**N° 156**

UNIVERSITÉ D'ABOMEY-CALAVI (UAC)

---

Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI)

---

Master de Recherche en **Matériaux & Structures**

---

# RAPPORT DE STAGE

**THEME**

## CONCEPTION ET REALISATION D'UN SYSTEME NUMERIQUE POUR LE SUIVI ET L'ENTRETIEN A LONG TERME DES DEFORMATIONS DES PONTS

*Présenté par :*

**Kora Farid Carlos YAROU**

**Ingénieur de Conception en Génie Civil**

*Sous la direction de :*

**Valéry K. DOKO**

**Maitre de Conférences des Universités du CAMES**

**Enseignant Chercheur à l'EPAC/UAC**

**Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquée (LEMA)**

*J'ai le grand honneur de dédier ce mémoire à :*

*Mon père* ***Demon YAROU****,*

*« Partout où vous passez, laissez-y votre trace par votre respect et votre travail.» Recevez ici papa, le fruit de cette règle de vie que vous m'avez inculquée dès mon enfance. Merci de vos soutiens et de vos encouragements sans fin. Puisse DIEU établir sa seigneurie dans votre vie et vous combler.*

*Ma mère* ***Baké Lahanatou CHABI BOUKARY MESSOUNA****,*

*« Qui honore sa mère se prépare un trésor.»*
*Pardonnez-moi de ne pas trouver le mot juste pour honorer l'amour, le don de soi et les sacrifices consentis à mon égard. Je tâcherai d'être digne de vous, afin que vous trouviez en cela la marque de ma gratitude. Que DIEU vous bénisse et vous accorde la longévité. Merci maman !*

# Remerciements

*Tout d'abord je tiens à remercier **ALLAH** le tout puissant de m'avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience pour mener à terme ma formation et pourvoir réaliser ce travail de recherche..*

Toute ma gratitude va à l'endroit du Dr **Valéry DOKO**, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Enseignant-chercheur à l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Coordonateur Adjoint de l'Ecole Doctorale Sciences de l'Ingénieur qui a encadré ce travail, pour sa patience et pour la qualité de son encadrement.

A tous les responsables et enseignants de l'Ecole Doctorale Sciences de l'Ingénieur, pour vos précieux enseignements et conseils et en particulier à ceux qui nous ont dispensé des cours et qui ne se sont aucunement ménagés pour développer et enrichir notre savoir. Pour la qualité de la formation offerte, je vous rends un hommage sincère et plus que mérité. Il s'agit en particulier de :

- Pr **GIBIGAYE Mohamed**, Professeur Titulaire des Universités du CAMES ;
- Pr **OLODO Emmanuel**, Professeur Titulaire des Universités du CAMES ;
- Dr **DOKO Valéry**, Maître de Conférences des Universités du CAMES ;
- Dr **DJARA Tahirou**, Maître de Conférences des Universités du CAMES ;
- Dr **HOUANOU Agapi**, Maître de Conférences des Universités du CAMES ;
- Dr **DEGILA Jules**, Maître Assistant des Universités du CAMES ;
- Dr **AGBANGBA Emile**, Maître Assistant des Universités du CAMES ;
- Dr **OLORY Bienvenu**, Enseignant à l'EPAC/UAC ;

Une pensée particulière va à l'endroit de mon cher père et ma douce et tendre mère pour la confiance et le soutien dont ils ont fait preuve à mon égard durant toutes mes années d'étude. Je n'oublie cependant pas mes frères et ma soeur, **Saleck**, **Yazid**, **Ziadath**, ma tante **Nadjibath** et ma bien aimée **Marzoukath**. Merci pour votre soutien et votre amour sans faille. Je n'aurais pas pu accomplir ceci sans vous.

Mes remerciements s'adressent également aux ingénieurs : **Eraste AKANDE** , **Serge AFOUDA**, **Boris GANMAVO**, **Walix DE** et tous mes camarades et amis qui ont participé d'une manière ou d'une autre à ce travail. Puisse le Tout Puissant vous en sache gré.

# Liste des sigles

## A

**ADC** Analog to Digital Converter
**API** Automate Programmable Industrielle

## C

**CAN** Convertisseur Analogique Numérique

## E

**EDI** Echange de données Informatisées

## G

**GNSS** Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites
**GPS** Global Positioning System

## I

**IDE** Integrated Development Environment
**ISIS** Intelligent Sensing for Innovation Structures
**I2C** Inter-Integrated Circuit

**IOT** Internet Of Things

## M

**MATLAB** MATrix LABoratory
**MISO** Master Input Slave Output
**MOSI** Master Output Slave Input

# O

**OTDR** Optical Time Domain Reflectometer

# R

**RISC** Reduced Instruction Set Computer

# S

**SHM** Structural Health Monitoring
**SPI** Serial Peripheral Interface

# T

**TOR** Tout Ou Rien

# W

**WiFi** Wireless Fidelity

# Liste des tableaux

1.1 Type de grandeur mesurée (capteurs actifs) . . . . . 13
1.2 Type de grandeur mesurée (capteurs passifs) . . . . . 14
1.3 Fréquences Modales Calculées [17] . . . . . 24

2.1 Désignation des broches E/S numériques de la carte Arduino. . . . . 42

# Table des figures


1.1 Pont . . . . . 4
1.2 Buse . . . . . 5
1.3 Ponceau . . . . . 5
1.4 Viaduc . . . . . 6
1.5 Fonctionnement d'un capteur . . . . . 9
1.6 Schéma d'une chaine d'acquisition [2] . . . . . 15
1.7 Structure d'une carte d'acquisition [3] . . . . . 15
1.8 Exemple d'un signal échantillonné [3] . . . . . 16
1.9 Symbole de la fonction CAN [3] . . . . . 17
1.10 Capteur à fibre optique interférométrique en basse cohérence [15] . . . 22
1.11 Le pont « Warth Talübergang», Autriche [17] . . . . . 22
1.12 Section transversalle et axial du pont instrumenté [17] . . . . . 23
1.13 Le viaduc de Millau [17] . . . . . 24
1.14 Jauge Fabry-Pérot [15] . . . . . 26
1.15 Principe des réseaux de bragg [15] . . . . . 27

2.1 Interface de Simulink . . . . . 36
2.2 Création d'un modèle Simulink . . . . . 37
2.3 Schéma synoptique du système . . . . . 38
2.4 Différents éléments de la carte Arduino [3] . . . . . 41
2.5 Les différentes parties de la fenêtre principale du logiciel Arduino [3] 44
2.6 Accès au moniteur série [3] . . . . . 45
2.7 Fenêtre associée au moniteur [3] . . . . . 45
2.8 Structure de la barre des boutons [3] . . . . . 46
2.9 Structure de la barre de menu [3] . . . . . 46
2.10 Processus de surveillance . . . . . 47
2.11 Jauge de contrainte . . . . . 47
2.12 Accéléromètre . . . . . 48
2.13 Capteur à fibre optique . . . . . 48
2.14 Inclinomètre . . . . . 48
2.15 Capteur de déplacement linéaire . . . . . 49
2.16 Capteur de température . . . . . 49
2.17 Capteur de pression . . . . . 50
2.18 Sine wave . . . . . 53
2.19 Schéma de connexion pour la création de l'amplificateur . . . . . 56
2.20 Schéma de l'amplificateur . . . . . 57

2.21 Harmonic distortion . . . . . 58
2.22 Schéma de simulation . . . . . 58

3.1 Résultat de la simulation . . . . . 61
3.2 Exemple de visualisation des déformations [54] . . . . . 62
3.3 Variation des déformations . . . . . 63

# *Résumé*

Les ponts sont des infrastructures cruciales qui permettent de relier les régions et de faciliter le transport de personnes et de marchandises. Cependant, en raison des contraintes auxquelles ils sont soumis, les ponts subissent des déformations et des dégradations au fil du temps. Il est donc essentiel de mettre en place une méthode pour suivre les différentes déformations afin d'analyser les données et de proposer des solutions de maintenances afin de garantir la sécurité et la durabilité des ouvrages.

Dans ce manuscrit, une solution a été proposée. Il s'agit de la conception d'un système numérique pour le suivi et l'entretien à long terme des déformations des ponts. Il comporte deux parties : une partie analogique et une partie numérique. La partie analogique est responsable de la collecte des données de déformation du pont à l'aide de capteurs physiques. Les capteurs utilisés varient en fonction des spécificités du pont et des paramètres de déformation à mesurer. Quant à la partie numérique, elle est responsable du traitement et de l'analyse des données de déformation acquises par les capteurs analogiques.

Par ailleurs, les résultats de simulation ont montré que la distorsion varie en fonction des fréquences. Les points jaunes observés sur le graphique sont des points de rupture indiquant les seuils de déformations importants ou des limites de capacité du pont. En effet, lorsque la charge dépasse la capacité maximale du pont, on remarque des points de structure ou le matériau se fracture et le pont subit une défaillance structurelle. Le signal observé sera transmis par communication sans fil. Des alertes seront donc envoyés au personnel de gestion pour qu'il réagisse rapidement car les valeurs des paramètres dépassent les valeurs seuils.

**Mots-clés :** ponts, déformations, suivi, entretien, système numérique.

# *Abstract*

Bridges are crucial infrastructure, linking regions and facilitating the transport of people and goods. However, due to the stresses to which they are subjected, bridges undergo deformation and degradation over time. It is therefore essential to implement a method for monitoring the various deformations, in order to analyze the data and propose maintenance solutions to guarantee the safety and durability of the structures.

In this manuscript, a solution has been proposed. It involves the design of a digital system for the long-term monitoring and maintenance of bridge deformations. It comprises two parts : an analog part and a digital part. The analog part is responsible for collecting bridge deformation data using physical sensors. The sensors used vary according to the specific characteristics of the bridge and the deformation parameters to be measured. The digital part is responsible for processing and analyzing the deformation data acquired by the analog sensors.

Simulation results also showed that distortion varies with frequency. The yellow dots on the graph are fracture points indicating significant deformation thresholds or bridge capacity limits. Indeed, when the load exceeds the bridge's maximum capacity, structural points can be seen where the material fractures and the bridge suffers structural failure. The signal observed will be transmitted by wireless communication. Alerts will then be sent to management staff, enabling them to react quickly when parameter values exceed threshold values.

**Keywords :** bridges, deformations, monitoring, maintenance, digital system.

# Sommaire

**Remerciements** ii

**Liste des sigles** iv

**Liste des tableaux** vi

**Table des figures** vii

**Résumé** ix

**Abstract** x

**INTRODUCTION GÉNÉRALE** 1

**1 REVUE DE LITTERATURE** 3
- 1.1 Introduction . . . 3
- 1.2 Généralités sur les ponts . . . 4
- 1.3 Actions sollicitant les ponts . . . 8
- 1.4 Les capteurs . . . 9
- 1.5 Système d'acquisition de données . . . 14
- 1.6 Analyse des tenseurs pour la sécurité et la durabilité des ponts . . . 17
- 1.7 Les systèmes de surveillance des ponts . . . 18
- 1.8 L'entretien des ponts . . . 28
- 1.9 Impact des entretiens . . . 30
- 1.10 Conclusion . . . 32

**2 MATERIEL ET METHODES** 33
- 2.1 Introduction . . . 33
- 2.2 Logiciels et outils de simulation . . . 34
- 2.3 Conception du système numérique . . . 38
- 2.4 Fonctionnement du système . . . 46
- 2.5 Représentation de la simulation . . . 53
- 2.6 Conclusion . . . 59

**3 ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSIONS** 60
- 3.1 Introduction . . . 60
- 3.2 Résultats et interprètation de la simulation . . . 61

3.3 Identification des déformations . . . . . 62
3.4 Localisation des déformations . . . . . 63
3.5 Durée de l'implémentation du système . . . . . 63
3.6 Conclusion . . . . . 66

**CONCLUSION GÉNÉRALE** **67**

**Bibliographie** **68**

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les ponts constituent une partie importante du patrimoine des ouvrages d'art au service de la communauté. Il est de la responsabilité des ingénieurs de s'assurer que ces constructions essentielles soient à même de remplir leur mission, le cas échéant d'en détecter à temps les éventuelles faiblesses, et de faciliter par une planification ordonnée, les interventions qui peuvent s'avérer nécessaires.

La notion de suivi de structure est une évolution naturelle de la nécessité de mieux maîtriser et caractériser chaque phase importante des processus de construction, d'exploitation et de maintenance. Selon le niveau de service des outils utilisés et des modes d'exploitation choisis par rapport à l'usage envisagé, on peut rendre une structure sensible ou lui affecter une certaine contrôlabilité plus ou moins évoluée. En effet, possédant un réseau de capteurs fiables, la structure peut livrer en temps réel et en permanence, des informations relatives à ses capacités et modes de fonctionnement, ses diagnostics d'anomalie et des informations reflétant son état de santé. Toutes ces données cumulées permettront l'optimisation de la maintenance et l'affinement des architectures futures. Les outils métrologiques deviennent alors des maillons d'une chaîne plus ou moins complexe à la base des avancées dans le domaine de la technologie notamment l'informatique, l'électronique, ou l'optique. Ces avancées ont permis d'élaborer de nouveaux outils permettant de suivre l'état de santé d'une structure..

En effet, les capteurs offrent des potentialités pour l'instrumentation au sein et en surface de structures de génie civil. Ce type de métrologie a bénéficié des avancées technologiques des télécommunications notamment pour la connectique, et des fonctionnalités puissantes telles que la mise en réseaux des capteurs, le multiplexage des signaux, le traitement et l'exploitation des données en temps réel. En dehors des spécificités telles que leurs petites tailles à mesurer de nombreuses grandeurs physiques (ex : température, pression, déformation). Les capteurs sont aussi des équipements électroniques qui sont sujets aux effets des ondes électromagnétiques, il est possible de disposer d'un ou plusieurs éléments sensibles sur un même capteur : capteur ponctuel (un seul point de mesure) ou multi capteurs (plusieurs points de mesure sur de grandes longueurs). Ces capteurs permettent ainsi de renseigner l'utilisateur sur le fonctionnement structurel local mais aussi global de l'ouvrage instrumenté. En sélectionnant donc les capteurs appropriés, il est possible de recueillir des données physiques exploitables pour l'analyse de l'état des structures.

Par ailleurs, le suivi de l'ouvrage constitue une base nécessaire pour le choix d'une stratégie d'entretien adéquate en fonction du type de dégradation et pour permettre une évaluation plus précise des coûts. Il faut donc prévoir une campagne d'évaluation la plus détaillée possible de l'état de la structure, avec pour but d'obtenir des informations sur l'étendue des dommages et d'établir les causes des dégradations. C'est dans cette logique que s'inscrit le projet de recherche intitulé « Conception et réalisation d'un système numérique pour le suivi et l'entretien à long terme des déformations des ponts ».

# HYPOTHÈSE DE RECHERCHE

L'utilisation d'un système numérique permettrait de suivre en temps réel les déformations observées au niveau des ponts suite à des sollicitations et de planifier l'entretien de ces ponts.

# OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

## Objectif général

Concevoir un système numérique permettant de suivre et d'entretenir à long terme des déformations des ponts.

## Objectifs spécifiques

— faire un état de l'art sur les ponts, les capteurs, les systèmes d'acquisition de données et les systèmes de surveillance des ponts ;

— présenter les étapes de la conception du système et son fonctionnement ;

— faire une simulation du système.

# Chapitre 1

# REVUE DE LITTERATURE

## 1.1 Introduction

Les ponts sont des structures essentielles qui permettent de traverser des obstacles tels que des rivières, des canyons, des vallées ou des autoroutes. Ils sont souvent considérés comme des chefs-d'œuvre de l'ingénierie civile en raison de la complexité de leur conception et de leur construction.

Ils existent depuis des milliers d'années et ont évolué au fil du temps pour devenir des structures très avancées et sophistiquées. Les premiers ponts étaient généralement construits en bois ou en pierre, mais les matériaux utilisés pour construire des ponts modernes incluent l'acier, le béton et les composites.

La conception d'un système numérique a pour but de fournir en temps réel les déformations observées au niveau des ponts, de les analyser afin d'apprécier l'état des ponts en y apportant des solutions de maintenance adéquate.

Ce chapitre est consacré à la revue de littérature. Dans un premier temps nous ferons une brève généralité sur les ponts, nous présenterons : les actions sollicitant les ponts, les capteurs, le système d'acquisition de données et dans un second temps nous ferons une synthèse bibliographique sur les systèmes de surveillance des ponts.

## 1.2 Généralités sur les ponts

Les ponts permettent le franchissement d'un obstacle naturel (fleuve, rivière, vallée) ou artificiel (route, voie ferrée) par une route (pont routier), par une voie ferrée (pont ferroviaire) ou parfois par une voie d'eau (pont-canal). Ils sont constitués de deux éléments principaux :

**La superstructure** : constitué du tablier et des équipements (corniches, barrières...) nécessaires à la circulation et l'esthétique de l'ouvrage.

**L'infrastructure** : composé des appuis et des fondations et qui supporte le tablier.

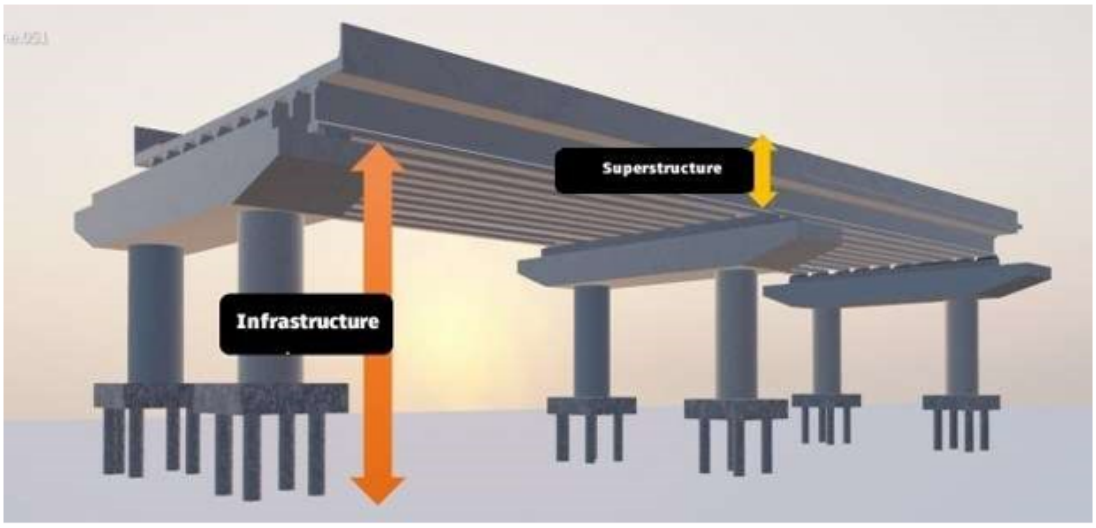



FIGURE 1.1 – Pont

En considérant les caractéristiques dimensionnelles on a :

— **La buse** : ouvrage de forme cylindrique pour le passage de l'eau ;



FIGURE 1.2 – Buse

— **Le ponceau** : ouvrage de petites dimensions ($\geq 2m$) ;



FIGURE 1.3 – Ponceau

— **Le viaduc** : ouvrage de grande hauteur à travées ou ouvertures successives.



FIGURE 1.4 – Viaduc

### 1.2.1 Classification des ponts

L'objectif de la classification est de mieux connaitre la nature et le type d'ouvrage. Les critères permettant de classifier les ouvrages sont :

**La nature de la voie portée** : on distingue le pont-route, pont-rail, aqueduc et pont pour avion.

**La géométrie** : on distingue le pont droit, pont courbe et pont biais.

**La nature du matériau utilisé (dans la réalisation des éléments porteurs)** : on distingue le pont en bois, pont en maçonnerie, pont métallique (fonte, fer, acier), pont en béton armé et pont en béton précontraint.

**Leur fonctionnement**

Il existe trois grandes catégories :

— Ponts à poutres (éléments porteurs parallèle à l'axe du pont) ;
— Ponts en arc (éléments porteurs en arc, encastrés ou articulés, générant des poussées horizontales aux appuis) ;

— Ponts suspendus (tablier suspendu à deux câbles porteurs principaux ancrés dans des massifs d'ancrage au niveau des culées, passant aux sommets de pylônes et supportant le tablier par l'intermédiaire de suspentes.

De manière générale, la classification adoptée se rapporte à la structure du tablier qui est la partie plane de l'ouvrage qui permet de porter la voie de communication et de raccorder entre les deux rives de l'obstacle. Dans le cas des portiques et des ponts en voûtes, la structure d'ensemble de l'ouvrage assure cette classification.

Il existe :
- Les ponts voûtés (maçonnerie, béton) ;
- Les portiques (tablier encastré sur piles) ;
- Les ponts à poutres (sous chaussée, latérales) ;
- Les ponts en caisson (unicellulaire, bicellulaire) ;
- Les ponts à dalles (pleine, élégie, nervurée) ;
- Les ponts haubanés (tablier soutenu par des câbles obliques et rectilignes) ;
- Les ponts en arc (à tablier inférieur, supérieur ou intermédiaire) ;
- Les ponts suspendus.

On peut également classer les ponts en considérant la méthode d'exécution donnant son nom à certains types de tablier :

**Pont en encorbellements successifs** : le tablier est constitué d'une succession de voussoirs montés en encorbellement de part et d'autre d'une pile ou à partir de la culée. Les voussoirs sont préfabriqués ou coulés sur place au moyen de coffrage glissant. Cette technique de construction est apparue avec le développement de la précontrainte.

**Pont cantilever** : la travée est constituée de consoles qui sont le prolongement des travées adjacentes ou encastrées sur les piles, et d'une travée centrale indépendante et de longueur réduite s'appuyant sur ces consoles.

Ainsi, le développement de l'informatique et du calcul automatique de structures d'ouvrages, a conduit à la constitution de dossiers pilotes pour les ouvrages ou structures de petites portées, comme suit :

- **PS-BA** : Passage Supérieur à poutre continue en Béton Armé ;
- **TI-BA** : Passage Supérieur à Travées Indépendantes en poutres (portée comprise entre 16 et 26 m) en Béton Armé ;
- **PI-PO** : Passage Inférieur à Portique Ouvert (portée $\leq 20m$) ;
- **PI-CF** : Passage Inférieur à Cadre Fermé (portée $\leq 10m$) ;
- **PSI-DA** : Passage Supérieur Inférieur à Dalle en Béton Armé ;

— **POD** : Passage à Portique Double (portée de la travée $\leq 20m$).

## 1.3 Actions sollicitant les ponts

Les ponts sont soumis à l'action de différentes charges dont, principalement celles citées ci-dessous [1] :

— **Les charges permanentes** ;
— **Les charges variables dues au trafic routier** ;
— **Les charges dues aux actions accidentelles**

### 1.3.1 Charges permanentes

Les actions dues à des charges permanentes appliquées à un tablier (y compris son poids propre), ainsi que les sollicitations qu'elles induisent peuvent être imprécises. En effet, si on considère, à titre d'exemple la valeur de la masse volumique du béton adoptée par les codes de calcul ($\gamma = 2,5t/m^3$), cette valeur sera soit surestimée soit au contraire sous-estimée, selon si on utilise pour la formulation du béton des granulats lourds1 ($\gamma \approx 3t/m^3$) ou des granulats légers($\gamma = 1,2 \sim 2t/m^3$). La valeur de la masse volumique devient sensiblement plus élevée dans le premier cas et moins dans le second. D'où le poids propre réel de l'ouvrage sera plus ou moins important que celui estimé par les calculs.

D'autres erreurs de métrés et de sous-estimation du poids propre de certains éléments sont les principales sources d'imprécision dans l'estimation des charges permanentes (ex : poids des équipements du pont), ou encore l'augmentation du poids propre par rapport à celui calculé suite à une opération d'entretien périodique de l'ouvrage (ex : rechargement de la couche de roulement pour les ponts routiers, ou de la couche de ballast pour les ponts ferroviaires). Il est à noter que les ponts ferroviaires portent des voies ballastées dont l'epaisseur va de 25 cm à 45 cm, dóù une charge permanente très élevée (de l'ordre de 40 à 70 KN/m). Ce ballast a pour rôle de répartir les charges d'essieux, d'amortir les chocs, et de faciliter les opérations de maintenance.

### 1.3.2 Charges variables dues au trafic routier

Dans les ponts routiers, le trafic des véhicules, notamment lourds, a principalement trois types d'effets sur les ponts : des effets dynamiques, des effets de répétition (phénomènes de fatigue) et des effets dus aux efforts de freinage des véhicules. D'une manière générale, on distingue deux systèmes de charge pour le trafic routier :

— **le système A** : composé d'une charge uniformément répartie et fonction de la longueur chargée (l) du pont ;

— **le système B** : comprenant le camion (Bc), l'essieu (Be), la roue (Br) et le convoi exceptionnel.

### 1.3.3 Charges dues aux actions accidentelles

Les actions accidentelles agissant sur la structure d'un pont peuvent être de différentes natures : aléas naturels tels que le séisme et les glissements, pression hydrodynamique de l'eau sur les piles des ponts franchissant les rivières et chocs des véhicules ou des bateaux.

De toutes les fonctionnalités d'un ouvrage de génie civil, la résistance mécanique de l'ensemble des matériaux le constituant vis-à-vis des différents types d'actions qu'ils doivent subir, est l'une des principales. Cette résistance mécanique est représentée par l'état des contraintes développées au sein des matériaux de l'ouvrage, qui doit respecter l'état des contraintes admissibles pris comme hypothèse dès la conception de l'ouvrage et fixé par les règlements [1].

## 1.4 Les capteurs

Par définition, un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.

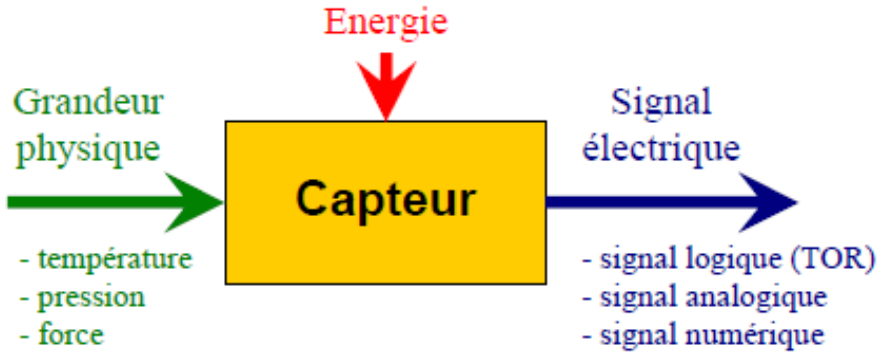



FIGURE 1.5 – Fonctionnement d'un capteur

### 1.4.1 Le domaine d'application des capteurss

L'utilisation des capteurs permet de réaliser une mesure. Plus spécifiquement elle est capitale dans le domaine industriel et intervient dans le domaine de la mesure et du contrôle de processus.

### 1.4.2 La commande de processus

L'objectif de la commande de processus est de mettre en place une commande à partir de l'état actuel et passé du système. On distingue deux types d'opération :

- la première consiste à mesurer l'état du système ;
- la seconde consiste à calculer la commande en fonction de l'état de ce système et d'une consigne.

L'intervention de l'automatique au niveau des actionneurs permet l'asservissement ou la régulation d'une grandeur issue d'un dispositif technique réalisant une fonctionnalité industrielle (moteur, processus chimique, thermique et autres). Cette technique s'appuie sur une structure de contre réaction :

Le calcul de la commande s'effectue à partir de l'écart entre une consigne (régulation) ou la variation de celle-ci (asservissement) et une grandeur de retour issue d'un capteur. Cet écart constitue une erreur que le calcul de commande cherche à minimiser pour que la grandeur de sortie soit égale à la consigne. La problématique de la mesure intervient dans la chaîne de retour.

Dans la mesure du possible, la mesure doit être linéaire et le dispositif ne doit pas modifier la grandeur de sortie. Une autre caractéristique importante est la réponse dynamique du capteur. Le capteur dépend en partie de la robustesse et la qualité de la commande.

En automatisme, les dispositifs à commander sont déjà asservis ou régulés. Ils constituent des actionneurs. Il s'agit de les mettre en œuvre pour réaliser une séquence c'est-à-dire la mise en marche ou l'arrêt des dispositifs à commander dans un ordre défini par avance. Cette séquence permet de mettre en œuvre, par exemple, un processus de fabrication. La commande est réalisée par un Automate Programmable industriel (API). Il s'agit d'un calculateur numérique qui pilote des entrées sorties. Elles sont soit de type TOR (Tout Ou Rien) soit de type analogique issue de convertisseur numérique analogique. La problématique de la mesure est ici moins contrainte que dans le cas de l'automatique. Elle consiste à connaître l'état des actionneurs afin de permettre à l'API de prendre des décisions.

Le processus de commande est numérique et discontinu. La mesure n'a pas besoin d'être linéaire. Dans le cas de commande temps réel contraint, la réponse dynamique du capteur peut être un paramètre important.

### 1.4.3 La chaine de mesure

Tout capteur intervient dans une chaine dite chaine de mesure. Cette chaîne est constituée du capteur associé dans le cas d'un capteur passif à un conditionneur, d'un dispositif d'amplification et de filtrage et d'un organe de traitement. Le conditionneur a pour rôle d'apporter l'énergie nécessaire pour transformer la variation d'impédance en une grandeur électrique. Il s'agit pour les capteurs résistifs soit d'un montage diviseur de tension ou potensiométrique soit d'un pont de Weasthone. Dans le cas des capteurs inductifs ou capacitifs, il est possible d'employer des oscillateurs.

S'il s'agit de capteur actif, il n'est pas nécessaire d'utiliser un conditionneur, le signal issu est identique à celui issue d'un générateur. Dans le cas des capteurs passifs et actifs, les signaux obtenus ont la particularité d'être d'amplitude faible, il est donc nécessaire d'amplifier le signal afin que les niveaux soient compatibles avec l'organe de traitement.

L'amplification doit posséder des caractéristiques propres au domaine capteur en termes d'impédance et de réjection de mode commun. Le filtrage est nécessaire pour éliminer une partie du bruit et dans le cas où l'organe de traitement est un organe numérique pour limiter la bande passante. Le cas de l'organe numérique est le cas le plus courant. Cet organe numérique peut être constitué d'un ordinateur, c'est-à-dire une machine de traitement équipée d'un système d'exploitation sur lequel fonctionne un logiciel de traitement comme Labview par exemple, le traitement consiste à effectuer une acquisition de données puis un traitement de mise à l'échelle, un traitement statistique ou autres. Ce type de structure se trouvera dans le domaine de mesure ou de la qualité. Dans le domaine du contrôle de processus, l'organe de traitement sera le plus souvent constitué d'un API ou d'un microcontrôleur. Le rôle de ces organes sera alors de réaliser l'acquisition des données et de calculer la commande à appliquer.

### 1.4.4 Les caractéristiques d'un capteur

Les caractéristiques d'un capteur sont :

**La sensibilité**

C'est le facteur de proportionnalité entre le signal de sortie du capteur s et la grandeur mesurée. Pour une valeur donnée $m$ du mesurande, la sensibilité $S(m)$ du

capteur est égale au rapport entre la variation de la sortie électrique et la variation du mesurande.

**La bande passante**

C'est la plage de fréquence pour laquelle le capteur fonctionne. Elle est caractéristique de la rapidité du capteur. La rapidité est la capacité de réponses aux variations du mesurande dans le temps.

**Le temps de réponsee**
Le temps de réponse est défini comme étant l'intervalle de temps entre le moment ou le capteur est excité par un mesurande de type échelon et le moment ou la grandeur de sortie atteint $\epsilon\%$ de la valeur finale.

### 1.4.5 Les différents types de capteur

Si l'on s'intéresse aux phénomènes physiques mis en jeux dans les capteurs, on peut classer ces derniers en deux catégories.

#### 1.4.5.1 Les capteurs actifs

Fonctionnant en générateur, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre à la grandeur physique à prélever, énergie thermique, mécanique ou de rayonnement. Les effets physiques les plus classiques sont :

**L'effet thermoélectrique** : Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente, dont les jonctions sont à des températures T et T2, est le siège d'une force électromotrice d'origine thermique $e$ (T1, T2).

**L'effet piézo-électrique** : L'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézo-électriques (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une déformation et d'une même charge électrique de signe différent sur les faces opposées.

**L'effet d'induction électromagnétique** : La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique (détection de passage d'un objet métallique).

**L'effet photo-électrique** : La libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique.

**L'effet Hall** : Un champ magnétique $B$ et un courant électrique $I$ crée dans le matériau une différence de potentiel $UH$.

**Effet photovoltaïque** : Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction $PN$ illuminée, leur déplacement modifie la tension à ses bornes.

TABLE 1.1 – Type de grandeur mesurée (capteurs actifs)

| Grandeur physique mesurée | Effet utilisé | Grandeur de sortie |
|---|---|---|
| **Température** | Thermoélectricité | Tension |
| **Flux de rayonnement optique** | Photo-émission | Courant |
| | Effet photovoltaique | Tension |
| | Effet photo-électrique | Tension |
| **Force** | Piézo-électrique | Charge électrique |
| **Pression** | | |
| **Accélération** | Induction électromagnétique | Tension |
| **Vitesse** | | |
| **Position (Aimant)** | Effet Hall | Tension |
| **Courant** | | |

#### 1.4.5.2 Les capteurs passifs

Il s'agit généralement d'impédance dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée. La variation d'impédance résulte : Soit d'une variation de dimension du capteur (c'est le principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteur de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile). Soit d'une déformation résultant de force ou de grandeur s'y ramenant, pression accélération (armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensomètre liée à une structure déformable).

TABLE 1.2 – Type de grandeur mesurée (capteurs passifs)

| Grandeur mesurée | Caractéristique électrique | Matériau utilisé |
|---|---|---|
| **Température** | Résistivité | Métaux, platine, etc. |
| **Très basse température** | Constante diélectrique | Verre |
| **Flux de rayonnement optique** | Résistivité | Semi-conducteur |
| **Déformation** | Résistivité | Alliage de Nickel |
| | Perméabilité magnétique | Alliage ferromagnétique |
| **Position (aimant)** | Résistivité | Matériaux résistants |
| **Humidité** | Résistivité | Chlorure de lithium |

## 1.5 Système d'acquisition de données

### 1.5.1 La chaine d'acquisition de données

Par définition, la chaine d'acquisition de données est l'ensemble des éléments nécessaires à la "capture" des données (analogiques ou numériques) à leur transmission jusqu'au récepteur et à l'utilisateur (homme ou machine) des données capturées. Cet utilisateur peut vouloir utiliser ces données immédiatement ou les stocker pour les utiliser ultérieurement.
Elle est constituée :

- D'une source d'information ;
- Des capteurs capables de transformer l'information physiologique en une grandeur électrique ;
- Des circuits de mise en forme réalisant les fonctions d'amplification, conditionneurs, de filtrage, de calibration, multiplexage ;
- De la carte d'acquisition des données proprement dite permettant l'interfaçage homme machine ;
- D'une transformation des données CAN ;
- D'un support logiciel réalisant l'acquisition, l'affichage, le traitement et la transmission des données conformément à un protocole de communication.

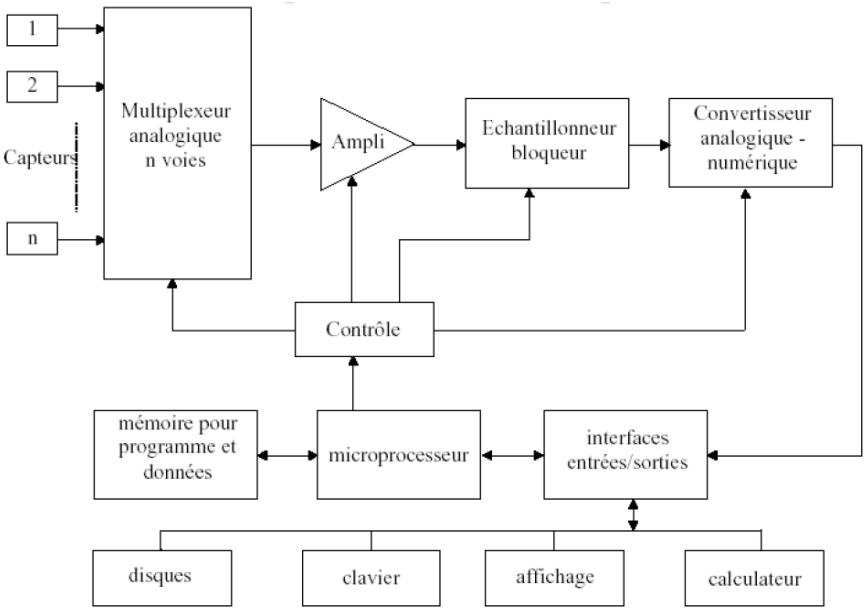



FIGURE 1.6 – Schéma d'une chaine d'acquisition [2]

### 1.5.2 La carte d'acquisition de donnéess

La carte d'acquisition de données est l'ensemble de circuits électroniques ou interfaces d'entrée/sortie et a pour objectif de traiter l'information venant des capteurs.

Une carte d'acquisition numérique peut se représenter selon le schéma suivant :

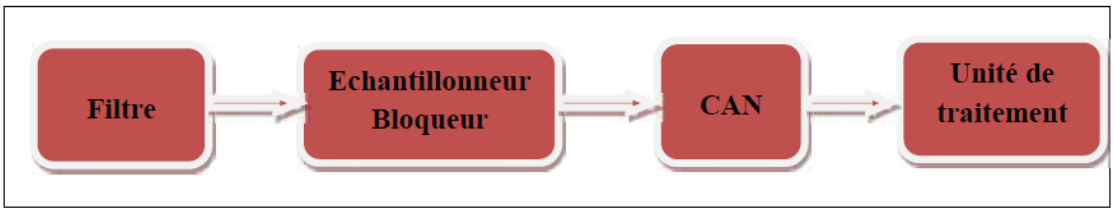



FIGURE 1.7 – Structure d'une carte d'acquisition [3]

#### 1.5.2.1 Le filtrage

On définit le filtrage comme étant un système linéaire qui a pour objectif de modifier la composition spectrale d'un signal sans ajout de nouvelles composantes.

#### 1.5.2.2 L'échantillonnage

L'échantillonneur permet de prélever de façon périodique la valeur du signal analogique. Il réalise une « photographie » du signal qui « fige » son image jusqu'à la « prise » suivante. L'intervalle de temps entre 2 instants consécutifs d'échantillonnage constitue la période d'échantillonnage, notée Te, du système de conversion analogique numérique.

Le choix de cette période est fonction de la nature du signal que l'on veut numériser et aussi du temps que le convertisseur analogique numérique met pour réaliser sa conversion.

On choisit judicieusement la fréquence en appliquant le théorème de Shannon. D'après ce théorème, la fréquence doit être au moins égale au double de la plus grande des fréquences du signal analogique.

Le signal échantillonné, à l'instant t (qui est un multiple entier de la période d'échantillonnage), est noté de la façon suivante que : SE(t)=SE (nTE)=SA(t).

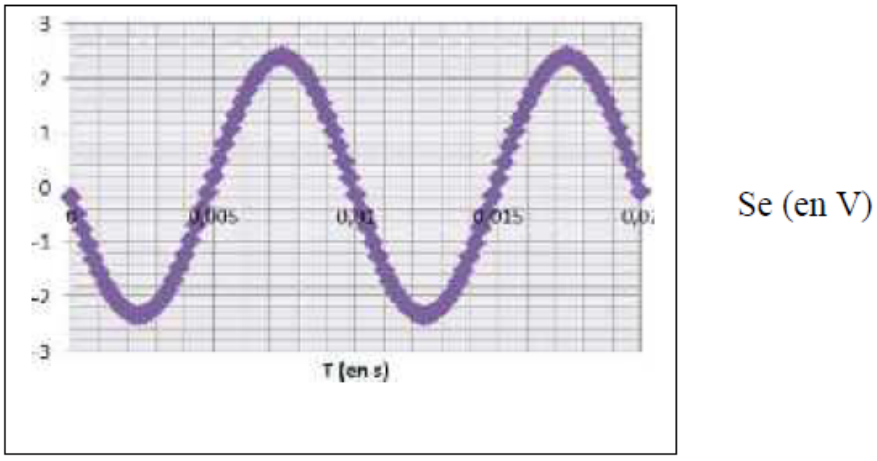



FIGURE 1.8 – Exemple d'un signal échantillonné [3]

Il est à noter que le signal transportant une information contient un certain nombre de fréquences correspondant à son spectre. Par nature, pour chaque fréquence, l'amplitude est aléatoire. Il est donc important de considérer une bande de fréquence dans laquelle se trouvent de façon pertinente les informations relatives au signal. On fixe ainsi une fréquence maximale du signal analogique et par conséquent on accepte de « perdre » une partie de l'information.

#### 1.5.2.3 Le bloqueur

La fonction du bloqueur est de maintenir constant le signal échantillonné SE(t) afin de permettre au convertisseur analogique numérique de le numériser. Ce signal est maintenu constant à la valeur SB(t) jusqu'à l'échantillonnage de la valeur suivante.

Il agit comme une mémoire qui garde constante la valeur échantillonnée (SB(t)=constante), on parle alors de bloqueur d'ordre 0. On trouve aussi des bloqueurs d'ordre supérieur (1, 2..), lorsque l'évolution du signal SB(t) est assimilable à des décroissances exponentielles ou paraboliques.

#### 1.5.2.4 Convertisseur analogique numérique

On appelle Convertisseur Analogique Numérique (C-A-N) tout dispositif électronique qui transforme une grandeur analogique d'entrée Ue en un nombre binaire de sortie N proportionnel à cette grandeur Ue. En anglais, le Convertisseur Analogique Numérique est appelé Analog to Digital Converter (A-D-C).

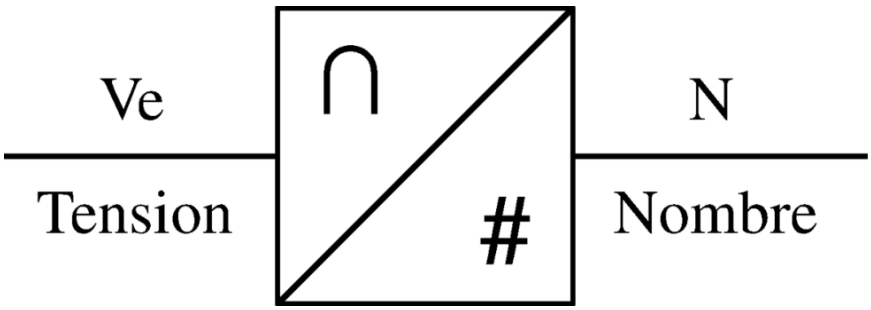



FIGURE 1.9 – Symbole de la fonction CAN [3]

## 1.6 Analyse des tenseurs pour la sécurité et la durabilité des ponts

Le suivi et l'entretien des déformations à long terme des ponts impliquent la surveillance de divers paramètres afin de garantir leur sécurité et leur durabilité. Les tenseurs (des objets mathématiques qui généralisent le concept de vecteur) jouent un rôle essentiel dans la mesure de ces déformations. Les tendeurs importants à prendre en compte sont :

— Tenseur de déformation : ce tenseur mesure les changements de forme et de dimensions de la structure. Il peut être calculé en utilisant les déplacements des points de référence sur le pont. Les composantes principales du tenseur

de déformation comprennent les déformations normales (compression ou extension) et les déformations de cisaillement ;

— Tenseur de contrainte : le tenseur de contrainte correspond aux forces internes qui s'exercent à l'intérieur du pont en réponse aux charges. Il est crucial pour évaluer la résistance structurelle et identifier les zones potentiellement vulnérables ;

— Tenseur de contrainte thermique : les variations de température peuvent causer des déformations thermiques dans les ponts. Le tenseur de contrainte thermique est important pour évaluer les effets de dilatation et de contraction thermiques sur la structure ;

— Tenseur de flexion : pour les ponts qui subissent des charges de flexion, le tenseur de flexion est utilisé pour évaluer les moments fléchissants et les contraintes résultantes. Cela est particulièrement pertinent pour les ponts en porte-à-faux ou à poutres multiples ;

— Tenseur de torsion : certains ponts peuvent subir des forces de torsion en raison de charges asymétriques ou de conditions environnementales. Le tenseur de torsion provoque les déformations résultantes autour de l'axe vertical ;

— Tenseur de déformation du sol : pour les ponts reposant sur des fondations dans le sol, il est important de surveiller les déformations du sol sous et autour des fondations à l'aide de tendeurs appropriés. Cela peut aider à éviter l'affaissement ou l'inclinaison de la structure ;

— Tenseur de déplacement : ce tenseur est fondamental pour suivre les déplacements absolus des différents points d'un pont. Il permet de mesurer les mouvements dans différentes directions spatiales ;

— Tenseur de déformation du sol : pour les ponts reposant sur des fondations dans le sol, il est important de surveiller les déformations du sol sous et autour des fondations à l'aide de tendeurs appropriés. Cela peut aider à éviter l'affaissement ou l'inclinaison de la structure.

## 1.7 Les systèmes de surveillance des ponts

Des études sur les systèmes d'acquisitions par capteurs ont été réalisées. Ces études sont néanmoins peu nombreuses.

Manzini et al [4] ont travaillé sur l'analyse des performances des stations Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites (GNSS) à faible coût pour la surveillance de la santé structurelle des ouvrages de génie civil. Les résultats ont montré un bon accord entre les séries temporelles GNSS, les capteurs de déplacement traditionnels et les simulations numériques réalisées à l'aide d'un modèle mécanique opérationnel du pont, soulignant le potentiel de ces solutions à faible coût pour les applications de surveillance de l'état des structures.

Kusal et al [5] ont conçu un système utilisant l'Internet Of Things (IoT). Ce système est composé de dispositifs de surveillance installés dans l'environnement du pont, y compris les dispositifs de communication reliant les dispositifs de surveillance du pont et un serveur qui calcule et analyse les données transmises par les dispositifs de surveillance ? Ce système peut surveiller et analyser les conditions d'un pont et son environnement, notamment le niveau de l'eau, les niveaux de force à proximité, les vibrations et d'autres conditions de sécurité. Les données détectées sont transmises au serveur et à la base de données pour que les utilisateurs puissent surveiller en temps réel l'état du pont à l'aide d'appareils de télécommunication mobiles.

Feng [6] a présenté dans son travail portant sur la Vision par ordinateur pour la Structural Health Monitoring (SHM) des infrastructures civiles un système qui a pour objectif de contribuer à élargir l'application de la technologie des capteurs à faible coût, non seulement dans la recherche scientifique, mais aussi dans la pratique de l'ingénierie, comme l'évaluation sur le terrain de l'état des structures de génie civil et des systèmes d'infrastructure vieillissants .

Nicolas [7] a révélé dans son étude de surveillance structurale que 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.

Salim et al [8] dans leur thème intitulé « conception et réalisation d'un système de mesure de charges mécaniques adapté à un dispositif de compression à base d'un microcontrôleur » ont réalisé un système composé de deux capteurs : un capteur

de force et un capteur de déformation. Le principe de fonctionnement du système de mesure de force et déformation repose sur le système a charge en déployant le pont de jauge de contraintes. L'étude est faite sur deux ponts. Le premier pont qui sera un pont complet pour la force qui nécessite la conception d'un système mécanique étudié et calculé. Le deuxième pont qui sera un demi pont de deux jauges sont collé dans une éprouvette. Les deux ponts équilibrés ont leurs propres amplificateurs d'instrumentation et sont connectés à la carte Arduino. Un programme similaire au système de charge est utilisé mais avec quelques modifications pour avoir les valeurs de force et de déformation. L'option de calibrage soft dans le programme Arduino est utilisée. Et pour finir, une connexion Arduino-MATLAB est établie pour la visualisation des valeurs de la force et la déformation et le tracé de leurs courbes relatifs.

Lynda [9] a réalisé un système électronique qui est constitué d'un capteur basé sur le pont à jauges de contrainte, ce dernier fournit une tension très faible qui est amplifiée avec un amplificateur différentiel suivi d'une carte ARDUINO-UNO. Il fonctionne avec le microcontrôleur ATMEL ATMega328 qui va se charger de la numérisation, du calcul de la contrainte et de l'affichage sur afficheur LCD. Ainsi un ensemble de boutons poussoirs en entrée de la carte ARDUINO servent aux différents réglages. La programmation du système a été fait sur le logiciel IDE ARDUINO.

Les capteurs à fibre optique peuvent être utilisés pour le caractère métrologique des ouvrages de génie civil. Il existe des avantages et inconvénients décisifs, liés aux spécificités des fibres optiques, et les avantages spécifiques, liés aux spécificités de certains capteurs ainsi que des potentialités de mise en réseau.

Ferreti [10] a énuméré quelques avantages notament :

• la possibilité de déport de l'instrumentation (grande dimension axiale et très faible atténuation linéique) ;

• le faible encombrement (très faible dimension transversale) ;

• la légèreté ou la grande souplesse (rayon de courbure minimal de quelques centimètres) ;

• l'absence de risques d'étincelles électriques ou de courts-circuits offre une sécurité non négligeable d'utilisation (ex. : mines de charbon, industries chimiques) ;

• les capteurs à fibre optique ont une bonne adaptation à toute mesure à distance.

Le regroupement d'un grand nombre de capteurs en réseau permet :

• d'augmenter notablement le nombre de points de mesure et donc de rendre l'information statistiquement plus crédible ;

• de rentabiliser les équipements par la mise en commun d'un unique système d'interrogation ;

• d'optimiser les câbles en masse et volume (il en résulte un gain au niveau des études, des plans, des infrastructures, de la maintenance,...) ;

• d'améliorer la gestion du parc des appareils ou machines instrumentées (centralisation des informations) ;

• les capteurs à fibre optique ont une bonne adaptation à toute mesure à distance.

Jeunhomme [11] et Ferdinand [12] ont énuméré des exemples d'applications des capteurs à fibres TOR. Le principe des capteurs à fibres TOR (Tout Ou Rien) est basé comme leur nom l'indique sur la propagation ou la non propagation du signal transmis. Ils sont à l'état haut ou bas et fournissent donc une information binaire, ou tout ou rien. Cette technique simple a été utilisée en réseau dans des applications industrielles .Ces capteurs à fibre optique TOR ont été mis en œuvre pour la surveillance de l'état de fissuration d'ouvrages d'art en béton, en s'appuyant sur une propriété importante des fibres optiques en silice : aucune variation notable du signal transmis n'est enregistrée jusqu'à la rupture de la fibre.

Rossi [13] a montré dans son étude que le signal transmis dans une fibre optique intégrée au sein du béton subit une forte atténuation pour atteindre une valeur quasi nulle lorsque la fissure entraîne la rupture de la fibre . Ce type de capteurs ne fournit aucune information sur l'importance de la fissure ni sur son évolution dans le temps. Il est possible tout au plus, à l'aide d'une technique OTDR, de localiser le lieu de rupture. En effet, en disposant tout un réseau de fibres optiques noyées dans la structure, il est alors possible de visualiser l'évolution des fissures suivant les ruptures successives des fibres du réseau.

Guillard [14] a reprit ce principe avec pour objectif de détecter, localiser et suivre l'évolution des fissures, mais cette fois en surface de structures en béton. Les capteurs sont des fibres optiques dénudées (cœur et gaine seulement), collées au fond d'une rainure réalisée sur la surface de la structure, à même le béton. La mesure ainsi effectuée dépend fortement de la qualité de la liaison par collage. C'est pourquoi toute une étude a consisté à tester en laboratoire, sur de petites et de grandes éprouvettes en béton, différents types de colles afin d'optimiser cette liaison.

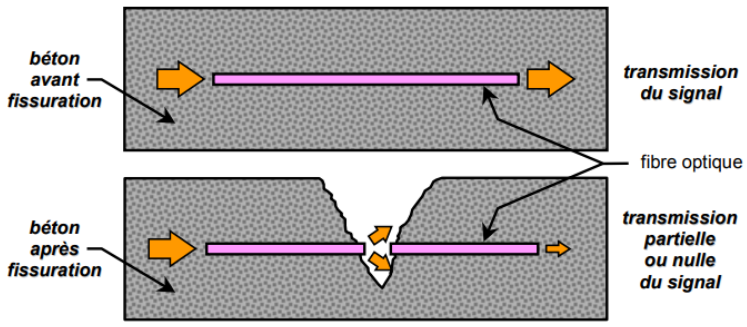



FIGURE 1.10 – Capteur à fibre optique interférométrique en basse cohérence [15]

Flesch et al [16] ont fait l'étude dynamique du tablier par section transversale espacée de 5 à 7 m sur les 459 m de portée du pont Warth Talübergang. L'objectif visé à travers sa recherche était de déterminer les modes propres du pont en utilisant une excitation de type balayage fréquentiel et de comparer ces données avec les modes propres déduit d'une analyse des excitations ambiantes. Ainsi, les capteurs utilisés sont les capteurs de vitesse, les capteurs de déformation, les accéléromètres, les sondes de températures.



FIGURE 1.11 – Le pont « Warth Talübergang», Autriche [17]

Les excitations horizontales de 10 KN et verticales de 15 KN issues de l'excitateur Victoria ont engendré un balayage de la plage fréquentielle allant de 0,5 à 11 HZ sur

une durée de 10 minutes.

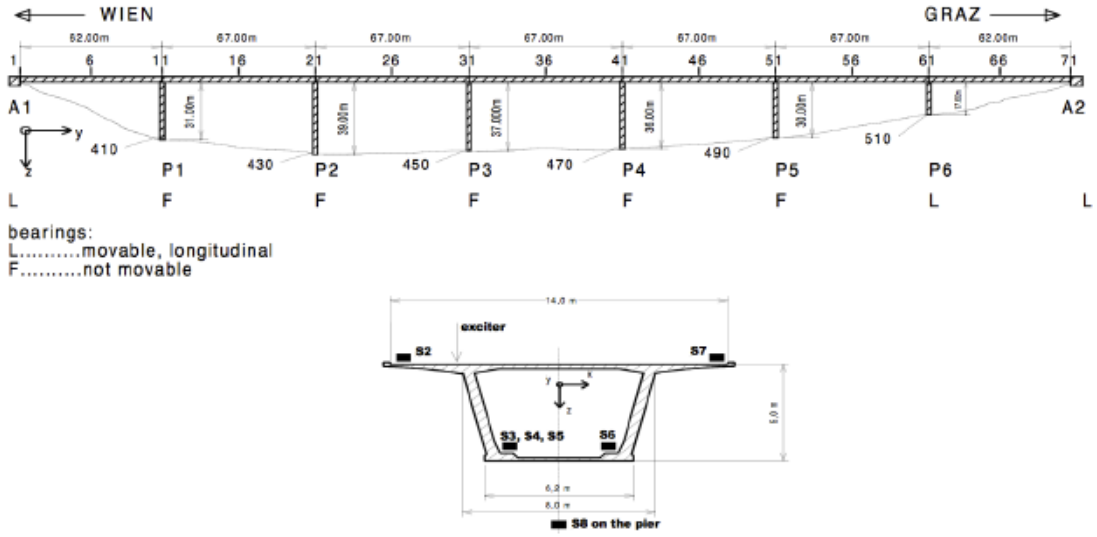



FIGURE 1.12 – Section transversalle et axial du pont instrumenté [17]

Les résultats obtenus étaient très différents des simulations sur un modèle numérique à éléments finis du pont. Les modes propres calculés lors de ces essais sont donnés dans le tableau suivant :

TABLE 1.3 – Fréquences Modales Calculées [17]

| **Type de mode** | **Caractéristique électrique sensible** | | | **[Hz]** |
|---|---|---|---|---|
| | **Mesuré** | Modèle -1 | Modèle -2 | Shell - Model |
| 1. Horizontal | 0.8 | 0.707 | 0.665 | 0.723 |
| 2. Horizontal | 1.1 | 1.019 | 0.993 | 0.998 |
| 3. Horizontal | 1.62 | 1.521 | 1.349 | 1.420 |
| 4. Horizontal | 2.23 | 2.214 | 1.903 | 1.960 |
| 1. Vertical | 2.58 | 2.670 | 2.618 | 2.577 |
| 5. Horizontal | 2.98 | 3.089 | 2.620 | 2.615 |
| 2. Vertical | 2.97 | 2.995 | 2.824 | 2.782 |
| 3. Vertical | 3.22 | 3.420 | 3.142 | 3.108 |
| 6. Horizontal | 3.77 | 4.042 | 3.489 | 3.392 |
| 4. Vertical | 3.65 | 3.841 | 3.521 | 3.509 |
| 5. Vertical | 3.99 | 4.152 | 3.890 | 3.916 |

Le viaduc de Millau, est le plus long pont à haubans du monde et a été ouvert à la circulation le 16 décembre 2004. Son tablier dispose d'une longueur de 2460 m par 32 m de large et repose sur 7 piliers dont le plus haut mesure 245 m au niveau du tablier et 343 m au sommet du pylône.



FIGURE 1.13 – Le viaduc de Millau [17]

L'intérêt majeur était de surveiller les vibrations du tablier et des pylônes à l'aide d'accéléromètres. De façon spécifique, il s'agissait de surveiller les modes verticaux de la structure à cause de leur amplitude. C'est dans ce sens que les travaux effectués par Chen [18] sur le viaduc de Millau en France ont permis d'identifier 14 modes propres avec des fréquences comprises entre 0,2 HZ et 0,9 HZ dont les valeurs sont très proches des valeurs théoriques.

La mesure des pressions est possible grâce aux capteurs à fibres optiques à microcourbures. Le capteur en question subit une force dont la direction est perpendiculaire à l'axe moyen de la fibre optique. WOLFF et al [19] ont appliqué cette technique à l'instrumentation de câbles de précontraintes d'un pont routier à Leverkusen en Allemagne. Plusieurs travaux ont été effectués de sorte à pouvoir utiliser ce type de capteurs en réseau [20]. C'est également dans ce sens que les recherches de ANDERSON et al [21] ont permis de réaliser un capteur capable de détecter des déformations.

L'étude de BALTAZART [22] a permis de mesurer le mesure instantané d'atténuation lumineuse donnant accès à des informations de charge en statique et dynamique.

Morin [23] et Chen [24] ont travaillé sur les mesures de déformations. Le principe du capteur de type Fabry-Pérot consiste à comparer la phase d'une onde lumineuse propagée par une fibre optique sur laquelle s'exerce la grandeur physique, dite fibre optique de mesure, avec la phase d'une onde lumineuse propagée par une autre fibre optique, dite fibre optique de référence.

Duplain [25] a également travaillé sur les capteurs de pression, de déplacement et de température .

Les possibilités d'utilisation de ce type de capteurs dans des centrales électriques ont notamment été étudiées par Narendran [26]. Des applications sur site ont été réalisées pour certains ouvrages de génie civil, comme par exemple des ponts étudiés par Lee [27] et Choquet[28] ou un stationnement à étages et une passerelle étudié par Quirion [29].

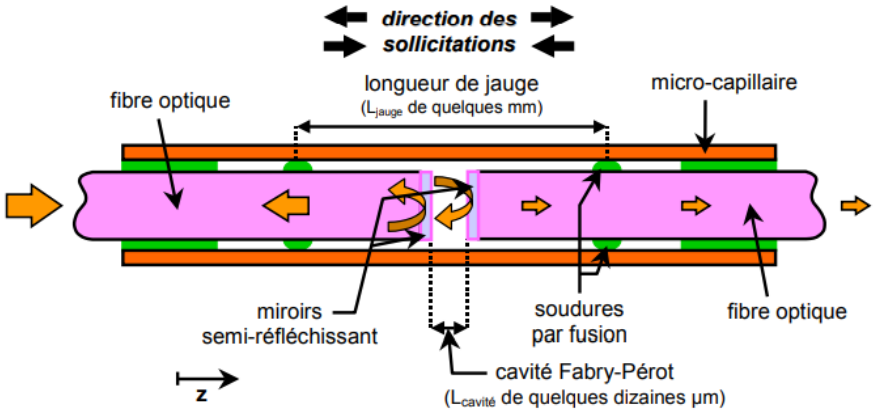



FIGURE 1.14 – Jauge Fabry-Pérot [15]

Par définition, le réseau de bragg est une modification périodique de l'indice de réfraction du cœur de la fibre optique.

Ferdinand [30] affirme dans son étude que l'inscription des réseaux de Bragg peut être réalisée de façon contrôlée suivant différents procédés de fabrication .

Niay [31] a montré que les concepteurs de réseaux de Bragg peuvent réaliser différents profils longitudinaux de modulation d'indice, comme par exemple des profils uniformes ou de forme gaussienne à indice moyen uniforme.

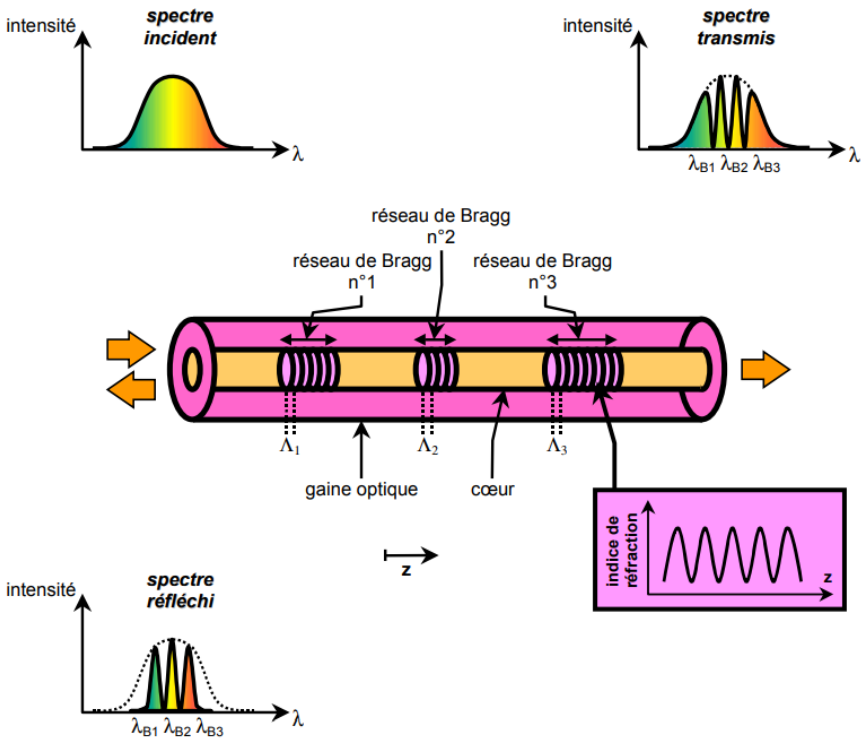



FIGURE 1.15 – Principe des réseaux de bragg [15]

Les capteurs à fibres optiques à réseaux de Braggs peuvent être utilisé sur les ouvrages de génie civil notamment les ponts. A titre d'exemple on a, le pont à haubans à Winterthur en Suisse sur lequel Nellen [32] a travaillé, ou le pont Las Cruces au Nouveau Mexique aux USA sur lequel Davis [33] a fait ses recherches. Ces ponts sont instrumentés de multicapteurs distribués à réseau de Bragg. Dans le cadre du programme de collaboration entre chercheurs et nombreux partenaires (12 Universités et une multitude d'organismes et de Sociétés) unique en son genre, portant sur les innovations en structures avec systèmes de détection intégrés, a débuté en 1995 au Canada : ISIS Canada (Intelligent Sensing for Innovative Structures), plusieurs ponts ont été instrumentés par des capteurs à fibre optique à réseau de Bragg notamment le pont de la Confédération de l'île du Prince Edward, le pont Taylor à Headingley à Manitoba, le pont de la rue Leslie à Toronto en Ontario étudié par Maaskant [34] et le pont de Beddington à Calgary en Alberta exploré par Aaviel [35].

Briole [36], Lazecky [37] et Sousa [38] ont montré que le suivi de déplacement et déformation des ouvrages peut se faire par la technique d'Interférométrie Radar par Satellites (InSAR) permettant de générer des cartes de déplacements relatifs à grande échelle.

Kromanis et al [39] et [40] ont révélé qu'on peut également mesurer les déplacements en utilisant un modèle mécanique ou statistique et pour la recherche d'anomalie (loi de comportement des matériaux, réponse d'un élément selon la température...).

Brevet [41] , Kretz [42] et Dumoulin [43] ont démontré que les capteurs d'émissions acoustiques sont conçus pour le suivi acoustique d'un ouvrage pour la détection de ruptures dans les structures à câbles.

En ce qui concerne le suivi géométrique, l'étude de Duquesnoy [44], permet de collecter des données tridimensionnelles denses pour le suivi géométrique. Elle 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 12 précisions. Ces techniques de suivi géométrique reposent sur des relevés ponctuels pour du suivi à long terme.

Ashkenazi et al [45] ont mis en place une station GNSS sur le pont de Humber doté d'une travée centrale de 1400 m de long. Les résultats de cette étude ont permis d'énumérer tous les mouvements verticaux et latéraux du tablier.

Plusieurs chercheurs notamment : Guo [46], Psimoulis [47], Wang [48], Gorski [49], Handayani [50], Kaloop [51], Tang [52] et Xi [53] ont travaillé sur l'étude du suivi des phénomènes de déformations pour ponts suspendus et ponts à haubans. Au-delà des résultats intéressants trouvés, on déduit que les stations GNSS peuvent être utilisés pour analyser le comportement statique des ponts.

De façon générale, l'idée du projet de recherche est de contribuer à conférer un caractère intelligent aux structures en génie civil notamment les ponts en affectant à la structure des capteurs qui permettent de surveiller et de diagnostiquer le pont en ayant pour but de détecter les différentes déformations que subissent le pont.

## 1.8 L'entretien des ponts

L'entretien des ponts joue un rôle essentiel dans la préservation de l'infrastructure de transport moderne et dans la garantie de la sécurité des usagers. Les ponts, en tant qu'éléments clés du réseau de circulation, sont soumis à des contraintes environnementales, structurelles et fonctionnelles qui bénéficient d'une attention constante. Cette tâche complexe englobe un large éventail d'activités, allant de l'inspection régulière à l'application de méthodes d'ingénierie avancées pour maintenir la solidité et la durabilité des structures.

### 1.8.1 Entetien à court terme

L'entretien à court terme se concentre sur les interventions rapides et ciblées visant à résoudre les problèmes émergents, à réduire les risques potentiels et à éviter toute détérioration supplémentaire. On peut citer :

— Surveillance visuelle fréquente : mettre en place un calendrier de surveillance visuelle fréquente des zones à risque sur le pont. Toutesfois on peut utiliser des instruments de mesure appropriés pour vérifier les déformations, les fissures ou les affaissements éventuels ;

— Mesures topographiques : utiliser des techniques de mesure topographique comme le nivellement et la tachéométrie pour détecter les changements dans la géométrie du pont. Comparez les résultats avec des mesures antérieures pour repérer rapidement toute déformation significative ;

— Tests de charge : réaliser périodiquement des tests de charge sur le pont pour évaluer sa résistance et sa stabilité. Les déformations provoquées pendant ces tests peuvent fournir des indications sur les zones de faiblesse ;

— Entretien de la structure environnante : s'assurer que les sols environnants et les éléments de support du pont (piliers, fondations, etc.) sont en bon état. Des déformations dans ces éléments peuvent également causer des déformations au niveau du pont ;

— Mesures correctives temporaires : en cas de déformations mineures mais préoccupantes, il faut envisager des mesures temporaires telles que le renforcement de certaines parties du pont, la limitation de la charge ou la mise en place de supports supplémentaires.

### 1.8.2 Entetien à long terme

L'entretien à long terme vise à anticiper et à contrer ces facteurs de dégradation en mettant en place des stratégies de maintenance programmée, d'inspection approfondie et de réhabilitation périodique. Cette approche proactive permet non seulement de prévenir les dégradations payées, mais aussi de prolonger la durée de vie fonctionnelle des ponts, assurant ainsi une mobilité sécurisée et un développement socio-économique durable. On peut citer :

— Études de charge et d'utilisation : réaliser des études approfondies pour comprendre comment le pont est utilisé et comment les charges sont réparties.

Cela aidera à identifier les zones de déformation potentielle et à concevoir des solutions adaptées ;

— Réhabilitation structurale : engager des ingénieurs en génie civil pour élaborer des plans de réhabilitation qui peuvent impliquer le renforcement de parties spécifiques du pont, le remplacement de matériaux endommagés ou la correction de défauts détectés ;

— Mise en place de joints de dilatation : installer ou remplacer des joints de dilatation permettant aux éléments du pont de se dilater et de se contracter en fonction des variations de température, présentant ainsi les contraintes et les déformations ;

— Maintenance préventive : établir un programme de maintenance régulière pour prévenir l'apparition de déformations. Cela peut inclure le nettoyage, la protection contre la corrosion, le revêtement des surfaces et d'autres mesures pour préserver l'intégrité structurelle ;

— Planification à long terme : développer un plan d'entretien à long terme pour le pont, en tenant compte de son utilisation prévue, de l'environnement, des conditions météorologiques et d'autres facteurs. Prévoyez des révisions périodiques du plan pour l'adapter aux changements potentiels.

## 1.9 Impact des entretiens

Les entretiens jouent un rôle crucial dans la prévention et la gestion des déformations des ponts. Les déformations, telles que le gauchissement, le fléchissement excessif, le tassement, et d'autres types de déformations structurales, peuvent résulter de divers facteurs tels que la charge, les vibrations, les conditions météorologiques, l'usure naturelle et d'autres facteurs environnementaux.

L'impact des entretiens sur les déformations des ponts peut être résumé de la manière suivante :

— Prévention des déformations : Des inspections régulières et des entretiens préventifs permettent de détecter les signes précurseurs de déformations potentielles. En identifiant ces problèmes à un stade précoce, des mesures correctives peuvent être prises pour éviter que les déformations ne s'aggravent ;

— Surveillance continue : les technologies de surveillance, telles que les capteurs de déformation et les systèmes de surveillance en temps réel, permettent de

suivre les déformations en cours et de déclencher des alertes en cas de variations anormales. Cela permet une réponse rapide en cas de besoin ;

— Entretien régulier : les activités d'entretien régulier, comme le remplacement des éléments usés, la réparation des dommages mineurs et la réparation de la couche de protection, contribuent à maintenir l'intégrité structurelle du pont et à éviter l'aggravation des déformationss ;

— Renforcement et réparation : lorsque des déformations sont détectées, des interventions ciblées telles que le renforcement des éléments structuraux portant affaiblis, la réparation des fissures et la reconstitution de la capacitée peuvent être effectuées pour réduire les déformations et rétablir la sécurité du pont ;

— Adaptation aux charges variables : les entretiens permettent également d'évaluer la capacité du pont à supporter différentes charges. Si les charges de trafic augmentent au fil du temps, des mesures peuvent être prises pour renforcer le pont et prévenir les déformations excessives ;

— Gestion des conditions environnementales : les entretiens tiennent compte des facteurs environnementaux tels que les variations de température, les précipitations, l'exposition aux produits chimiques corrosifs, etc. Ces facteurs peuvent affecter les matériaux du pont et contribuer aux déformations.

## 1.10 Conclusion

Les ouvrages d'art en génie civil notamment les ponts font partie de l'évolution économique d'un pays. Ils jouent un rôle vital dans notre système de transport, assurant la connectivité entre les régions et permettant le passage en toute sécurité des personnes et des biens. Mais on note une détérioration de ces ouvrages au fil du temps. La surveillance et l'entretien peuvent donc prolonger leur durée de vie et prévenir des défaillances.

En effet, la revue de littérature faite met en évidence l'importance croissante de la surveillance continue et de l'entretien préventif des infrastructures de transport. Un système numérique est donc une solution appropriée qui permettra le suivi en temps réel des déformations sous l'effet des sollicitations engendrées sur le pont, de visualiser et d'exploiter ces données. Par la suite apprécier l'état du pont et proposer des solutions de maintenance.

# Chapitre 2

# MATERIEL ET METHODES

## 2.1 Introduction

Une anomalie sur un pont ou tout autre structure peut être détecter à l'aide d'une méthode numérique.

Le suivi et l'entretien à long terme des déformations des ponts sont d'une importance cruciale pour assurer la sécurité et la durabilité de ces structures essentielles aux infrastructures de transports. Avec l'avancée technologique dans le domaine des systèmes numériques, il est devenu possible de concevoir et de réaliser des systèmes qui permettent de surveiller de manière précise et continue les déformations des ponts. La conception et la réalisation d'un tel système numérique exige une approche méthodique intégrant des éléments matériels et des méthodes avancées.

Dans ce chapitre, il sera question d'énumérer le matériel et les méthodes utilisées pour la conception du système.

## 2.2 Logiciels et outils de simulation

### 2.2.1 MATLAB

MATLAB (MATrix LABoratory) est un logiciel de calcul numérique et de visualisation graphique destiné aux ingénieurs et scientifiques. Avec ses fonctions spécialisées, MATLAB peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques. Il existe deux modes de fonctionnement :

‘ **Mode interactif** : MATLAB exécute les instructions au fur et à mesure qu'elles sont données par l'usager.

**Mode exécutif** : MATLAB exécute ligne par ligne un "fichier M" (programme en langage MATLAB).

#### 2.2.1.1 L'extension simulink

Simulink est l'extension graphique de Matlab permettant de représenter les fonctions mathématiques et les systèmes sous forme de diagramme en blocs et de simuler le fonctionnement de ces systèmes. L'utilisation du SIMULINK suit en général les étapes suivantes :

• Etablir (dessiner) le modèle du système en utilisant les blocs présents en librairie ;

• Placer des sources de signaux aux entrées du modèle : générateurs numériques ou analogiques ;

• Placer des instruments de visualisation en sortie du modèle : Scope, Display, spectrum scope ;

• Paramétrer et lancer la simulation du fonctionnement du modèle : double clic sur le bloc puis modifier les paramètres et Simulation/Start pour lancer la simulation ;

• Paramétrer et lancer la simulation du fonctionnement du modèle : double clic sur le bloc puis modifier les paramètres et Simulation/Start pour lancer la simulation ;

• Observer les résultats à l'aide des instruments de visualisation.

#### 2.2.1.2 Justification du choix de l'extension simulink

Simulink est une plateforme de modélisation et de simulation largement utilisée dans le domaine de l'ingénierie et des systèmes numériques. Voici quelques raisons pour lesquelles simulink peut être un bon choix pour simuler un système numérique de suivi et d'entretien à long terme des déformations des ponts :

• **Interface graphique conviviale** : simulink propose une interface graphique intuitive qui permet de modéliser et de simuler facilement des systèmes complexes. On peut construire notre modèle en utilisant des blocs fonctionnels et les relier de manière visuelle, ce qui facilite la compréhension et la modification ultérieure du modèle ;

• **Bibliothèque de blocs étendue** : simulink offre une vaste bibliothèque de blocs prédéfinis qui représentent des éléments couramment utilisés dans les systèmes numériques. On peut trouver des blocs spécifiques aux domaines des signaux et des systèmes, de la mécanique, de l'électricité, etc. Ces blocs prédéfinis permettent de construire rapidement des modèles et de simuler le comportement des déformations des ponts ;

• **Prise en charge de la modélisation multi-domaines** : simulink permet la modélisation de systèmes multi-domaines, ce qui est essentiel pour représenter les interactions complexes entre les différents composants d'un pont. On peut intégrer des modèles mathématiques représentant les aspects structuraux, mécaniques, électriques, hydrauliques, etc., du pont dans un seul environnement de simulation ;

• **Analyse et visualisation avancées** : simulink offre des outils puissants pour analyser et visualiser les résultats de la simulation. On peut effectuer des analyses temporelles, fréquentielles et statistiques pour étudier le comportement du système dans différentes conditions. De plus, on peut visualiser les résultats sous forme de graphiques, de tableaux et d'animations, ce qui facilite l'interprétation des données de déformation du pont ;

• **Intégration avec MATLAB** : simulink est étroitement intégré à MATLAB, un langage de programmation puissant utilisé dans de nombreux domaines scientifiques et d'ingénierie. Cette intégration permet d'accéder aux fonctionnalités avancées de MATLAB pour effectuer des calculs, des analyses supplémentaires, des optimisations, etc. On peut également utiliser MATLAB pour traiter les données de déformation en temps réel et les intégrer dans notre modèle Simulink ;

• **Documentation et support** : simulink est soutenu par une documentation complète et des ressources en ligne, y compris des exemples de modèles et des tutoriels. On peut trouver de l'aide auprès de la communauté d'utilisateurs de simulink et d'experts MATLAB pour résoudre les problèmes ou obtenir des conseils sur la

modélisation et la simulation des déformations des ponts.

#### 2.2.1.3 Création d'un modèle Simulink

Pour ouvrir Simulink taper "Simulink" dans la fenêtre de commande du MATLAB ou cliquez sur l'icône présent dans la fenêtre principale de MATLAB. Une boîte de dialogue contenant la liste des librairies apparaît à l'écran. Chaque librairie contient un ensemble des blocs qui servent à la création des diagrammes, ou schémas blocs.

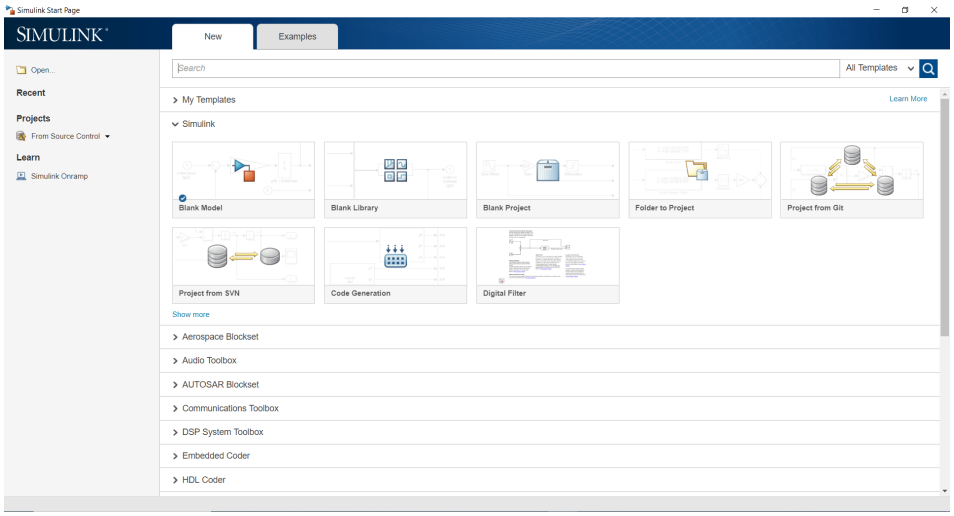



FIGURE 2.1 – Interface de Simulink

Pour créer un modèle Simulink suivre les étapes suivantes :

• Dans le menu du Simulink Library Browser sélectionnez File > New > Model ;

• Ouvrir les collections de blocs par double clic (Vous pouvez chercher n'importe quel bloc en tapant son nom dans la barre de recherche du Simulink Library Browser) ;

• Faire glisser dans la fenêtre de travail les blocs dont vous avez besoin pour construire le diagramme (Vous pouvez prendre une copie d'un bloc en cliquant sur le bouton droit de la sourie et le faire glisser) ;

• Faire des liaisons entre les blocs à l'aide de la souris ;

• Changer les paramètres de n'importe quel bloc en faisant double clic sur ce bloc, une fenêtre s'ouvrira ;

• Lorsque vous terminé le diagramme, enregistrer le modèle dans un fichier : File > Save ou l'icône d'enregistrement et donner un nom au modèle (*.mdl) ;

• Simuler le montage : dans le menu Simulation/Start ou en cliquant sur l'icône Play.

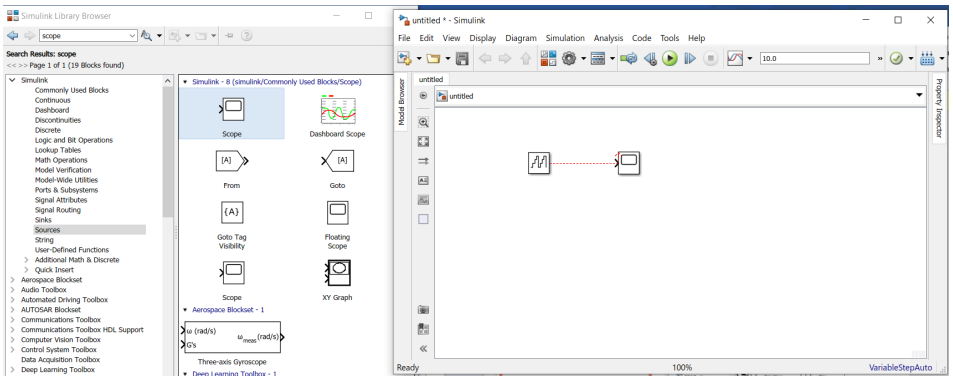



FIGURE 2.2 – Création d'un modèle Simulink

**Remarques**

— Pour grouper plusieurs blocs en un seul bloc (sous-système), sélectionnez les blocs dont vous voulez qu'ils soient contenus dans le sous-système, puis sélectionnez **Create subsystem** dans le menu **Edit** (ou bouton droit de la sourie) ;
— Pour écrire un texte double clic sur la ligne puis écrire le texte.

#### 2.2.1.4 Classification des blocs

La classification des blocs de simulink repose sur différents critères, tels que la fonctionnalité, le domaine d'application et le type de signal manipulé. Les blocs sont regroupés en catégories pour simplifier la recherche et la navigation dans la bibliothèque de blocs de Simulink, qui comprend des centaines de blocs préconstruits. On distingue :

- **Sources**

Les sources sont des blocs possédant une ou plusieurs sorties et aucune entrée. Ils sont utilisés pour la génération de signaux.

- **Sink**

Les blocs de cette librairie à l'inverse des sources ne possèdent qu'une ou plusieurs entrées. Ils sont utilisés pour l'affichage (digital ; oscilloscope) ou la mémorisation de signaux (vers une variable, un fichier).

- **Math operations**

Ensemble de blocs réalisant une fonction mathématique appliquée aux signaux entrants. La ou les résultats est ou sont renvoyés sur le ou les points de sortie.

- **Signal routing**

Ensemble des blocs utiles pour l'aiguillage de signaux ou la connexion de blocs.

## 2.3 Conception du système numérique

Le système à réaliser est constitué de trois parties principales à savoir :

— acquisition du signal (capteurs) ;

— conditionnement du signal (filtre, amplificateur) ;

— et récupération des données via une mémoire SD, le réseau Ethernet ou Wifi.

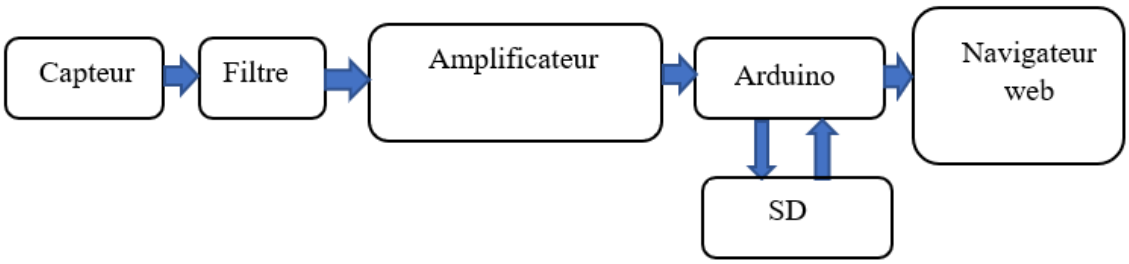



FIGURE 2.3 – Schéma synoptique du système

En ce qui concerne l'unité de traitement et de communication la carte Arduino sera utilisée car elle offre des entrées analogiques et des moyens de communication comme l'ethernet et le wifi, aussi une carte mémoire micro SD peut être utilisée pour stocker les données.

### 2.3.1 Partie analogique

‘

#### 2.3.1.1 Les capteurs

Les capteurs jouent un rôle crucial dans la partie analogique d'un système numérique utilisé pour le suivi et l'entretien à long terme des déformations des ponts. Ces capteurs sont conçus pour mesurer et surveiller les variations de déformation qui se produisent dans différentes parties d'un pont, ce qui permet de détecter les signes de dégradation, de fatigue ou de dommages potentiels.

Les capteurs utilisés pour le suivi des déformations des ponts sont généralement conçus pour mesurer les changements de longueur, de déplacement ou d'inclinaison qui se produisent dans les éléments structuraux du pont. Ils peuvent être basés sur différents principes de mesure, tels que la jauge de contrainte, les capteurs de déplacement linéaire, les capteurs d'inclinaison, les capteurs de déformation optiques ou les capteurs à ultrasons. Ils transforment le processus physique en un signal électrique.

#### 2.3.1.2 Le filtrage

Le filtrage analogique consiste à gérer le signal analogique provenant des capteurs de déformation installés sur le pont afin de réduire les perturbations et les variations indésirables. Les signaux de déformations reçus par les capteurs sont généralement faibles et peuvent être affectés par diverses sources de bruit, tels que les interférences électromagnétiques, les variations de température, les vibrations, etc. Le filtrage permet d'améliorer la qualité des mesures en éliminant ou en utilisant ces sources de bruit.
Il peut être réalisé à l'aide de différents types de filtres, tels que les filtres passe-bas, passe-haut, passe-bande ou coupe-bande. Chaque type de filtre est conçu pour atténuer ou supprimer certaines fréquences spécifiques du signal analogique.
Pour le suivi et l'entretien des déformations des ponts, les filtres permettront de séparer le signal de déformation utile des signaux indésirables, d'éliminer le bruit et les interférences du signal en fonction des besoins spécifiques du système. Cela permet d'obtenir des mesures de déformation plus précises et fiables, facilitant ainsi la surveillance et l'entretien efficaces des ponts sur le long terme.

#### 2.3.1.3 L'amplification

L'objectif principal de l'amplificateur est d'amplifier les signaux analogiques provenant des capteurs de déformation installés sur le pont, afin de les rendre plus facilement mesurables et traitables par les systèmes numériques ultérieurs.

En effet, le signal analogique généré par les capteurs de déformation est généralement faible et nécessite une amplification pour atteindre un niveau approprié pour le traitement ultérieur. L'amplificateur analogique reçoit ce signal d'entrée et le multiplie par un facteur d'amplification spécifié. Cela garantit que le signal est suffisamment fort pour être traité avec précision par les composants numériques suivants.

### 2.3.2 Partie numérique

La partie numérique du système comprend la conversion analogique numérique du signal de sortie et la transmission des données au format numérique vers un ordinateur en vue d'un traitement numérique.

Le système réalisé est architecturé autour de la carte Arduino UNO qui est une carte électronique ayant des fonctionnalités avancées pour réaliser des prototypes d'objets connectés. L'Arduino UNO peut communiquer directement avec un réseau local ou internet, soit en filaire ou en wifi. Elle simplifie donc considérablement la communication distante, via internet, entre un ordinateur et des capteurs.

#### 2.3.2.1 Présentation de la carte Arduino

Arduino est une carte électronique basée autour d'un microcontrôleur et de composants minimum pour réaliser des fonctions plus ou moins évoluées à bas cout. Elle possède une interface USB pour la programmer.

Elle est construite autour du microcontrôleur AVR ATML. C'est un microcontrôleur à 8 bits caractérisé par un jeu d'instruction réduit (RISC) et d'une architecture Harvard. Sa programmation peut être réalisé en langage C.

**Alimentation de la carte Arduino**

La carte Arduino peut être alimentée par un câble USB, par un bloc secteur externe doté d'une prise jack, ou un par bloc de pile. L'alimentation extérieure admise est comprise entre 7 a 12 V. La carte dispose de circuits régulateurs qui permettent de stabiliser les tensions d'alimentation à 3,3V et 5V lesquelles sont nécessaires pour alimenter les composants électroniques de la carte.

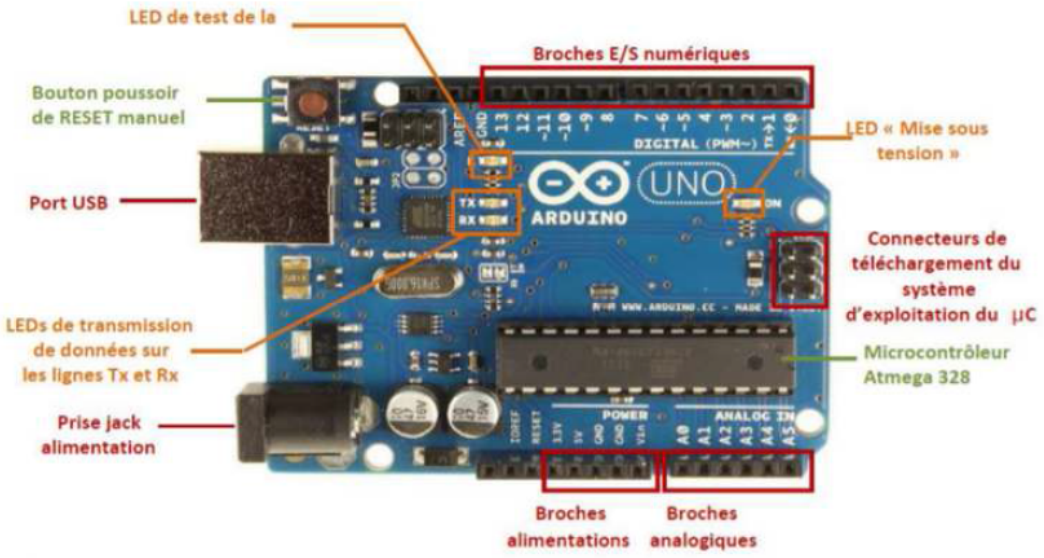



FIGURE 2.4 – Différents éléments de la carte Arduino [3]

**Les entrées-sorties (E/S)** La carte Arduino dispose de 14 E/S numériques et 6 entrées analogiques.

• *Les entrées-sorties numériques*
Les 14 broches d'E/S numériques identifiées sur la carte par les chiffres 0 à 13 peuvent être configurées par la programmation. Les différentes broches sont présentées dans le tableau 2-1. Elles fonctionnent en logique Transistor-Transistor Logic (TTL) (0V-5V). Elles peuvent recevoir ou fournir un courant maximal de 40mA. Certaines broches peuvent avoir différentes fonctions dont le choix est défini dans le programme.

• *Les entrées analogiques*
Les 06 broches analogiques identifiées A0 à A5 sont des entrées (PC0 à PC5) dont la tension analogique admise est comprise entre 0 et 5 V. Ces entrées sont gérées par un convertisseur analogique numérique (CAN) de 10 bits dont la sortie peut varier entre 0 et 1023. Les entrées A4 et A5 peuvent également être utilisées respectivement comme la ligne de donnée SDA et la ligne d'horloge SCL de l'interface série I2C.

TABLE 2.1 – Désignation des broches E/S numériques de la carte Arduino.

| N° E/S | N° ligne de port | Fonction |
|---|---|---|
| 0 | PD0 | **Rx** : Entrée de iaison sére synchrone |
| 1 | PD1 | **Tx** : Sortie liaison série synchrone |
| 2 | PD2 | **INT0** : Entrée interruption externe |
| 3 | PD3 | **INT1** : Entrée interruption externe<br>**OC2B** : PWM modulation à largeur d'impulsion |
| 4 | PD4 | **T0** : Entrée Timer/compteur 0<br>**XCK** : Entrée horloge |
| 5 | PD5 | **T1** : Entrée Timer / compteur 1<br>**OC0B** : Sortie module PWM modulation |
| 6 | PD6 | **OC0A** : Sortie module PWM<br>**AIN0** : Entrée comparateur analogique |
| 7 | PD7 | **AIN1** : Entrée comparateur analogique |
| 8 | PD0 | **CLKO** : Sortie de l'horloge de fonctionnement<br>**ICP1** : Entrée de capture Timer/compteur 1 |
| 9 | PD1 | **OC1A** : Sortie module PWM |
| 10 | PD2 | **SS** : Select Slave liaison SPI<br>**OC1B** : Sortie module PWM |
| 11 | PD3 | **MOSI** : Sortie de liaison SPI<br>**OC2A** : Sortie module PWM |
| 12 | PD4 | **MISO** : Entrée liaison SPI |
| 13 | PD5 | **SCK** : Horloge liaison SPI |

**Les mémoires**

Le microcontrôleur ATmega dispose de :

— 32 Ko de mémoire flash destinée a stocké le programme a exécuter ;

— 2 Ko de mémoire vive de type SRAM. Elle est utilisée pour stocker les résultats temporaires lors du traitement ;

— 1 Ko de mémoire EEPROM permettant de stocker des données persistantes.

**L'horloge**

Le microcontrôleur est cadencé à une fréquence d'horloge de 16 Mhz grâce à un quartz.

**La communication**

La carte Arduino communique avec le monde extérieur au moyen :

— d'une interface de communication série : accessible grâce aux broches numériques 0 (ligne RX) et 1 (ligne TX) ;

— d'un bus I2C : accessible grâce aux broches analogiques 4 (SDA) et 5 (SCL) ;

— d'une liaison serie synchrone SPI accessible grâce aux broches numériques 10 (SS),11 (MOSI),12 (MISO) et 13 (SCX).

**Circuit de réinitialisation (RESET)**

On distingue :

— le reset automatique : il s'agit du reset a la mise sous tension qui permet au programme du microcontrôleur de démarrer automatiquement ;

— le reset manuel : il est actif à l'aide d'un bouton poussoir situé sur la carte pour relancer l'exécution d'un programme.

**La protection de surintensité USB**

Le port USB de la carte arduino est équipé d'un fusible réarmable ou « polyfuse » permettant de protéger le port USB de l'ordinateur auquel elle est reliée contre toute consommation excédant les 500 mA.

#### 2.3.2.2 L'environnement de programmation Arduino

La carte arduino représente le noyau de notre système, et pour qu'on puisse la programmer, un logiciel compatible est mis à notre disposition avec cette carte, ce logiciel est arduino IDE.

L'environnement de développement arduino est une application Java multi-plateforme, c'est-à-dire, fonctionnant sur plusieurs systèmes d'exploitation.

Ce dernier, joue le rôle d'éditeur de code et de compilateur, qui peut transférer le programme à travers la liaison série asynchrone.

Le logiciel arduino a pour fonctions principales :

— d'écrire et compiler des programmes pour la carte Arduino) ;

— de se connecter avec la carte Arduino pour y transférer les programmes ;

— de communiquer avec la carte Arduino.

Cet espace de développement intégré (EDI) dédié au langage Arduino et à la programmation des cartes arduino comporte plusieurs barres qu'on va voir en détail ci-dessous :

— une BARRE DE MENUS comme pour tout logiciel ;

— une BARRE DE BOUTONS qui regroupe tous les raccourcies du logiciel afin de simplifier au maximum son utilisation ;

— un EDITEUR (à coloration syntaxique) pour écrire le code du programme, avec onglets de navigation ;

— une ZONE DE MESSAGES qui affiche indique l'état des actions en cours ;

— une CONSOLE TEXTE qui affiche les messages concernant le résultat de la compilation du programme.

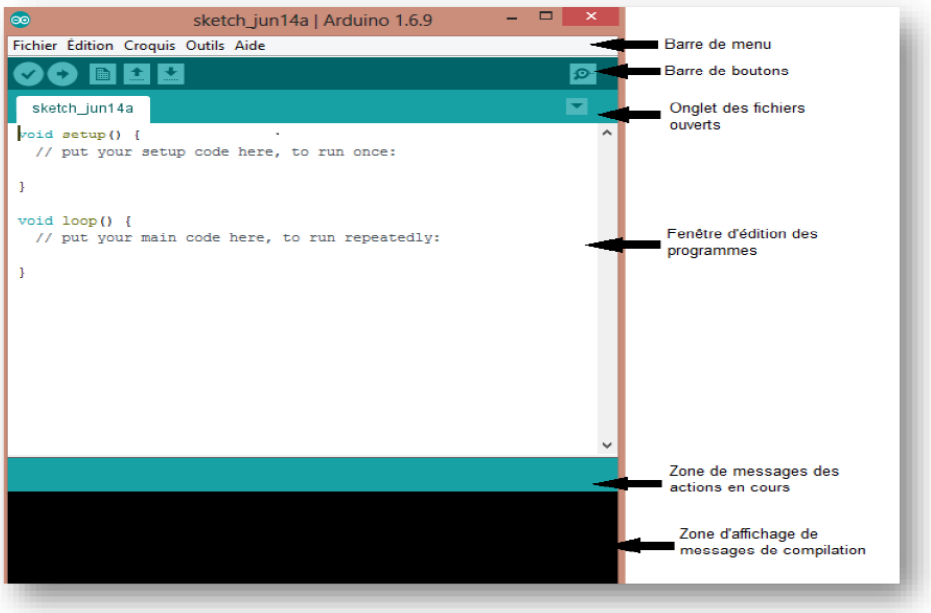



FIGURE 2.5 – Les différentes parties de la fenêtre principale du logiciel Arduino [3]

Le logiciel arduino intègre également un TERMINAL SERIE qui permet d'afficher des messages textes reçus de la carte Arduino et d'envoyer des caractères vers la carte arduino.

Cette fonctionnalité permet d'afficher sur l'ordinateur l'état de variables, de résultats de calculs ou de conversions analogique-numérique : un élément essentiel pour améliorer, tester et corriger ses programmes.




FIGURE 2.6 – Accès au moniteur série [3]

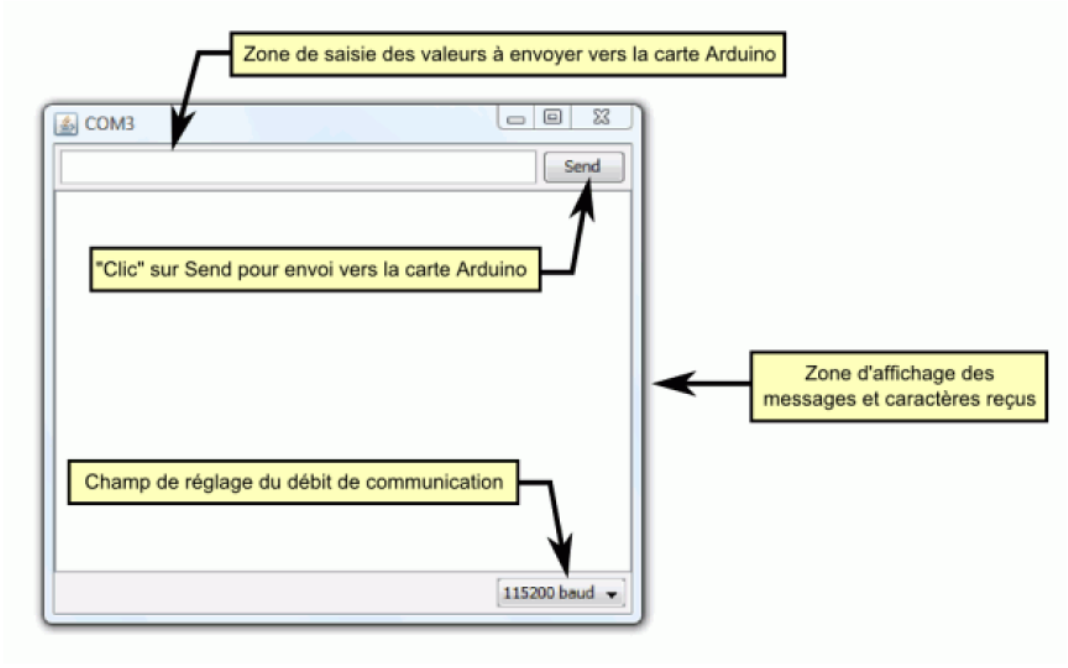



FIGURE 2.7 – Fenêtre associée au moniteur [3]

La barre des boutons nous permet de vérifier la syntaxe, le transfert des programmes, la création, l'ouverture et sauvegarde d'un code écrit.




FIGURE 2.8 – Structure de la barre des boutons [3]

— Bouton 1 : Vérification de programme, il actionne un module qui cherche les erreurs dans votre programme ;

— Bouton 2 : Charger (téléverser) le programme dans la carte Arduino ;

— Bouton 3 : Création de nouveau programme ;

— Bouton 4 : Ouvrir la liste de tous les programmes déjà sauvegarder, et choisir un programme en cliquant sur ce dernier ;

— Bouton 5 : sauvegarde le programme avant la fermeture de la fenêtre.

Les différents éléments du menu nous permettent de créer de nouveaux sketchs, de les sauvegarder, de gérer les préférences du logiciel et les paramètres de communication avec la carte Arduino.

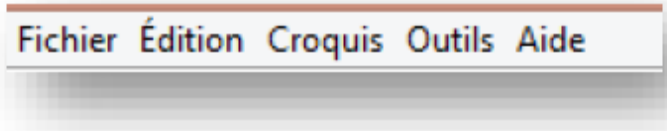



FIGURE 2.9 – Structure de la barre de menu [3]

## 2.4 Fonctionnement du système

Le but du système est de détecter en temps réel les déformations d'une structure. Il consiste à surveiller en continu ou à intervalles réguliers l'intégrité d'une structure. Le processus de surveillance est présenté comme suit :

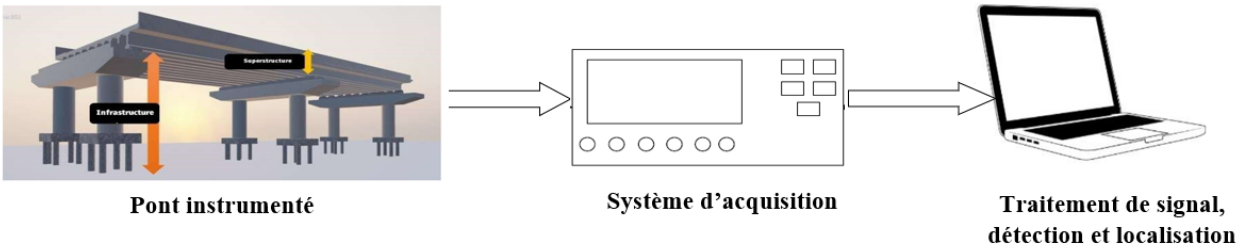



FIGURE 2.10 – Processus de surveillance

- **Pont instrumenté**

Les capteurs qu'on peut utiliser pour la surveillance des déformations des ponts sont :

— Jauges de contrainte (ou jauges extensométriques) : Ce sont des capteurs qui mesurent les déformations ou les contraintes d'un matériau. Ils sont souvent utilisés pour mesurer les déformations locales ou les contraintes sur les composants structurels du pont ;

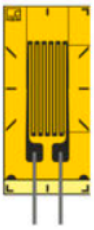


FIGURE 2.11 – Jauge de contrainte

— Accéléromètres : ces capteurs mesurent les vibrations et les accélérations du pont. Ils peuvent détecter les mouvements indésirables tels que les vibrations

excessives ou les oscillations, qui pourraient indiquer des problèmes de stabilité ;

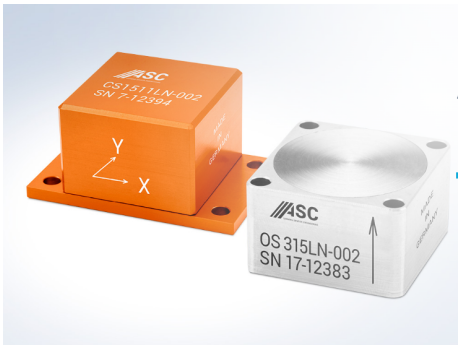



FIGURE 2.12 – Accéléromètre

— Capteurs à fibre optique : ces capteurs utilisent des fibres optiques pour mesurer les déformations ou les variations de température. Ils sont souvent utilisés pour surveiller les déformations longitudinales, les contraintes ou les variations thermiques sur de longues distances ;



FIGURE 2.13 – Capteur à fibre optique

— Inclinomètres : ces capteurs mesurent l'inclinaison ou l'angle de pente d'une surface. Ils peuvent être utilisés pour détecter les déformations locales ou les mouvements anormaux du pont ;




FIGURE 2.14 – Inclinomètre

— Capteurs de déplacement linéaire : ces capteurs mesurent les déplacements linéaires d'une structure. Ils sont utiles pour surveiller les déformations globales ou les mouvements horizontaux du pont ;



FIGURE 2.15 – Capteur de déplacement linéaire

— Capteurs de température : ils mesurent la température ambiante ou la variation de température sur le pont. Les variations de température peuvent provoquer des expansions ou des contractions du matériau, ce qui peut influencer les déformations structurelles ;



FIGURE 2.16 – Capteur de température

— Capteurs de pression : ces capteurs mesurent la pression exercée sur une surface. Ils peuvent être utilisés pour surveiller les charges statiques ou dynamiques, telles que le poids des véhicules ou les charges dues au vent.




FIGURE 2.17 – Capteur de pression

- **Système d'acquisition et de transmission des données**

Ce système est conçu pour collecter en continu des informations sur les déformations structurelles des ponts, les transmettre à un centre de contrôle et permettre une analyse approfondie des données pour détecter les problèmes potentiels et prendre des mesures préventives. En effet, les capteurs de déformation sont connectés aux unités d'acquisition de données qui sont responsables de la conversion des signaux analogiques en signaux numériques exploitables. Ces unités peuvent inclure des amplificateurs, des convertisseurs analogique-numérique et d'autres composants électroniques.

Les données recueillies par les unités d'acquisition sont transmises de manière fiable à un centre de contrôle ou à une station de surveillance à distance. Différentes méthodes de transmission peuvent être utilisées, telles que les réseaux filaires (fibres optiques, câbles Ethernet), les réseaux sans fil (Wi-Fi, Bluetooth, 4G/5G) ou même des systèmes de communication par satellite dans les zones reculées.

- **Système de traitement des données**

Le traitement des données comprend plusieurs étapes clés. Ces étapes permettent de convertir les données brutes nécessaires en informations significatives, de les analyser et de prendre des décisions éclairées sur l'entretien des ponts. Voici les principales étapes du traitement des données :

— Analyse temporelle : l'analyse temporelle des données consiste à examiner les tendances et les variations des déformations dans le temps. Elle permet de détecter les changements lents ou rapides, les cycles de charge récurrents, les variations saisonnières, etc. Des techniques telles que l'analyse spectrale, l'analyse de Fourier ou les méthodes de décomposition en principales composantes peuvent être utilisées pour extraire les informations temporelles significatives.

— Analyse spatiale : l'analyse spatiale des données vise à étudier les déformations le long de la structure du pont. Elle permet d'identifier les zones critiques, les régions sujettes à des contraintes élevées ou à des déformations anormales. Des techniques telles que l'analyse de corrélation spatiale, l'interpolation spatiale ou la modélisation numérique peuvent être utilisées pour comprendre la distribution spatiale des déformations.

— Analyse de tendance et de stabilité : cette analyse se concentre sur l'évolution des déformations au fil du temps. Elle permet de détecter les tendances de déformation à long terme et de prévoir les changements futurs. Des méthodes statistiques, des régressions linéaires ou des techniques de séries chronologiques peuvent être utilisées pour identifier les modèles de déformation, estimer les taux de déformation et évaluer la stabilité structurelle à long terme.

— Détection d'anomalies : l'analyse des données peut également inclure des techniques de détection d'anomalies pour identifier les événements ou les déformations inhabituelles qui pourraient indiquer des problèmes de structure. Cela peut impliquer l'utilisation de seuils prédéfinis, de méthodes basées sur l'apprentissage automatique ou de techniques d'apprentissage supervisé pour détecter les déformations anormales ou les comportements hors norme.

— Modélisation et prévision : en utilisant les données historiques et les informations recueillies, il est possible de développer des modèles de déformation pour prévoir les performances futures du pont. Ces modèles peuvent être basés sur des approches analytiques, des simulations numériques ou des techniques d'apprentissage automatique. Ils permettent d'estimer les taux de déformation, d'évaluer les scénarios de charge futurs et d'aider à planifier les activités d'entretien et de réparation.

• **Système d'alerte et de notification**

Le système d'alerte et de notification joue un rôle crucial pour assurer la sécurité des structures. Ce système permet de détecter les déformations anormales ou critiques, d'émettre des alertes en temps réel et de notifier les parties concernées pour prendre des mesures appropriées. Voici comment ce système fonctionne généralement :

— Détection des déformations anormales : à l'aide des capteurs de déformation installés sur les ponts, les données sont poussées en continu. Ces données sont analysées en temps réel pour détecter les déformations anormales. Des seuils prédéfinis ou des algorithmes de détection d'anomalies peuvent être utilisés pour identifier les déformations qui présentent les limites acceptables ou qui indiquent des problèmes potentiels.

— Système d'alerte : lorsqu'une déformation anormale est détectée, le système d'alerte se déclenche. Il peut s'agir d'un système automatisé basé sur des règles prédéfinies ou d'un système basé sur l'apprentissage automatique qui apprend à partir des données historiques. L'alerte peut être déclenchée lorsque la déformation dépasse un seuil critique ou lorsque des tendances inhabituelles sont constatées. L'objectif est d'identifier rapidement les problèmes potentiels qui pourraient compromettre la sécurité du pont.

— Notification : une fois qu'une alerte est déclenchée, le système envoie des notifications aux parties concernées. Cela peut inclure les gestionnaires de ponts, les ingénieurs en charge de l'entretien, les autorités responsables des infrastructures, les entreprises de construction ou de réparation. Les notifications peuvent être envoyées par le biais de divers canaux tels que des messages électroniques, des SMS, des notifications push sur des applications mobiles ou des alertes visuelles sur des tableaux de bord de surveillance.

— Informations d'urgence : Dans le cas où une déformation critique ou une situation d'urgence est détectée, le système d'alerte peut également fournir des informations supplémentaires pour aider les parties concernées à prendre des mesures rapides et automatiques. Cela peut inclure des données spécifiques sur la localisation de la déformation, des recommandations d'action préliminaires, des plans d'évacuation ou des instructions pour minimiser les risques potentiels.

• **Gestion de la maintenance**

Les informations fournies par le système de suivi des déformations aident les équipes de maintenance à planifier et à prioriser les travaux d'entretien. Les données historiques et en temps réel permettent de prendre des décisions éclairées sur les inspections, les réparations et les rénovations nécessaires pour assurer la sécurité et la durabilité du pont.

## 2.5 Représentation de la simulation

Pour la réalisation de cette simulation nous avons utilisé Simulink de MATLABR2019a.

Les différents blocs utilisés sont :

- **Sine wave mask (masque en forme de sinusoïde)**

C'est un bloc qui est utilisé pour modéliser les déformations structurelles. Il est conçu pour détecter les déformations et les mouvements subtils dans les structures tels que les ponts. Il est également sensible aux changements de forme et peut être utilisé pour simuler les déformations de manière réaliste, ce qui permet d'obtenir une représentation précise du comportement du pont dans le temps.

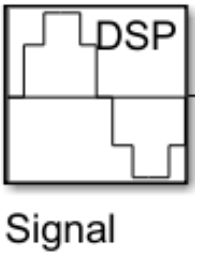



FIGURE 2.18 – Sine wave

- **In/out (entrée/sortie)**

Les entrées représentent les données ou les paramètres qui sont fournis au système pour effectuer la simulation. Ces données peuvent inclure des informations sur la structure du pont, telles que les dimensions, les matériaux utilisés, les charges appliquées, les conditions environnementales, etc. Les paramètres peuvent également inclure des variables de contrôle, telles que les actions de maintenance ou les interventions déployées sur le pont.

Les sorties, quant à elles, sont les résultats de la simulation, c'est-à-dire les déformations imaginées ou calculées du pont. Ces résultats peuvent être utilisés pour évaluer l'état de santé du pont, détecter des déformations anormales, prédire les besoins d'entretien futurs ou prendre des décisions concernant les interventions nécessaires.

En utilisant les termes "in" et "out", il devient plus facile de comprendre comment les informations circulent entre le système de simulation et les utilisateurs ou

les outils d'analyse. Les entrées sont fournies au système, qui effectuent les calculs nécessaires, puis les sorties sont produites et utilisées par les parties concernées pour prendre des décisions appropriées en matière de suivi et d'entretien des ponts.

En résumé, l'utilisation des termes "in" et "out" dans ce contexte facilite la communication et la compréhension des flux d'informations entre le système de simulation et les utilisateurs ou les outils d'analyse, ce qui est essentiel pour un suivi et un entretien efficace des déformations des ponts à long terme.

- **Sum (somme)**

Lorsqu'un pont est soumis à des charges, des vibrations, des variations de température, ou d'autres facteurs environnementaux, il peut subir des déformations progressives au fil du temps. Ces déformations peuvent être minimes au départ, mais elles s'accumulent avec le temps et peuvent éventuellement entraîner des dommages structurels importants si elles ne sont pas surveillées et gérées correctement.

Pour suivre et évaluer les déformations cumulatives d'un pont, il est courant d'utiliser des modèles numériques et des simulations. Ces modèles prennent généralement en compte les différentes charges et conditions environnementales auxquelles le pont est exposé, ainsi que les caractéristiques structurelles du pont lui-même.

Lorsque la simulation se produit sur une période de temps donnée, les déformations instantanées sont généralement calculées à intervalles réguliers. Pour obtenir la déformation cumulative, il est nécessaire d'additionner toutes les déformations instantanées en utilisant la fonction "somme". Cela permet de mesurer l'ampleur totale des déformations observées sur la durée de la simulation.

En résumé, l'utilisation de la fonction "somme" dans une simulation de suivi et d'entretien à long terme des déformations des ponts permet de calculer la somme des déformations instantanées sur une période donnée, fournissant ainsi une mesure de la déformation cumulative subie par le pont au fil du temps.

- **Polynomial evaluation (évaluation polynomiale)**

L'évaluation polynomiale permet d'obtenir des approximations précises des déformations des ponts. Les polynômes peuvent être ajustés pour correspondre aux données d'entrée, ce qui permet de modéliser les déformations avec une bonne précision.

Les polynômes peuvent être utilisés pour modéliser différentes formes de déformations, telles que des courbes, des surfaces ou des volumes. Ils peuvent être adaptés à des problèmes spécifiques et à différentes configurations de ponts, offrant ainsi une

grande flexibilité.

L'évaluation polynomiale permet également de réaliser l'interpolation des données. Cela signifie qu'en connaissant quelques points de données, on peut utiliser un polynôme pour estimer les déformations entre ces points, ce qui est utile pour suivre les déformations dans le temps.

Les polynômes peuvent être évalués rapidement à l'aide d'algorithmes efficaces tels que l'algorithme de Horner. Cela permet d'obtenir rapidement des résultats lors de la simulation du système numérique, ce qui est essentiel pour le suivi en temps réel des déformations des ponts.Ce sont des fonctions mathématiques bien connues et étudiées. Leurs coefficients et leurs propriétés peuvent être interprétés facilement, ce qui facilite l'analyse des résultats de la simulation et la prise de décisions concernant l'entretien des ponts.

Il est important de noter que l'utilisation de l'évaluation polynomiale dans la simulation des déformations des ponts peut varier en fonction des besoins spécifiques du projet et des contraintes techniques. D'autres techniques et modèles mathématiques peuvent également être utilisés en complément de l'évaluation polynomiale pour obtenir une représentation plus précise du comportement des ponts.

- **Random source mask (masques aléatoires)**

L'utilisation d'une source aléatoire de masquage, également connue sous le nom de "random source mask" en anglais, dans la simulation d'un système numérique pour le suivi et l'entretien à long terme des déformations des ponts peut avoir plusieurs avantages :

**Variabilité des conditions** : Les déformations des ponts peuvent être générées par divers facteurs, tels que les charges appliquées, les conditions environnementales, l'usure et d'autres paramètres. En utilisant une source aléatoire de masquage, vous pouvez simuler ces variations dans les conditions de manière réaliste. Cela permet de prendre en compte un large éventail de scénarios possibles et de produire des données plus réalistes pour l'entretien à long terme.

**Génération de données différenciées** : Une simulation basée sur une seule série de données peut ne pas être représentative de l'ensemble des déformations possibles des ponts. En utilisant une source aléatoire de masquage, vous pouvez produire des données variées qui produisent un large éventail de situations potentielles. Cela permet d'obtenir une meilleure compréhension des différentes formes de déformation et de développer des stratégies d'entretien plus robustes.

**Test de résistance** : En appliquant une source aléatoire de masquage, vous pouvez évaluer la résistance d'un système numérique de suivi et d'entretien des déformations des ponts dans des conditions variées. Cela peut aider à identifier les faiblesses potentielles du système et à les améliorer. En exposant le système à des scénarios aléatoires, vous pouvez tester sa capacité à détecter et à réagir efficacement à différents types de déformations.

**Validation des algorithmes** : L'utilisation d'une source aléatoire de masquage peut également être utile pour valider les algorithmes utilisés dans le système de suivi et d'entretien des déformations des ponts. En introduisant des variations aléatoires dans les données, vous pouvez vérifier si les algorithmes sont capables de gérer ces fluctuations et de fournir des résultats fiables et précis.

En résumé, l'utilisation d'une source aléatoire de masquage dans une simulation d'un système numérique pour le suivi et l'entretien à long terme des déformations des ponts permet de prendre en compte la diversité des conditions, de générer des données différenciées, de tester la résistance du système et de valider les algorithmes utilisés. Cela conduit à une meilleure compréhension des déformations possibles des ponts et à des stratégies d'entretien plus efficaces.

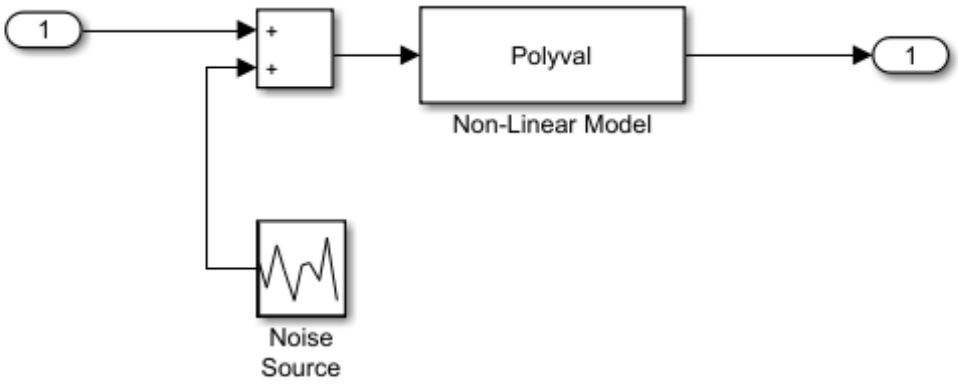



FIGURE 2.19 – Schéma de connexion pour la création de l'amplificateur

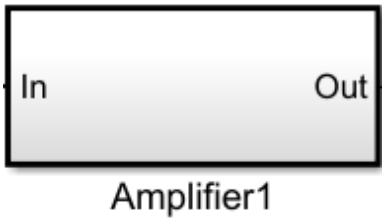



FIGURE 2.20 – Schéma de l'amplificateur

- **Harmonic distortion (distorsion harmonique)**

L'utilisation de la distorsion harmonique dans la simulation d'un système numérique pour le suivi et l'entretien à long terme des déformations des ponts peut offrir plusieurs avantages.

Tout d'abord, la distorsion harmonique permet de modéliser les effets non linéaires présents dans le comportement des ponts. Les déformations d'un pont peuvent être fournies par des facteurs tels que les charges variables, les matériaux non linéaires ou les mouvements dynamiques. En incorporant la distorsion harmonique dans la simulation, il est possible de capturer ces effets non linéaires et de mieux représenter le comportement réel du pont.

Ensuite, la distorsion harmonique permet d'analyser les interactions entre les différentes fréquences présentes dans le système. Les ponts sont soumis à diverses sources de vibrations et de forces, qui peuvent générer des harmoniques à des fréquences multiples. En examinant la distorsion harmonique, on peut identifier les fréquences dominantes et évaluer leur impact sur les déformations du pont. Cela permet de détecter les modes de vibration prédominants, de prévoir les zones sujettes à des déformations excessives et de concevoir des stratégies d'entretien appropriées.

De plus, l'utilisation de la distorsion harmonique peut faciliter la surveillance à long terme des déformations des ponts. En considérant régulièrement les réponses harmoniques du pont, il est possible de détecter les changements progressifs dans le comportement structurel, tels que les déformations accumulées ou les altérations des fréquences caractéristiques. Cela permet d'identifier les signes précurseurs de défaillances potentielles ou de dégradation, ce qui facilite la planification de l'entretien et de la réparation.

En résumé, l'utilisation de la distorsion harmonique dans la simulation d'un système numérique pour le suivi et l'entretien des déformations des ponts permet de modéliser les effets non linéaires, d'analyser les interactions entre les différentes fréquences et de faciliter la surveillance à long terme. Ces informations précieuses aident les ingénieurs à mieux comprendre le comportement des ponts, à prendre des

décisions éclairées en matière d'entretien et à garantir la sécurité et la durabilité des ouvrages.

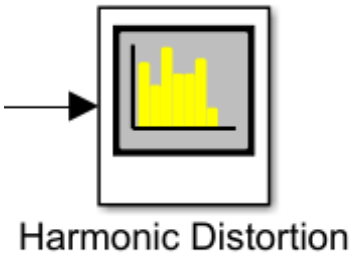



FIGURE 2.21 – Harmonic distortion

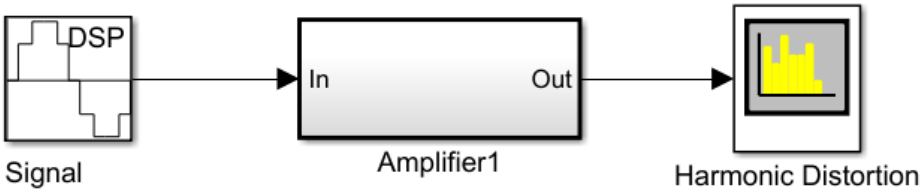



FIGURE 2.22 – Schéma de simulation

Les blocs sont ajoutés à l'aide de la bibliothèque de blocs simulink. Ils sont ensuite connectés entre eux en utilisant des lignes pour représenter les flux de signaux.

## 2.6 Conclusion

Le choix du matériel approprié est crucial pour garantir une collecte de données précise et fiable. Des capteurs de haute qualité doivent être utilisés pour mesurer avec précision les déformations et les mouvements des ponts. Ces capteurs peuvent être basés sur diverses technologies telles que les jauges de contrainte, les accéléromètres, les inclinomètres et les capteurs de position. Le matériel doit être robuste, résistant aux conditions environnementales difficiles et capable de fonctionner de manière autonome pendant de longues périodes. Les mesures doivent être effectuées régulièrement et de manière systématique afin de détecter rapidement les déformations anormales et de prendre les mesures nécessaires pour éviter les défaillances potentielles. Les méthodes de surveillance peuvent inclure des relevés manuels, des inspections visuelles, des techniques de mesure sans contact telles que la télédétection laser, ainsi que des systèmes automatisés de surveillance à distance.

# Chapitre 3

# ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSIONS

## 3.1 Introduction

Le suivi et l'entretien des déformations des ponts joue un rôle essentiel dans la préservation de l'intégrité structurelle de ces infrastructures. Avec l'avènement des technologies numériques, la conception et la réalisation de systèmes numériques ont ouvert de nouvelles perspectives dans ce domaine. Ces systèmes permettent de surveiller en continu les déformations des ponts, d'analyser les données nécessaires et de prendre des mesures appropriées pour assurer leur entretien à long terme.

Dans ce chapitre, nous analyserons les résultats obtenus suite à la simulation faite avec les logiciels et outils de simulation.

## 3.2 Résultats et interprètation de la simulation

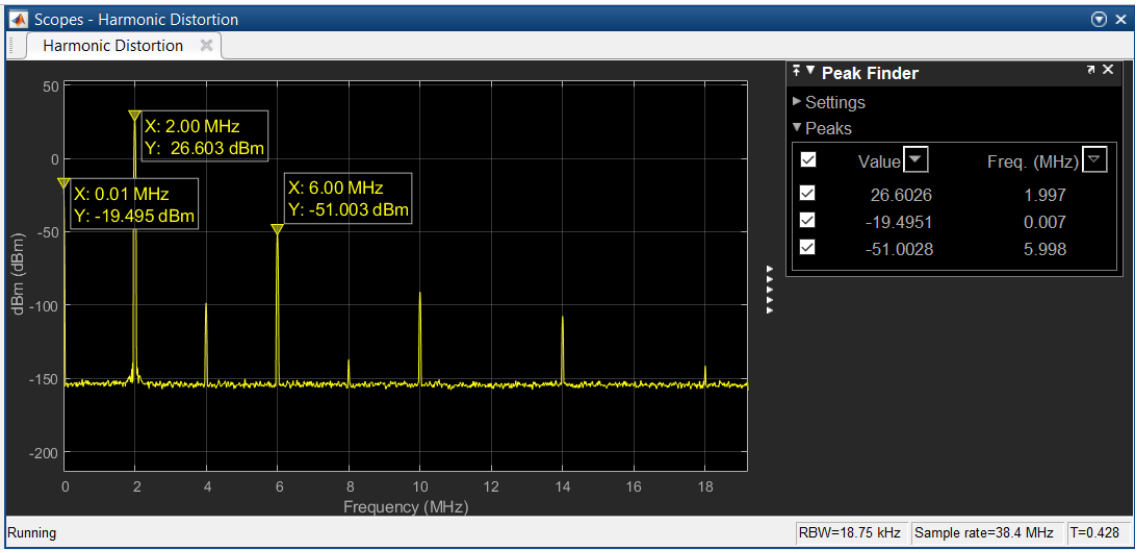



FIGURE 3.1 – Résultat de la simulation

La figure 3.1 présente le signal de variation de la distorsion en fonction des fréquences. Les points jaunes observés sur le graphique sont des points de rupture indiquant les seuils de déformations importants ou des limites de capacité du pont. En effet, lorsque la charge dépasse la capacité maximale du pont, on remarque des points de structure ou le matériau se fracture et le pont subit une défaillance structurelle.
Le signal observé sera transmis par communication sans fil.

## 3.3 Identification des déformations

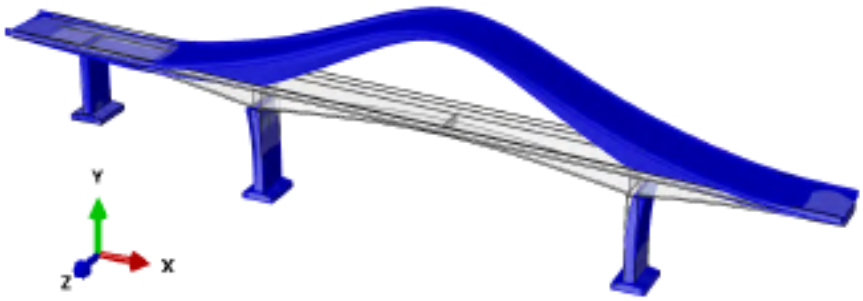



FIGURE 3.2 – Exemple de visualisation des déformations [54]

Pour l'identification des déformations, des capteurs sont installés sur les éléments principaux du pont. Le pont sera modélisé. Cela permettra de visualiser et d'identifier les déformations du pont en temps réel.

En fonction des déformations détectées, il convient d'effectuer une évaluation initiale, de mettre en place des mesures de sécurité temporaire, d'effectuer des inspections plus approfondies, d'établir un plan de réparation, d'engager les travaux de réparation et enfin de réévaluer et d'effectuer un suivi régulier.

## 3.4 Localisation des déformations

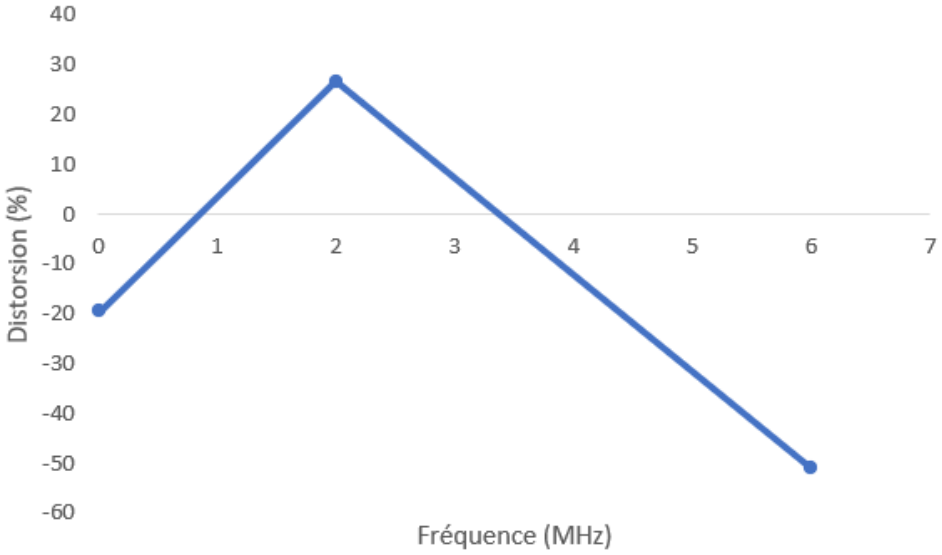



FIGURE 3.3 – Variation des déformations

En appliquant les techniques de localisation on constate une variation engendrée par les endommagements.

Cela peut être dû à une surcharge structurelle, à une dégradation des matériaux, à des conditions environnementales produites ou à d'autres facteurs. Ces déformations peuvent compromettre la sécurité structurelle des ponts et nécessite une attention immédiate pour éviter tout risque d'effondrement.

## 3.5 Durée de l'implémentation du système

Les résultats étant prometteurs cela nous amène à réaliser un prototype du système sur une période de 3 ans. Voici une proposition de plan d'implémentation en détaillant les activités à réaliser à chaque année :

**Année 1**

— Évaluation des besoins : identification des objectifs spécifiques du système numérique, les déformations à surveiller, les données requises et les contraintes techniques.

— Conception du système : développement d'une architecture de système numérique qui comprendra des capteurs pour mesurer les déformations, une infrastructure de communication pour transmettre les données, et une plateforme logicielle pour stocker et analyser les informations recueillies.

— Sélection des capteurs : choix des capteurs appropriés en fonction des types de déformations à surveiller. Il peut s'agir de capteurs de déplacement, de jauges de contrainte, de capteurs d'inclinaison, etc. Vérifiez-vous qu'ils sont compatibles avec la plateforme logicielle.

— Installation des capteurs : effectuer l'installation des capteurs sur les ponts concernés en suivant les meilleures pratiques, s'assurer de l'étalonnage correct des capteurs et à leur connexion au système de communication.

— Développement du logiciel : conception et développement du logiciel nécessaire pour collecter, stocker et analyser les données des capteurs. S'assurer que le logiciel est convivial et permet d'obtenir des informations pertinentes sur les déformations des ponts.

**Année 2**

— Test et validation : effectuer des tests approfondis pour vérifier le bon fonctionnement du système numérique. Validez les mesures des capteurs et spécifiez que les données sont correctement transmises et enregistrées.

— Collecte de données : commencer à collecter des données sur les déformations des ponts à l'aide du système numérique, s'assurer que les données sont accessibles de manière sécurisée et qu'elles soient facile pour l'analyse ultérieure.

— Analyse des données : utiliser les outils d'analyse appropriés pour étudier les tendances et les modèles de déformations des ponts. Identifiez les seuils critiques et les anomalies qui recevront une attention particulière.

— Établissement d'un plan d'entretien : sur la base des données et des analyses réalisées, élaborez un plan d'entretien pour les ponts. Cela peut inclure des mesures préventives, des réparations ou des renforcements spécifiques pour corriger les déformations.

**Année 3**

— Suivi continu : continuer à collecter des données sur les déformations des ponts conformément au plan d'entretien établi. Effectuer des analyses régulières pour évaluer l'efficacité des mesures prises et ajustez le plan si nécessaire.

— Maintenance préventive : mettre en œuvre les mesures d'entretien préventif définies dans le plan. Cela peut inclure des inspections régulières, des ajustements des capteurs, des renforcements supplémentaires, etc.

— Surveillance en temps réel : utiliser le système numérique pour surveiller en temps réel les déformations des ponts. Configurer des alertes pour les seuils critiques définis afin de prendre des mesures immédiates en cas de dépassement de ces seuils.

— Rapports et communication : générer des rapports périodiques sur l'état des déformations des ponts, les mesures d'entretien effectuées et les recommandations pour l'avenir. Communiquer ces informations aux parties concernées, telles que les ingénieurs, les autorités compétentes et les équipes d'entretien.

## 3.6 Conclusion

La simulation effectuée a permis de créer un modèle virtuel représentant les contraintes auxquelles sont soumises les ponts, en prenant en compte les matériaux utilisés, les charges appliquées et les conditions environnementales. L'analyse des résultats obtenus à partir de cette simulation permet de prendre des décisions éclairées quant aux mesures d'entretien et de réparation nécessaires pour assurer la durabilité du pont. Les données recueillies permettent d'identifier les zones présentant des déformations anormales ou excessives et de planifier des inspections et des interventions ciblées.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

Les ponts sont des infrastructures critiques qui supportent des charges lourdes et sont exposés à des conditions environnementales variables. La surveillance des déformations permet de détecter rapidement les signes de dégradation et de prendre des mesures préventives pour éviter les défaillances potentielles qui pourraient mettre en danger la sécurité des usagers.

Dans ce contexte, nous avons étudié dans ce manuscrit, les différentes étapes à suivre pour la conception d'un système numérique pour le suivi et l'entretien à long terme des déformations des ponts. Cette conception repose sur deux parties qui sont la partie analogique et la partie numérique. La partie analogique est responsable de la collecte des données de déformation du pont à l'aide de capteurs physiques. Les capteurs utilisés peuvent varier en fonction des spécificités du pont et des paramètres de déformation à mesurer. Quant à la partie numérique, elle est responsable de l'acquisition, du traitement et de l'analyse des données de déformation par les capteurs analogiques. Par ailleurs, les résultats de simulation ont montré un signal de variation de la distorsion en fonction des fréquences. Les points jaunes observés sur le graphique sont des points de rupture indiquant les seuils de déformations importants ou des limites de capacité du pont. En effet, lorsque la charge dépasse la capacité maximale du pont, on remarque des points de structure ou le matériau se fracture et le pont subit une défaillance structurelle. Le signal observé sera transmis par communication sans fil. Des alertes seront donc envoyés au personnel de gestion pour qu'il réagisse rapidement car les valeurs des paramètres dépassent les valeurs seuils.

A titre d'amélioration de ce travail, nous envisageons pour les années à venir d'aller beaucoup plus en profondeur en étudiant de manière minutieuse chaque partie du système pour proposer un prototype du système.

# Bibliographie


[1] Jean-Armand Calgaro et Roger Lacroix. *Maintenance et réparation des ponts*. Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, 1997.

[2] Georges Asch et al. *Acquisition de données : du capteur à l'ordinateur*. Dunod, 2011.

[3] Izza Keltouma. « Conception et réalisation d'un data-Logger a 8 Vois a base d'une carte Arduino Yun. » Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri, 2016.

[4] André et Thom Christian et Brossault Marc-Antoine et Botton Serge et Ortiz Miguel et Dumoulin John Manzini Nicolas et Orcesi. « Analyse des performances des stations GNSS à bas coût pour la surveillance de la santé structurelle des ouvrages de génie civil ». In : *Ingénierie des structures et des infrastructures* 18 (), p. 595-611.

[5] Amrita et Chiplunkar Sanika et Kumbhar Rohini et Khodke Swati A Kusal Varsha et Argade. *Système de surveillance de pont et de génération d'alertes utilisant IOT*.

[6] Dongming Feng et Maria Q Feng. « Computer vision for SHM of civil infrastructure : From dynamic response measurement to damage detection–A review ». In : *Engineering Structures* 156 (2018), p. 105-117.

[7] Nicolas Manzini. « Surveillance de santé structurale des ouvrages d'art incluant les systèmes de positionnement par satellites ». Thèse de doctorat. Université Paris-Est, 2020.

[8] Salim BELKHEIR et al. « Conception et réalisation d'un système de mesure de charges mécaniques adapté à un dispositif de compression à base d'un microcontrôleur ». In : (2022).

[9] Boudjemai Lynda. « Conception et réalisation d'un système de mesure électronique pour un banc didactique d'études des jauges de contraintes. » Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri, 2014.

[10] Marc FERRETTI. « Capteurs à fibres optiques ». In : *Techniques de l'ingénieur. Mesures et contrôle* R415 (1996), R415-1.

[11] LB JEUNHOMME et FX DESFORGES. *Réseaux de capteurs tout ou rien pour applications industrielles*. 1987.

[12] Pierre Ferdinand. *Capteurs à fibres optiques et réseaux associés*. Tec & Doc, 1992.

[13] P Rossi et F Le Maour. « Ouvrages d'art : le contrôle des fissurations ». In : *REVUE DES LABORATOIRES D'ESSAIS (LA)* 7 (1986).

[14] Y GUILLARD et H MOREAU. *Collage de fibres optiques en surface de structure*. 1995.

[15] James Dupont. « Comportements de Capteurs à Fibres Optiques, noyés ou fixés en surface d'ouvrages en béton ». Thèse de doctorat. Ecole des Ponts ParisTech, 2002.

[16] Rainer G Flesch et al. « Seismic risk assessment of motorway bridge Warth/Austria ». In : *Proceedings of the12th World Conference on Earthquake Engineering*. 2000.

[17] Andrés Belisario-Briceño. « Contribution à la détection de fragilité des structures en béton armé :«Méthodologies d'instrumentation à l'aide de capteurs piézoélectriques» ». Thèse de doctorat. UPS Toulouse-Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 2016.

[18] Xinghua Chen, Piotr Omenzetter et Sherif Beskhyroun. « Calibration of the finite element model of a twelve-span prestressed concrete bridge using ambient vibration data ». In : *Proceedings of the 7th European Workshop on Structural Health Monitoring*. 2014.

[19] Reinhard Wolff. « Monitoring of prestressed concrete structures with optical fiber sensors ». In : *First European Conference on Smart Structures and Materials*. T. 1777. SPIE. 1992, p. 33-39.

[20] « Structure de capteur à microcourbure à sélection de mode/filtrage pour une utilisation dans des systèmes de capteurs distribués et quasi-distribués ». In : *Smart Structures and Materials 1998 : Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials*. T. 3330, p. 180-191.

[21] Betty Lise Anderson et Jill A Brosig. « New approach to microbending fiber optic sensors : varying the spatial frequency ». In : *Optical engineering* 34.1 (1995), p. 208-213.

[22] V BALTAZART et al. *Application d'appuipeseur instrumenté par CFO au pesage dynamique de véhicules sur un ouvrage d'art*. 2000.

[23] Andre Morin et al. « Field monitoring of the ice load of an icebreaker propeller blade using fiber optic strain gauges ». In : *Smart Structures and Materials 1996 : Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*. T. 2718. SPIE. 1996, p. 427-438.

[24] J-Y Chen et al. « In-situ monitoring of graphite/epoxy cure using optical fiber and ultrasonic sensors ». In : *PROCEEDINGS-AMERICAN SOCIETY FOR COMPOSITES*. TECHNOMIC PUBLISHING AG. 1997, p. 872-881.

[25] G Duplain et al. « Absolute fiber-optic linear position and displacement sensor ». In : *Optical Fiber Sensors*. Optica Publishing Group. 1997, OTuD5.

[26] Nadarajah Narendran et Joseph M Weiss. « Fiber optic strain and temperature sensor for power plant applications ». In : *Self-Calibrated Intelligent Optical Sensors and Systems*. T. 2594. SPIE. 1996, p. 149-158.

[27] Wanku Lee et al. « Railroad bridge instrumentation with fiber-optic sensors ». In : *Applied optics* 38.7 (1999), p. 1110-1114.

[28] P Choquet, F Juneau et F Dadoun. « New generation of fiber-optic sensors for dam monitoring ». In : *Proceedings of the 1999 International Conference on Dam Safety and Monitoring*. 1999, p. 19-22.

[29] Marco Quirion et Gérard Ballivy. « Application des capteurs à fibre optique Fabry-Pérot pour le suivi à long terme de structures en béton ». In : *BULLETIN-LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES* (2000), p. 75-88.

[30] P Ferdinand et al. « Optical fiber Bragg grating sensors make composite structures smart ». In : *Advanced materials and processes affordabilities for the new age (Paris La Défense, April 13-15 1999)*. 1999, p. 53-64.

[31] P Niay et al. « Les réseaux de bragg photoinscrits dans les fibres optiques ». In : *Optique et Photonique* 1.30-37 (1998), p. 276.

[32] Philipp M Nellen et al. « Application of fiber optical and resistance strain gauges for long-term surveillance of civil engineering structures ». In : *Smart structures and materials 1997 : Smart systems for bridges, structures, and highways*. T. 3043. SPIE. 1997, p. 77-86.

[33] Michael A Davis et Alan D Kersey. « Fiber Bragg grating based systems for transportation infrastructure monitoring ». In : *Transportation Sensors and Controls : Collision Avoidance, Traffic Management, and ITS*. T. 2902. SPIE. 1997, p. 201-210.

[34] T et Measures RM et Tadros G et Rizkalla SH et Guha-Thakurta A Maaskant R et Alavie. « Capteurs à réseau de Bragg à fibre optique pour la surveillance des ponts ». In : *Ciment et Béton Composites* 19 (), p. 21-33.

[35] A Tino Alavie et al. « Bragg grating fiber optic sensing for bridges and other structures ». In : *Second European Conference On Smart Structures and Materials*. T. 2361. SPIE. 1994, p. 162-167.

[36] P et Parcharidis I et Bignami Christian et Benekos G et Samsonov-S et Kyriakopoulos C et Stramondo Salvatore et Chamot-Rooke Nicolas et Drakatou ML et autres Briole P et Elias. « La séquence sismique de janvier–février 2014 à l'île de Céphalonie (Grèce) : contraintes issues de l'interférométrie SAR et du GPS ». In : *Suppléments géophysiques aux avis mensuels de la Royal Astronomical Society* 203 (), p. 1528-1540.

[37] Daniele et Bakon Matus et de Sousa Joaquim M et Hlavacova Ivana et Real Nuno Lazecky Milan et Perissin. « Potentiel des techniques satellites InSAR pour la surveillance des déformations des ponts ». In : *2015 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, p. 1-4.

[38] I et Bakoň I et Lazeckỳ M et Patr ício G et Guimarãese Pedro et Ruiz AM et Bastosi Luísa et Sousa A Sousa JJ et Hlaváčová. « Potentiel de l'InSAR multi-temporel pour la surveillance des ponts et barrages ». In : *ScienceDirect Elsevier Procedia Technology*. T. 16, p. 834-841.

[39] Rolands Kromanis et Prakash Kripakaran. « Predicting thermal response of bridges using regression models derived from measurement histories ». In : *Computers & Structures* 136 (2014), p. 64-77.

[40] Rolands Kromanis et Prakash Kripakaran. « Data-driven approaches for measurement interpretation : analysing integrated thermal and vehicular response in bridge structural health monitoring ». In : *Advanced Engineering Informatics* 34 (2017), p. 46-59.

[41] Pierre Brevet, Jean-Louis Robert et Christian Aubagnac. « Surveillance acoustique des câbles de ponts ». In : *Revue I2M* 3 (2003), p. 1-2.

[42] Thierry KRETZ et al. « Haute surveillance et évaluation de l'aptitude au service du pont suspendu d'Aquitaine ». In : *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées* (2006), p. 13-22.

[43] John Dumoulin et al. *Surveillance acoustique des câbles : Guide pour la maîtrise d'ouvrage*. 2013.

[44] Thierry Duquesnoy, Yves Egels et Michel Kasser. « 2.3. 1 Use of GPS in photographic planes Thierry Duquesnoy ». In : *Digital photogrammetry* (2002), p. 115.

[45] V Ashkenazi et GW Roberts. « Experimental monitoring of the Humber Bridge using GPS. » In : *Proceedings of the institution of civil engineers-civil engineering*. T. 120. 4. Thomas Telford-ICE Virtual Library. 1997, p. 177-182.

[46] Yi Lin Guo et Yan Xin. « Application of Global Positioning System Measuring Technology in Safety Monitoring of Long-Span Bridges ». In : *Advanced Materials Research*. T. 671. Trans Tech Publ. 2013, p. 2053-2056.

[47] Panos Psimoulis et al. « Combination of GPS and RTS measurements for the monitoring of semi-static and dynamic motion of pedestrian bridge ». In : (2016).

[48] Jian Wang et al. « Vibration frequencies extraction of the forth road bridge using high sampling GPS data ». In : *Shock and Vibration* 2016 (2016).

[49] Peter et Konopka Eduard et Napieraj Monika Górski Piotr et Breuer. « Efficacité de la technologie GPS dans la surveillance de la réponse induite par le trafic d'un pont routier en acier ». In : *Série de conférences IOP : Science et ingénierie des matériaux*. T. 419.

[50] « Étude préliminaire de la surveillance de la déformation du pont à l'aide du GPS et du CRP (étude de cas : pont de Suramadu) ». In : *Procedia Sciences de l'environnement* 24 (), p. 266-276.

[51] Mosbeh R KALOOP et Jong Wan HU. « Dynamic performance analysis of the towers of a long-span bridge based on gps monitoring technique ». In : *Journal of Sensors* 2016 (2016).

[52] Xu TANG et al. « Real-time kinematic PPP GPS for structure monitoring applied on the Severn Suspension Bridge, UK ». In : *Advances in space research* 60.5 (2017), p. 925-937.

[53] Ruijie XI et al. « Bridge monitoring using BDS-RTK and GPS-RTK techniques ». In : *Measurement* 120 (2018), p. 128-139.

[54] Farouk Omar FRIGUI. « Contribution au développement d'un système de surveillance des structures en génie civil ». Thèse de doctorat. 2018.

# Table des matières

**Remerciements** ii

**Liste des sigles** iv

**Liste des tableaux** vi

**Table des figures** vii

**Résumé** ix

**Abstract** x

**INTRODUCTION GÉNÉRALE** 1

**1 REVUE DE LITTERATURE** 3

1.1 Introduction . . . 3
1.2 Généralités sur les ponts . . . 4
1.2.1 Classification des ponts . . . 6
1.3 Actions sollicitant les ponts . . . 8
1.3.1 Charges permanentes . . . 8
1.3.2 Charges variables dues au trafic routier . . . 8
1.3.3 Charges dues aux actions accidentelles . . . 9
1.4 Les capteurs . . . 9
1.4.1 Le domaine d'application des capteurss . . . 10
1.4.2 La commande de processus . . . 10
1.4.3 La chaine de mesure . . . 11
1.4.4 Les caractéristiques d'un capteur . . . 11
1.4.5 Les différents types de capteur . . . 12
1.4.5.1 Les capteurs actifs . . . 12
1.4.5.2 Les capteurs passifs . . . 13
1.5 Système d'acquisition de données . . . 14
1.5.1 La chaine d'acquisition de données . . . 14
1.5.2 La carte d'acquisition de donnéess . . . 15
1.5.2.1 Le filtrage . . . 15
1.5.2.2 L'échantillonnage . . . 16
1.5.2.3 Le bloqueur . . . 17
1.5.2.4 Convertisseur analogique numérique . . . 17

1.6 Analyse des tenseurs pour la sécurité et la durabilité des ponts . . . . 17
1.7 Les systèmes de surveillance des ponts . . . . . 18
1.8 L'entretien des ponts . . . . . 28
1.8.1 Entetien à court terme . . . . . 29
1.8.2 Entetien à long terme . . . . . 29
1.9 Impact des entretiens . . . . . 30
1.10 Conclusion . . . . . 32

**2 MATERIEL ET METHODES 33**
2.1 Introduction . . . . . 33
2.2 Logiciels et outils de simulation . . . . . 34
2.2.1 MATLAB . . . . . 34
2.2.1.1 L'extension simulink . . . . . 34
2.2.1.2 Justification du choix de l'extension simulink . . . . 35
2.2.1.3 Création d'un modèle Simulink . . . . . 36
2.2.1.4 Classification des blocs . . . . . 37
2.3 Conception du système numérique . . . . . 38
2.3.1 Partie analogique . . . . . 39
2.3.1.1 Les capteurs . . . . . 39
2.3.1.2 Le filtrage . . . . . 39
2.3.1.3 L'amplification . . . . . 39
2.3.2 Partie numérique . . . . . 40
2.3.2.1 Présentation de la carte Arduino . . . . . 40
2.3.2.2 L'environnement de programmation Arduino . . . . . 43
2.4 Fonctionnement du système . . . . . 46
2.5 Représentation de la simulation . . . . . 53
2.6 Conclusion . . . . . 59

**3 ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSIONS 60**
3.1 Introduction . . . . . 60
3.2 Résultats et interprètation de la simulation . . . . . 61
3.3 Identification des déformations . . . . . 62
3.4 Localisation des déformations . . . . . 63
3.5 Durée de l'implémentation du système . . . . . 63
3.6 Conclusion . . . . . 66

**CONCLUSION GÉNÉRALE 67**

**Bibliographie 68**