moins affectée par le retrait des entrées les plus fortement corrélées à la série cible. Puisque les séries étudiées (73Y, 80Z et 77Y) présentent différents degrés de corrélation avec les autres capteurs, on propose de trier plus finement les données (GNSS et environnantes) en entrée des modèles selon leur corrélation à la série cible :

- scénario A : entrées très fortement corrélées ($C_p > 0,9$) ;
- scénario B : entrées fortement corrélées ($C_p > 0,8$) ;
- scénario C : entrées corrélées ($C_p > 0,6$) ;
- scénario D : entrées corrélées, mais celles très fortement corrélées sont exclues ($0,9 > C_p > 0,6$) ;

Les modèles sont entraînés sur l'intervalle Int_5 et appliqués sur un intervalle s'étalant du 29/11/2017 au 30/06/2018 (soit 183 jours une fois les journées d'entraînement retirées). Les résultats sont présentés dans le Tableau IV-14.

Série cible	Outil	Scenario A	Scenario B	Scenario C	Scenario D
		μ_R (mm)	μ_R (mm)	μ_R (mm)	μ_R (mm)
73Y	MLR	3,0	3,0	3,3	13,0
	TDMLR	2,6	2,8	2,3	11,0
	ARIMAX	2,4	2,4	2,3	4,6
	SVM _{lin}	2,4	3,5	2,5	5,2
	SVM _{RBF}	2,7	5,0	4,9	6,1
	RNN	2,4	2,3	2,1	4,0
80Z	MLR	4,5	4,0	4,1	14,5
	TDMLR	3,9	4,2	3,7	14,5
	ARIMAX	4,0	4,0	4,1	14,4
	SVM _{lin}	4,1	4,1	4,1	14,5
	SVM _{RBF}	4,6	4,0	4,0	14,1
	RNN	3,9	3,7	3,8	9,1
77Y	MLR	9,6	8,6	6,5	8,0
	TDMLR	9,8	7,5	7,0	7,8
	ARIMAX	7,9	7,3	6,4	6,9
	SVM _{lin}	8,0	7,4	9,5	13,1

	SVM _{RBF}	8,0	6,6	8,0	8,5
	RNN	7,0	5,3	5,6	6,4

Tableau IV-14 Comparaison d'outils de régression selon la corrélation des entrées d'un modèle

Pour les trois séries, le comportement de chaque outil est relativement stable entre les scénarios A, B et C. De légers gains en performance sont observés avec l'utilisation d'un seuil de corrélation plus faible augmentant le nombre d'entrées des modèles. Avec le scénario D, la situation est différente selon les séries cible : pour la série 77Y, peu de variations sont observées (on note d'ailleurs que dans ce cas précis, utiliser plus d'entrées moins fortement corrélées améliore la précision). En revanche, pour la série 73Y, les modèles MLR et TDMLR subissent une très forte dégradation tandis que celle-ci est moindre pour les modèles ARIMAX, SVM et RNN. Enfin, pour la série 80Z, tous les modèles à l'exception des RNN subissent une dégradation de l'ordre de 10 mm, tandis que celle observée sur le modèle RNN est plutôt de l'ordre de 5 mm.

En accord avec ce qui a été observé précédemment, il ressort que les RNN fournissent généralement la meilleure performance des différents outils testés, ou sinon proche de la meilleure, et surtout qu'ils sont moins sensibles au changement d'intervalle d'apprentissage et plus à même d'exploiter des données dont les relations sont plus faibles entre elles. Ces modèles sont utilisés dans le paragraphe suivant pour établir un formalisme de détection d'anomalies.

IV.4. DETECTION DES ANOMALIES A L'AIDE DES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

IV.4.1. PRINCIPES ET ENJEUX

IV.4.1.1. UTILISATION DES MODELES POUR LA DETECTION D'ANOMALIES

Les paragraphes précédents ont permis d'identifier les RNN comme outil privilégié pour la génération de modèles par apprentissage de séries temporelles GNSS. Pour en illustrer l'utilisation pour l'identification d'anomalies ou de changements de comportement, on s'intéresse au cas d'une perturbation réelle dont les dates sont connues : l'installation d'échafaudages et de treuils sur le tablier coté amont entre le 25 mai et le 19 juin 2018. Un modèle RNN des déplacements longitudinaux du capteur 80 (80Y) généré par apprentissage sur un mois d'été et un mois d'hiver, et avec des entrées sélectionnées selon le Scénario n°1 (cf. Paragraphe IV.3.4) est présenté dans la Figure IV-26.

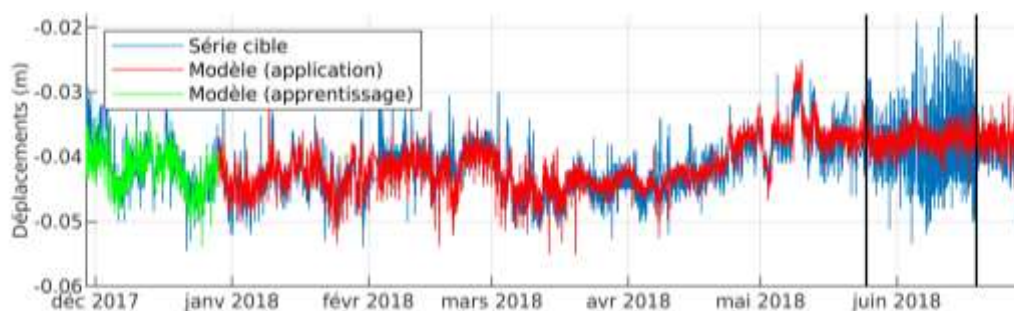


Figure IV-26 Modèle RNN de la série 80Y pour l'identification d'anomalies (période d'intervention indiquée en noir).

L'identification de la période anormale est relativement aisée. On observe également que l'écart entre la prédiction et les données est plus faible au début de l'intervention. Cette différence s'explique par le fait que le 25 mai est la date de début de l'installation des équipements sur le tablier, il est donc fort probable que sur les premiers jours, moins d'équipements soient installés sur le tablier, générant moins de vibrations et d'effets de masques.

Afin de faciliter l'exploitation du résidu prédiction/observation, on propose d'utiliser les variations du RMSE quotidiens ($RMSE^{24h}$) de la prédiction par intervalles de 24 heures (Figure

IV-27). L'évolution des résidus pendant l'installation des équipements sur le tablier peut être observée :

- pendant les premiers jours de l'intervention, du 25 mai au 2 juin 2018, les RMSE quotidiens ont une moyenne sensiblement plus élevée que sur les mois précédents, correspondant à la période où les équipements commencent à être installés ;
- pendant le reste de l'intervention, à partir du 3 juin 2018, les RMSE quotidiens atteignent des valeurs bien supérieures à ce qui a été observé précédemment, correspondant à la période où tous les équipements sont en place.



Figure IV-27 RMSE du modèle RNN de la série 80Y.

Si cette brève étude des résidus permet d'illustrer l'utilisation des modèles RNN pour l'identification d'anomalies, on souhaite vérifier l'intérêt de l'utilisation des RNN par rapport à des modèles plus simples. Pour cela, on compare dans la Figure IV-28 la prédiction et les résidus du modèle RNN avec ceux d'un modèle TDMLR avec les mêmes entrées (le TDMLR s'étant avéré globalement comme le second outil le plus stable durant l'étude de sensibilité).

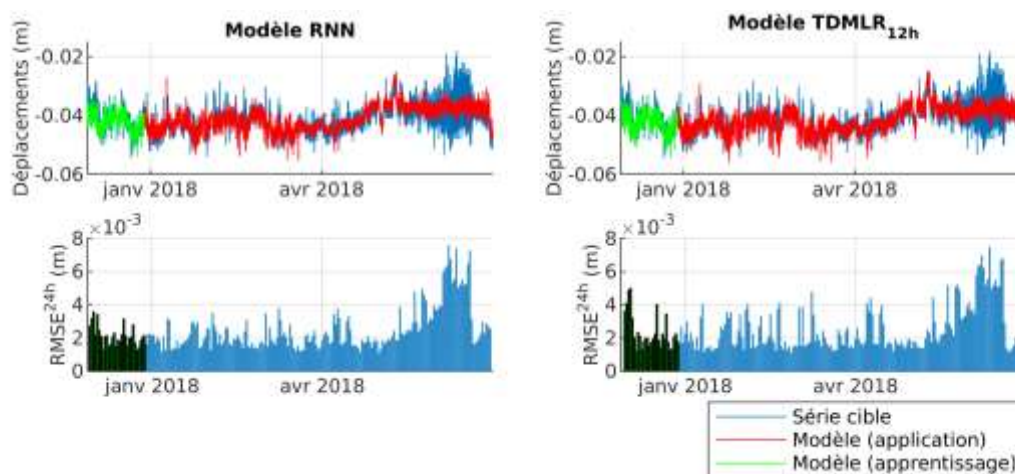


Figure IV-28 Comparaison d'un modèle RNN et d'un modèle TDMLR pour l'identification d'anomalies.

Les prédictions et par conséquent les résidus des deux modèles sont très fortement similaires : dans ce cas précis, l'utilisation des RNN n'améliore pas significativement l'identification de l'anomalie dans la série temporelle 80Y. Cependant, l'intérêt des RNN est plus notable pour les scénarios où les données d'entrées ne sont pas très fortement corrélées à la série cible. Dans le scénario étudié ici, les données d'entrées utilisées incluent notamment les déplacements longitudinaux du capteur 84, situé symétriquement de l'autre côté de la chaussée. On dispose donc de deux capteurs proches dont les déplacements sont très fortement corrélés : les modèles par apprentissage donnent alors un poids très fort à la série 84Y pour la prédiction de la série 80Y puisque celles-ci sont pratiquement identiques la majorité du temps. Or le cas étudié est relativement particulier et favorable : bien que les deux capteurs soient proches et corrélés, seul un capteur est affecté. La différence de comportement est donc très facilement détectable. Il est pourtant envisageable qu'une anomalie ou une charge exceptionnelle sur le

tablier affecte les observations de deux capteurs : si les deux capteurs observent la même anomalie, un modèle exploitant la série 84Y en entrée pourrait erronément innocenter une anomalie présente sur la série 80Y. On propose alors de comparer l'utilisation d'un modèle RNN et d'un modèle TDMLR n'exploitant pas les données du capteur 84 pour la prédiction de 80Y.

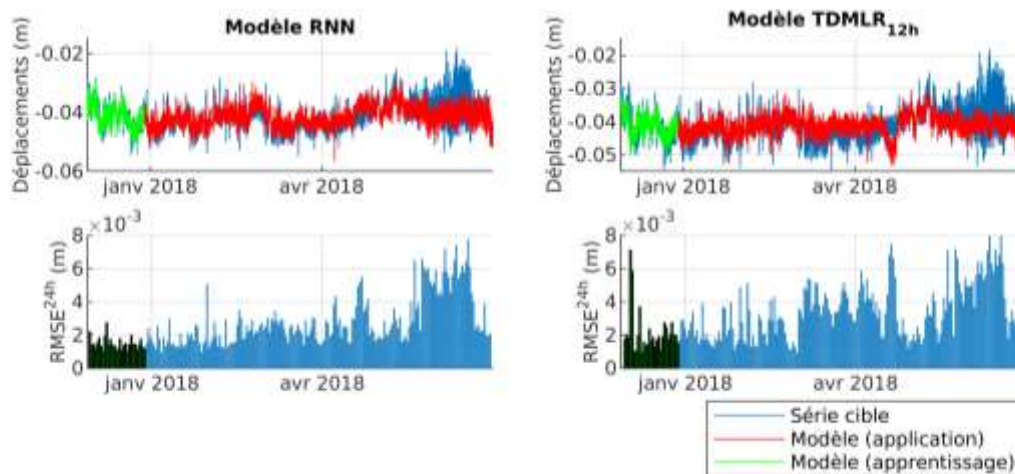


Figure IV-29 Comparaison d'un modèle RNN et d'un modèle TDMLR pour l'identification d'anomalies (2).

La différence entre les deux modèles est alors bien plus marquée :

- avec le modèle RNN, le RMSE est stable les journées sans chantier, tandis que la période d'intervention reste clairement identifiable. Néanmoins, on observe une période dans la seconde moitié du mois d'avril avec des résidus sensiblement plus forts : l'origine de cette anomalie sera étudiée dans le Paragraphe IV.4.1.2 ;
- avec le modèle TDMLR, le RMSE quotidien présente une augmentation nette à partir de la fin du mois de février. Dans le domaine temporel, on peut constater que cette augmentation est due au fait que le modèle ne semble pas prédire les variations saisonnières. Si la période d'intervention est révélée par des forts résidus, elle est en revanche nettement plus difficile à distinguer des journées « normales » à partir du mois de mars.

Ainsi, le cas des perturbations réelles observées sur le capteur 80 confortent les résultats obtenus dans le Paragraphe IV.3.4 en validant l'intérêt des modèles RNN pour la détection d'anomalies.

IV.4.1.2. IDENTIFICATION DES CAPTEURS AFFECTES

Le cas présenté dans le paragraphe précédent est une situation relativement simple dont tous les paramètres sont connus : la localisation du chantier (ou de la source de l'anomalie) et sa durée. Cependant, dans un cas plus général, l'identification de périodes anormales à l'aide de modèles par apprentissage d'une série cible Y ne signifie cependant pas forcément que l'anomalie se situe sur la série cible. En effet, dans le cas d'un modèle M utilisant des entrées X pour la prédiction de Y , il existe plusieurs sources possibles à une anomalie observée dans le résidu : soit la série Y , soit une ou plusieurs des entrées X , soit le modèle M s'il est incapable de prédire le comportement de la cible dans des conditions particulières.

Pour pallier à ce problème, on propose d'exploiter l'aspect « réseau » permis par le déploiement de capteurs GNSS à bas coût et les nombreuses relations de corrélations observées entre la plupart des capteurs en combinant plusieurs modèles d'une série temporelle donnée. On propose d'illustrer la démarche en s'intéressant au cas des déplacements longitudinaux enregistrés par le capteur 73 (73Y), situé sur le viaduc d'accès du pont de Brotonne, à proximité de la culée sud.

Un premier modèle RNN est étudié, réalisé à partir des données des capteurs très fortement corrélés (scénario A, cf. Paragraphe IV.3.4), les capteurs 70 et 74 situés de part et d'autre du joint de chaussée opposé (Figure IV-30).

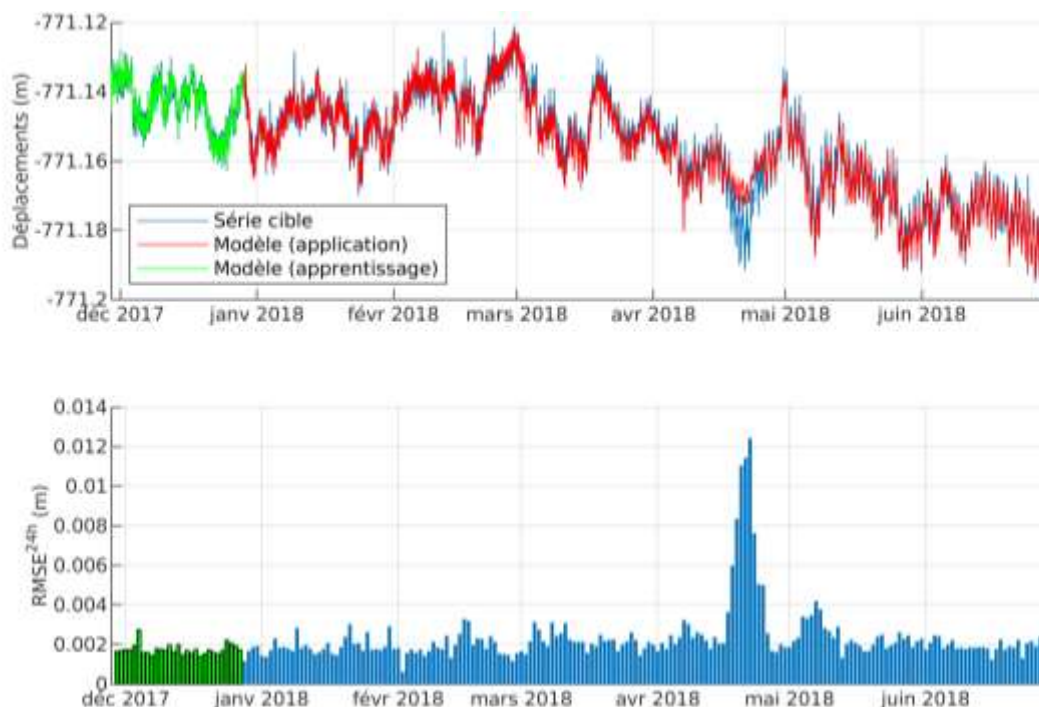


Figure IV-30 Modèle RNN et résidus de la prédiction de la série 73Y.

Le $RMSE^{24h}$ moyen est très faible (environ 2 mm) comparé à l'écart type de la série cible (environ 16 mm), et deux périodes anormales ressortent : une période du 17 au 25 avril 2018, et une seconde du 4 au 8 mai 2018 environ. La première est significativement plus forte, et représente l'anomalie la plus significative sur la série 73Y.

On propose alors d'étudier les résidus d'un modèle ayant des entrées moins fortement corrélées (scénario D, cf. Paragraphe IV.3.4) pour vérifier si ces mêmes anomalies peuvent être repérées (Figure IV-31).

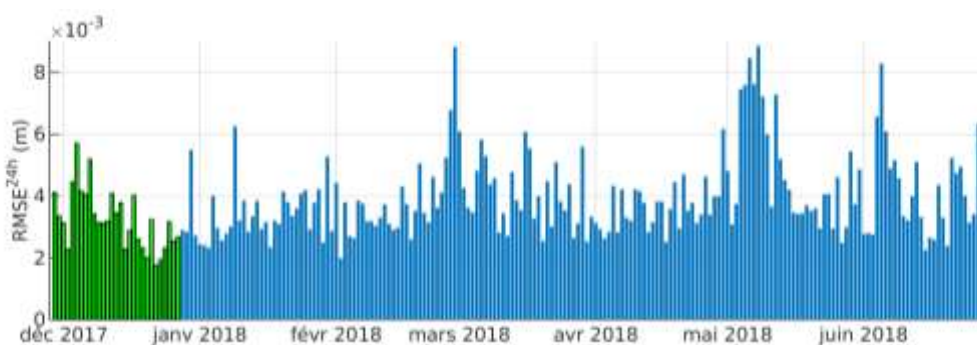


Figure IV-31 Résidus d'un second modèle prédictif de la série 73Y.

Le $RMSE^{24h}$ moyen est plus élevé qu'avec le modèle précédent (environ 4 mm) mais reste faible en comparaison de l'écart type de la série cible. Il est possible d'identifier visuellement trois périodes d'anomalie : quelques jours aux alentours du 1^{er} mars et du 5 juin 2018, et sur une période allant du 4 au 9 mai 2018 environ. On remarque alors en comparant les résidus des deux modèles que la première anomalie identifiée dans le premier scénario (du 17 au 25 avril 2018) ne ressort pas avec le second modèle. En étudiant la prédiction dans le domaine temporel (Figure IV-32), on constate que la prédiction du modèle est bonne, malgré le fait que ce modèle soit globalement moins précis.

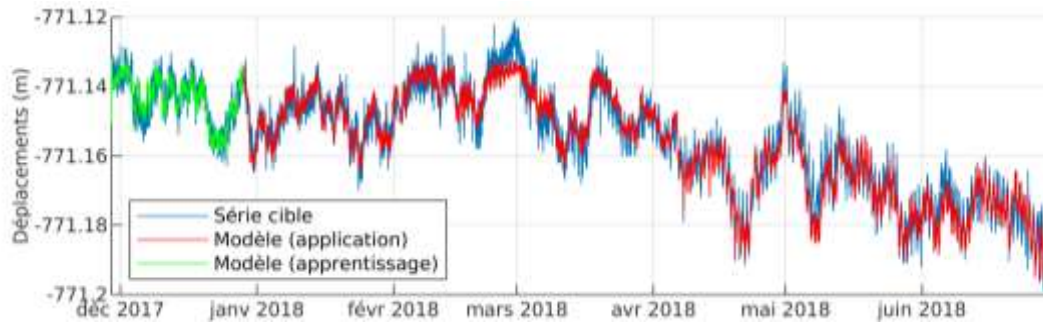


Figure IV-32 Prédiction de la série 73Y à partir d'un modèle RNN dans le scénario D.

Ainsi, bien que la période du 17 au 25 avril 2018 ait été considérée dans un premier temps comme la plus critique, le fait qu'un des deux modèles soit capable de modéliser le comportement du capteur sur cette période indique que l'anomalie est imputable soit aux entrées utilisées, soit aux limites du RNN lui-même. En parallèle, l'anomalie de la période du 4 au 8-9 mai 2018, bien que plus faible, est plus significative, car présente pour les deux modèles.

Pour conforter ce raisonnement, on utilise les résidus d'un troisième modèle de la série 73Y, celui-ci utilisant exclusivement des données environnementales (température, CSN) en entrée (Figure IV-33).



Figure IV-33 Résidus d'un troisième modèle prédictif de la série 73Y.

Le $RMSE^{24h}$ moyen est sensiblement plus élevé que ceux des modèles précédents (de l'ordre de 5 mm), mais toujours largement en dessous de l'écart type de la série 73Y. Si de plus nombreuses périodes anormales peuvent être identifiées, on constate néanmoins que :

- la période du 17 au 25 avril 2018 n'est pas identifiée comme anormale ;
- la période du 4 au 9 mai ressort ici aussi comme anormale.

Compte tenu de la capacité des deuxième et troisième RNN à prédire le comportement du capteur 73 sur la période du 17 au 25 avril 2018, il est possible d'attribuer l'anomalie observée à une ou plusieurs des entrées du premier modèle (capteurs 70 et 74). On remarque par ailleurs que cette période coïncide avec celle de l'anomalie détectée avec les prédictions des déplacements du capteur 80 (Figure IV-29), le RNN en question utilisant lui aussi les données des capteurs 70 et 74 en entrée.

Après étude des séries temporelles, il s'avère que les séries issues des capteurs 70 et 74 comportent une coupure, probablement imputable à un problème technique lors de l'acquisition ou du stockage qui n'a pas été détecté lors de leur nettoyage. Les séries sont en effet « plates » entre le 17 avril 7h00 et le 26 avril 10h : des positions ont été générées sur cet intervalle alors que les observations n'étaient pas disponibles (un trou dans les données était attendu). Si la cause de l'anomalie peut une nouvelle fois être assez facilement identifiée, l'objectif était ici de proposer une démarche valide mettant à profit les capteurs disponibles pour identifier la source d'une anomalie observée sur plusieurs modèles.

Enfin, cette démarche permet d'identifier la période du 4 au 9 mai 2018 comme anormale pour les déplacements du capteur 73, cette dernière ayant été constatée par les trois modèles ayant pourtant des entrées différentes. L'origine de cette anomalie n'est pas connue avec précision, mais il est possible d'envisager que celle-ci soit due à la présence des équipements de l'intervention réalisée durant l'été sur le tablier. Les équipements utilisés (treuils, échafaudages), d'un poids total de 35 tonnes environ selon l'exploitant, étaient initialement installés au niveau de la culée sud, avant d'être progressivement déplacés sur le tablier à partir de la mi-mai. Il est possible (mais pas confirmé) que des opérations intermédiaires aient eu lieu sur le viaduc d'accès avant les opérations sur le tablier principal : il est concevable que le poids du matériel ait un impact sur le comportement du viaduc aux alentours.

IV.4.2. STRATEGIE D'AUTOMATISATION PROPOSEE

IV.4.2.1. ALGORITHME GLOBAL

L'approche présentée dans le Paragraphe IV.4.1.2 à l'aide de plusieurs modèles de la série 73Y a permis, en mettant à profit la multiplicité des capteurs déployés, d'identifier les sources de deux anomalies sur les séries temporelles des capteurs 70, 73 et 74. On souhaite automatiser cette approche en l'appliquant à l'ensemble des capteurs GNSS de l'ouvrage afin de proposer une aide à la décision pour l'identification d'anomalies, avec la perspective de pouvoir ensuite la transférer à d'autres structures instrumentées en réseau. Pour cela, on propose d'appliquer l'algorithme suivant sur chaque série GNSS acquise :

- pour une série cible donnée, N modèles avec des scénarios d'entrées différents sont générés par apprentissage. L'objectif de ces différents modèles est de diversifier les entrées utilisées, ainsi, bien qu'il ne soit pas forcément nécessaire (ou possible) que tous les modèles aient des entrées exclusives, il convient d'éviter qu'une même série soit utilisée systématiquement. Une stratégie simple est proposée dans le Paragraphe IV.4.2.2 ;
- pour chaque modèle, les opérations suivantes sont appliquées :
 - un test de performance sur un intervalle de vérification est réalisé. L'objectif est de tester la pertinence de la prédiction du modèle. Si le modèle ne remplit pas les critères de validité du test, il est ignoré, et le modèle suivant est testé. Un test basé sur μ_r est proposé dans le Paragraphe IV.4.2.3 ;
 - le résidu entre la série réelle et la prédiction est calculé et divisé en intervalles réguliers (par exemple 1 heure, 6 heures, 24 heures...) ;
 - un test statistique étiquetant les intervalles avec un résidu jugé normal (étiqueté 0) ou anormal (étiqueté 1), et les étiquettes sont stockés. Différentes natures de tests sont possibles : tests sur une valeur caractéristique par intervalle (RMSE, MAE), tests sur l'ensemble des valeurs (distance symbolique), écarts à des valeurs de référence, écarts aux valeurs précédentes... Un test simple basé sur l'utilisation du RMSE est proposé dans le Paragraphe IV.4.2.4 ;
- le nombre de modèles validés est vérifié, et si moins de deux modèles ont été validés, aucune conclusion ne peut être tirée (en effet, si un seul modèle est disponible, il n'est pas possible d'isoler la source de l'anomalie, comme montré précédemment) ;
- la moyenne des séries d'étiquettes est calculée : à chaque intervalle est alors assignée une valeur comprise entre 0 et 1 : cette valeur représente son degré d'anomalie, c'est-à-dire le pourcentage de modèles qui ont identifié cet intervalle comme anormal.

Un logigramme synthétique de cet algorithme est présenté dans la Figure IV-34. Cet algorithme a vocation à valider si une anomalie peut être attribuée à la série cible sélectionnée plutôt qu'aux entrées ou à un modèle utilisé. Il peut alors être appliqué sur l'ensemble des composantes (X,Y,Z) de chaque capteur GNSS de l'ouvrage afin d'identifier les périodes anormales sur l'ensemble du réseau GNSS.

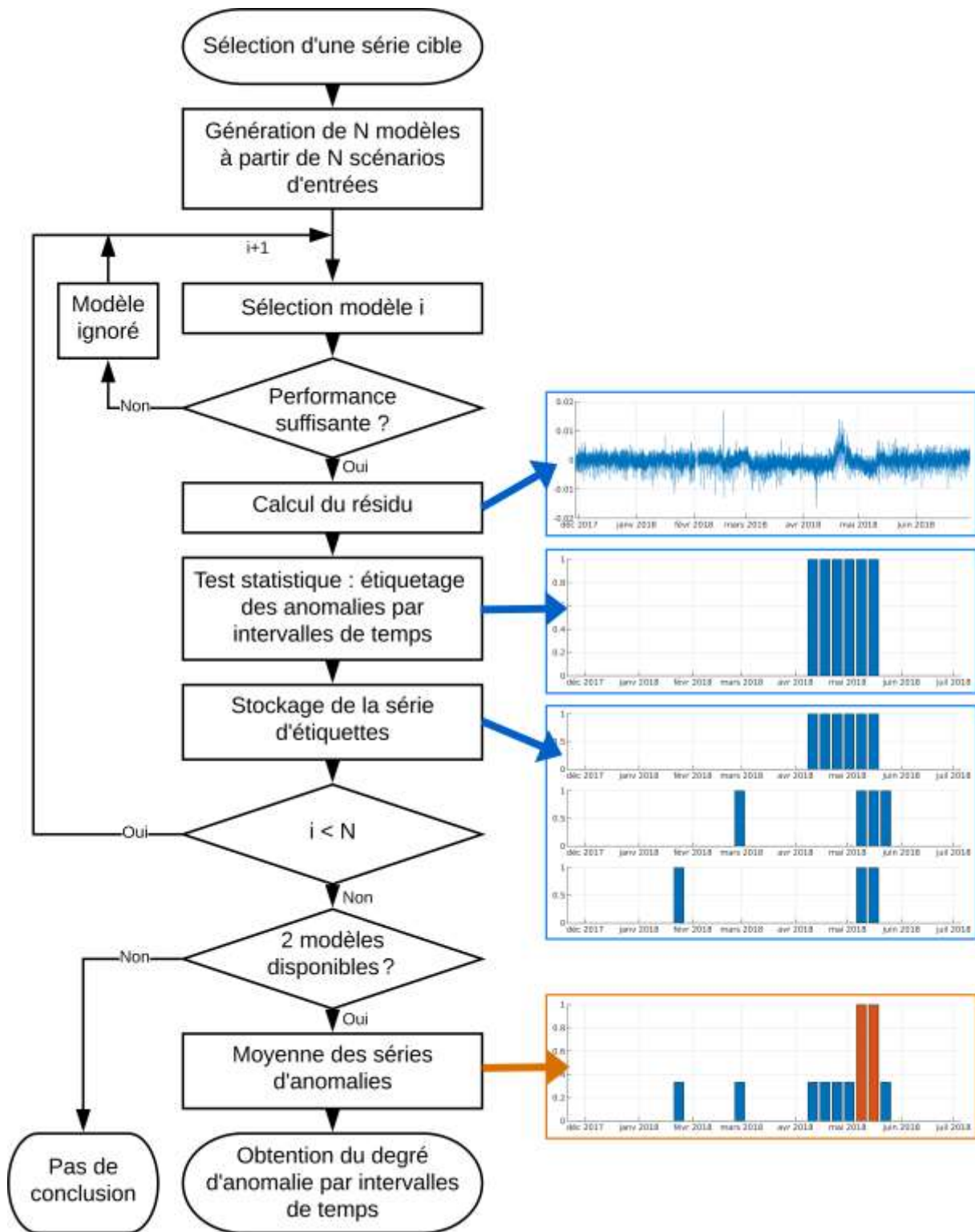


Figure IV-34 Logigramme de l'algorithme proposé pour l'identification des anomalies sur les séries GNSS.

IV.4.2.2. SCENARIOS DES ENTREES

Pour générer les différents modèles par apprentissage, on propose dans un premier temps, à l'instar des scénarios A, B, C et D proposés dans le Paragraphe IV.3.4, de sélectionner les données d'entrée (GNSS et environnementales) selon leur corrélation à la série cible :

- scénario I : entrées très fortement corrélées uniquement ($C_p \geq 0,9$) ;
- scénario II : entrées fortement corrélées uniquement ($0,9 > C_p \geq 0,8$) ;

- scénario III : entrées corrélées uniquement ($0,8 > C_p \geq 0,6$) ;
- scénario IV : entrées faiblement corrélées uniquement ($0,6 > C_p \geq 0,4$) ;

Cette approche présente l'intérêt de produire des jeux d'entrées exclusifs, cependant il est a été observé (Figure III-49) que tous les capteurs ne peuvent pas systématiquement avoir des entrées pour chaque scénario. Par ailleurs, bien que les RNN ait été plus stables face au retrait des entrées fortement corrélées à la cible que les autres outils de régression, les performances se dégradent tout de même généralement avec le retrait de trop nombreux capteurs. Ainsi, il a été observés que plusieurs modèles RNN, dans certains scénarios, obtiennent des résultats avec des résidus élevés en comparaison avec les variations de la série cible (σ_{cible}).

Pour éviter de manquer de modèles exploitables, trois scénarios supplémentaires, regroupant les données par nature et localisation ont été considérés :

- scénario V : toutes les données environnementales ;
- scénario VI : toutes les données GNSS du tablier principal et des pylônes ;
- scénario VII : toutes les données GNSS du viaduc d'accès et de la culée sud.

Les scénarios I, II, III et IV sont exclusifs entre eux, il en va de même pour les scénarios V, VI et VII, limitant la redondance des entrées entre les modèles tout en permettant d'envisager d'autres scénarios. Les données issues de l'instrumentation des piles n'ont pas été utilisées, leur disponibilité étant limitée.

IV.4.2.3. VALIDITE D'UN MODELE

Afin de valider la performance et l'exploitabilité d'un modèle, un test simple sur la valeur du RMSE moyen est proposé. Il a été montré que l'indicateur μ_r , calculé sur les 15 premiers jours de prédiction était un bon estimateur de la performance d'un modèle RNN sur les mois suivants. Compte tenu du volume de données disponible et de l'objectif d'automatisation de la détection, on propose ici de le renforcer cet estimateur en le calculant sur un intervalle de trente jours.

Il est nécessaire de comparer cet indicateur du résidu avec l'amplitude de la série modélisée : par exemple, une valeur μ_r de 8 mm n'a pas la même signification en fonction des amplitudes maximales des séries considérées. On propose alors un seuil proportionnel à l'écart-type σ_{cible} de la série cible (Eq. IV-37) sur l'intervalle de vérification.

$$\mu_r < \frac{1}{2} \sigma_{cible} \quad \text{Eq. IV-37}$$

Cependant, il a également été régulièrement observé que la performance de nombreux modèles avec des entrées très fortement corrélées (donc des conditions très favorables) était proche de 4 mm : cette limite est liée à la précision intrinsèque des capteurs utilisés. On souhaite éviter d'éliminer des capteurs avec des variations faibles ($5 \text{ mm} < \sigma_{cible} < 8 \text{ mm}$) tout en sachant que le seuil présenté dans l'Eq. IV-37 risque d'être difficile à atteindre pour ces capteurs. On propose alors d'utiliser un second seuil fixe à 4 mm, en ajoutant la condition que μ_r doit être inférieur à σ_{cible} (Eq. IV-38).

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_r < 4 \text{ mm} \\ \mu_r < \sigma_{cible} \end{array} \right\} \quad \text{Eq. IV-38}$$

La fonction utilisée pour le test est représentée dans la Figure IV-35.

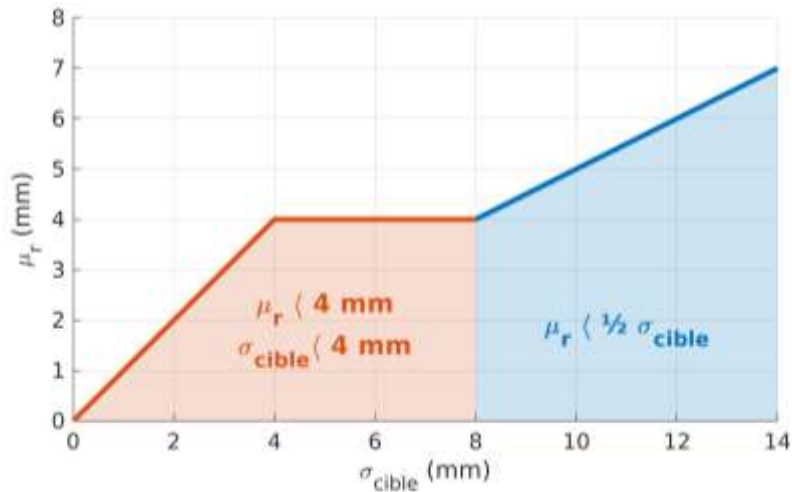


Figure IV-35 Fonction représentant le test de validité utilisé.

IV.4.2.4. METHODES DE DETECTION D'UNE ANOMALIE

Il a été montré dans le Paragraphe IV.4.1 que les variations du RMSE quotidien ($RMSE^{24h}$) pouvaient être utilisées pour identifier avec précision les périodes anormales dans les séries temporelles. Cependant, aucune expression du seuil à partir duquel l'intervalle peut être considéré comme anormal n'a été formulée.

Pour formuler un seuil pertinent qui prend en compte la distribution des RMSE quotidiens, on propose d'utiliser leur densité de probabilité calculée sur un jeu de données comprenant le jeu d'entraînement, et le jeu de vérification de 30 jours. Afin d'augmenter le nombre d'échantillons utilisés, le résidu est découpé en intervalles de 6 heures pour lesquels le $RMSE^{6h}$ est calculé. La fonction de densité de probabilité du $RMSE^{6h}$ est calculée à l'aide d'une estimation par noyaux (Węglarczyk, [2018]; Zambom et al., [2013]). Le seuil est alors fixé comme un percentile P de la fonction de densité (Figure IV-36).

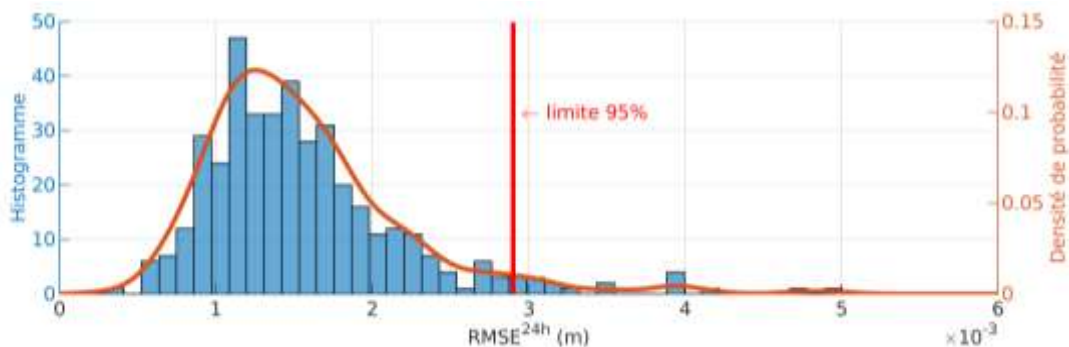


Figure IV-36 Exemple de percentile à 95% sur la fonction de densité de probabilité des RMSE.

On propose d'utiliser la valeur du percentile $P = 95\%$ comme valeur seuil pour sélectionner les intervalles de 6 heures anormaux, afin de minimiser le nombre de faux négatifs et de faux positifs.

IV.4.3. APPLICATION DE LA DETECTION AUTOMATISEE D'ANOMALIES

IV.4.3.1. DETECTION D'ANOMALIES REELLES

Le protocole présenté dans le Paragraphe IV.4.2 a été appliqué sur les données issues des capteurs 70, 73, 74, 77, 80, 81, 83, 84 et 85 (9 capteurs, 27 séries temporelles au total). Les capteurs 130 (pylône sud) et 133 (joint avec la culée sud) n'ont pas été traités en raison de l'absence de données durant l'été 2017. L'apprentissage a été réalisé sur deux intervalles, du 02/06/2017 au 01/07/2017 puis du 29/11/2017 au 28/12/2017, et les modèles ont été appliqués sur la période du 29/12/17 au 29/06/2018. De façon similaire aux paragraphes

précédents, ces intervalles ont été choisis pour minimiser les interruptions. Enfin le premier mois de l'intervalle d'application a été sélectionné comme intervalle de vérification. Les degrés d'anomalies obtenus pour chaque composante (en utilisant la procédure décrite dans la Figure IV-34) sont présentés sous la forme d'une carte des anomalies dans la Figure IV-37.

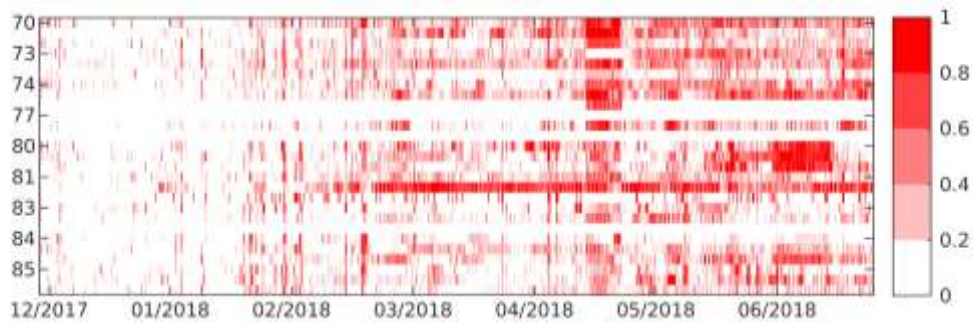


Figure IV-37 Degrés d'anomalie des données du pont de Brotonne. Pour chaque capteur, les composantes sont dans l'ordre X, Y et Z.

En l'état, la carte d'anomalie comporte de nombreuses courtes périodes (tranches de six heures) qui ressortent avec un degré d'anomalie élevé. L'utilisation de périodes plus courtes donne un poids plus fort aux petites interruptions ou aux valeurs aberrantes. Pour lisser les résultats obtenus, un filtre par moyenne glissante sur 24h est appliqué sur chaque série (Figure IV-38).

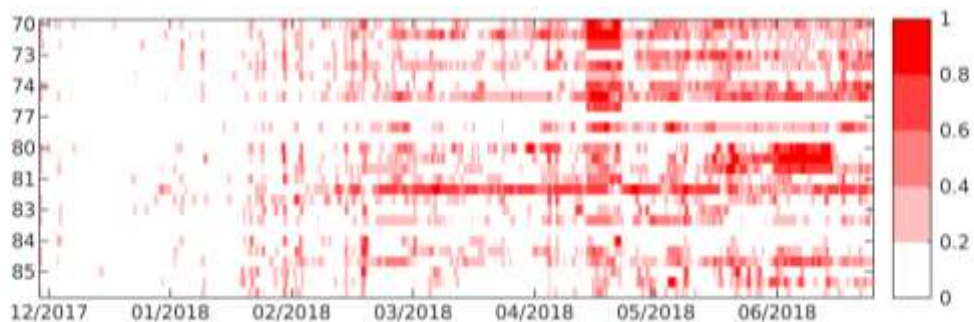


Figure IV-38 Degrés d'anomalie lissés des données du pont de Brotonne. Pour chaque capteur, les composantes sont dans l'ordre X, Y et Z.

Pour isoler les périodes les plus critiques, plutôt que de simplement sélectionner les valeurs d'anomalie les plus fortes, on propose d'appliquer un filtrage par hystérésis dans le sens chronologique sur chaque série (Figure IV-39).

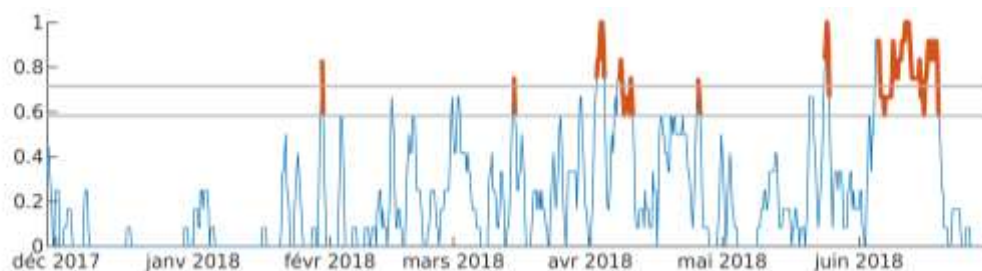


Figure IV-39 Exemple de filtrage par hystérésis

Le seuil supérieur (d'activation) est fixé à une anomalie de 0,75 (75% des modèles ont détecté une anomalie) et le seuil inférieur à 0,5 (50% des modèles ont détecté une anomalie). La carte des anomalies résultante est alors présentée dans la Figure IV-40.

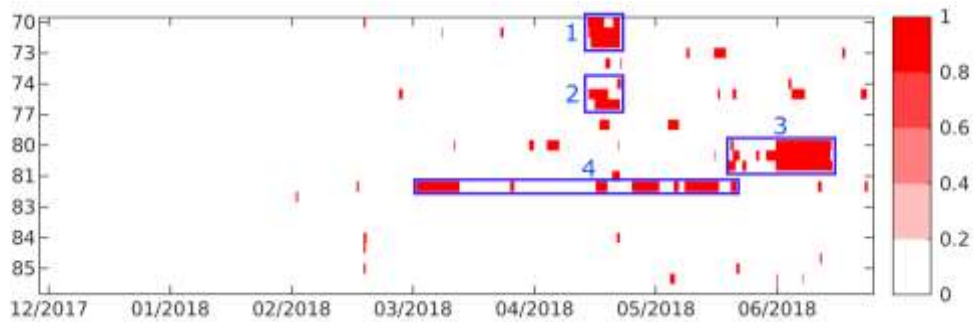


Figure IV-40 Degrés d'anomalie filtrés par hystérésis des données du pont de Brotonne. Pour chaque capteur, les composantes sont dans l'ordre X, Y et Z.

A partir des degrés d'anomalie filtrés, quatre périodes fortement anormales sont identifiées dans la Figure IV-40 :

- les périodes 1 et 2, affectant les composantes X, Y et Z du capteur 70, et les composantes Y et Z du capteur 74 correspondent à l'anomalie sur les acquisitions identifiée dans le Paragraphe IV.4.1.2 ;
- la période 3, observée sur les trois composantes du capteur 80, correspond à la période d'installation des engins de chantier sur le tablier côté amont (cf. Paragraphe IV.4.1.1) ;
- la période 4, liée aux déplacements du capteur 81, identifie les nombreux comportements anormaux décelés sur ce capteur, causés notamment par une mauvaise installation de celui-ci (cf. Chapitre III).

Les anomalies connues sont ainsi mises en avant à l'aide de la stratégie proposée dans ce chapitre. On note par ailleurs que ces anomalies n'affectent pas la détection sur les autres capteurs. Par exemple, pendant les périodes 1 et 2, même si une hausse du degré d'anomalie peut être observée sur la plupart des capteurs (Figure IV-38), l'utilisation de modèles n'incluant pas les capteurs 70 et 74 permet d'en diminuer la valeur et donc de ne pas identifier d'autres capteurs comme étant la source du problème. La stratégie proposée ici apparaît alors efficace pour identifier les capteurs et les périodes anormales, mais nécessite une interprétation visuelle pour en exploiter les résultats : elle constitue alors une aide à la décision.

Enfin, pour les séries 77X, 77Z et 83Z, il n'a pas été possible de générer au moins deux modèles passant le test de validité proposé. Ces trois séries représentent environ 11% d'échec sur les vingt-sept sur lesquelles la stratégie a été appliquée. Plusieurs causes peuvent expliquer ces échecs. Les séries 77X et 77Z sont issues du capteur situé au sommet du pylône nord de l'ouvrage, elles sont particulièrement difficiles à modéliser en raison du comportement relativement unique des pylônes et le fait que les données du capteur sur le pylône sud n'ont pas été utilisées. La série 83Z a été acquise par un capteur situé sur la culée, enregistrant peu de mouvements : avec un σ_{cible} très faible, le test de validité proposé devient très difficile à réussir.

IV.4.3.2. DETECTION D'ANOMALIES SIMULEES

Afin de tester la robustesse de cette approche, on propose de tester la détection d'anomalies simulées sur les données, dans deux scénarios conçus pour être à la fois vraisemblables et mettant à l'épreuve la stratégie de modèles par apprentissage.

Dans un premier scénario, un affaissement du tablier est simulé, avec un régime transitoire du 01/05/2018 au 15/05/2018. L'anomalie virtuelle appliquée est représentée dans la Figure IV-41.

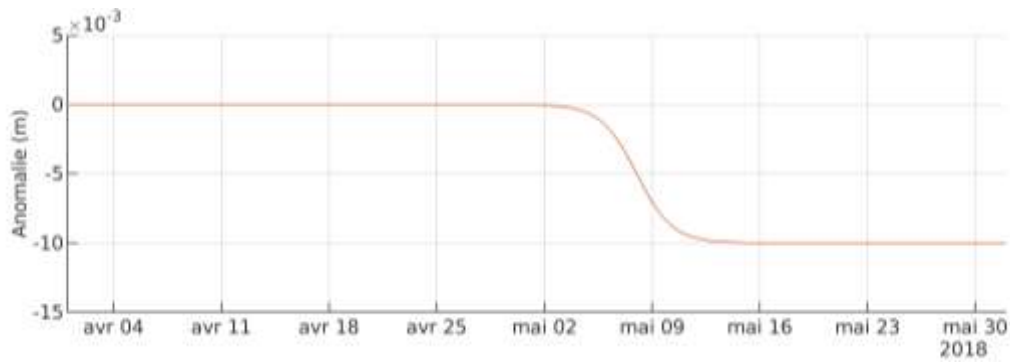


Figure IV-41 Affaissement virtuel du tablier appliqué sur les séries temporelles

Les composantes verticales des capteurs 80 et 84, au centre du tablier, ont été modifiées. Cette simulation est un cas intéressant car les deux capteurs sont proches et très fortement corrélés : en les affectant de manière similaire, il est possible qu'un modèle utilisant l'un des deux en entrée innocente l'autre. Deux amplitudes ont été simulées : un affaissement de 1 cm, et un second de 2 cm (Figure IV-42). Ces valeurs sont à comparer avec les variations saisonnières de plus de 5 cm observées précédemment.

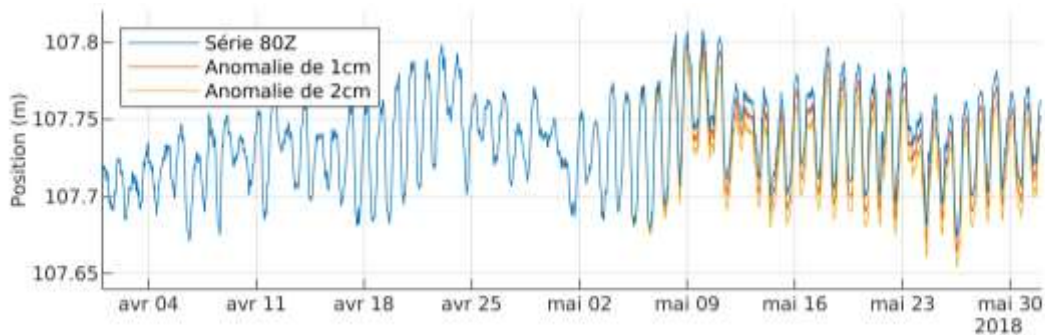


Figure IV-42 Simulations d'affaissement sur les données du capteur 80

Pour la simulation d'un affaissement de 1 cm, la carte des anomalies est générée avec les mêmes filtrages (moyenne glissante puis hystérésis) que dans le cas précédent.

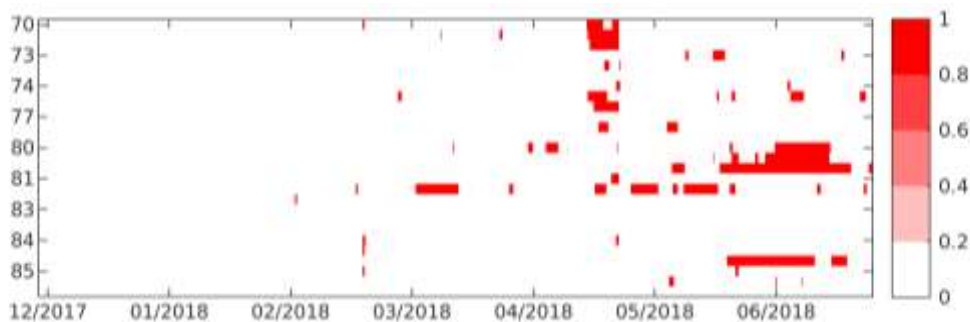


Figure IV-43 Carte des anomalies du pont de Brotonne avec la simulation d'un affaissement (1 cm) du tablier

Pour simplifier la lecture des changements générés par la simulation, on propose d'utiliser les différences entre la carte des endommagements simulés et la véritable carte obtenue à partir des données réelles (Figure IV-44). Des valeurs de 0, 1 et -1 signifient respectivement qu'un intervalle n'a pas changé de statut, qu'il est devenu anormal, ou qu'il a été innocenté.

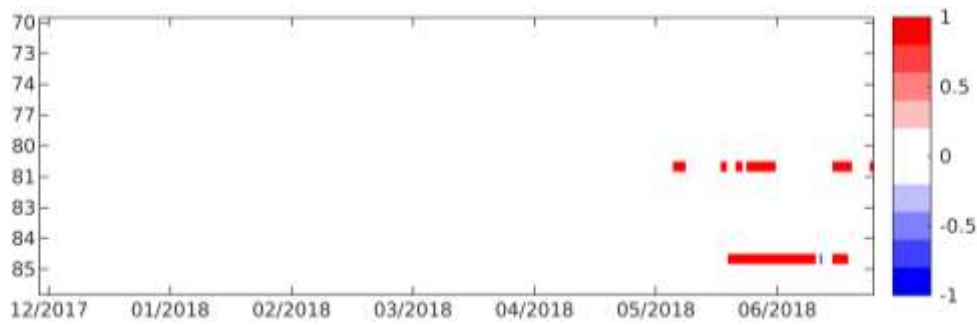


Figure IV-44 Changements détectés avec la simulation d'un affaissement (1 cm) du tablier

L'ajout de l'anomalie sur les deux séries est observée uniquement sur les deux séries 80Z et 84Z. La période inchangée sur le capteur 80 dans le mois de juillet s'explique par le fait que le comportement du capteur était déjà anormal dans cette période (présence du chantier). Il s'agit d'ores et déjà d'un résultat positif : d'une part l'origine de l'anomalie a été identifiée avec succès et n'a pas perturbé significativement les autres séries, d'autre part les capteurs 80 et 84 ne se sont pas mutuellement innocentés. On remarque cependant que pour les deux séries, le régime transitoire (01/05/2018 au 15/05/2018) de la simulation n'est pas détectée : dans ce cas précis, la valeur de 1 cm apparaît comme proche de la limite de détection automatique.

La même approche est appliquée sur la simulation de 2 cm d'amplitude (Figure IV-45).

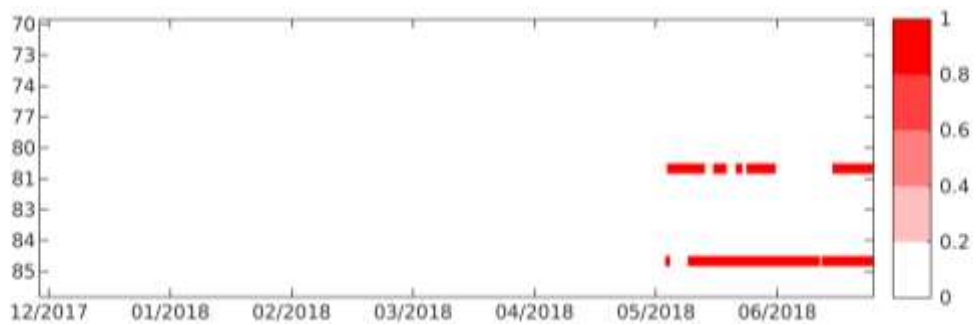


Figure IV-45 Changements détectés avec la simulation d'un affaissement (2 cm) du tablier

L'endommagement simulé est cette fois détecté très rapidement sur les deux séries, dès le début du mois de mai 2018.

Dans un second scénario, un étirement quotidien du viaduc d'accès est simulé, avec des oscillations dans la direction longitudinale entre le 01/05/2018 et le 15/05/2018 appliquées aux capteurs aux extrémités du viaduc d'accès (Figure IV-46).

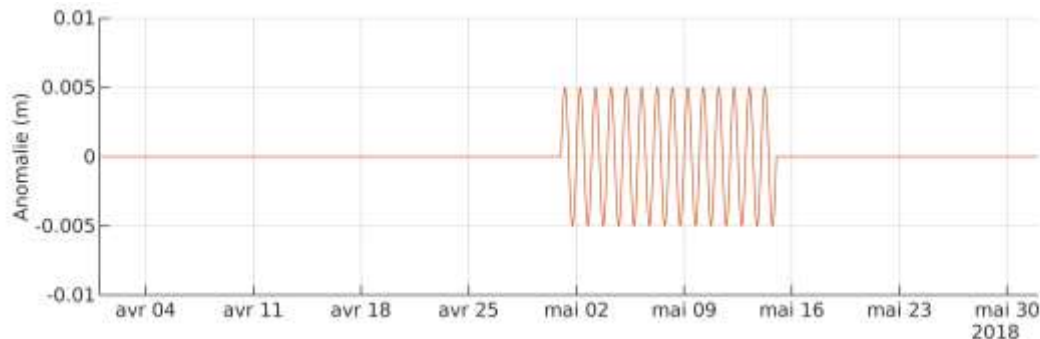


Figure IV-46 Simulation d'étirement du viaduc d'accès appliquée sur les séries temporelles

Les données des capteurs 73 et 74 ont été modifiées avec des anomalies d'amplitudes (crête à crête) de 1 cm et de 2 cm (Figure IV-47). Les deux séries ont été affectées dans le sens opposé, de façon à simuler un étirement plutôt qu'une translation du viaduc. Similairement à ce qui a été

fait sur les données du tablier, ce scénario est intéressant car les deux capteurs ont des mouvements pratiquement symétriques, et pourraient s'innocenter mutuellement.

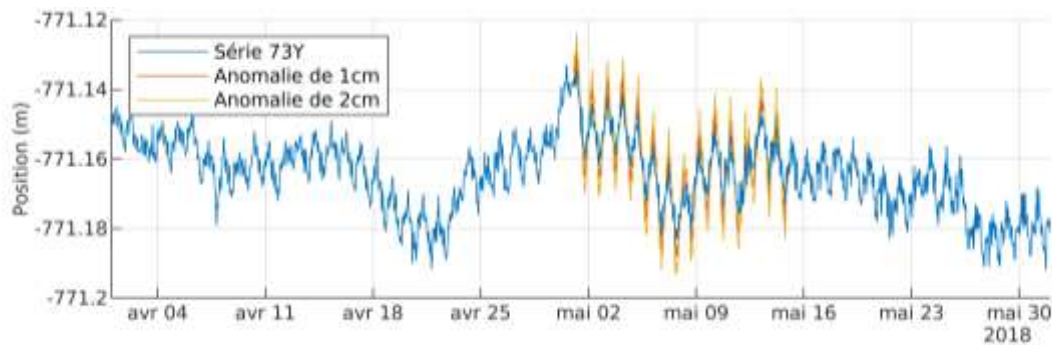


Figure IV-47 Simulations d'étirement sur les données du capteur 73

Les différences entre la carte des véritables anomalies (Figure IV-44) et celles obtenues avec les anomalies de 1 cm et de 2 cm sont présentées dans la Figure IV-48 et la Figure IV-49, respectivement.

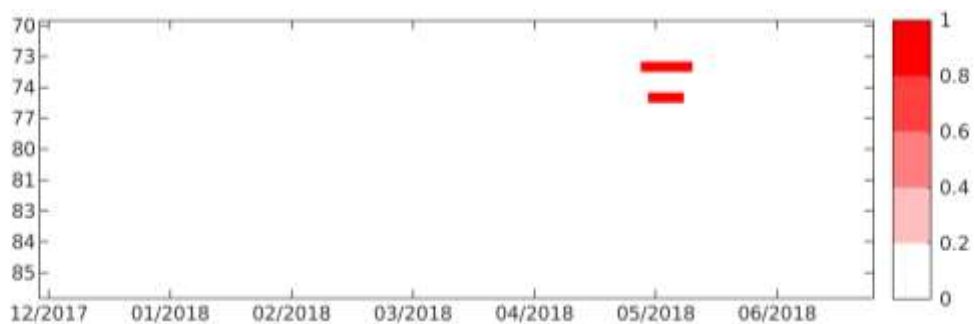


Figure IV-48 Changements détectés avec la simulation d'un étirement (1 cm) du viaduc d'accès

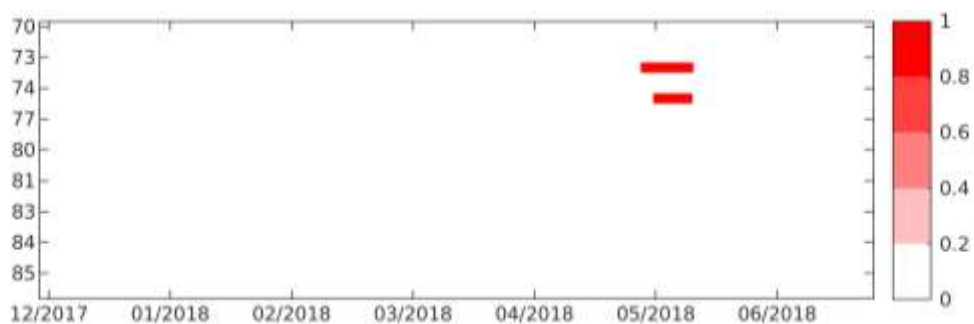


Figure IV-49 Changements détectés avec la simulation d'un étirement (2 cm) du viaduc d'accès

Dans les deux cas, similairement à ce qui a été observé avec les simulations sur les données du tablier, l'origine des anomalies a été identifiée avec succès et n'a pas affecté les autres séries. Par ailleurs, les séries 73Y et 74Y ne se sont pas mutuellement innocentées.

IV.5. SYNTHÈSE

Dans ce chapitre, les réseaux de neurones artificiels ont été considérés pour réaliser des modèles prédictifs par apprentissage des séries GNSS en exploitant les acquisitions d'autres capteurs du réseau ou des données environnementales. Plusieurs architectures et tailles de réseaux ont été étudiées, et divers paramètres (fonctions d'activation, méthode d'entraînement, arrêt de l'apprentissage) ont été testés. Il ressort que des réseaux de neurones récurrents (RNN) relativement petits, à une couche et moins d'une dizaine de neurones, sont adaptés pour la régression des séries GNSS disponibles sur ouvrage. Un protocole utilisant un court intervalle de

vérification a été proposé pour sélectionner un modèle optimal dans les différents scénarios de données utilisées.

Les RNN ont ensuite été comparés dans une étude de sensibilité à des modèles linéaires, ARIMAX et SVM. Cette étude a permis de mettre en avant d'une part une performance quasi-systématiquement optimale des RNN par rapport aux autres méthodes, et d'autre part une plus grande capacité des RNN à obtenir des performances constantes pour des intervalles d'apprentissages plus ou moins courts, ce dernier point pouvant s'avérer critique dans les premières phases d'une instrumentation où peu de données sont disponibles. Les écarts de performance entre les différentes méthodes se sont montrés d'autant plus importants que les corrélations entre les données d'entrées et la série modélisée étaient faibles, à l'avantage des RNN.

Les modèles prédictifs générés grâce aux RNN ont alors été utilisés pour identifier les anomalies sur plusieurs séries temporelles grâce à l'utilisation des résidus avec les données réelles découpés par intervalles réguliers. Une stratégie globale et automatisée a été proposée, reposant sur la pondération des résultats obtenus avec plusieurs modèles pour une même série cible, et appliquée sur les données du réseau Geocube du pont de Brotonne. Cette stratégie d'automatisation constitue en l'état une aide à la décision reposant sur la focalisation des périodes anormales. L'utilisation de tests plus avancés (Santos, [2014]) fait partie des perspectives d'amélioration de cette approche. Des anomalies réelles et connues ont pu être détectées et localisées avec succès. Plusieurs scénarios virtuels ont également été considérés, soulignant la robustesse de l'approche proposée.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit ont porté sur l'utilisation de capteurs GNSS à bas coût déployés en réseaux pour la surveillance d'ouvrages. Plusieurs problématiques ont été dégagées :

- quelle est la solution la plus adaptée de matériel GNSS de traitement associé pour fournir une solution de positionnement à bas coût compatible avec la surveillance de santé structurale ?
- quelles performances peuvent être atteintes avec une station GNSS à bas coût ?
- quels phénomènes peuvent être identifiés et suivis sur un ouvrage à l'aide de station GNSS à bas coût ?
- comment exploiter les données GNSS acquises en réseau sur un ouvrage pour permettre la détection d'anomalies structurales ?

L'état de l'art de l'utilisation des GNSS pour la surveillance de santé structurale proposé dans le Chapitre I a mis en avant l'intérêt croissant dans le domaine du génie civil pour les GNSS en raison de leurs caractéristiques (positionnement en référentiel, absence de dérive) et de leur déploiement relativement aisé. Cette revue a également mis en avant l'intérêt pour le suivi dynamique et en temps réel grâce à l'utilisation de solutions commerciales haut de gamme à haute fréquence, et des techniques de positionnement RTK (calcul relatif en temps réel). Si cette approche permet de faire des stations GNSS des outils polyvalents, leurs performances pour le suivi de phénomènes vibratoires restent inférieures à celles d'accéléromètres traditionnels. Surtout, ces applications nécessitent l'utilisation d'un matériel coûteux, ce qui limite drastiquement le déploiement de ces stations d'un point de vue opérationnel. A contrepied de cette tendance, il a été proposé de s'intéresser à des solutions exploitant un matériel plus modeste en gamme de performance, mais avec un coût significativement plus faible. Cette diminution du coût du matériel a pour objectif de compenser les performances moindres des stations utilisées en permettant de multiplier le nombre de capteurs pouvant être déployés sur un ouvrage pour un investissement similaire. Cette démarche s'inscrit par ailleurs dans les tendances actuelles de capteurs intelligents à bas coût ayant vocation à être déployés en réseau. Une approche en calcul relatif a été sélectionnée : d'une part, l'utilisation d'une station de référence ne change pas significativement le coût par point de mesure dans le cas d'un déploiement en réseau, et d'autre part elle facilite l'établissement d'un référentiel local à l'ouvrage. Surtout, pour peu que la station de référence soit située à quelques kilomètres ou moins des stations de mesure, le calcul relatif permet d'atteindre une précision infracentimétrique avec un matériel GNSS monofréquence. L'approche du calcul RTK, qui permet un traitement instantané, n'a pas été sélectionnée car le gain de temps par rapport à un calcul relatif rapide n'a pas été jugé pertinent face à la dégradation de la précision et à la complexification du dispositif déployé.

Les résultats d'une série d'évaluations expérimentales utilisant le logiciel RTKLib pour le traitement ont été présentés dans le Chapitre II. L'objectif de ces expérimentations était double : d'une part, sélectionner une solution efficiente adaptée aux applications de surveillance, et d'autre part évaluer la précision pouvant être atteinte avec un tel matériel. Des récepteurs GPS monofréquence ont été combinés à différentes gammes d'antennes, allant d'une simple antenne patch sans protection particulière à des antennes géodésiques de type « *choke-ring* », et évaluées dans des scénarios statiques. Ces premiers essais ont permis de valider le potentiel de puces GPS monofréquence combinées à des antennes relativement modestes mais a montré l'intérêt de l'utilisation d'une protection contre les multitrajets, *a minima* sous la forme d'un plan de masse d'une dizaine de centimètres de diamètre. Plusieurs séries d'essais ont ensuite été conduites, en scénarios fixes et dynamiques, afin d'identifier les paramètres optimaux de calcul. Une revue des évaluations expérimentales de solutions GNSS pour des applications de génie civil a été réalisée afin de proposer des scénarios dynamiques pertinents, permettant d'évaluer la capacité de la

solution proposée à caractériser des oscillations d'amplitude et de fréquence variée, ainsi que des déplacements rapides et intempestifs. Les résultats ont permis de mettre en avant la précision infracentimétrique (4 mm en horizontal et 7 mm en vertical) de la solution proposée dans des conditions favorables et avec une ligne de base quasi nulle, en notant des résultats similaires avec une ligne de base de 2 km. La solution proposée a par ailleurs été capable de détecter des déplacements instantanés de 4 mm et 15 mm, horizontalement et verticalement respectivement, ainsi que de caractériser des oscillations de 1 cm et d'une période de 4 secondes (pour un échantillonnage d'acquisition à 1 Hz). Ces performances confirment la compatibilité de telles solutions GNSS avec les applications de surveillance de grands ouvrages souples, ces derniers présentant généralement des déplacements lents d'amplitudes centimétriques ou plus.

L'étude du Chapitre II s'étant limitée à des conditions expérimentales optimales, et afin d'en valider les performances et l'intérêt lors d'un déploiement opérationnel *in situ*, les données issues de l'instrumentation de deux ouvrages d'art par des réseaux de capteurs GNSS à bas coût, le pont de Brotonne et le pont d'Aquitaine, ont été étudiées dans le Chapitre III. Ces deux instrumentations ont été réalisées hors du cadre de cette thèse, et ont été une opportunité d'avoir accès à des données récentes acquises avec des capteurs aux composantes proches de celles étudiées dans le Chapitre II, les Geocube. Bien que fonctionnant sur des principes similaires au logiciel RTKLib utilisé dans le Chapitre II, le logiciel de calcul utilisé (G3GPS) était différent. Une comparaison entre les résultats obtenus avec RTKLib et G3GPS a donc été proposée pour vérifier la précision similaire des séries obtenues et la robustesse accrue du second logiciel. Une étude sur la disponibilité des données a permis d'illustrer la double faiblesse d'une technologie encore jeune dans le domaine. D'une part la liaison sans fil basse consommation dans les réseaux maillés utilisés entraîne une perte des observations lors de la transmission, et d'autre part le calcul GNSS conserve un taux de calcul non résolu. Il a cependant été noté que, compte tenu de l'échantillonnage choisi (30 s) et de la périodicité des mouvements suivis, ces pertes n'empêchaient pas leur exploitation pour chacun des deux ponts instrumentés. Au total, les données acquises sur le pont de Brotonne s'étalent sur plus d'un an et demi, avec des périodes sans interruption de plusieurs mois, tandis que celles du pont de d'Aquitaine s'étalent sur 5 mois.

Les données GNSS ont ensuite été regroupées par parties d'ouvrages pour comparaison à des données thermiques ou à des capteurs de référence. Pour le pont de Brotonne, la réponse thermique a pu être identifiée au niveau du tablier principal, du viaduc d'accès et des pylônes grâce à la mesure de températures au niveau des piles. Une comparaison des séries GNSS avec les prédictions d'un modèle de l'ouvrage a été réalisée pour valider l'ordre de grandeur des effets saisonniers observés. Pour le pont d'Aquitaine, les mouvements des travées et des pylônes ont pu être identifiés grâce à des données thermiques réparties dans l'ouvrage, et les amplitudes observées ont pu être validées par comparaison à des capteurs de déplacement traditionnels. Les stations GNSS ont également été utilisées pour étudier des grandeurs autrement difficiles à suivre, comme l'écartement entre les pylônes du pont de Brotonne ou les mouvements le long du tablier du pont d'Aquitaine. L'étude globale des relations entre les données de chaque réseau a permis d'illustrer les natures différentes des ouvrages et de leur instrumentation. Le pont de Brotonne étant un ouvrage en béton précontraint, un matériau avec une inertie thermique importante, des relations majoritairement non linéaires ont été observées entre les capteurs GNSS. A l'inverse sur le pont d'Aquitaine, qui est un ouvrage métallique, des relations linéaires plus fortes et nombreuses ont été constatées. Cette différence était d'autant plus forte que la disposition des capteurs prévue par l'exploitant du pont d'Aquitaine comporte de nombreux capteurs installés symétriquement sur les travées et pylônes de l'ouvrage.

En l'absence de modèles mécaniques ou de données thermiques complètes disponibles durant cette étude, il a été proposé de mettre à profit les relations observées entre les séries des différents capteurs GNSS pour constituer des modèles par apprentissage du comportement de chaque capteur. Les réseaux de neurones artificiels, de par leur capacité à modéliser des comportements variés, ont été considérés dans le Chapitre IV pour proposer une démarche originale de modélisation des séries temporelles. Une première série de tests, exploitant les

données du réseau de capteurs GNSS du pont de Brotonne ainsi que des données environnementales (température, ensoleillement) a été réalisée pour en identifier l'architecture et les paramètres optimaux. Les réseaux de neurones récurrents (RNN), couplés à une architecture de petite taille (une seule couche, peu de neurones) a été identifiée comme l'approche optimale dans ce cas d'application. Un protocole de sélection a été proposé pour identifier le meilleur réseau dans chaque scénario, en se basant sur l'observation faite que la performance d'un modèle sur un court intervalle de vérification pouvait être un bon estimateur de sa performance sur le long terme (dans le cas étudié, plusieurs mois). Les RNN ont été comparés dans une étude de sensibilité à des modèles linéaires, ARIMAX et SVM, ce qui a mis en avant une précision optimale des RNN et une plus grande robustesse face au changement du jeu d'apprentissage (intervalle et données utilisées). L'impact de la corrélation entre les séries GNSS en entrée avec la série cible a été caractérisé : avec une corrélation forte, la plupart des méthodes conduisent à des résultats proches, tandis qu'avec des corrélations plus faibles l'avantage des RNN est nettement plus marqué. En parallèle, l'utilisation d'un apprentissage sur deux mois disjoints, un mois en été et un mois en hiver, est efficace et permet de produire des modèles stables lorsque ceux-ci sont appliqués sur un semestre.

Enfin, les résidus entre les séries prédites par RNN et les observations ont été utilisés pour mettre en avant les périodes anormales sur les données, capteur par capteur. Le calcul de l'erreur quadratique (RMSE) par intervalles régulier est utile pour mettre en évidence les anomalies, et la comparaison de plusieurs modèles pour une même série cible a été utilisée pour identifier la source d'une anomalie dans un cas réel. Afin de généraliser cette approche, une stratégie automatisée suivant le même principe a été appliquée sur l'ensemble des capteurs du réseau Geocube du pont de Brotonne. Bien que cette approche se limite en l'état à une aide à la détection, des anomalies réelles et connues ont pu être isolées et localisées avec succès. Plusieurs scénarios virtuels ont également été testés, et les anomalies associées ont également pu être identifiées.

Finalement, ces travaux ont permis de démontrer le potentiel de capteurs GNSS relativement simples et peu coûteux pour des applications de surveillance de santé structurale en génie civil. Les performances d'un matériel GNSS à bas coût ont été validées expérimentalement et *in-situ*, soulignant la sensibilité de tels capteurs à d'éventuelles anomalies structurales.

CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES

Plusieurs contributions scientifiques ont été réalisées pour répondre aux problématiques soulevées par la thèse :

- un état de l'art des applications GNSS dans le domaine de la surveillance structurale des grands ouvrages. Cet état de l'art a permis de mettre en avant l'intérêt croissant pour les techniques GNSS dans le domaine du génie civil, notamment pour des solutions commerciales haut de gamme avec un calcul en temps réel et un taux d'échantillonnage élevé. Ces caractéristiques se justifient notamment par un intérêt récent pour l'utilisation de stations GNSS pour le suivi vibratoire des structures les plus souples, visant à faire des GNSS un outil polyvalent adapté aux suivi statique et dynamique des ouvrages ;
- une analyse de l'impact de plusieurs modes et paramètres de calcul, tels que la ligne de base, la méthode et le sens de résolutions des ambiguïtés entières, ou l'utilisation de corrections d'horloges et d'orbites précises, sur la performance d'un calcul GNSS relatif monofréquence. Ces paramètres font généralement l'objet de peu de détails dans la littérature des applications de génie civil. Dans cette analyse, il a été proposé de caractériser la performance d'une solution à l'aide de trois critères : sa précision, son exactitude et sa robustesse. Plusieurs protocoles de scénarios dynamiques ont été considérés en plus d'une évaluation traditionnelle en scénario fixe afin de sélectionner les paramètres de calcul optimaux pour des applications de surveillance structurale des ouvrages d'art ;

- une étude des données acquises par deux réseaux de capteurs GNSS à bas coût déployés sur deux ponts situés en France afin d'en compléter le suivi géométrique. Si le déploiement des capteurs a été réalisé hors du cadre de cette thèse, l'étude qui en découle est une démarche aujourd'hui unique pour ce type d'instrumentation. Les séries temporelles acquises par les capteurs GNSS à bas coût ont été validées par corrélation entre les données GNSS et avec des mesures de température acquises dans les structures. Les données GNSS ont également été comparées avec les prédictions un modèle de l'ouvrage pour le pont de Brotonne, et avec des mesures issues de capteurs de déplacement de référence pour le pont d'Aquitaine ;
- le dégagement d'un protocole de sélection pour l'utilisation de réseaux de neurones récurrents de petite taille pour l'élaboration de modèles prédictifs des déplacements observés sur un ouvrage. Si les réseaux de neurones font l'objet d'un intérêt croissant depuis la dernière décennie, l'application dans le contexte étudié de réseaux de petite taille est encore peu courante, et leur paramétrage est généralement peu détaillé ;
- la proposition d'une stratégie automatisée pour la détection et la localisation d'anomalies à l'aide d'un réseau de capteurs GNSS qui prend la forme d'une aide à la détection par la focalisation sur des périodes anormales. L'utilisation de données issues des plusieurs capteurs GNSS déployés en réseau pour la constitution automatique de modèles prédictifs par réseaux de neurones est une approche originale, dont la robustesse a pu être soulignée à l'aide d'anomalies réelles et simulées.

En parallèle, ces travaux ont donné lieu à la publication de deux articles en marge de conférences, EWSHM 2018 (Manzini et al., [2018]a) et IABSE 2018 (Manzini et al., [2018]b). Un article intitulé « *Analysis of low-cost GNSS stations performance for structural health monitoring of bridges* » est (au moment de la soumission de cette thèse) en cours de révision pour publication dans la revue *Structure and Infrastructure Engineering*. Ces travaux ont également fait l'objet de plusieurs présentations en conférences sans acte, notamment aux Doctoriales de la COFREND (mai 2017), au congrès Lambda-Mu 21 (septembre 2018), au colloque SHM-France (mai 2019) et aux Journées Ouvrage d'Art (Mai 2019).

PERSPECTIVES

Plusieurs perspectives d'amélioration ou de prolongement des démarches entreprises apparaissent à la fin de ces travaux. Concernant le matériel utilisé, de nouvelles générations de puces à bas coût désormais disponibles ont intégré successivement la gestion de plusieurs constellations de satellites, puis de plusieurs bandes de fréquence. Si l'ajout de constellations supplémentaire ne devrait pas drastiquement améliorer la précision du calcul, l'utilisation de récepteurs multifréquences devrait en revanche le permettre. Un calcul multifréquence permettrait en effet de s'affranchir plus efficacement des erreurs ionosphériques et des multitrajets, ces derniers s'étant avérés comme la source d'erreur principale sur les séries acquises.

Au niveau de l'étude des données sur ouvrages, la validation des observations s'est globalement limitée à des comparaisons indirectes à des données de sondes thermiques, parfois distantes des points étudiés. Pour renforcer cette validation, il serait intéressant de déployer des mesures de référence (type station robotisée) suivant les points instrumentés, ou d'utiliser des modèles mécaniques des ouvrages pour en prédire un comportement de référence.

En parallèle, les approches de modélisation par apprentissage ont été fortement contraintes par la disponibilité des données des capteurs sur le pont de Brotonne. Si ces conditions ont été l'occasion de mettre en avant les performances des RNN malgré un apprentissage très court, elles ne sont pas optimales. Avec la poursuite des instrumentations, l'utilisation d'une année complète

pour l'apprentissage et la prédiction sur une période équivalente ou supérieure permettrait de valider définitivement les performances des modèles prédictifs par réseaux de neurones.

Par ailleurs, pour les modèles de régression des séries GNSS à partir des données environnementales, seules les mesures de température et d'ensoleillement ont été exploitées. Cette approche pourrait être approfondie en incluant des données environnementales supplémentaires comme la vitesse et la direction du vent, ainsi que des données d'exploitation de l'ouvrage (charges de trafic).

Enfin, la recherche d'anomalies proposée sur les séries GNSS reste en l'état une approche basique. Si la stratégie, consistant à combiner des modèles avec des entrées différentes pour identifier la source d'une anomalie, a été validée, son exécution dispose de grandes marges d'amélioration. Bien que l'algorithme proposé ait permis d'identifier la source des anomalies dans les cas présentés en mettant en évidence les périodes « fortement anormales », en l'état la stratégie proposée ne peut être considérée comme une méthode purement automatique et décisionnelle sans l'intervention d'un tiers. Cette limite peut être attribuée notamment à l'utilisation d'un test encore relativement basique pour l'étiquetage des intervalles de temps. Cette recherche d'anomalie gagnera à être améliorée, notamment à l'aide de tests statistiques plus robustes et automatisés.

RÉFÉRENCES

- Adamowski, J., Fung Chan, H., Prasher, S. O., Ozga-Zielinski, B., & Sliusarieva, A. (2012). Comparison of multiple linear and nonlinear regression, autoregressive integrated moving average, artificial neural network, and wavelet artificial neural network methods for urban water demand forecasting in Montreal, Canada. *Water Resources Research*, 48(1), 1-14. <https://doi.org/10.1029/2010WR009945>
- Angrisano, A., Petovello, M., & Pugliano, G. (2012). Benefits of combined GPS/GLONASS with low-cost MEMS IMUs for vehicular urban navigation. *Sensors*, 12(4), 5134-5158. <https://doi.org/10.3390/s120405134>
- ARTBA. (2019). *2019 Bridge Report*. Consulté à l'adresse <https://artbabridgereport.org/>
- Artusi, R., Verderio, P., & Marubini, E. (2002). Bravais-Pearson and Spearman correlation coefficients: meaning, test of hypothesis and confidence interval. *The International journal of biological markers*, 17(2), 148-151.
- Ashkenazi, V., & Roberts, G. W. (1997). Experimental monitoring of the Humber bridge using GPS. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering*, 120(4), 177-182. <https://doi.org/10.1680/icien.1997.29810>
- Ataei, S., Aghakouchak, A. A., Marefat, M. S., & Mohammadzadeh, S. (2005). Sensor fusion of a railway bridge load test using neural networks. *Expert Systems with Applications*, 29(3), 678-683. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.04.038>
- Benesty, J., Chen, J., Huang, Y., & Cohen, I. (2009). *Pearson Correlation Coefficient*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00296-0_5
- Benoît, L. (2014). *Positionnement GPS précis et en temps-réel dans le contexte de réseaux de capteurs sans fil type Geocube : application à des objets géophysiques de taille kilométrique*.
- Benoit, L., Briole, P., Martin, O., & Thom, C. (2014). Real-time deformation monitoring by a wireless network of low-cost GPS. *Journal of Applied Geodesy*, 8(2), 119-128. <https://doi.org/10.1515/jag-2013-0023>
- Benoit, L., Briole, P., Martin, O., Thom, C., Malet, J. P., & Ulrich, P. (2015). Monitoring landslide displacements with the Geocube wireless network of low-cost GPS. *Engineering Geology*, 195, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.020>
- Benoit, L., Dehecq, A., Pham, H. T., Vernier, F., Trouvé, E., Moreau, L., ... Briole, P. (2015). Multi-method monitoring of Glacier d'Argentière dynamics. *Annals of Glaciology*, 56(70), 118-128. <https://doi.org/10.3189/2015AoG70A985>
- Beutler, G., Bauersima, I., Gurtner, W., Rothacher, M., Schildknecht, T., & Geiger, A. (1987). Atmospheric refraction and other important biases in GPS carrier phase observations. *Mitt. Satell.-Beobachtungsstn. Zimmerwald, Nr. 22*, 26 pp., 22. Consulté à l'adresse <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987MiSBZ..22S....B>
- Bingham, N. H., & Fry, J. M. (2010). *Regression: Linear models in statistics*. Springer Science & Business Media.
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: forecasting and control*. John Wiley & Sons.
- Brault, J. L., & Mathivat, J. (1976). THE BROTONNE BRIDGE, DESIGN AND EXPERIENCE GAINED AFTER EIGHTEEN MONTHS OF CONSTRUCTION. *Travaux*, (492).
- Breuer, P., Chmielewski, T., Górski, P., & Konopka, E. (2002). Application of GPS technology to measurements of displacements of high-rise structures due to weak winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(3), 223-230. <https://doi.org/10.1016/S0167->

- Breuer, P., Chmielewski, T., Górski, P., Konopka, E., & Tarczyński, L. (2008). The Stuttgart TV Tower - displacement of the top caused by the effects of sun and wind. *Engineering Structures*, *30*(10), 2771-2781. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.03.008>
- Brevet, P., Robert, J.-L., & Aubagnac, C. (2003). Surveillance acoustique des câbles de ponts. *Revue I2M*, *3*, 1-2.
- Briole, P., Elias, P., Parcharidis, I., Bignami, C., Benekos, G., Samsonov, S., ... others. (2015). The seismic sequence of January--February 2014 at Cephalonia Island (Greece): constraints from SAR interferometry and GPS. *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *203*(3), 1528-1540.
- Brühwiler, E. (2015). Extending the fatigue life of riveted bridges using data from long term monitoring. *Advanced Steel Construction*, *11*(3), 283-293.
- Burden, F., & Winkler, D. (2008a). Bayesian regularization of neural networks. In *Artificial neural networks* (p. 23-42). Springer.
- Burden, F., & Winkler, D. (2008b). Bayesian regularization of neural networks. *Methods in Molecular Biology*, *458*, 25-44. https://doi.org/10.1007/978-1-60327-101-1_3
- Busca, G., Cigada, A., Mazzoleni, P., & Zappa, E. (2014). Vibration Monitoring of Multiple Bridge Points by Means of a Unique Vision-Based Measuring System. *Experimental Mechanics*, *54*(2), 255-271. <https://doi.org/10.1007/s11340-013-9784-8>
- Caldera, S., Realini, E., Barzaghi, R., Reguzzoni, M., & Sansò, F. (2016). Experimental study on low-cost satellite-based geodetic monitoring over short baselines. *Journal of Surveying Engineering*, *142*(3), 1-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000168](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000168)
- Casciati, F., & Fuggini, C. (2009). Engineering vibration monitoring by GPS: Long duration records. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, *8*(3), 459-467. <https://doi.org/10.1007/s11803-009-9058-8>
- Catbas, F. N., Aktan, A. E., Allemang, R. J., & Brown, D. L. (1998). Correlation function for spatial locations of scaled mode shapes - (COMEF). *Proceedings of the International Modal Analysis Conference - IMAC*, *2*(September), 1550-1555.
- Cawley, P., & Adams, R. D. (1979). The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, *14*(2), 49-57. <https://doi.org/10.1243/03093247V142049>
- Cazzaniga, N. E., Pinto, L., Forlani, G., & Abruzzi, P. (2005). Monitoring oscillations of slender structures with GPS and accelerometers. *proceeding of "FIG Working Week*.
- Çelebi, M., & Sanli, A. (2002). GPS in pioneering dynamic monitoring of long-period structures. *Earthquake Spectra*, *18*(1), 47-61. <https://doi.org/10.1193/1.1461375>
- Cha, Y.-J., Choi, W., & Büyüköztürk, O. (2017). Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, *32*(5), 361-378. <https://doi.org/10.1111/mice.12263>
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? - Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, *7*(3), 1247-1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Chan, W.-S., Xu, Y.-L., Asce, M., Ding, X.-L., Xiong, Y.-L., & Dai, W.-J. (2006). Assessment of Dynamic Measurement Accuracy of GPS in Three Directions. *Journal of Surveying Engineering*, *132*(3), 108-117.
- Chan, W. S., Xu, Y. L., Ding, X. L., & Dai, W. J. (2006). An integrated GPS-accelerometer data processing technique for structural deformation monitoring. *Journal of Geodesy*, *80*(12),

705-719. <https://doi.org/10.1007/s00190-006-0092-2>

- Chatzi, E. N., & Fuggini, C. (2012). Structural identification of a super-tall tower by GPS and accelerometer data fusion using a multi-rate Kalman filter. *Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems: Proceedings of the Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE'12), Vienna, Austria*, 79.
- Chen, Q., Ju, B., Xi, R., Chen, Q., Meng, X., Jiang, W., & Fan, W. (2017). GNSS for real-time monitoring of bridge dynamic responses. *2017 Forum on Cooperative Positioning and Service (CPGPS)* , 184-189. <https://doi.org/10.1109/CPGPS.2017.8075121>
- Choi, B. (2012). *ARMA model identification*. Springer Science & Business Media.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. 2, 79-80.
- Connor, J. T., Martin, R. D., & Atlas, L. E. (1994). Recurrent Neural Networks and Robust Time Series Prediction. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(2), 240-254. <https://doi.org/10.1109/72.279188>
- Cosser, E., Roberts, G. W., Meng, X., & Dodson, A. H. (2003). The comparison of single frequency and dual frequency GPS for bridge deflection and vibration monitoring. *Proc of the Deformation Measurements and Analysis, 11th International Symposium on Deformation Measurements, International Federation of Surveyors (FIG)*, (October 2015). Consulté à l'adresse <https://www.fig.net/commission6/santorini/I-Monitoring Static and Dyn/I10.pdf>
- Cury, A. (2010). *Techniques d'anormalité appliquées à la surveillance de santé structurale*. Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00581772>
- Cury, A., & Crémone, C. (2012). Pattern recognition of structural behaviors based on learning algorithms and symbolic data concepts. *Structural Control and Health Monitoring*, 19(2), 161-186.
- Cury, A., Crémone, C., & Diday, E. (2010). Application of symbolic data analysis for structural modification assessment. *Engineering Structures*, 32(3), 762-775.
- Dabove, P., & Manzino, A. M. (2014). GPS & GLONASS mass-market receivers: Positioning performances and peculiarities. *Sensors (Switzerland)*, 14(12), 22159-22179. <https://doi.org/10.3390/s141222159>
- Dai, W. J., Ding, X., Li, Z. W., Kwok, K. C. S., & Campbell, S. D. (2006). Tropospheric effects on GPS measurements for monitoring tall buildings. *Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2006), held at Fort Worth, Texas, 26-29 Sep. 2006*, 36-41. Consulté à l'adresse <https://researchdirect.westernsydney.edu.au/islandora/object/uws:10358/>
- DIRA. (2013). *En route 2013*. Consulté à l'adresse www.dir.atlantique.developpement-durable.gouv.fr
- Doan, C. D., & Liong, S. (2004). Generalization for multilayer neural network bayesian regularization or early stopping. *Proceedings of Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources 2nd Conference*, 5-8.
- Dorffner, G., & Dorffner, G. (1996). Neural Networks for Time Series Processing. *NEURAL NETWORK WORLD*, 6, 447--468. Consulté à l'adresse <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.45.5697>
- Du, K.-L., & Swamy, M. N. S. (2013). *Neural networks and statistical learning*. Springer Science & Business Media.
- Du, K.-L., Swamy, M. N. S., Du, K.-L., & Swamy, M. N. S. (2014). Multilayer Perceptrons: Architecture and Error Backpropagation. In *Neural Networks and Statistical Learning* (p. 83-126). https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5571-3_4

- Ellenberg, A., Branco, L., Krick, A., Bartoli, I., & Koutsos, A. (2015). Use of unmanned aerial vehicle for quantitative infrastructure evaluation. *Journal of Infrastructure Systems*, 21(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000246](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000246)
- Favre, C. (2016). *Surveillance de santé structurale des ouvrages d'art incluant les systèmes de positionnement par satellites*. 26-32.
- Fine, T. L. (2006). *Feedforward neural network methodology*. Springer Science & Business Media.
- Flake, G. W., & Lawrence, S. (2002). Efficient SVM regression training with SMO. *Machine Learning*, 46(1-3), 271-290. <https://doi.org/10.1023/A:1012474916001>
- Fox, J. (2015). *Applied regression analysis and generalized linear models*. Sage Publications.
- Fox, J., & Monette, G. (2002). *An R and S-Plus companion to applied regression*. Sage.
- France 3. (2018). *Reportage - Entre Rouen et Le Havre, le point sur l'état du pont de Brotonne*. Consulté à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=YgZAQtOjwkc>
- Frigui, F. O., Genet, S., Faye, J.-P., Judenherc, S., Martin, C., & Dalverny, O. (2018). *Capteurs vibratoires connectés pour l'auscultation continue des ouvrages : exemple du barrage route de Ribou (Cholet)*.
- Friswell, M. I., Penny, J. E. T., & Wilson, D. A. L. (1994). Using vibration data and statistical measures to locate damage in structures. *Modal Analysis: The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 9(4), 239-254.
- Gautier, Y., & Dumoulin, J. (2013). *Surveillance acoustique des câbles: Guide pour la maîtrise d'ouvrage*.
- Ge, L., Han, S., Rizos, C., Ishikawa, Y., Hoshiba, M., Yoshida, Y., ... Himori, S. (2000). GPS seismometers with up to 20 Hz sampling rate. *Earth Planets and Space*, 52(10), 881-884. <https://doi.org/10.1186/BF03352300>
- Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M., Shi, C., & Liu, J. (2008). Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. *Journal of Geodesy*, 82(7), 389-399. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0187-4>
- Godart, B. (2015). *Auscultation des ouvrages d'art*. Consulté à l'adresse <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01462851>
- Godart, B., & Kretz, T. (2001). Replacement of the suspension of the Aquitaine Bridge in Bordeaux. In *Structures 2001: A Structural Engineering Odyssey* (p. 1-8).
- Goh, A. T. C. (1995). Back-propagation neural networks for modeling complex systems. *Artificial Intelligence in Engineering*, 9(3), 143-151. [https://doi.org/10.1016/0954-1810\(94\)00011-S](https://doi.org/10.1016/0954-1810(94)00011-S)
- Gordan, M., Razak, H. A., Ismail, Z., & Ghaedi, K. (2017). Recent developments in damage identification of structures using data mining. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14(13), 2373-2401. <https://doi.org/10.1590/1679-78254378>
- Górski, P. (2015). Investigation of dynamic characteristics of tall industrial chimney based on GPS measurements using Random Decrement Method. *Engineering Structures*, 83, 30-49. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.11.006>
- Górski, P. (2017). Dynamic characteristic of tall industrial chimney estimated from GPS measurement and frequency domain decomposition. *Engineering Structures*, 148, 277-292. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.06.066>
- Górski, P., Breuer, P., Konopka, E., & Napieraj, M. (2018). Effectiveness of GPS technology in monitoring of traffic-induced response of highway steel bridge. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 419(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/419/1/012009>

- Gul, M., & Necati Catbas, F. (2009). Statistical pattern recognition for Structural Health Monitoring using time series modeling: Theory and experimental verifications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(7), 2192-2204. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2009.02.013>
- Guo, Y. L., & Xin, Y. (2013). Application of Global Positioning System Measuring Technology in Safety Monitoring of Long-Span Bridges. *Advanced Materials Research*, 671-674, 2053-2056. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.671-674.2053>
- Ha, D., Park, H., Choi, S., & Kim, Y. (2013). A Wireless MEMS-Based Inclinometer Sensor Node for Structural Health Monitoring. *Sensors*, 13(12), 16090-16104. <https://doi.org/10.3390/s131216090>
- Hahnloser, R. H. R., Sarpeshkar, R., Mahowald, M. A., Douglas, R. J., & Seung, H. S. (2000). Digital selection and analogue amplification coexist in a cortex-inspired silicon circuit. *Nature*, 405(6789), 947-951.
- Ham, Y., Han, K. K., Lin, J. J., & Golparvar-Fard, M. (2016). Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a review of related works. *Visualization in Engineering*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s40327-015-0029-z>
- Handayani, H. H., Yuwono, & Taufik, M. (2015). Preliminary Study of Bridge Deformation Monitoring Using GPS and CRP (Case Study: Suramadu Bridge). *Procedia Environmental Sciences*, 24, 266-276. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.03.035>
- Harvey, A. C. (1990). ARIMA Models. In *Time Series and Statistics* (p. 22-24). https://doi.org/10.1007/978-1-349-20865-4_2
- Hassoun, M. H., & others. (1995). *Fundamentals of artificial neural networks*. MIT press.
- Hecht-Nielsen, R. (1992). Theory of the backpropagation neural network. In *Neural networks for perception* (p. 65-93). Elsevier.
- Herring, T., Gu, C., Nafi Toksöz, M., Parol, J., Al-Enezi, A., Al-Jeri, F., ... Büyüköztürk, O. (2019). GPS measured response of a tall building due to a distant M w 7.3 earthquake. *Seismological Research Letters*, 90(1), 49-159. <https://doi.org/10.1785/0220180147>
- Hofmann, M. (2006). Support vector machines-kernels and the kernel trick. *Notes*, 26(3).
- Huber, P. J. (2004). *Robust statistics* (Vol. 523). John Wiley & Sons.
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: principles and practice*. OTexts.
- Iwasaki, A., Todoroki, A., Shimamura, Y., & Kobayashi, H. (2004). An unsupervised statistical damage detection method for structural health monitoring (applied to detection of delamination of a composite beam). *Smart Materials and Structures*, 13(5), N80-N85. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/5/N02>
- Izenman, A. J. (2013). *Multivariate Regression*. https://doi.org/10.1007/978-0-387-78189-1_6
- Jo, H., Sim, S.-H., Tatkowski, A., Spencer Jr, B. F., & Nelson, M. E. (2013). Feasibility of displacement monitoring using low-cost GPS receivers. *Structural Control and Health Monitoring*, 20(9), 1240-1254.
- Kalooop, M. R., & Hu, J. W. (2016). Dynamic Performance Analysis of the Towers of a Long-Span Bridge Based on GPS Monitoring Technique. *Journal of Sensors*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/7494817>
- Kalooop, M. R., & Kim, D. (2014). GPS-structural health monitoring of a long span bridge using neural network adaptive filter. *Survey Review*, 46(334), 7-14. <https://doi.org/10.1179/1752270613Y.0000000053>
- Kalooop, M. R., & Kim, D. (2016). De-noising of GPS structural monitoring observation error using wavelet analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(2), 804-825.

<https://doi.org/10.1080/19475705.2014.983186>

- Kalooop, M. R., & Li, H. (2009). Monitoring of bridge deformation using GPS technique. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 13(6), 423-431. <https://doi.org/10.1007/s12205-009-0423-y>
- Kalooop, M. R., & Li, H. (2011). Sensitivity and analysis GPS signals based bridge damage using GPS observations and wavelet transform. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 44(5), 927-937. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.02.008>
- Kalooop, M. R., & Li, H. (2014). Multi input-single output models identification of tower bridge movements using GPS monitoring system. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 47(1), 531-539. <https://doi.org/10.1109/ICEP.2014.6826791>
- Kang, D., & Cha, Y.-J. (2018). Autonomous UAVs for Structural Health Monitoring Using Deep Learning and an Ultrasonic Beacon System with Geo-Tagging. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(10), 885-902. <https://doi.org/10.1111/mice.12375>
- Kao, C.-Y., & Loh, C.-H. (2013). Monitoring of long-term static deformation data of Fei-Tsui arch dam using artificial neural network-based approaches. *Structural Control and Health Monitoring*, 20(3), 282-303. <https://doi.org/10.1002/stc.492>
- Karlik, B., & Olgac, A. V. (2011). Performance analysis of various activation functions in generalized MLP architectures of neural networks. *International Journal of Artificial Intelligence and Expert Systems*, 1(4), 111-122.
- Kasser, M., & Egels, Y. (2002). *Digital photogrammetry*.
- Kato, M., & Shimada, S. (1986). Vibration of PC Bridge during Failure Process. *Journal of Structural Engineering*, 112(7), 1692-1703. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1986\)112:7\(1692\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1986)112:7(1692))
- Kavitha, S., Daniel, R. J., & Sumangala, K. (2013). A simple analytical design approach based on computer aided analysis of bulk micromachined piezoresistive MEMS accelerometer for concrete SHM applications. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 46(9), 3372-3388. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.05.013>
- Kavitha, S., Joseph Daniel, R., & Sumangala, K. (2016). Design and Analysis of MEMS Comb Drive Capacitive Accelerometer for SHM and Seismic Applications. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 93, 327-339. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.029>
- Keerthi, S. S., & Gilbert, E. G. (2002). Convergence of a generalized SMO algorithm for SVM classifier design. *Machine Learning*, 46(1-3), 351-360. <https://doi.org/10.1023/A:1012431217818>
- Kijewski-Correa, T., Kareem, A., & Kochly, M. (2006). Experimental Verification and Full-Scale Deployment of Global Positioning Systems to Monitor the Dynamic Response of Tall Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 132(8), 1242-1253. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:8\(1242\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:8(1242))
- Kijewski-Correa, T., Kilpatrick, J., Kareem, A., Kwon, D., Bashor, R., Kochly, M., ... Baker, W. (2006). Validating Wind-Induced Response of Tall Buildings: Synopsis of the Chicago Full-Scale Monitoring Program. *Journal of Structural Engineering*, 132(10), 1509-1523. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:10\(1509\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:10(1509))
- Kim, J.-H., Park, W.-J., Park, J.-O., & Park, S.-H. (2018). LoRa LPWAN Sensor Network for Real-Time Monitoring and It's Control Method. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 31(6), 359-366. <https://doi.org/10.7734/coseik.2018.31.6.359>
- Kim, S. W., & Kim, N. S. (2013). Dynamic characteristics of suspension bridge hanger cables using digital image processing. *NDT and E International*, 59, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.05.002>

- Kirkko-Jaakkola, M., Söderholm, S., Honkala, S., Koivula, H., Nyberg, S., & Kuusniemi, H. (2015). Low-cost precise positioning using a national GNSS network. *28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS 2015*, 4(September), 2570-2577.
- Kretz, T., Brevet, P., Cremona, C., Godart, B., & Paillusseau, P. (2006). Haute surveillance et évaluation de l'aptitude au service du pont suspendu d'Aquitaine. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 13-22.
- Kromanis, R., & Kripakaran, P. (2014). Predicting thermal response of bridges using regression models derived from measurement histories. *Computers & Structures*, 136, 64-77. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUC.2014.01.026>
- Kromanis, R., & Kripakaran, P. (2017). Data-driven approaches for measurement interpretation: analysing integrated thermal and vehicular response in bridge structural health monitoring. *Advanced Engineering Informatics*, 34, 46-59. <https://doi.org/10.1016/J.AEI.2017.09.002>
- Kuang, C., Kwok, K. C. S., Hitchcock, P. A., & Ding, X. (2011). Wind-Induced Response Characteristics of a Tall Building from GPS and Accelerometer Measurements. *Positioning*, 02(01), 1-13. <https://doi.org/10.4236/pos.2011.21001>
- Kuang, C., Yi, Z. H., Dai, W. J., & Zeng, F. (2013). Measuring wind-induced response characteristics of tall building based on GPS PPP method. *J. Cent. South Univ. Sci. Technol*, 11, 4588-4596.
- Lazecky, M., Perissin, D., Bakon, M., De Sousa, J. M., Hlavacova, I., & Real, N. (2015). Potential of satellite InSAR techniques for monitoring of bridge deformations. *2015 Joint Urban Remote Sensing Event, JURSE 2015*. <https://doi.org/10.1109/JURSE.2015.7120506>
- Lekidis, V., Tsakiri, M., Makra, K., Karakostas, C., Klimis, N., & Sous, I. (2005). Evaluation of dynamic response and local soil effects of the Evripos cable-stayed bridge using multi-sensor monitoring systems. *Engineering Geology*, 79(1-2), 43-59. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.10.015>
- Lera, G., & Pinzolas, M. (2002). Neighborhood based Levenberg-Marquardt algorithm for neural network training. *IEEE transactions on neural networks*, 13(5), 1200-1203.
- Li, H., Bao, Y., Li, S., & Zhang, D. Y. (2015). Data science and engineering for structural health monitoring. *Engineering Mechanics*, 32(8), 1-7.
- Li, Q., & Yi, J. (2016). Monitoring of dynamic behaviour of super-tall buildings during typhoons. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(3), 289-311. <https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1010223>
- Li, Xiaojing, Ge, L., Ambikairajah, E., Rizos, C., Tamura, Y., & Yoshida, A. (2006). Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system. *GPS Solutions*, 10(4), 233-247. <https://doi.org/10.1007/s10291-006-0023-y>
- Li, Xin, Huang, G., Zhang, Q., & Zhao, Q. (2018). A new GPS/BDS tropospheric delay resolution approach for monitoring deformation in super high-rise buildings. *GPS Solutions*, 22(3), 90. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0752-8>
- Lin, Y., Nie, Z., & Ma, H. (2017). Structural Damage Detection with Automatic Feature-Extraction through Deep Learning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(12), 1025-1046. <https://doi.org/10.1111/mice.12313>
- Liu, P., Chen, A. Y., Huang, Y. N., Han, J. Y., Lai, J. S., Kang, S. C., ... Tsai, M. H. (2014, juin 1). A review of rotorcraft unmanned aerial vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering. *Smart Structures and Systems*, Vol. 13, p. 1065-1094. <https://doi.org/10.12989/sss.2014.13.6.1065>
- Liu, T., & Li, B. (2017). Single-frequency BDS/GPS RTK with low-cost U-blox receivers. *2017 Forum on Cooperative Positioning and Service, CPGPS 2017*, 232-238.

<https://doi.org/10.1109/CPGPS.2017.8075131>

- Lovse, J., Teskey, W., & Lachapelle, G. (1995). Dynamic deformation monitoring of tall structure using GPS technology. *Journal of surveying*, 121(1), 35-40. Consulté à l'adresse [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(1995\)121:1\(35\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9453(1995)121:1(35))
- Maas, A. L., Hannun, A. Y., & Ng, A. Y. (2013). Rectifier nonlinearities improve neural network acoustic models. *Proc. icml*, 30(1), 3.
- Manzini, N., Orcesi, A., Thom, C., Botton, S., Clement, A., Ortiz, M., & Dumoulin, J. (2018a). Structural Health Monitoring using a GPS sensor network. *Proceedings of the 9th European Workshop on Structural Health Monitoring Series (EWSHM)*, Manchester, UK, 10-13.
- Manzini, N., Orcesi, A., Thom, C., Botton, S., Clement, A., Ortiz, M., & Dumoulin, J. (2018b). *Use of low-cost GNSS receivers for Structural Health Monitoring*.
- Mao, J. X., Wang, H., Feng, D. M., Tao, T. Y., & Zheng, W. Z. (2018). Investigation of dynamic properties of long-span cable-stayed bridges based on one-year monitoring data under normal operating condition. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(5), 1-19. <https://doi.org/10.1002/stc.2146>
- Matarazzo, T. J., Shahidi, S. G., Chang, M., & Pakzad, S. N. (2015). Are today's shm procedures suitable for tomorrow's bigdata? *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 7, 59-65. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15230-1_7
- Matarazzo, T. J., Shahidi, S. G., & Pakzad, S. N. (2015, septembre 27). *Exploring the Efficiency of BIGDATA Analyses in SHM*. <https://doi.org/10.12783/shm2015/369>
- Maurey, H., Chaize, P., & Dagbert, M. (2019). *Sécurité des ponts : évier un drame*.
- Meng, X., Roberts, G. W., Dodson, A. H., Cosser, E., Barnes, J., & Rizos, C. (2004). Impact of GPS satellite and pseudolite geometry on structural deformation monitoring: Analytical and empirical studies. *Journal of Geodesy*, 77(12), 809-822. <https://doi.org/10.1007/s00190-003-0357-y>
- Meo, M., Zumpano, G., Meng, X., Cosser, E., Roberts, G., & Dodson, A. (2006). Measurements of dynamic properties of a medium span suspension bridge by using the wavelet transforms. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(5), 1112-1133. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2004.09.008>
- Messina, A., Williams, E. J., & Contursi, T. (1998). STRUCTURAL DAMAGE DETECTION BY A SENSITIVITY AND STATISTICAL-BASED METHOD. *Journal of Sound and Vibration*, 216(5), 791-808. <https://doi.org/10.1006/JSVI.1998.1728>
- Meyer, J., Bischoff, R., & Feltrin, G. (2008). Microelectromechanical Systems (MEMS). In *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. <https://doi.org/10.1002/9780470061626.shm123>
- Moreu, F., Kim, R. E., & Spencer, B. F. (2017). Railroad bridge monitoring using wireless smart sensors. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(2), e1863. <https://doi.org/10.1002/stc.1863>
- Moschas, F., Avallone, A., Saltogianni, V., & Stiros, S. C. (2014). Strong motion displacement waveforms using 10-Hz precise point positioning GPS: an assessment based on free oscillation experiments. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(12), 1853-1866. <https://doi.org/10.1002/eqe.2426>
- Moschas, F., & Stiros, S. (2011). Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer. *Engineering Structures*, 33(1), 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.09.013>
- Müller, K. R., Smoła, A. J., Rättsch, G., Schölkopf, B., Kohlmorgen, J., & Vapnik, V. (1997). Predicting

- time series with support vector machines. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 1327, 999-1004. <https://doi.org/10.1007/bfb0020283>
- Murtagh, F. (1991). Multilayer perceptrons for classification and regression. *Neurocomputing*, 2(5-6), 183-197. [https://doi.org/10.1016/0925-2312\(91\)90023-5](https://doi.org/10.1016/0925-2312(91)90023-5)
- Nair, V., & Hinton, G. E. (2010). Rectified linear units improve restricted boltzmann machines. *Proceedings of the 27th international conference on machine learning (ICML-10)*, 807-814.
- Nickitopoulou, A., Protopsalti, K., Kontogianni, V., Triantafillidis, P., & Stiros, S. (2003). Experimental Assessment Of The Accuracy Of RTK - GPS For Monitoring Movements / Oscillations Of Flexible Engineering Structures. *Data Processing*.
- Nickitopoulou, A., Protopsalti, K., & Stiros, S. (2006). Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises. *Engineering Structures*, 28(10), 1471-1482. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.02.001>
- Ou, J., & Li, H. (2003, avril 2). *Wireless sensor information fusion for structural health monitoring* (B. V. Dasarathy, Éd.). <https://doi.org/10.1117/12.487067>
- Pandey, A. K., & Biswas, M. (1994). Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility. *Journal of Sound and Vibration*, 169(1), 3-17. <https://doi.org/10.1006/JSVI.1994.1002>
- Pandey, A. K., Biswas, M., & Samman, M. M. (1991). Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*, 145(2), 321-332. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90595-B](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90595-B)
- Park, H. S., Sohn, H. G., Kim, I. S., & Park, J. H. (2008). Application of GPS to monitoring of wind-induced responses of high-rise buildings. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17(1), 117-132. <https://doi.org/10.1002/tal.335>
- Park, J. W., Sim, S. H., & Jung, H. J. (2014). Wireless displacement sensing system for bridges using multi-sensor fusion. *Smart Materials and Structures*, 23(4). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/4/045022>
- Paziewski, J., Sieradzki, R., & Baryla, R. (2018). Multi-GNSS high-rate RTK, PPP and novel direct phase observation processing method: Application to precise dynamic displacement detection. *Measurement Science and Technology*, 29(3). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa9ec2>
- Peddinti, V., Povey, D., & Khudanpur, S. (2015). A time delay neural network architecture for efficient modeling of long temporal contexts. *Proceedings of the Annual Conference of the International Speech Communication Association, INTERSPEECH, 2015-Janua*, 2-6.
- Pehlivan, H. (2018). Frequency analysis of GPS data for structural health monitoring observations. *Structural Engineering and Mechanics*, 66(2), 185-193. <https://doi.org/10.12989/sem.2018.66.2.185>
- Psimoulis, P., Peppas, I., Bonenberg, L., Ince, S., & Meng, X. (2016). Combination of GPS and RTS measurements for the monitoring of semi-static and dynamic motion of pedestrian bridge. *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring*, 1-7.
- Psimoulis, P., Pytharouli, S., Karambalis, D., & Stiros, S. (2008). Potential of Global Positioning System (GPS) to measure frequencies of oscillations of engineering structures. *Journal of Sound and Vibration*, 318(3), 606-623. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.04.036>
- Psimoulis, P., & Stiros, S. C. (2008). Experimental assessment of the accuracy of GPS and RTS for the determination of the parameters of oscillation of major structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23(5), 389-403. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00547.x>

- Rao, C. R., & Toutenburg, H. (1995). *Linear Models*. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0024-1_2
- Rao, C. R., Toutenburg, H., Shalabh, H. C., & Schomaker, M. (2008). *Linear models and generalizations. Least Squares and Alternatives (3rd edition) Springer, Berlin Heidelberg New York*.
- Reda Taha, M. M., & Lucero, J. (2005). Damage identification for structural health monitoring using fuzzy pattern recognition. *Engineering Structures*, 27(12), 1774-1783. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2005.04.018>
- Remondi, B., & W. (1985). Performing Centimeter-Level Surveys in Seconds with GPS Carrier Phase: Initial Results. *Navigation*, 32(4), 386-400. <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.1985.tb00918.x>
- Rencher, A. C., & Schaalje, G. B. (2008). *Linear models in statistics*. John Wiley & Sons.
- Roberts, G. W., Cosser, E., Meng, X., & Dodson, A. H. (2004). High frequency deflection monitoring of bridges by GPS. *Journal of Global Positioning Systems*, 3(1-2), 226-231. <https://doi.org/10.5081/jgps.3.1.226>
- Roberts, G. W., Meng, X., & Dodson, A. (2001). The use of kinematic GPS and triaxial accelerometers to monitor the deflections of large bridges. *10th International Symposium on ...*, 268-275. Consulté à l'adresse [http://www.fig.net/com6_orange/pdf/Session VIII_Paper 2.pdf](http://www.fig.net/com6_orange/pdf/Session_VIII_Paper_2.pdf)
- Roberts, G. W., Meng, X., & Dodson, A. H. (2004). Integrating a global positioning system and accelerometers to monitor the deflection of bridges. *Journal of Surveying Engineering*, 130 %6(May), 65 %&. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2004\)130:2\(65\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2004)130:2(65))
- Rojas, I., Valenzuela, O., Rojas, F., Guillen, A., Herrera, L. J., Pomares, H., ... Pasadas, M. (2008). Soft-computing techniques and ARMA model for time series prediction. *Neurocomputing*, 71(4-6), 519-537. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2007.07.018>
- Rosenblatt, F. (1958). The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, 65(6), 386-408. <https://doi.org/10.1037/h0042519>
- Sampietro, D., Caldera, S., Capponi, M., & Realini, E. (2017, mars 6). *Geoguard - An Innovative Technology Based on Low-cost GNSS Receivers to Monitor Surface Deformations*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201700014>
- Santos, J. P. (2014). Smart structural health monitoring techniques for novelty identification in civil engineering structures. *PhD thesis*.
- Santos, J. P., Cremona, C., Orcesi, A. D., & Silveira, P. (2017). Early Damage Detection Based on Pattern Recognition and Data Fusion. *Journal of Structural Engineering (United States)*, 143(2), 1-11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001643](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001643)
- Santos, J. P., Crémona, C., Orcesi, A. D., & Silveira, P. (2013). Multivariate statistical analysis for early damage detection. *Engineering Structures*, 56, 273-285. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.022>
- Schaal, R. E., & Larocca, A. P. (2009). Measuring Dynamic Oscillations of a Small Span Cable-Stayed Footbridge: Case Study Using L1 GPS Receivers. *Journal of Surveying Engineering*, 135(February), 33-37. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2009\)135:1\(33\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2009)135:1(33))
- Schoefs, F., Tran, T.-V., & Bastidas-Arteaga, E. (2011). *Optimization of inspection and monitoring of structures in case of spatial fields of deterioration/properties*.
- Schölkopf, B. (1998). SVMs - A practical consequence of learning theory. *IEEE Intelligent Systems and Their Applications*, 13(4), 18-21. <https://doi.org/10.1109/5254.708428>
- Schölkopf, B. (2001). The kernel trick for distances. *Advances in neural information processing*

systems, 301-307.

- Shumway, R. H., & Stoffer, D. S. (2000). *Time Series Regression and ARIMA Models*. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3261-0_2
- Sibi, P., Jones, S. A., & Siddarth, P. (2013). Analysis of different activation functions using back propagation neural networks. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 47(3), 1264-1268.
- Sousa, J., Hlavacova, I., Bakon, M., & Lazecky, M. (2014). *Potential of Multi-temporal InSAR Techniques for Bridges and Dams Monitoring Disaster management support scenarios using geoinformation technologies View project project METAN View project*. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.033>
- Spencer, B. F., Jo, H., Mechitov, K. A., Li, J., Sim, S. H., Kim, R. E., ... Agha, G. (2016). Recent advances in wireless smart sensors for multi-scale monitoring and control of civil infrastructure. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(1), 17-41. <https://doi.org/10.1007/s13349-015-0111-1>
- Spencer, B. F., Moreu, F., & Kim, R. E. (2015). *Campaign Monitoring of Railroad Bridges in High-Speed Rail Shared Corridors using Wireless Smart Sensors*. (June). Consulté à l'adresse <http://hdl.handle.net/2142/78095>
- Spencer, B. F., Park, J. W., Mechitov, K. A., Jo, H., & Agha, G. (2017). Next Generation Wireless Smart Sensors Toward Sustainable Civil Infrastructure. *Procedia Engineering*, 171, 5-13. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.304>
- Stabile, T. A., Perrone, A., Gallipoli, M. R., Ditommaso, R., & Ponzio, F. C. (2013). Dynamic survey of the Musmeci bridge by joint application of ground-based microwave radar interferometry and ambient noise standard spectral ratio techniques. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(4), 870-874. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2226428>
- Stephen, I. (1990). Perceptron-based learning algorithms. *IEEE Transactions on neural networks*, 50(2), 179.
- Sun, Z., Zou, Z., & Zhang, Y. (2017). Utilization of structural health monitoring in long-span bridges: Case studies. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(10), 1-12. <https://doi.org/10.1002/stc.1979>
- Suykens, J. A. K. (2001). Nonlinear modelling and support vector machines. *Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 1, 287-294. <https://doi.org/10.1109/imtc.2001.928828>
- Suykens, J. A. K., & Vandewalle, J. (1999). Least squares support vector machine classifiers. *Neural Processing Letters*, 9(3), 293-300. <https://doi.org/10.1023/A:1018628609742>
- Svozil, D., Kvasnička, V., & Pospíchal, J. (1997). Introduction to multi-layer feed-forward neural networks. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 39(1), 43-62. [https://doi.org/10.1016/S0169-7439\(97\)00061-0](https://doi.org/10.1016/S0169-7439(97)00061-0)
- Takasu, T. (2009). RTKLIB: Open source program package for RTK-GPS. *Proceedings of the FOSS4G*.
- Takasu, T. (2013). *RTKLIB ver. 2.4.2 Manual*.
- Takasu, T., & Yasuda, A. (2009). Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. *International Symposium on GPS/GNSS*, 4-6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.82.022112>
- Tamura, Y., Matsui, M., Pagnini, L.-C., Ishibashi, R., & Yoshida, A. (2002). Measurement of wind-induced response of buildings using RTK-GPS. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(12-15), 1783-1793. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(02\)00287-8](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00287-8)
- Tang, X., Roberts, G. W., Li, X., & Hancock, C. M. (2017). Real-time kinematic PPP GPS for structure

- monitoring applied on the Severn Suspension Bridge, UK. *Advances in Space Research*, 60(5), 925-937. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.05.010>
- Tsoia, A. C., & Back, A. (1997). Discrete time recurrent neural network architectures: A unifying review. *Neurocomputing*, 15(3-4), 183-223. [https://doi.org/10.1016/S0925-2312\(97\)00161-6](https://doi.org/10.1016/S0925-2312(97)00161-6)
- Van Nee, R. D. J. (1992). Multipath Effects on GPS Code Phase Measurements. *Navigation*, 39(2), 177-190. <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.1992.tb01873.x>
- Vazquez, G. E., Gaxiola-Camacho, J. R., Bennett, R., Guzman-Acevedo, G. M., & Gaxiola-Camacho, I. E. (2017). Structural evaluation of dynamic and semi-static displacements of the Juarez Bridge using GPS technology. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 110, 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.06.026>
- Wang, G., & Jain, C. L. (2003). *Regression analysis: modeling & forecasting*. Institute of Business Forec.
- Wang, J., Meng, X., Qin, C., & Yi, J. (2016). Vibration frequencies extraction of the forth road bridge using high sampling GPS data. *Shock and Vibration*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/9807861>
- Wang, L. (2005). *Support vector machines: theory and applications* (Vol. 177). Springer Science & Business Media.
- Wang, P., Yan, Y., Tian, G. Y., Bouzid, O., & Ding, Z. (2012). Investigation of wireless sensor networks for structural health monitoring. *Journal of Sensors*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/156329>
- Watson, C., Watson, T., & Coleman, R. (2007). Structural Monitoring of Cable-Stayed Bridge: Analysis of GPS versus Modeled Deflections. *Journal of Surveying Engineering*, 133(1), 23-28. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2007\)133:1\(23\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2007)133:1(23))
- Weglarczyk, S. (2018). Kernel density estimation and its application. *ITM Web of Conferences*, 23, 37. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20182300037>
- Welsch, R. E. (1977). Robust regression using iteratively reweighted least-squares. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 6(9), 813-827. <https://doi.org/10.1080/03610927708827533>
- Xi, R., Jiang, W., Meng, X., Chen, H., & Chen, Q. (2018). Bridge monitoring using BDS-RTK and GPS-RTK techniques. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 120(February), 128-139. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.001>
- Xiong, C., & Niu, Y. (2019). Investigation of the Dynamic Behavior of a Super High-rise Structure using RTK-GNSS Technique. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(2), 654-665. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0238-9>
- Xu, G., & Xu, Y. (2016). *GPS: theory, algorithms, and applications*.
- Xu, L., Guo, J. J., & Jiang, J. J. (2002). Time-frequency analysis of a suspension bridge based on GPS. *Journal of Sound and Vibration*, 254(1), 105-116. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.4087>
- Xu, P., Shi, C., Fang, R., Liu, J., Niu, X., Zhang, Q., & Yanagidani, T. (2013). High-rate precise point positioning (PPP) to measure seismic wave motions: An experimental comparison of GPS PPP with inertial measurement units. *Journal of Geodesy*, 87(4), 361-372. <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0606-z>
- Yeung, W. T., & Smith, J. W. (2005a). Damage detection in bridges using neural networks for pattern recognition of vibration signatures. *Engineering Structures*, 27(5), 685-698. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.12.006>
- Yeung, W. T., & Smith, J. W. (2005b). Damage detection in bridges using neural networks for

- pattern recognition of vibration signatures. *Engineering Structures*, 27(5), 685-698. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2004.12.006>
- Yi, J., Zhang, J. W., & Li, Q. S. (2013). Dynamic characteristics and wind-induced responses of a super-tall building during typhoons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 121, 116-130. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.08.006>
- Yi, T. H., Li, H.-N., & Gu, M. (2013a). Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures. *Structural Control and Health Monitoring*, 20(5), 649-670.
- Yi, T. H., Li, H., & Gu, M. (2010). Full-scale measurements of dynamic response of suspension bridge subjected to environmental loads using GPS technology. *Science China Technological Sciences*, 53(2), 469-479. <https://doi.org/10.1007/s11431-010-0051-2>
- Yi, T. H., Li, H. N., & Gu, M. (2013b). Experimental assessment of high-rate GPS receivers for deformation monitoring of bridge. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 46(1), 420-432. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.07.018>
- Yi, Z., Kuang, C., Wang, Y., Yu, W., Cai, C., & Dai, W. (2018). Combination of High- and Low-Rate GPS Receivers for Monitoring Wind-Induced Response of Tall Buildings. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18(12). <https://doi.org/10.3390/s18124100>
- Yigit. (2016). Experimental assessment of post-processed kinematic Precise Point Positioning method for structural health monitoring. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(1), 360-383. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.917724>
- Yigit, & Gurlek. (2017). Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 893-904. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1284160>
- Yu, H., & Wilamowski, B. M. (2011). Levenberg-marquardt training. *Industrial electronics handbook*, 5(12), 1.
- Zambom, A. Z., & Dias, R. (2013). A review of kernel density estimation with applications to econometrics. *International Econometric Review*, 5(1), 20-42.
- Zhang, J.-S., & Xiao, X.-C. (2000). Predicting Chaotic Time Series Using Recurrent Neural Network. *Chinese Physics Letters*, 17(2), 88. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/17/2/004>
- Zhang, Q., Zhu, T., Zhang, J., & Chiang, K. S. (2013). Micro-fiber-based FBG sensor for simultaneous measurement of vibration and temperature. *IEEE Photonics Technology Letters*, 25(18), 1751-1753. <https://doi.org/10.1109/LPT.2013.2272934>

ANNEXE I : PARAMETRES DE CALCUL RTKLIB

A utiliser pour reproduire les paramètres de calcul utilisés dans le Chapitre II.3.

```
pos1-posmode    =kinematic
pos1-frequency  =11
pos1-soltype    =combined
pos1-elmask     =15
pos1-snrmask_r  =off
pos1-snrmask_b  =off
pos1-snrmask_L1 =0,0,0,0,0,0,0,0
pos1-snrmask_L2 =0,0,0,0,0,0,0,0
pos1-snrmask_L5 =0,0,0,0,0,0,0,0
pos1-dynamics   =off
pos1-tidecorr   =on
pos1-ionoopt    =off
pos1-tropopt    =saas
pos1-sateph     =brdc
pos1-posopt1    =off
pos1-posopt2    =off
pos1-posopt3    =off
pos1-posopt4    =off
pos1-posopt5    =off
pos1-exclsats   =
pos1-navsys     =1
pos2-armode     =continuous
pos2-gloarmode  =on
pos2-bdsarmode  =on
pos2-arthres    =3
pos2-arlockcnt  =0
pos2-arelmask   =0
pos2-arminfix   =10
pos2-elmaskhold =0
pos2-aroutcnt   =5
pos2-maxage     =30
pos2-syncsol    =off
pos2-slipthres  =0.05
pos2-rejionno   =30
pos2-rejgdop    =30
pos2-niter      =1
pos2-baselen    =0
pos2-basesig    =0
out-solformat   =xyz
out-outhead     =on
out-outopt      =on
out-timesys     =gpst
out-timeform    =hms
out-timendec    =3
out-degform     =dms
out-fieldsep    =
out-height      =ellipsoidal
out-geoid       =internal
out-solstatic   =all
out-nmeaintv1   =0
```

out-nmeaintv2 =0
out-outstat =off
stats-eratio1 =100
stats-eratio2 =100
stats-errphase =0.003
stats-errphaseel =0.003
stats-errphasebl =0
stats-errdoppler =10
stats-stdbias =30
stats-stdiono =0.03
stats-stdtrop =0.3
stats-prnacclh =10
stats-prnacclv =10
stats-prnbias =0.0001
stats-prniono =0.001
stats-prntrop =0.0001
stats-clkstabil =5e-12
ant1-postype =llh
ant1-pos1 =90
ant1-pos2 =0
ant1-pos3 =-6335367.6285
ant1-anttype =ACCG3ANT_52AT1
ant1-antdele =0
ant1-antdeln =0
ant1-antdelu =0
ant2-postype =llh
ant2-pos1 =48.841054864
ant2-pos2 =2.587307766
ant2-pos3 =160.461100000201
ant2-anttype =TRM57971.00
ant2-antdele =0
ant2-antdeln =0
ant2-antdelu =0
misc-timeinterp =off
misc-sbasatsel =0
misc-rnxopt1 =
misc-rnxopt2 =
file-satantfile =antcal.atx
file-rcvantfile =antcal.atx
file-staposfile =
file-geoidfile =
file-ionofile =
file-dcbfile =
file-eopfile =
file-blqfile =
file-tempdir =
file-geexefile =
file-solstatfile =
file-tracefile =
