



Université Mohammed V
École Normale Supérieure de l'Enseignement
Technique
-Rabat-



Mémoire du Projet de Fin d'Études

En vue de l'obtention du diplôme

INGÉNIEUR D'ÉTAT

Filière : Génie Électrique
Option : Systèmes Mécatroniques

Conception et Réalisation d'un Système de Pesage Dynamique

Organisme d'accueil : UM6P de BENGEURIR



Réalisé par :

M. Si Mohamed RAHILI
M. Mohamed TEBBAI

Soutenu le 20 juillet 2020, Devant le jury :

Pr. Alaarbi BELLARBI :	ENSET Rabat	- Président
Pr. Mustapha RAHBAOUI :	ENSET Rabat	- Examinateur
Pr. Aziz SOULHI :	ENSET Rabat	- Encadrant
Pr. Abdeljalil BENDANI :	UM6P Benguerir	- Encadrant Indus

Année universitaire 2019/2020



DÉDICACE

Nous dédions ce travail à

Notre chers parents

Pour tous leur sacrifice, leur bienveillance à notre succès, et leur soutien moral.

Pour leur aide, durant toute la période de notre études.

Que ce travail soit la preuve de notre éternelle reconnaissance, amour et respect.

Nos frères et sœurs

En témoignage de l'affection et de tout l'amour qui nous unit. Pour leur soutien moral et leur aide tout au long de nos études et qu'ils trouvent dans ce travail l'expression de mon profond respect.

Nos famille et Nos amis

Pour leur soutien, Leur reconnaissance et leur affection.

Nos encadrants

Pour leurs aides et leurs accompagnements qui nous ont permis de mener à bien notre projet.

Nos respectables professeurs qui nous ont formé pour être à la hauteur de représenter notre honorable école.

RAHILI SI MOHAMED

TEBBAI MOHAMED

REMERCIEMENT

Louange à **ALLAH**, Le Tout Puissant, Le Soutien Éternel.

Avant tout propos, nous tenons à adresser les plus sincères remerciements à l'ensemble de l'équipe pédagogique de l'**École Normale Supérieure de l'Enseignement Technique de Rabat** où nous avons évolué durant nos trois années de formation universitaire.

En ce qui concerne ce travail, nous souhaiterons exprimer nos vifs remerciements et notre reconnaissance à nos encadrantes industriels, Mr. **BENDANI ABDELJALIL** et Mr. **LAASSIRI YASSER** pour leur assistance continue, leur orientation constructive, la richesse de leur directive et leur soutien moral durant toute la durée de notre stage. Merci pour le support que vous nous avez fourni afin d'accomplir ce travail dans les meilleures conditions.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude à Mr. **SOULHI AZIZ**, notre encadrant universitaire pour ses conseils, son soutien, son encouragement et sa sympathie qui nous ont permis de réaliser notre projet dans une ambiance de travail joviale et agréable. Les moments passés avec vous ont été d'une immense valeur pour nous. Il n'a jamais hésité à enrichir nos connaissances par des informations fructueuses pour nous initier à la vie professionnelle, par des conseils précieux et des recommandations qu'ils nous prodiguées durant la période du stage.

Sans oublier de remercier toute l'équipe pédagogique de la filière Ingénierie des systèmes Mécatroniques qui ont fourni des efforts pour nous offrir une formation professionnelle adéquate et qui ont toujours été à notre écoute.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres du jury et aussi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, et aussi Mr. **Charaf GHANAJ** pour ces informations précieuses. Sans oublier la groupe de la mine expérialental qui a pris la

responsabilité de financier ce travail. À tous ces intervenants, nous présentons nos remerciements, nos respects et gratitudes.



RÉSUMÉ

Dans les sites de production industrielle, comme les usines de ciment, les mines et les ports, il est essentiel de pouvoir peser efficacement de nombreux camions en peu de temps. Les données de pesée en mouvement (Weigh-in-Motion (WIM)) fournissent des informations essentielles pour facturer les biens industriels d'après leur poids et vérifier les charges totales. Le but de ce projet est d'améliorer les technologies WIM piézoélectriques actuelles à travers une amélioration de la conception d'un système de pesage en mouvement à base des capteurs piézoélectriques.

Les systèmes WIM actuels ne sont disponibles qu'en tant que systèmes propriétaires, C-à-d que l'architecture du système interne et les algorithmes sont hautement protégés, ce qui rend difficile la comparaison et l'amélioration de la technologie sous-jacente. Par conséquent, le deuxième objectif est de développer un système WIM basé sur une architecture ouverte, utilisant des cartes de développement et des composants standards, et de publier les détails de la conception afin de promouvoir une architecture ouverte permettant des améliorations futures par d'autres développeurs.

Mots clés : Systèmes WIM, piézoélectrique, conception, pesage dynamique.



ABSTRACT

In the industrial production sites, such as cement plants, mines and ports, it is essential to be able to weigh many trucks efficiently in a short time. Weigh-in-Motion (WIM) data provides vital information for billing industrial products by weight and checking total loads. The purpose of this project was to improve the present piezoelectric WIM technologies through a better Weigh-in-Motion (WIM) system design with piezoelectric sensors.

The current WIM systems are only available as proprietary systems, that is, the internal system design and algorithms are highly protected, making it difficult to compare and improve the underlying technology. Therefore, the second objective was to develop a WIM system based on an open architecture, using development boards and standard components, and to publish the details of the design to promote an open architecture for continuous future improvements by other developers.

Keywords : Weigh-in-Motion (WIM), development boards, piezoelectric WIM technologies.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	i
REMERCIEMENT	ii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	v
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES TABLES	xiii
LISTE DES ABRÉVIATIONS	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 Présentation de l'organisme d'accueil	2
Introduction	3
1.1 Présentation de l'organisme d'accueil	3
1.1.1 L'Université Mohammed VI Polytechnique	3
1.1.2 La mine expérimentale TTO (Transfert Technologie Office)	5
1.1.3 Les axes de développement de l'ILO	8
Conclusion	8
2 Contexte et présentation de projet	9
Introduction	10
2.1 Contexte général	10
2.1.1 État de l'art	11
2.1.2 Technologies des systèmes de pesage :	13
2.2 Présentation du projet	17
2.2.1 Problématique du projet	17

TABLE DES MATIÈRES

2.2.2	Diagramme QQOQCP	19
2.2.3	Planification du projet	19
2.2.4	Management des délais « GANTT »	19
2.2.5	Management des ressources humaines du projet	20
conclusion		21
3	Ingénierie des systèmes complexes et langage SysML	22
Introduction		23
3.1	Ingénierie des systèmes	23
3.1.1	Définition :	23
3.1.2	Vocabulaire fondamentaux de l'IS :	23
3.1.3	Normes de l'IS :	25
3.1.4	Management de l'IS	26
3.1.5	Différentes visions de l'IS	26
3.2	Langage SysML	28
3.2.1	Définition	28
3.2.2	Interaction entre langage SysML et l'IS	28
Conclusion		29
4	Étude et Modélisation du système	30
Introduction		31
4.1	Analyse fonctionnelle	31
4.1.1	Diagramme cas d'utilisation (use cases)	31
4.1.2	Diagramme des exigences	32
4.1.3	Diagramme de séquences	33
4.1.4	Diagramme de définition de blocs	33
4.1.5	Diagramme de blocs internes	34
4.2	Analyse organique	36
4.2.1	Principes fondamentaux de la piézoélectricité	36
4.2.2	Quelques applications des matériaux piézoélectriques	47
4.2.3	Conditionnement du signal de capteur piézoélectrique	51
Conclusion		57
5	Réalisation du prototype de système de pesage dynamique	58
Introduction		59
5.1	Description de prototype	59
5.1.1	Schéma synoptique	59

TABLE DES MATIÈRES

5.1.2	Matériel utilisé	60
5.1.3	Partie Logicielle	66
Conclusion	70
6	Proposition d'un plan d'expériences afin de développer la précision	71
6.1	Généralité	72
6.1.1	Introduction général	72
6.1.2	Comment conduire une recherche expérimentale ?	73
6.1.3	Les plans d'expériences	75
6.1.4	Conduite du plan d'expérience	76
6.1.5	Résolution du problème	79
6.2	Application sur le système de pesage dynamique	84
6.2.1	Identification du problème	84
6.2.2	Note conceptuelle	86
Conclusion	89
CONCLUSION GÉNÉRALE		90
BIBLIOGRAPHIE & WEBOGRAPHIE		91
ANNEXES		97
A.1	Management des ressources humaines du projet	97
A.2	Fiches techniques des composants	99
A.2.1	La fiche technique de la carte Raspberry :	99
A.2.2	La fiche technique de capteur de poids	100
A.2.3	La fiche technique de l'amplificateur de charge	101
A.3	Code source Python	102

LISTE DES FIGURES

1.1	Université Mohammed 6 Polytechnique	4
1.2	Les équipements au mines.	6
1.3	Les équipements au mines.	6
1.4	Laboratoire d'innovation pour les opérations	7
2.1	Balances statiques portatives et plaques de bois de nivellement.	11
2.2	WIM basse vitesse utilisant des bascules à roue de pesée dans une plate-forme en béton.	12
2.3	Plaques de cintrage HS-WIM installées dans un tronçon de route.	14
2.4	Symbole schématique et modèle électronique d'un capteur piézoélectrique.	16
2.5	Plaque de pliage.	16
2.6	Renversement de camion et arrachement de couteaux.	19
2.7	Analyse du problème avec la méthode QOQCP.	20
3.1	Couverture des trois normes sur le cycle de vie du système.	25
3.2	Couverture des trois normes sur le cycle de vie du système.	27
3.3	Les différents diagrammes du langage SysML.	28
4.1	Diagramme cas d'utilisation (use cases).	32
4.2	Diagramme des exigences.	33
4.3	Diagramme de séquences.	34
4.4	Diagramme de définition de blocs.	35
4.5	Diagramme de blocs internes.	35
4.6	L'histoire de la piézoelectricité	37
4.7	Illustration des effets piézoélectriques[10].	38
4.8	Organisation des différentes classes cristalline	39
4.9	Représentation schématique de l'apparition de la piézoélectricité : (a) Cristal centrosymétrique (ou isotrope), (b) Cristal non centrosymétrique (ou anisotrope)[30].	40
4.10	Modes de déformation principaux d'un matériau piézoélectrique[39].Les traits en pointillés montrent la déformation mécanique obtenue.	45

LISTE DES FIGURES

4.11	Déformation parasite par conservation du volume. Pour une déformation longitudinale, la conservation du volume introduit un mode transversal mécanique[37].	46
4.12	Transformateur piézoélectrique « Type de Rosen »[40].	47
4.13	(a) Quelques valeurs de puissances produites par le corps humain, (b) Implantation du matériel piézoélectrique dans une chaussure et vue d'un convertisseur de remise en forme de la tension[41].	49
4.14	(a) Déformation d'une poutre par application d'une tension (b) Bilame couplé à une petite plaque métallique très fine[10].	49
4.15	Pesage en mouvement.	50
4.16	Longueur de l'empreinte sous différentes pressions de gonflage des pneus[43]. .	51
4.17	Signaux d'essieux à différentes vitesses[44].	52
4.18	Signal de sortie de l'amplificateur de charge d'un seul essieu ou d'une charge de roue.	53
4.19	Zone sous signal (Méthode 2) Vs Ré-échantillonnage de la zone (Méthode 3). .	55
5.1	Schéma synoptique.	59
5.2	Capteur à quartz piézoélectrique de type 9195 de Kistler.	60
5.3	Véhicule passant sur le capteur et forme d'onde du signal d'essieu correspondant.	61
5.4	Amplificateur de charge pour les capteurs Lineas WIM Type 9195G.	62
5.5	Capteur laser LS-500.	63
5.6	Carte Raspberry Pi 3.	64
5.7	photo - 8 mégapixels.	64
5.8	Écran ACL tactile 7 quot;Raspberry Pi.	65
5.9	Système de reconnaissance des plaques d'immatriculation.	66
5.10	Appareil Exemple de reconnaissance de plaque d'immatriculation avec Raspberry Pi et OpenCV.	67
5.11	Diagramme de cas d'utilisation.	68
5.12	Interface Homme-machine HIM.	69
6.1	L'organigramme de conduite d'une recherche.	74
6.2	Place des plans d'expériences parmi les méthodes et outils de la qualité. . . .	75
6.3	La conduite d'un plan d'expériences.	78
6.4	Les causes de perte de qualité.	79
6.5	La roue de Deming (PDCA) adaptée à une méthode classique de résolution de problème.	79
6.6	La matrice d'expériences.	80
6.7	La roue de Deming (PDCA) adaptée au plan d'expériences.	81
6.8	Background.	86

LISTE DES FIGURES

6.9 Description du projet	87
6.10 Diagnostic préliminaire	88

Liste des tableaux

4.1	Équations de la piézoélectricité.	41
4.2	Grandeurs électriques, mécaniques et piézoélectriques.	41



LISTE DES ABRÉVIATIONS

R&D Recherche et Développement

WIM Weigh-in-Motion

SysMI Systems Modeling Language

UML Unified Modeling Language

UM6P Université Mohammed VI Polytechnique

TTO Transfert Technologie Office

OCP Office Chérifien des Phosphate

SQL Structured Query Language

Tkinter Tool kit interface

OCR Optical Character Recognition

OpenCV Open Source Computer Vision Library

ANPR Automatic Number Plate Recognition

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans les sites de production industrielle, comme les usines de ciment, les mines, les ports et les compagnies de fret, il est essentiel de pouvoir peser efficacement et rapidement les camions transportant des marchandises. Les données de pesée en mouvement (WIM) fournissent des informations essentielles pour mesurer le poids d'un camion et vérifier sa charge totale. Le but de ce projet est d'utiliser la technologie WIM, capteur piézoélectrique, pour la mise en place d'un pesage dynamique.

Le présent travail expose les moyens et la démarche pour réaliser un tel objectif. Il sera décliné comme suit :

Dans un premier temps, nous présenterons la structure dans laquelle a été effectué ce travail, ensuite sera abordé les éléments de ce projet.

Après quoi, un état de l'art sur les systèmes de pesage en mouvement. Les différentes technologies des capteurs de pesage dynamique seront déclinées ainsi que les avantages que ces technologies offres en comparaison avec le pesage statique.

Ensuite, nous consacrerons une partie à l'étude de modélisation du système à travers la mise en place d'une démarche d'ingénierie des systèmes complexes.

Enfin cette dernière partie sera dédiée aux étapes de conception et de réalisation des éléments de notre système.

Chapitre

1

Présentation de l'organisme d'accueil

Introduction

Dans ce qui suit, sera présenté en préambule, l'Université Mohammed VI Polytechnique. Ensuite nous aborderons, de manière succincte, les différentes missions de l'UM6P, ainsi que les structures de recherche qui sont nées avec cette Université.

1.1 Présentation de l'organisme d'accueil

1.1.1 L'Université Mohammed VI Polytechnique

L'Université Mohammed VI Polytechnique se situe au cœur même de la future ville verte de BENGUERIR. Lancée en 2009 par Sa Majesté le Roi Mohammed VI et initiée à l'aide des moyens de l'Office Chérifien des Phosphates (OCP S.A.). la ville de Benguerir a l'ambition de devenir une ville pilote et un espace socioéconomique qui servira de locomotive en matière de développement industriel et logistique, de la région Tensift-El Haouz.

L'Université Mohammed VI Polytechnique (UM6P) ambitionne de devenir un pôle académique de qualité pour permettre, avec d'autres pôles académiques Marocains, de hisser le Maroc au rang des grandes nations en matière de recherche et de formation. Elle a aussi pour objet et d'accompagner l'OCP en matière d'innovation et au niveau de toute sa chaîne de valeur.

L'Université accueillera à terme 12000 étudiants, encadrés par 1000 professeurs et chercheurs. Elle a une forte vocation internationale, Coopération avec des Universités de renom, Européennes et Américaines. Cependant elle diversifie aussi ses partenariats avec des pays émergents et notamment Africains[1].

L'Université Mohammed VI Polytechnique constituera un véritable ascenseur social pour les jeunes Marocains en permettant aux plus méritants, sans condition de revenus, parmi eux, de bénéficier des bourses d'études et d'un large choix de formation.



FIGURE 1.1: Université Mohammed 6 Polytechnique

L'UM6P dispose plusieurs laboratoires de recherche :

- MSN (Material Sciences and Nanoengineering) ;
- ESAFE (Ecole des Sciences fertilisants) ;
- SIMLAB (Simulation Laboratory) ;
- LISC (Laboratoire Ingénierie des Systèmes Complexes) ;
- La Mine Expérimentale TTO (Transfert Technologie Office)

Au niveau technique les laboratoires bénéficient d'un FABLAB, ILO FABLAB (INNOVATION LAB FOR OPERATIONS Fabrication Laboratory).

Notre travail, stage de fin d'étude, s'est déroulé au sein du laboratoire de Physique, EMINES, School of Management Industrial, faisant partie intégrantes de l'UM6P.

Il s'est déroulé en collaboration et avec les moyens de la structure "Mine expérimentale" initiée par Messieurs : **Youssef DAAFI** sous la responsabilité de **Abdelaali KOSSIR**. (Voir en annexe 1 ce qu'est cette structure savante).

Enfin, Cette structure, la mine expérimentale, s'appuie sur un Fablab, ILO FABLAB (INNOV-ATIION LAB FOR OPERATIONS Fabrication Laboratory), équipé pour répondre à des défis, mécanique, électromécanique, électronique et de mécatronique.

1.1.2 La mine expérimentale TTO (Transfert Technologie Office)

La mine expérimentale à ciel ouvert de Benguerir marque une avancée significative dans la démarche d'OCP d'accéder à une industrie 4.0. Elle fait partie des sites d'expérimentation de l'Université Mohammed VI Polytechnique qui sont au centre des programmes de recherche.

Ouverts à la communauté scientifique, ils permettent aux chercheurs des universités 40 partenaires de tester des solutions à échelle réelle dans des domaines clés. Sous le nom de "Advanced Mining Technology Platform", la vocation de cette mine pilote est multiple.

Dans un premier temps, il s'agit de placer le Groupe à l'avant-garde du progrès technologique en matière d'extraction minière et de management, d'attirer les fournisseurs d'équipements /technologies et les chercheurs pour leur permettre de réaliser en grandeur réelle des essais en milieu industriel et de créer au niveau de l'Université Mohammed VI Polytechnique, une vraie expertise basée sur le learning by doing, l'apprentissage par la pratique. D'autant plus que les projets *R&D* menés permettent de développer un écosystème entrepreneurial à travers la valorisation des résultats de la *R&D*, l'innovation et l'implication d'entreprises innovantes.

Le projet de la mine a vu le jour en août 2017 et une vingtaine de projets dont la majeure partie porte sur la digitalisation industrielle : des projets de pilotage industriel, d'intelligence artificielle, d'automatisation ou encore de maintenance. Tous ces projets innovants concernent l'amélioration des processus d'extraction ou l'automatisation.

Ainsi, plusieurs projets font la part belle au contrôle en temps réel des installations pour améliorer les retours et les prises de décisions. D'autres projets, axés sur l'automatisation, permettront de réduire les risques liés aux travaux des opérateurs humains et d'assurer une plus grande sécurité ainsi qu'un rendement plus élevé. Au-delà des projets en cours, la mine expérimentale est aussi une vitrine du savoir-faire d'OCP en termes de digitalisation et permet à tout l'écosystème de profiter d'innovation et d'expérimentation à la pointe de la technologie.



FIGURE 1.2: Les équipements au mines.



FIGURE 1.3: Les équipements au mines.

Cette structure, la mine expérimentale, s'appuie sur un Fablab, ILO FABLAB (ILO FABLAB (INNOVATION LAB FOR OPERATIONS Fabrication Laboratory), équipé pour répondre à des défis, mécanique, électromécanique, électronique et de mécatronique :

1.1.2.1 ILO

LO est l'acronyme en anglais de « INNOVATION LAB FOR OPERATIONS » ce laboratoire a pour objectif de développer et gérer des infrastructures, démonstrateurs et autres outils de test axés sur la digitalisation industrielle[2].

Le FABLAB de l'UM6P met donc à disposition des utilisateurs des moyens de conception et de fabrication modernes pour la réalisation de leurs projets. L'équipe de techniciens disponible

CHAPITRE 1. PRÉSENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL

sur place a pour mission d'aider les créateurs à bien utiliser ces moyens en toute sécurité et en toute autonomie par des formations sur les équipements.

Il est aussi et surtout un lieu collaboratif de fabrication, ouvert à tous, qui aide les créateurs à s'approprier des technologies utiles pour leurs projets. Il favorise la rencontre des envies et des compétences pour partager, créer et réaliser des objets et des systèmes. Il constitue in-fine un outil pour l'innovation et de la concrétisation des idées.



FIGURE 1.4: Laboratoire d'innovation pour les opérations

1.1.2.2 Missions de l'ILO

ILO est un laboratoire spécialement dédié à la recherche et au développement des projets il a pour mission de :

- Accompagner l'OCP et les acteurs industriels marocains et africains dans l'amélioration de leur compétitivité par la digitalisation industrielle et l'amélioration de leurs outils de production ;
- Soutenir l'innovation au sein de l'écosystème UM6P à travers le développement d'une plateforme d'Open Innovation (conception, prototypage) ouverte à la communauté par la mise à disposition d'un atelier FABLAB comportant un grand nombre des équipements de fabrication.

1.1.3 Les axes de développement de l'ILO

ILO s'engage à l'étude de la réalisation de projets en ingénierie avancée, la recherche et de plateforme de tests dans les 8 domaines suivants :

- Contrôles avancés des procédés ;
- Pilotage des installations portuaires, chimiques et minières ;
- Maintenance avancée ;
- Capteurs intelligents et spectrométrie avancée ;
- l'enrichissement industriel ;
- Simulateurs industriels ;
- Ingénierie des Systèmes et standardisation pour les domaines miniers ;
- Développement de nouveaux procédés chimiques pour la production d'acide phosphorique[2].

Conclusion

Le présent projet de fin d'études a été effectué au sein du La mine expérimentale TTO de l'UM6P en collaboration avec l'OCP de BENGUERIR. Nous avons présenté, dans ce chapitre, l'organisme d'accueil, ses missions et ses axes de développement. Dans le chapitre suivant, nous allons définir le contexte général et la présentation de notre projet.

Chapitre

2

Contexte et présentation de projet

Introduction

Notre projet s'inscrit dans le cadre de la conception et la réalisation d'un système de pesage dynamique à base des capteurs piézo-électriques. Dans ce chapitre, nous allons dresser le contexte général du projet, et indiquer la solution qui nous a semblé la plus adaptée.

2.1 Contexte général

Deux problèmes sont posés :

Comment s'assurer du tonnage réel véhiculé par un poids lourds ? Et que faire pour que cette pesée effectuée sur un véhicule de transport de marchandises ne mobilise pas trop de temps ?

La surcharge des véhicules est un problème de sécurité routière qui a suscité de réelles préoccupations. Les camions en surpoids peuvent causer de graves dommages et accélérer la dégradation des infrastructures routières. Dans certains cas extrêmes, le poids du camion surchargé peut même dépasser la capacité de charge du pont et provoquer directement son effondrement. De plus, les camions surchargés présentent un risque plus élevé d'être impliqués dans des accidents de la route (Jacob et Beaumelle, 2010). Compte tenu de ces préoccupations, le contrôle des poids lourds est devenu de plus en plus important pour la protection et la maintenance des systèmes de transport modernes. Les techniques couramment utilisées pour peser les camions routiers comprennent les techniques de pesage statique et les techniques de pesage dynamique (weigh-in-motion WIM). Bien que le pesage statique puisse être précis, sa mise en œuvre est coûteuse et prend beaucoup de temps. Par conséquent, elle est peu pratique. Pour surmonter les limites du pesage statique, des technologies WIM basées sur les chaussées ont été développées depuis les années 1960 (Richardson et al. 2014). Les systèmes WIM basés sur les chaussées utilisent des dispositifs installés sur la route pour peser les véhicules routiers dans des conditions de circulation normales.

Les dispositifs couramment utilisés pour les systèmes WIM basés sur les chaussées comprennent les plaques de pliage, les capteurs de force, les tapis de capacité et les capteurs de bande.

2.1.1 État de l'art

2.1.1.1 Limites de pesage statique :

Le pesage statique souffre d'un certain nombre de limitations[3]. Il est difficile d'effectuer des contrôles en toute sécurité sur les autoroutes et les autoroutes à trafic intense. Avec un volume de trafic élevé et l'augmentation du nombre de véhicules lourds sur des routes, le pesage statique devient inefficace et a un effet dissuasif limité.

En raison du temps requis pour le pesage statique, lorsque plusieurs camions sont sélectionnés pour le contrôle, la zone de pesage est saturée et les autres camions surchargés sont ainsi en mesure de contourner le point de contrôle. De plus, la pesée statique implique des retards de 10 à 30 minutes (parfois plus), ce qui pénalise les conducteurs de camions, y compris la majorité d'entre eux qui se conforment à la réglementation.



FIGURE 2.1: Balances statiques portatives et plaques de bois de nivellation.

2.1.1.2 Développement du pesage en mouvement (WIM)

a. Low speed WIM (LS-WIM)

Pour les raisons décrites ci-dessus et afin d'accroître l'efficacité des contrôles par un pesage partiellement automatisé, le concept WIM à faible vitesse a été développé et mis en œuvre. LS-WIM consiste à utiliser des balances à roue ou à essieu, principalement équipées de capteurs

CHAPITRE 2. CONTEXTE ET PRÉSENTATION DE PROJET

de force, technologie la plus précise, installées sur des plates-formes en béton ou en asphalte résistant, d'une longueur minimale de 30 à 40 m.

Le logiciel du système d'acquisition et de traitement des données est conçu pour analyser le signal des cellules de charge, en tenant compte de la vitesse, et pour calculer avec précision les charges des roues ou des essieux. Ces systèmes sont installés soit en dehors des voies de circulation, sur des zones de pesage, soit à des barrières de péage ou dans toute autre zone contrôlée. La vitesse de fonctionnement est généralement comprise entre 5 et 15 km / h.

L'Organisation internationale de métrologie légale[4] a publié une recommandation internationale relative à la réalisation d'essais d'approbation du modèle et à la certification d'instruments de pesage à fonctionnement automatique pour véhicules routiers, applicable aux systèmes LS-WIM. Il est légalement mis en œuvre au Royaume-Uni depuis 1978, ainsi que dans plusieurs États d'Amérique du Nord, provinces canadiennes et australiennes. À la fin des années 90 et au début des années 2000, plusieurs pays européens (Allemagne, France, Belgique, etc.) et le Japon ont autorisé le LS-WIM à les faire respecter. La précision des systèmes LS-WIM peut aller de 3 à 5%.



FIGURE 2.2: WIM basse vitesse utilisant des bascules à roue de pesée dans une plate-forme en béton.

b. High speed WIM (HS-WIM)

WIM haute vitesse (HS-WIM) signifie que les capteurs, installés dans une ou plusieurs voies de circulation, mesurent les charges sur les essieux et les véhicules lorsque ces véhicules circulent à une vitesse normale. HS-WIM permet de peser presque tous les camions traversant une section de route et d'enregistrer des mesures individuelles ou des statistiques.

HS-WIM présente les principaux avantages suivants :

- il s'agit d'un système de pesage entièrement automatisé ;
- il peut enregistrer tous les véhicules, quels que soient leur vitesse, leur nombre d'essieux ou l'heure du jour ;
- aucune infrastructure supplémentaire n'est requise et il peut être installé sur de bonnes chaussées et sections de route conformément aux spécifications européennes du WIM[5] ;
- c'est un système de coûts raisonnables

2.1.2 Technologies des systèmes de pesage :

Les systèmes HS-WIM ont cependant certaines limites. Le problème principal est la précision, qui dépend fortement de la planéité et les caractéristiques de la chaussée, ainsi que des performances de suspension des camions, en raison de l'interaction dynamique entre la route et les camions. De plus, comme les capteurs routiers sont exposés à des charges de circulation entières et sont montés sur la surface de la chaussée, ils peuvent avoir une durée de vie limitée en cas de défaillance de la chaussée. L'étalonnage et l'évaluation de la précision des systèmes HS-WIM constituent un problème délicat.

La technologie HS-WIM peut être utilisée pour :

- Ingénierie des chaussées et des ponts, pour enregistrer les schémas de charge de trafic utilisés pour : le calibrage des codes de conception et des modèles de charge conventionnels, la surveillance et l'évaluation des infrastructures, en fatigue ou contre des charges extrêmes, et l'inspection et le renforcement stratégies.

- Collecte de données sur le trafic, statistiques sur le transport de marchandises, enquêtes économiques et, parfois, tarification des routes en fonction des charges et du volume réels du trafic, par exemple.
- Cribler les camions surchargés avant une zone de contrôle équipée d'appareils de pesage statique ou LS-WIM ; une présélection précise dans le flux de trafic augmente considérablement l'efficacité des contrôles et évite d'arrêter les véhicules chargés légalement ou vides.



FIGURE 2.3: Plaques de cintrage HS-WIM installées dans un tronçon de route.

2.1.2.1 Les technologies des capteurs

Le pesage en mouvement (WIM) est la technologie permettant de mesurer le poids des véhicules en mouvement. Il existe actuellement deux modes de mesure de pesage en mouvement, à savoir la mesure du poids brut et du poids par essieu. En mode de mesure du poids brut, l'utilisation d'une plate-forme plus grande a entraîné une augmentation de la difficulté de mise en œuvre et des coûts de construction. Contrairement à la mesure du poids des essieux, mesurez le poids de chaque essieu séparément, puis le poids brut dans le système.

Aujourd'hui, quatre types principaux de capteurs sont utilisés pour un certain nombre d'applications comprenant la collecte de données sur le trafic et l'application de stations de pesage :

capteurs piézoélectriques, plaque de flexion, capteur de force et fibre optique.

a. Les capteurs piézoélectriques

Les capteurs piézoélectriques sont fabriqués à partir d'un matériau qui génère une charge électrique lorsqu'il est déformé mécaniquement. Cet effet a été découvert par les frères Curie à la fin du XVIII^e siècle et tire son nom du mot grec piézo, qui signifie « j'appuie ». En particulier lorsque la pression est appliquée à un cristal polarisé, la déformation mécanique résultante génère une charge électrique.

Lorsqu'un ensemble de ces cristaux polarisés est placé entre deux plaques métalliques, une force appliquée de manière externe est convertie en une charge proportionnelle. Cette charge résulte en une tension qui dépend de la force externe. Ce type de capteur peut être installé directement dans un emplacement sur la route pour des applications permanentes, ou enregistré pour des applications portables.

Un transducteur piézoélectrique a une impédance de sortie CC très élevée et peut être modélisé comme une source de tension proportionnelle et un réseau de filtres. La tension V à la source est directement proportionnelle à la force, à la pression ou à la contrainte appliquée. Le signal de sortie est alors associé à cette force mécanique comme si elle avait traversé le circuit équivalent. Un modèle détaillé inclut les effets de la construction mécanique du capteur et d'autres non-idealités. L'inductance L_m est due à la masse sismique et à l'inertie du capteur lui-même. C'est inversement proportionnel à l'élasticité mécanique du capteur. C_0 représente la capacité statique du transducteur, résultant d'une masse inertuelle de taille infinie. R_i est la résistance de fuite d'isolement de l'élément transducteur. Si le capteur est connecté à une résistance de charge, celle-ci agit également en parallèle avec la résistance d'isolement, augmentant toutes les deux la fréquence de coupure passe-haut.

b. Les systèmes WIM de plaque de pliage

Les systèmes WIM de plaque de pliage utilisent des plaques avec des jauge de contrainte collées sur la face inférieure. Lorsqu'un véhicule passe sur la plaque de flexion, le système enregistre la déformation mesurée par la jauge de contrainte et calcule la charge dynamique.

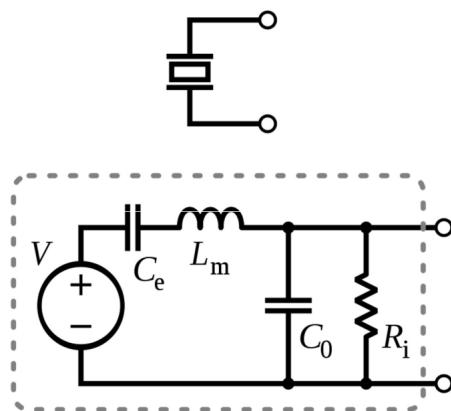


FIGURE 2.4: Symbole schématique et modèle électronique d'un capteur piézoélectrique.

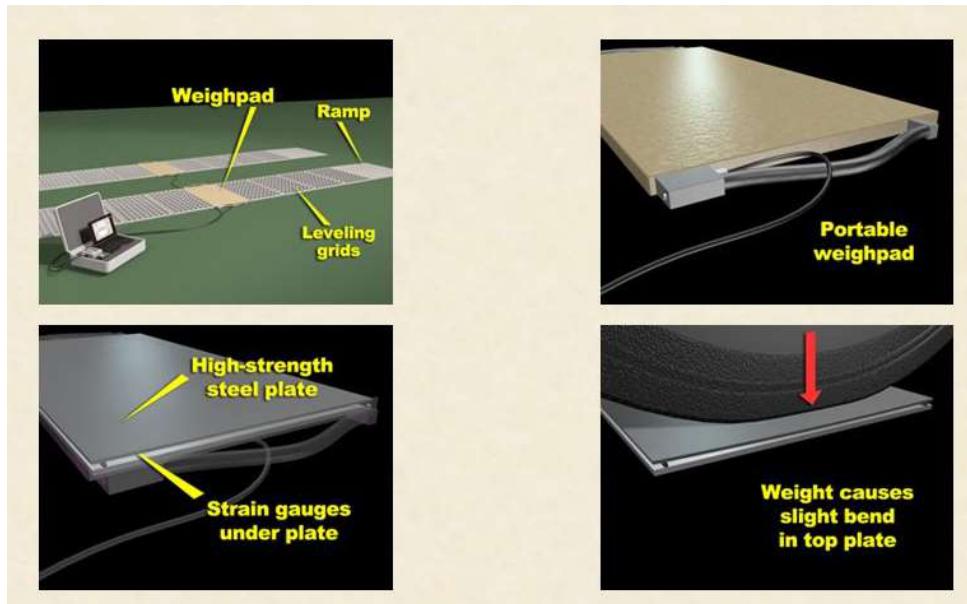


FIGURE 2.5: Plaque de pliage.

La charge statique est estimée à l'aide de la charge dynamique mesurée et des paramètres d'étalonnage. Lorsque le revêtement est en asphalte, il est nécessaire de construire un béton de fondation pour supporter l'échelle de la plaque de pliage, et lorsque la chaussée est faite de béton, une excavation peu profonde est nécessaire pour installer la plaque.

c. Cellule de charge

Les systèmes WIM de cellules de charge utilisent une seule cellule de charge avec deux balances pour détecter un essieu et peser simultanément les côtés droit et gauche de l'essieu. Lorsqu'un véhicule passe sur la cellule de charge, le système enregistre les poids mesurés par

chaque balance et les additionne pour obtenir le poids sur essieu. L'installation d'un système WIM à cellule de charge unique nécessite une chambre forte en béton.

d. Fibre optique

En plus d'autres utilisations, la fibre optique peut servir de technologie au sens WIM. Un capteur à fibre optique est constitué de deux bandes métalliques soudées autour d'une fibre optique. Le principe du capteur utilise les propriétés photo élastiques induites de la fibre de verre sous une force de compression verticale. Cela induit une séparation en deux modes de propagation : un mode vertical plus rapide et un mode horizontal plus lent. La pression transmise à la fibre optique crée un déphasage entre les deux modes de polarisation, qui est directement lié à la charge de la fibre. La technologie est encore assez théorique.

Cependant, les applications de la plupart de ces capteurs ont été limitées par des problèmes tels que des volumes importants, une installation difficile, un coût élevé et une mise en œuvre peu pratique. Dans cet article, un nouveau capteur de pesage capacitif a été proposé. Les caoutchoucs conducteurs sont utilisés comme électrodes et comme sandwich isolant entre deux électrodes. L'intégration de la plate-forme et du capteur de pesage a été réalisée avec succès. Cette conception réduit considérablement le volume et le poids du capteur WIM. Ce capteur est caractérisé par la facilité de son transport, qui peut être enroulé grâce à sa flexibilité. La structure et le mécanisme de détection du capteur de pesage flexible sont d'abord présentés dans le document. Le circuit de mesure du système WIM est ensuite présenté. Sur cette base, des expériences ont été réalisées et les résultats ont été analysés.

2.2 Présentation du projet

2.2.1 Problématique du projet

La surcharge est un gros problème dans le secteur du camionnage. Un nombre relativement élevé d'infractions est lié au poids des poids lourds. En moyenne, un véhicule contrôlé sur trois est surchargé. Ces surcharges dépassent souvent de 10 à 20% le poids maximum autorisé. Les véhicules en sur poids entraînent toutes sortes de problèmes, par exemple : liés à la sécurité

routière, à la sécurité du conducteur, à la dégradation des routes, à l'environnement et à la concurrence.

Un camion surchargé est plus susceptible d'être impliqué dans un accident et d'avoir des conséquences plus graves qu'un camion légalement chargé. Plus le véhicule est lourd, plus son énergie cinétique est élevée, entraînant des forces d'impact plus importantes et des dommages plus importants aux autres véhicules ou à l'infrastructure en cas de collision. Cependant, le poids absolu n'est pas un problème en soi et les lourdes charges peuvent être transportées en toute sécurité par des camions conçus à cet effet, tels que les «véhicules de grande capacité». Toutefois, lorsque la charge actuelle dépasse la limite maximale autorisée d'un camion, plusieurs conséquences néfastes peuvent en résulter :

- **Instabilité du camion :** un véhicule surchargé est moins stable en raison de la hauteur accrue au centre de gravité et de l'inertie accrue des carrosseries du véhicule (remorque ou semi-remorque, par exemple). Étant donné que les outils de stabilité embarqués (ESP, système anti-renversement, etc.) peuvent être surmenés, le risque de renversement, de sortie de voie ou de soulèvement de couteau est accru (Figure 2.6)
- **Défaut de freinage :** le système de freinage de tout camion est conçu pour le poids maximal admissible indiqué sur les documents du véhicule. Le pouvoir de freinage dépend des freins eux-mêmes, mais également des performances du pneu et de la suspension conçues pour le poids maximal admissible du chariot. Tout excès de poids réduit la capacité de freinage d'un camion et peut même endommager le système de freinage.
- **Perte de motricité et de manœuvrabilité :** un véhicule surchargé devient sous-alimenté ; il en résulte des vitesses réduites sur les pentes en montée, ainsi que des risques de congestion, de freinage moteur inefficace et de vitesse excessive sur les pentes en descente. Les dépassements prennent également plus de temps et comportent donc des risques supplémentaires pour les autres usagers de la route.
- Les statistiques sur la charge et la surcharge des camions impliqués dans des accidents de la route sont très rares en raison des pertes fréquentes de fret lors d'un accident et des données relatives au poids ne sont pas collectées par les autorités. Quelques études documentent la gravité accrue des collisions[5].



FIGURE 2.6: Renversement de camion et arrachement de couteaux.

De plus, lors du contrôle du poids, les camions surchargés sont souvent en défaut pour d'autres infractions, comme le dépassement du temps de conduite, le dispositif de limitation de vitesse défectueux, etc.

2.2.2 Diagramme QQOQCP

Pour mieux cerner ces différents problèmes et comprendre la situation, nous avons choisi d'utiliser la méthode QQOQCP (Quoi ? Qui ? Où ? Quand ? Comment ? Pourquoi ?). Cette démarche d'analyse critique constructive basée sur le questionnement systématique nous a permis de rassembler les informations élémentaires et suffisantes pour mieux identifier la vraie problématique et nous orienter vers les meilleures solutions.

2.2.3 Planification du projet

2.2.4 Management des délais « GANTT »

Dans le but de réaliser un travail méthodique et dans les meilleurs délais, les principales tâches liées à ce projet sont planifiées d'une façon optimale. D'où, l'utilité de la présentation graphique de l'état d'avancement, moyennant le diagramme de **GANTT** qui va répertorier toutes les tâches à accomplir, en indiquant la date à laquelle ces tâches doivent être effectuées (**Voir Annexe 2**).

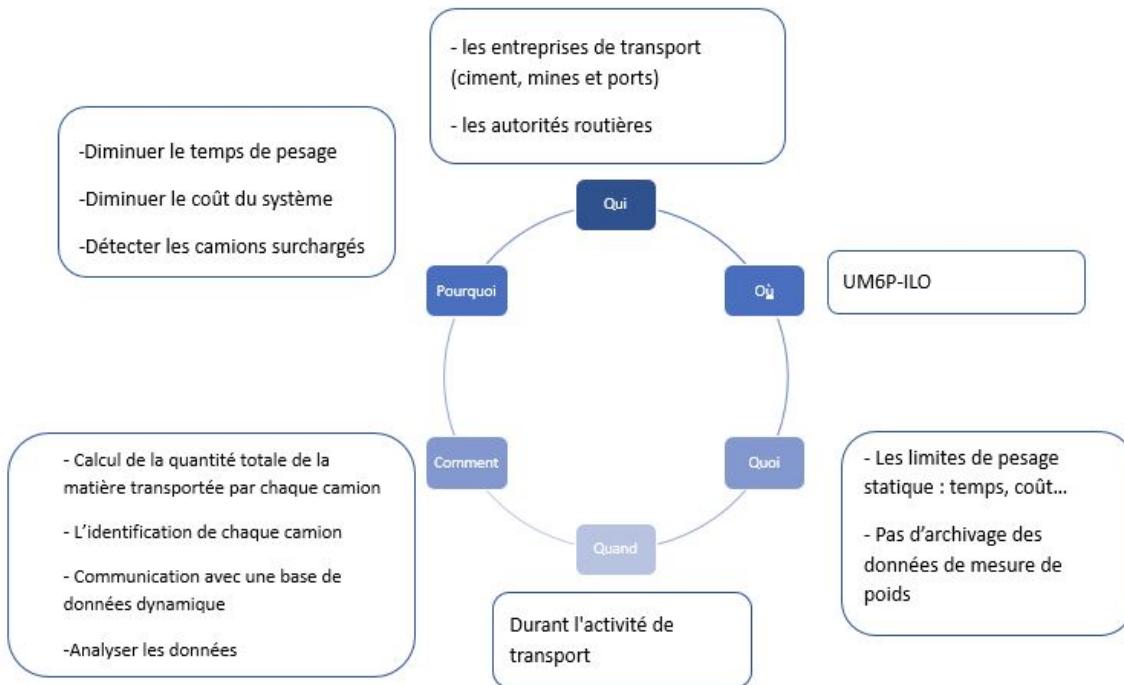


FIGURE 2.7: Analyse du problème avec la méthode QQOQCP.

2.2.5 Management des ressources humaines du projet

Le projet est encadré par :

- **Mr. Abdeljalil BENDANI**, Responsable, Tuteur au l'EMINES, Professeur de Physique à l'EMINES, Ecole d'Ingénieur en Management Industriel, UM6P, Benguerir ;
- **Mr Djamal FIFEL**, Ingénieur de Recherche, spécialiste en acte d'entreprendre, EMINES ;
- **Mr. Yasser LAASSIRI**, Technicien au Laboratoire de Physique, EMINES ;
- **Mr. SOULHI Aziz**, tuteur Pédagogique, Professeur à ENSET-Rabat.

Notre équipe est composée de :

- **Mr. RAHILI Si Mohamed**, élève ingénieur en génie électrique à ENSET - Rabat ;
- **Mr. TEBBAI Mohamed**, élève ingénieur en génie électrique à ENSET - Rabat.

Mise au point : Malgré la commande de matériel (voir annexe) et les premiers rendez-vous pris pour les essais et les premières mesures de mise au point sur terrain, la pandémie due au **COVID-19** nous a interdit de poursuivre dans le sens des sujets originaux. Nous nous sommes contentés de fournir un travail, de fond certes, mais qui demeure descriptif.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi une étude de contexte générale des technologies d'aide à la conduite, ainsi que des systèmes de pesage, afin d'avoir une vision claire sur notre projet et ses objectifs principaux. Avant de passer à la phase de la conception, nous avons effectué, une analyse du système tout en s'appuyant sur la méthodologie de l'ingénierie des systèmes.

Chapitre

3

Ingénierie des systèmes complexes et langage SysML

Introduction

L'ingénierie des systèmes est une démarche méthodologique, qui vient pour maîtriser les systèmes et les produits complexes. Afin de modéliser cette approche, on utilise le langage SysML, qui comporte différents diagrammes permettant l'analyse, la spécification, la conception, la vérification et la validation des systèmes.

3.1 Ingénierie des systèmes

3.1.1 Définition :

L'ingénierie des systèmes est une approche interdisciplinaire, qui englobe l'ensemble des activités adéquates pour réaliser un système, qui doit répondre aux besoins d'un cahier des charges, en satisfaisant l'ensemble des parties prenantes. L'ingénierie des systèmes devient nécessaire dès qu'elle va exploiter des systèmes complexes ou des produits plus simples mais déployés dans un environnement complexe ou comprenant des parties prenantes multiples et avec des profils très divers.

3.1.2 Vocabulaire fondamentaux de l'IS :

Système : C'est un ensemble de composants inter reliés qui interagissent les uns avec les autres d'une manière organisée pour accomplir une finalité commune (NASA 1995). Un système est un ensemble intégré d'éléments qui accomplissent un objectif défini (INCOSE 2004).

Système complexe : C'est un système multi physique dont le fonctionnement fait appel à plusieurs disciplines, Les relations liant les composants sont multiples, interdépendantes et bouclées. Le comportement global n'est pas directement prévisible à partir des comportements élémentaires des composants.

Besoin : L'ensemble des attentes de l'utilisateur que le produit à réaliser ou le service doit accomplir pour satisfaire le client.

Exigence : Une exigence permet de spécifier une capacité ou une contrainte qui doit être satisfaite par un système. Elle peut spécifier une fonction que le système devra réaliser ou une condition de performance, de fiabilité, de sécurité, etc. Les exigences servent à établir un contrat entre le client et les réalisateurs du futur système.

Finalité : La finalité d'un système répond à la question « Pourquoi le système doit exister ? ». C'est le sens et la raison d'être du système.

Mission : La mission répond à la question « Que fait le système ? ». C'est la fonction de plus haut niveau assurée par le système, et perceptible par son utilisateur principal au travers des actions et réactions, du système, générées.

Objectif : À partir de la finalité et de la mission, les objectifs caractérisent le besoin qualitatif et quantitatif.

Cycle en vie : Au démarrage d'un projet, l'identification du cycle de vie est une activité clé. Cela donne une vision globale sur le déroulement du projet, ce qui facilite sa préparation initiale, en définissant par défaut les phases qui va parcourir. C'est un outil de mise sous contrôle du projet qui donne un enchainement des phases, en produisant, progressivement, le résultat du projet.

Parties prenantes : On entend par partie prenante tout individu ou groupe de personnes, qui ont un lien direct ou indirect avec le projet. L'analyse des parties prenantes repose sur une étude détaillée des positions, des intérêts et de l'influence des personnes ou les organisations sur la réalisation et la réussite du projet.

Scenario : Sert à décrire l'enchaînement séquentiel des interactions. Il permet de représenter dynamiquement les missions et de détailler et de montrer comment le système se comporte durant son exécution.

Cas d'utilisation : Représente un ensemble de séquences d'actions qui sont réalisées par le système et qui produisent un résultat observable intéressant pour un acteur particulier. Chaque

cas d'utilisation spécifie un comportement attendu du système considéré. Il permet de décrire ce que le futur système devra faire, sans spécifier comment il le fera.

Flux : Le flux d'un système est un modèle de données décrivant les relations entre tous les blocs du système.

3.1.3 Normes de l'IS :

Il existe trois grandes normes qui font références à l'IS :

- **L'IEEE 1220** : Standard for application and Management of the Systems Engineering Process de Institute of Electrical and Electronics Engineers ;
- **L'EIA-632** : Processes for Engineering a System Electronic Industries Alliance (EIA) et American National Standards Institute (ANSI) ;
- **L'ISO 12588** : System Engineering – System Life-Cycle Processes association française de normalisation (AFNOR).

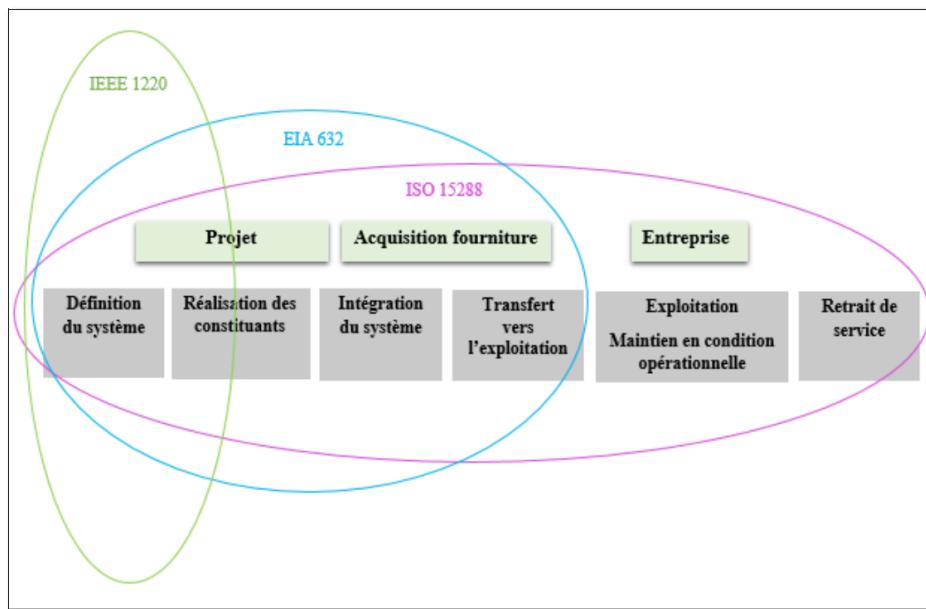


FIGURE 3.1: Couverture des trois normes sur le cycle de vie du système.

Remarque :

L'IEEE 1220 : Sert à définir les tâches interdisciplinaires requises pour transformer, au long du cycle de vie du système, les besoins des parties intéressées, exigences et contraintes en une

solution système, La norme IEEE 1220 se focalise sur les processus techniques d'ingénierie système allant de l'analyse des exigences jusqu'à la définition physique du système.

EIA-632 : Complète les processus techniques de définition du système en couvrant la réalisation des produits jusqu'à leur mise en service

ISO 12588 : Traite des processus de cycle de vie des systèmes, ce standard s'adresse à l'ensemble du cycle de vie d'un système industriel. Il inclut les processus d'exploitation, de maintien, en condition opérationnelle et de retrait de service. La norme ISO 15288 s'applique à l'ingénierie des systèmes contributeurs qui ont leur propre cycle de vie.

3.1.4 Management de l'IS

Le management de l'IS consiste à conduire le projet de sa définition jusqu'à sa mise en service, et cela en faisant[7] :

La planification du projet fait l'ingénierie de conception du système à partir de :

- Définition des exigences du projet, les objectifs et les contraintes ;
- Décomposition fonctionnelle du système en plusieurs tâches ;
- Définition des démarches de réalisation des tâches ;
- Estimation des ressources nécessaires aux tâches ;
- Ordonnance et planification des tâches.

La réalisation du projet qui consiste à mettre en existence le système défini, qui se fait par :

- Piloter et réaliser les tâches planifiées ;
- Manager les coûts, les délais, les ressources du projet ;
- Réagir aux écarts entre le réel et le planifié.

3.1.5 Différentes visions de l'IS

A partir de l'approche IS, chaque système intégré peut être analysé complètement suivant trois perspectives différentes et complémentaires, la figure suivante présente les trois visions de l'ingénierie des systèmes :

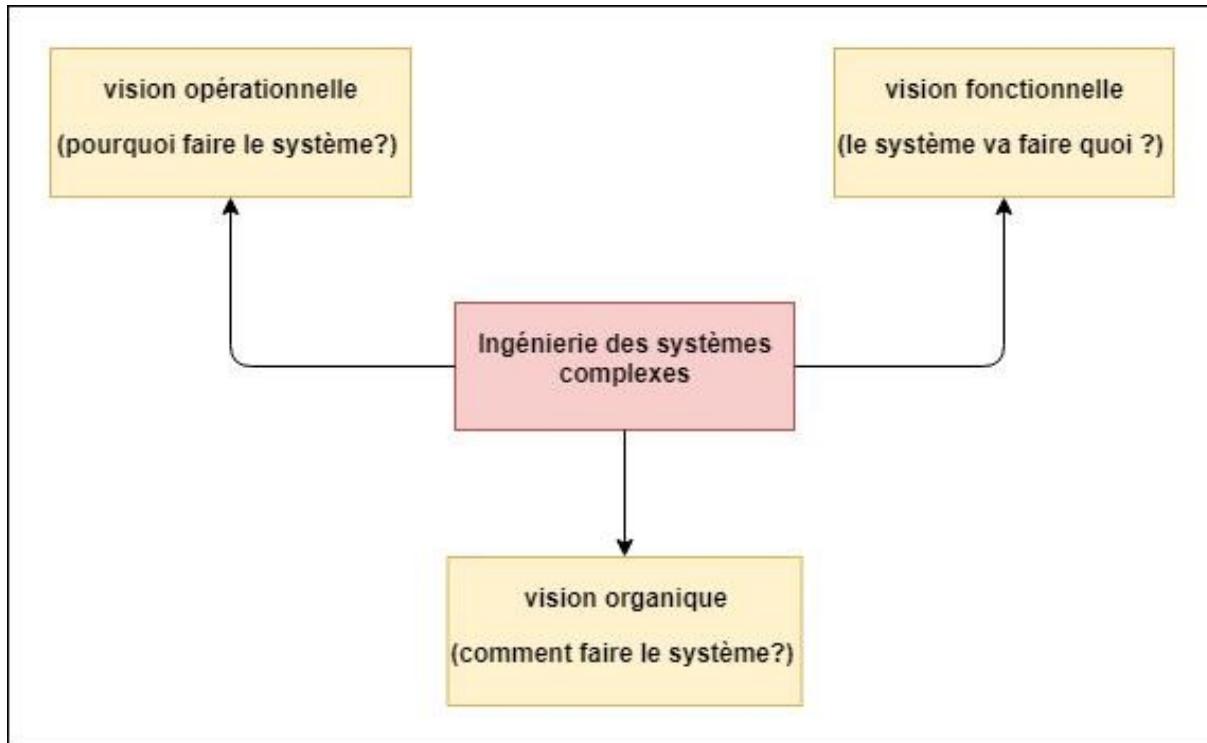


FIGURE 3.2: Couverture des trois normes sur le cycle de vie du système.

3.1.5.1 Vision opérationnelle

La vision opérationnelle fournit des modèles de « boîte noire » d'un système donné, où l'on ne décrit pas le système d'intérêt, mais plutôt ses interactions et ses interfaces avec son environnement. Au niveau de cette vision, on précise le « POURQUOI » du système. Elle consiste à déterminer[8] :

- Les besoins ;
- Le cycle de vie ;
- Les parties prenantes ;
- Les cas d'utilisations ;
- Les scénarios opérationnels ;
- Le flux opérationnel.

3.2 Langage SysML

3.2.1 Définition

Le langage SysML – Systems Modeling Language - est un langage de modélisation spécifique au domaine de l'ingénierie système. Le langage SysML s'articule autour de neuf types de diagrammes. Chacun d'eux étant dédié à la représentation des concepts particuliers d'un système.

SysML est un outil de modélisation et non une méthode d'analyse. Si tous les diagrammes sont liés à un même système, ils peuvent être abordés dans n'importe quel ordre. Chaque utilisateur est libre de créer sa propre méthodologie.

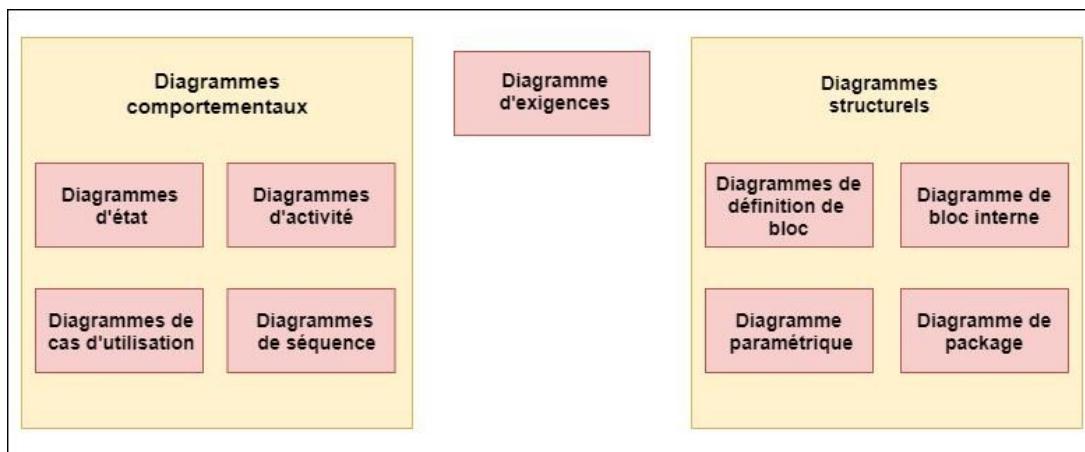


FIGURE 3.3: Les différents diagrammes du langage SysML.

3.2.2 Interaction entre langage SysML et l'IS

Parmi les diagrammes SysML les plus utilisés par l'ingénierie des systèmes, on trouve :

- Diagramme des exigences ;
- Diagramme de définition des blocs ;
- Diagramme des blocs internes ;
- Diagramme des cas d'utilisation ;
- Diagramme de séquences.

Conclusion

L'ingénierie des systèmes vient pour simplifier, décortiquer et détailler le système et ceci en s'adoptant le langage SysML, qui sert à la modélisation et la représentation graphique des besoins du système. Dans le chapitre qui suit, nous allons entamer la phase la plus importante dans notre travail : la conception du système de pesage en mouvement.

Chapitre

4

Étude et Modélisation du système

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons appliquer l'approche de l'ingénierie des systèmes pour la modélisation et la conception de notre projet « système de pesage dynamique ».

En effet, ce chapitre est subdivisé en deux grandes parties : la première, consiste à mettre en œuvre l'ingénierie des systèmes pour la conception du système de pesage dynamique en entier, et la deuxième, aborde, également, l'approche d'ingénierie des systèmes, mais cette fois ci, pour la conception du système de pesage dynamique à autonome.

4.1 Analyse fonctionnelle

4.1.1 Diagramme cas d'utilisation (use cases)

Les diagrammes de cas d'utilisation sont des diagrammes UML utilisés pour donner une vision globale du comportement fonctionnel d'un système logiciel. Ils sont utiles pour des présentations auprès de la direction ou des acteurs d'un projet, mais pour le développement, les cas d'utilisation sont plus appropriés. Un cas d'utilisation représente une unité discrète d'interaction entre un utilisateur (humain ou machine) et un système. Il est une unité significative de travail. Dans un diagramme de cas d'utilisation, les utilisateurs sont appelés acteurs (actors), ils interagissent avec les cas d'utilisation (use cases).

UML définit une notation graphique pour représenter les cas d'utilisation, cette notation est appelée diagramme de cas d'utilisation. UML ne définit pas de standard pour la forme écrite de ces cas d'utilisation, et en conséquence il est aisément de croire que cette notation graphique suffit elle seule pour décrire la nature d'un cas d'utilisation. Dans les faits, une notation graphique peut seulement donner une vue générale simplifiée d'un cas ou d'un ensemble de cas d'utilisation. Les diagrammes de cas d'utilisation sont souvent confondus avec les cas d'utilisation. Bien que ces deux concepts soient reliés, les cas d'utilisation sont bien plus détaillés que les diagrammes de cas d'utilisation.

Le diagramme suivant donne un aperçu détaillé des cas d'utilisation de notre système ainsi que les interactions avec les acteurs primaires et secondaires.

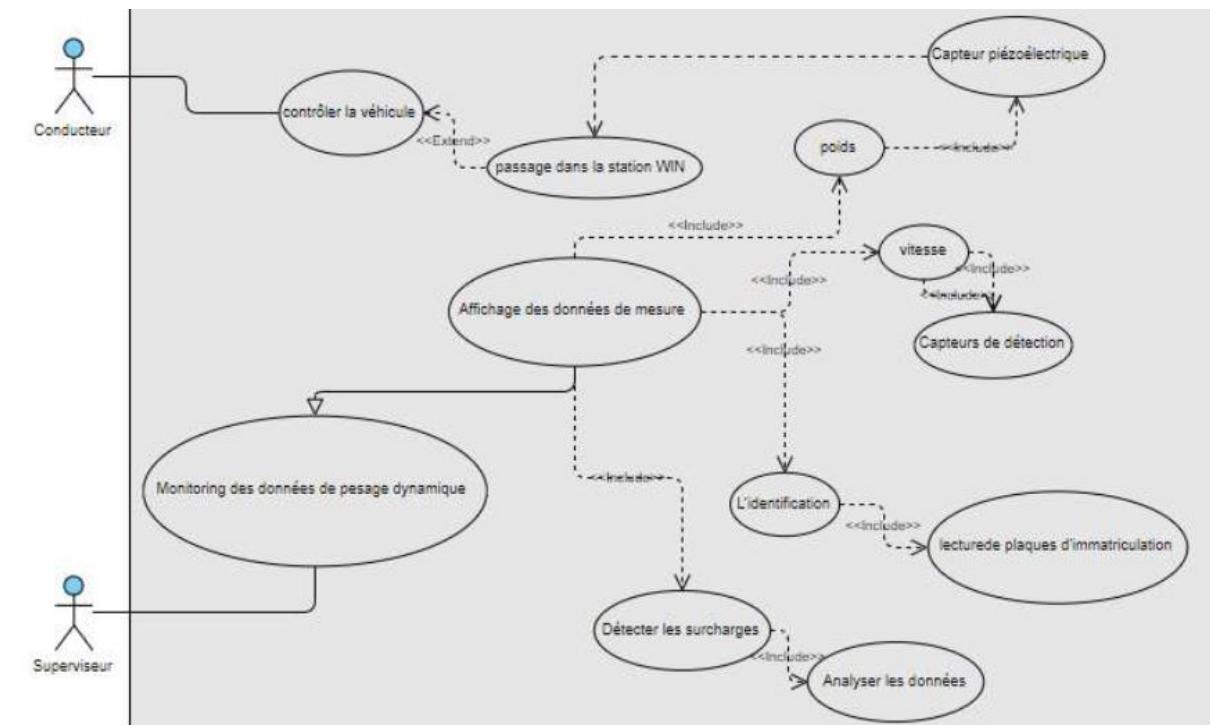


FIGURE 4.1: Diagramme cas d'utilisation (use cases).

4.1.2 Diagramme des exigences

L'objectif du diagramme des exigences, appelé Requirement Diagram (req), est de modéliser les exigences devant être vérifiées par le système en liant les solutions mises en œuvre sur le système avec les besoins définis dans le cahier des charges. Ce diagramme traduit, par des fonctionnalités ou des contraintes, ce qui doit être satisfait par le système.

De nombreux domaines peuvent être couverts, les plus classiques étant les exigences fonctionnelles ou techniques, environnementales et économiques.

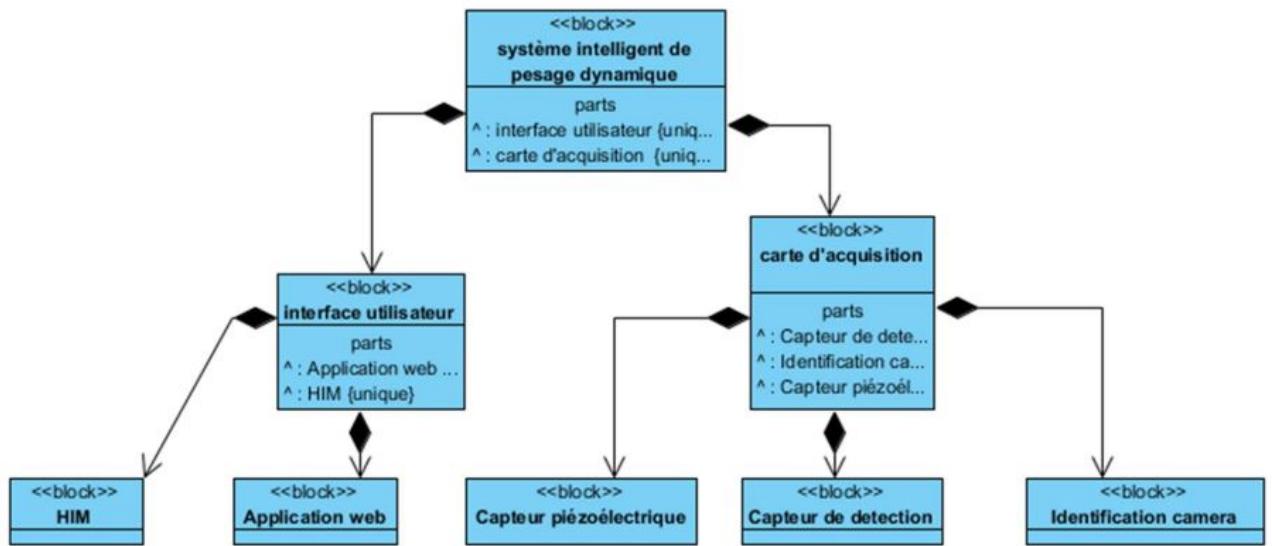


FIGURE 4.2: Diagramme des exigences.

4.1.3 Diagramme de séquences

Le diagramme de séquence fait parties des diagrammes comportementaux (dynamique) et plus précisément des diagrammes d’interactions. Il permet de représenter des échanges entre les différents objets et acteurs du système en fonction du temps.

A moins que le système à modéliser me soit extrêmement simple, nous ne pouvons pas modéliser la dynamique globale du système dans un seul diagramme. Nous ferons donc appel un à ensemble de diagrammes de séquences, chacun correspondant à une sous fonction du système, généralement pour illustrer un cas d’utilisation.

4.1.4 Diagramme de définition de blocs

Le diagramme de définition de blocs est utilisé pour décrire l’architecture matérielle du système. Un bloc est une entité bien délimitée qui encapsule principalement des attributs (variables d’état), des opérations (procédures comportementales), des contraintes, des ports (échange de flux avec l’extérieur) et des parts (sous-blocs internes). Un bloc peut modéliser tout le système, un élément matériel ou logiciel.

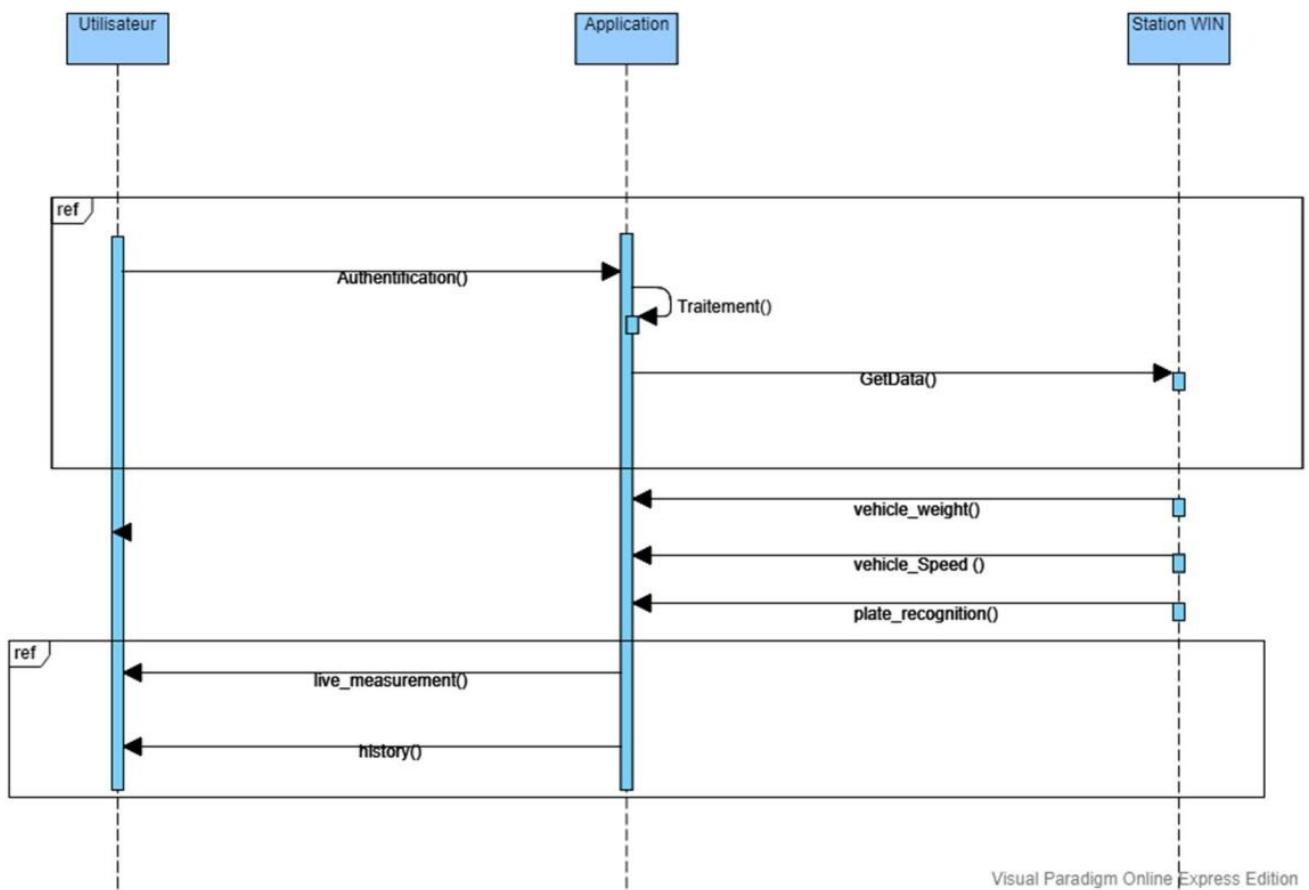


FIGURE 4.3: Diagramme de séquences.

4.1.5 Diagramme de blocs internes

Le diagramme de bloc interne modélise la structure interne d'un bloc. Il décrit les flux (MEI) et interactions entre des blocs qui caractérisent les fonctions. Un diagramme de bloc interne est obligatoirement un descendant d'un diagramme de bloc. On reconnaît le diagramme de bloc interne par les trois lettres ibd qui surplombent le diagramme.

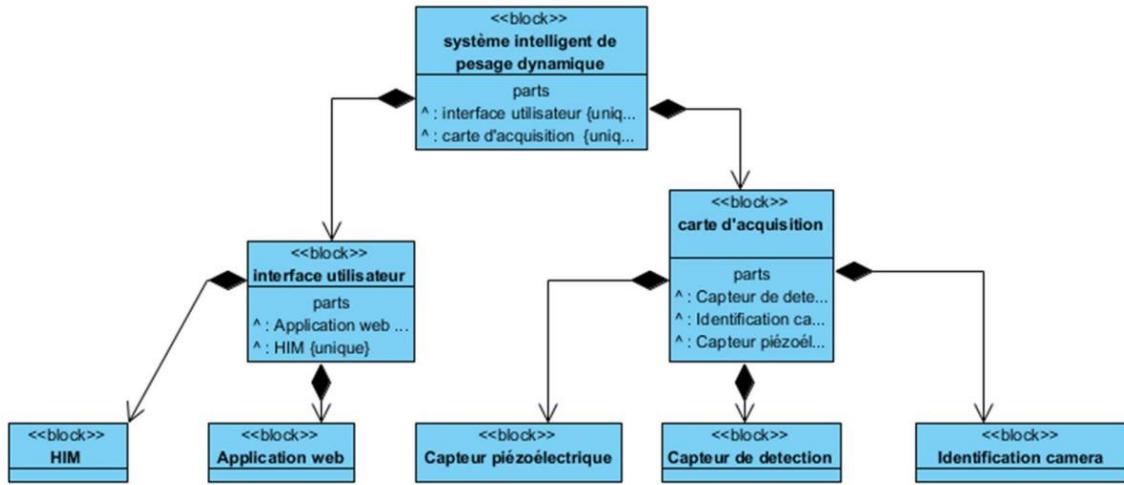


FIGURE 4.4: Diagramme de définition de blocs.

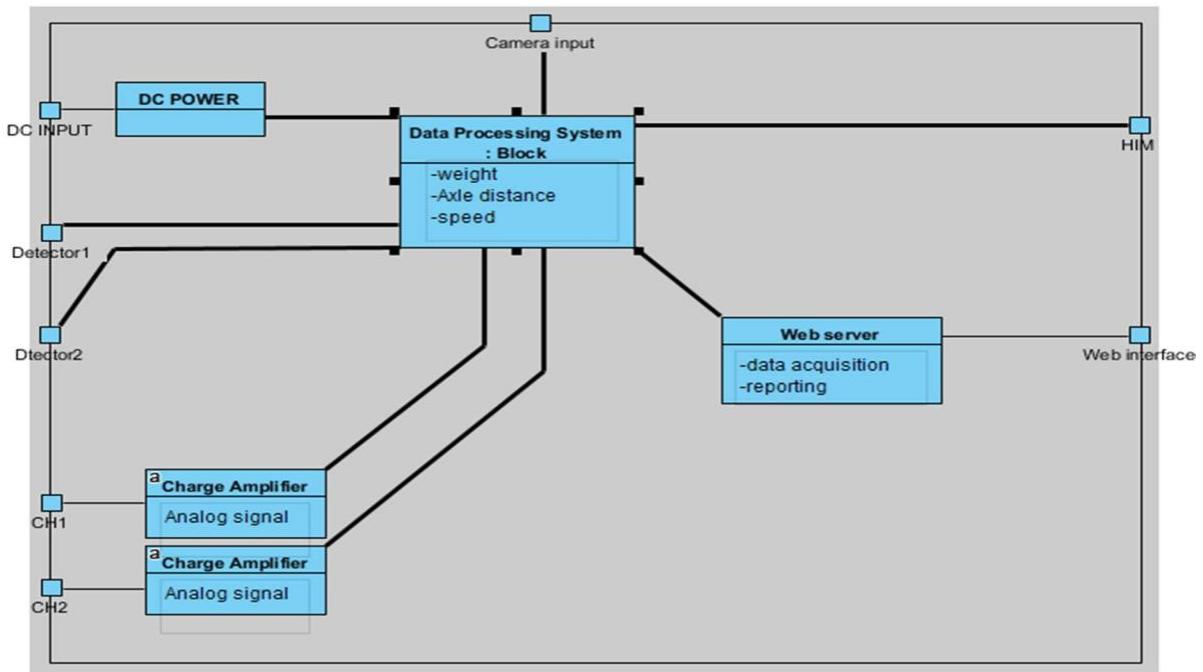


FIGURE 4.5: Diagramme de blocs internes.

4.2 Analyse organique

4.2.1 Principes fondamentaux de la piézoélectricité

4.2.1.1 Historique et généralité

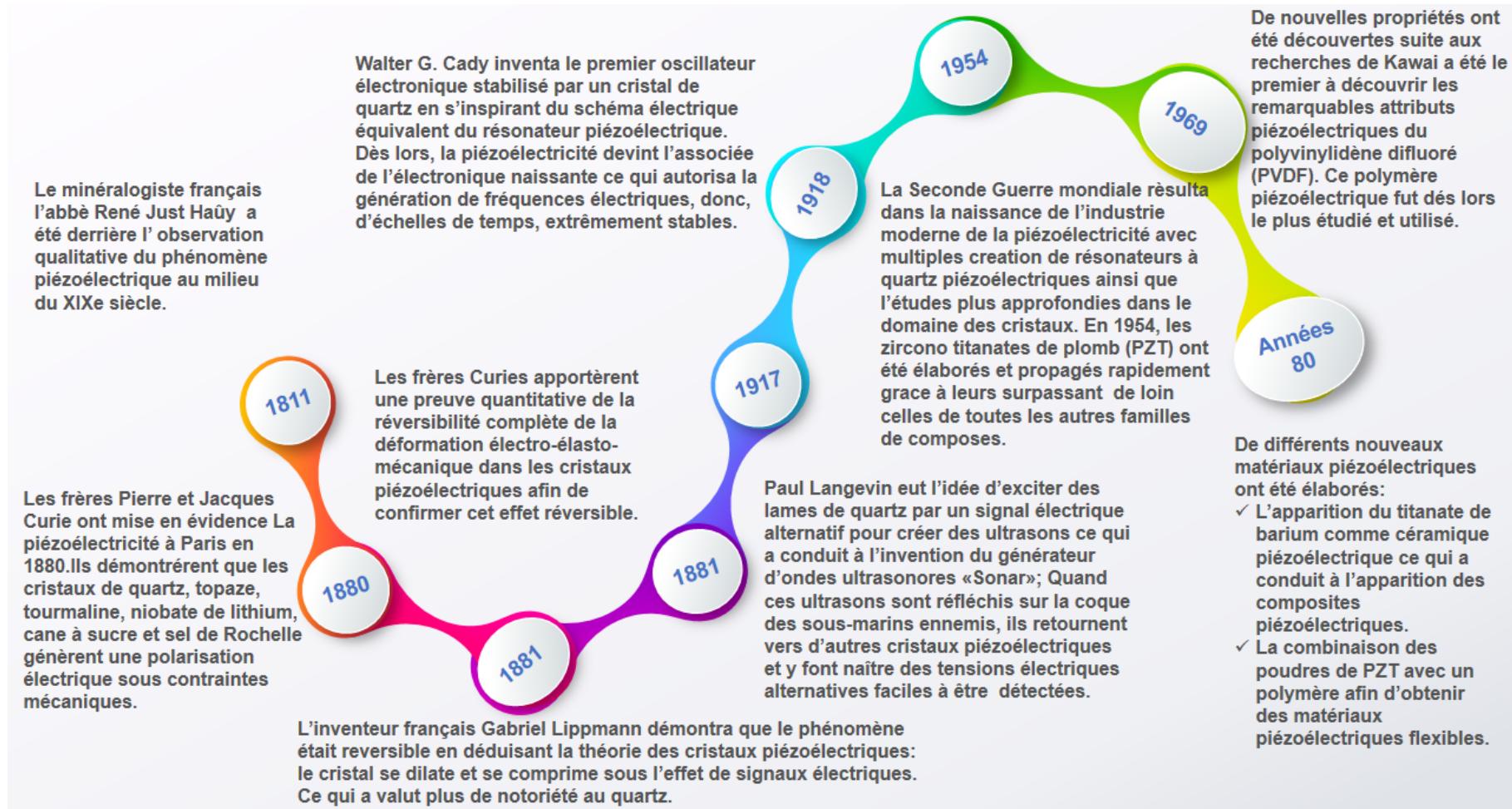


FIGURE 4.6: L'histoire de la piézoélectricité .

a. Effet piézoélectrique

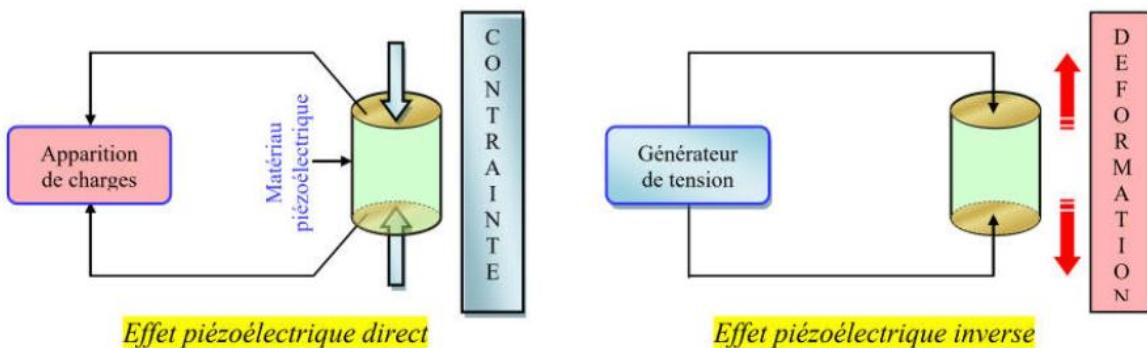


FIGURE 4.7: Illustration des effets piézoélectriques[10].

Certains matériaux (cristaux, céramiques ou polymères) ont l'attribut de se polariser sous l'influence d'une contrainte mécanique : c'est l'effet piézoélectrique direct. Tiré du mot grec "piézo" signifiant presser ou serrer, la piézoélectricité est le résultat de la polarisation qui est proportionnelle à une contrainte mécanique et s'adapte en changeant de signe avec elle. Ce phénomène a été prouvé réversible, comme vous pouvez le voir dans la partie de l'historique, par l'inventeur français Gabriel Lippmann et confirmé par la suite par les frères Curie : On parle d'un effet piézoélectrique inverse (figure 4.6) quand une polarisation électrique résultant de l'application d'un champ électrique entraînera une déformation d'un même matériau.

Comment cela est-il possible ? Une onde acoustique apparaissant dans le matériau oscille à une fréquence donnée ; appelée également une fréquence de résonance, et résulte dans l'application exploitée dans les oscillateurs à quartz. Cette onde est initialement déclenchée par l'application d'un champ électrique variable (champ électrique alternatif) entre les faces d'un matériau piézoélectrique.

b.Symétrie et piézoélectricité

L'effet piézoélectrique a été démontré principalement dans des solides cristallins anisotropes (pas de centre de symétrie dans le réseau cristallin) [24,25,26]. En cristallographie toutes les structures mentionnées sont classées selon 32 classes de symétrie définies car ce sont toutes des combinaisons différentes possibles entre les éléments de symétrie qui sont plans, axes et centres de symétrie. Onze de ces classes sont centrosymétriques et ne peuvent donc pas présenter de propriétés polaires ou de polarisation spontanée. L'une des 21 autres classes (classe cubique

432) possède des éléments de symétrie qui l'empêchent de présenter des caractéristiques polaires. Les 20 classes restantes ont au moins un axe polaire et ainsi les matériaux caractérisés par eux peuvent avoir des caractéristiques polaires telles que la piézoélectricité, la pyroélectricité et la ferroélectricité [27,28].. La figure 4.7 montre la position des matériaux piézoélectriques dans la hiérarchie des solides cristallins :

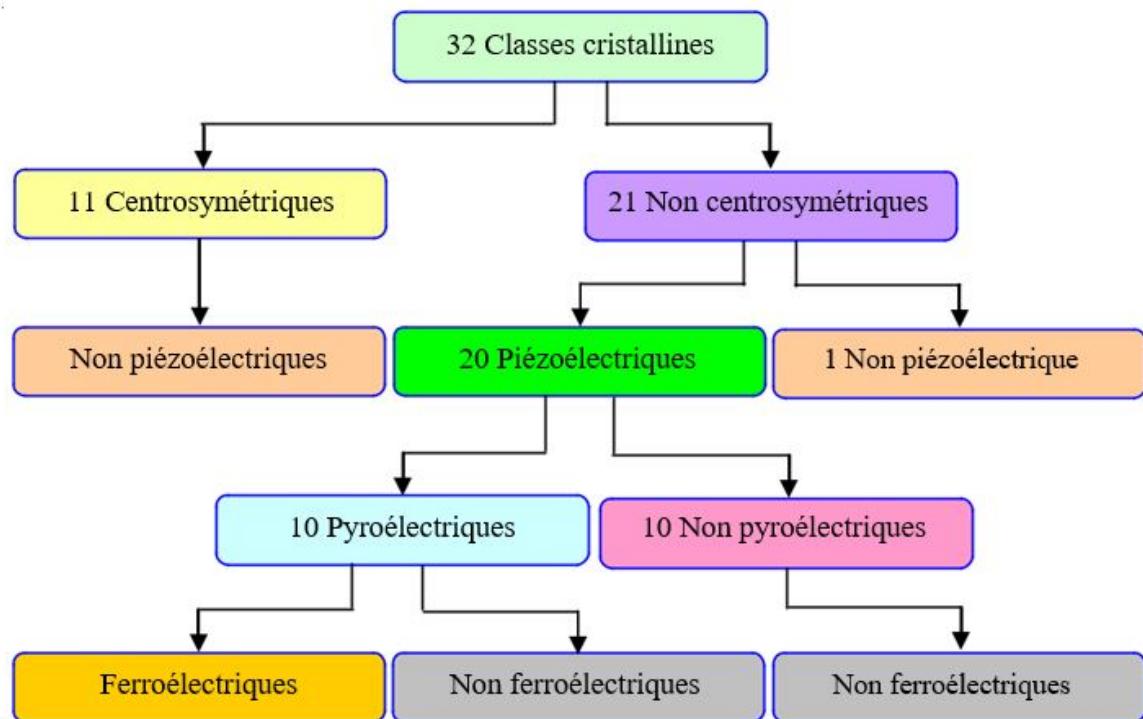


FIGURE 4.8: Organisation des différentes classes cristalline .

À l'échelle du cristal, la piézoélectricité elle-même se manifeste par la polarisation du réseau cristallin, et à l'échelle du réseau cristallin, c'est la symétrie du cristal qui détermine s'il est piézoélectrique. Tout objet avec un centre de symétrie ne peut pas être un corps piézoélectrique, et un cristal sans centre de symétrie peut être un corps piézoélectrique [29]. Un cristal avec un centre de symétrie ne peut pas être électriquement déséquilibré, il ne peut donc pas avoir de propriétés piézoélectriques (voir Figure 4.8.a) [30]. En effet, sous contrainte (flèches jaunes ou vertes), le déplacement des charges positives et négatives est le même dans toutes les directions, donc la structure reste équilibrée (c'est-à-dire que l'on observe toujours le même centre de symétrie). Or, si le cristal n'a pas de centre de symétrie, le phénomène représenté sur la figure 4.8.b peut être observé. Notez que la structure cristalline est formée de deux triangles équilatéraux

et que les sommets des deux triangles sont chargés positivement l'un sur l'autre et chargés négativement l'autre. Tant que le cristal n'est pas sollicité, les deux centres du triangle équilatéral sont les mêmes, et il n'y a pas d'effet piézoélectrique. Après avoir appliqué une contrainte le long de X ou Y, les centres des deux triangles équilatéraux se déplacent dans des directions opposées, ce qui déséquilibre la structure cristalline. L'effet piézoélectrique est lié à la possibilité de ce déséquilibre structurel, de sorte que seuls les cristaux dont la structure n'a pas de centre de symétrie sont piézoélectriques. De plus, nous pouvons voir que les deux centres se déplacent le long de l'axe X quelle que soit la contrainte appliquée (dans la direction Y ou X). Par conséquent, l'axe X est appelé axe électrique et l'axe Y est appelé axe mécanique. L'axe Z perpendiculaire à ces deux axes est appelé axe optique car la technologie optique est utilisée pour le positionner. De plus, il n'y a pas d'effet piézoélectrique lié à l'axe optique.

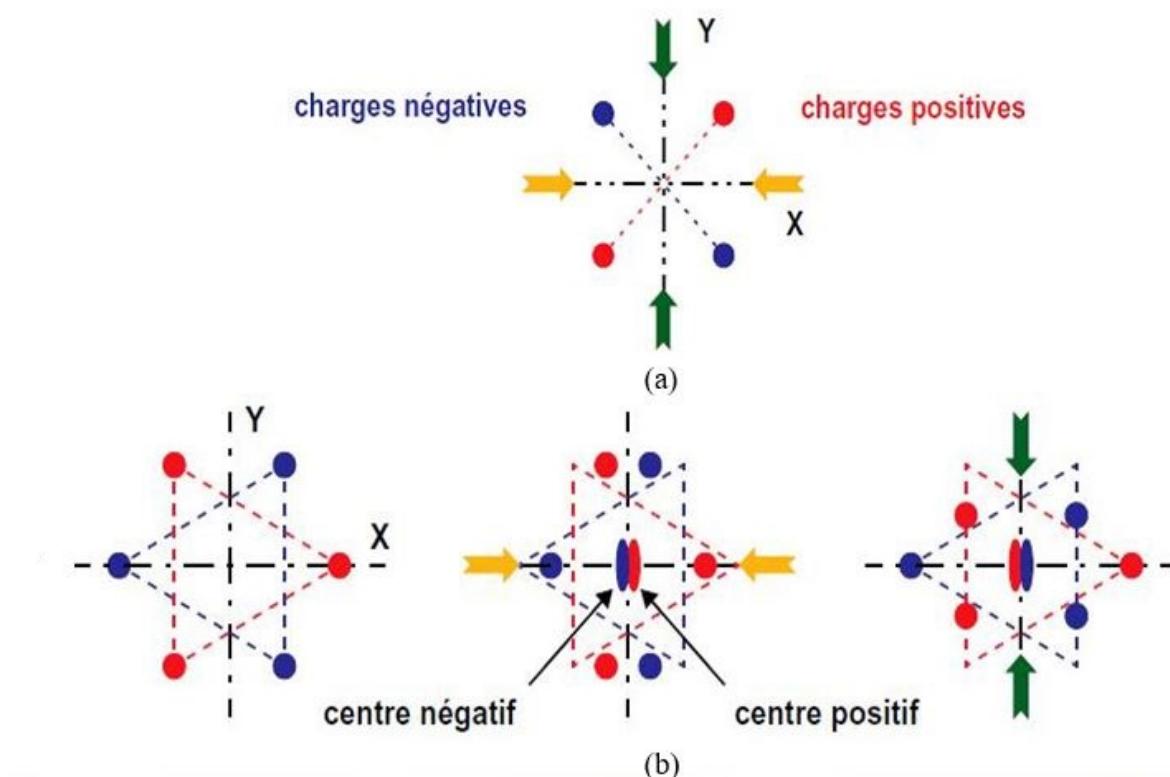


FIGURE 4.9: Représentation schématique de l'apparition de la piézoélectricité : (a) Cristal centrosymétrique (ou isotrope), (b) Cristal non centrosymétrique (ou anisotrope)[30].

4.2.1.2 Équations de la piézoélectricité

L'effet piézoélectrique est la conséquence d'un couplage entre le comportement électrique et mécanique d'un matériau piézoélectrique. Lorsque le phénomène de la pyroélectricité est négligeable (i.e. l'effet thermique est négligeable), l'effet piézoélectrique peut se traduire par les 8 équations fondamentales reliant les grandeurs électriques (champ électrique " E " et induction " D ") aux grandeurs mécaniques (contrainte " T " et déformation " S ") comme indiqué dans le tableau 4.1.[18,31]

Variables	Type	Relation piézoéle	Forme
T, E	Extensives	$S = s^E T + d^t E; D = d^T + \epsilon^T E$	Forme-d
S, D	Intensives	$T = c^D S - h^t D; E = -hS + \beta^S D$	Forme-h
T, D	Mixtes	$S = s^D T + g^t D; E = -gT + \beta^T D$	Forme-g
S, E	Mixtes	$T = c^E S + e^t E; D = eS + \epsilon^S ED$	Forme-e

TABLE 4.1: Équations de la piézoélectricité.

Le tableau 4.2 récapitule les différentes grandeurs électriques, mécaniques et piézoélectriques ainsi que leurs significations.

Symbol	Signification	Unité	Dimension
D	Déplacement électrique ou induction	C/m^2	(3 * 1)
E	Champ électrique	V/m	(3 * 1)
ϵ	Permittivité électrique	F/m	(3 * 3)
β	Constante d'imperméabilité diélectrique	m/F	(3 * 3)
S	Déformation relative	—	(6 * 1)
T	Contrainte mécanique	N/m^2	(6 * 1)
s	Compliance ou susceptibilité élastique	m^2/N	(6 * 6)
c	Raideur ou constante élastique	N/m^2	(6 * 6)
d	Coefficient piézoélectrique ($T, D \propto E = cte$)	C/N	(3 * 6)
e	Coefficient piézoélectrique ($S, D \propto E = cte$)	C/m^2	(3 * 6)
g	Coefficient piézoélectrique ($T, E \propto D = cte$)	Vm/N	(3 * 6)
h	Coefficient piézoélectrique ($D, E \propto D = cte$)	V/m	(3 * 6)

TABLE 4.2: Grandes électriques, mécaniques et piézoélectriques.

Avec :

- X^t est la transposé de la matrice X ;
- X^E indique que la grandeur X est considérée à champ électrique constant ;
- X^D indique que la grandeur X est considérée à induction électrique constante ;
- X^T indique que la grandeur X est considérée à contrainte constante. ;
- X^S indique que la grandeur X est considérée à Déformation constante.

Remarque :

- Le coefficient piézoélectrique d (ou e, g, h) est identique pour le comportement électrique et le comportement mécanique du matériau piézoélectrique. Ceci signifie que la piézoélectricité requiert l'interaction entre ces deux comportements ;
- Comme cas particulier, si le matériau est non piézoélectrique ($d = e = g = h = 0$), le comportement électrique et le comportement mécanique sont découplés.

4.2.1.3 Caractéristiques électriques et mécaniques des matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques possèdent des performances différentes d'un matériau à un autre. Pour quantifier ces performances, plusieurs coefficients sont définis. Parmi eux, nous citerons :

a. Permittivité « $\epsilon_{i,j}$ »

La permittivité $\epsilon_{i,j}$ d'un matériau piézoélectrique détermine la charge par unité de surface due au champ électrique appliqué[32,33]. Elle est suivie de deux indices. Le premier indice désigne la direction du déplacement électrique ; le second celui du champ électrique.

- $\epsilon_{i,j}^T$ est la permittivité à force constante caractérisant un échantillon libre ;
- $\epsilon_{i,j}^S$ est la permittivité à déformation constante caractérisant un échantillon encastré.

b. Compliance élastique « $s_{i,j}$ »

La compliance élastique $s_{i,j}$ est définie comme le rapport de la déformation relative sur la contrainte mécanique appliquée[34]. Elle est suivie de deux indices. Le premier indice désigne la direction de la déformation relative ; le second celui de la contrainte mécanique.

- $s_{i,j}^E$ est la compliance à champ électrique constant;
- $s_{i,j}^D$ est la compliance à déplacement électrique constant.

c. Constante de charge piézoélectrique « $d_{i,j}$ »

Le coefficient de charge $d_{i,j}$ est la constante de proportionnalité entre le déplacement électrique et la contrainte mécanique (ou la déformation relative et le champ électrique). Il est suivi de deux indices. Le premier indice désigne la direction du déplacement électrique (ou du champ électrique); le second celui de la contrainte mécanique (ou déformation relative). Puisque la contrainte induite dans un matériau piézoélectrique par application d'un champ électrique est le produit de la valeur du champ électrique et de la valeur du coefficient de charge, les matériaux piézoélectriques qui se caractérisent par des coefficients de charges élevés sont plus souvent utilisés comme actionneurs que comme capteurs.[32,35]

e. Coefficient de couplage électromécanique « $k_{i,j}$ »

Un matériau piézoélectrique est caractérisé dynamiquement par son coefficient de couplage c'est-à-dire sa capacité à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement. Cette transformation d'énergie est utilisée dans les capteurs et actionneurs à base de matériaux piézoélectriques. Ce paramètre est toujours inférieur à 1 parce que la conversion d'énergie est toujours inachevée[35,36]. Il s'écrit :

$$k_{i,j}^2 = \frac{\text{Energie transformée}}{\text{Energie appliquée}}$$

Le coefficient de couplage peut s'exprimer en fonction des électromécaniques du matériau et selon le mode de déformation considéré[32] :

$$k_{i,j}^2 = \frac{d_{i,j}^2}{\epsilon_{i,j}^T s_{i,j}^E}$$

e. Facteur de qualité « Q »

Pour les matériaux piézoélectriques, nous définissons deux facteurs de qualité qui permettent de mesurer l'influence des pertes diélectriques et mécaniques [22,37,38]. Le facteur de qualité mécanique Q_m est relié à la résistance R_m , la capacité C_m , l'induction L_m et la pulsation ω tel que :

$$Q_m = \frac{1}{R_m C_m \omega} = \frac{L_m \omega}{R_m}$$

Ce paramètre est égal aussi au rapport de la fréquence centrale sur la largeur de bande :

$$Q_m = \frac{f_c}{f_2 - f_1}$$

Avec :

- f_c est la fréquence centrale du matériau piézoélectrique ;
- f_1 et f_2 sont les fréquences à $-3dB$ en dessous et au-dessus de f_c .

Le facteur de qualité électrique Q_e qui correspond au rapport entre la capacité C_0 du matériau piézoélectrique et la résistance R_0 symbolisant les pertes diélectriques tel que :

$$Q_e = \frac{1}{R_0 C_0 \omega}$$

Ces facteurs aussi appelés facteurs de surtension donnent le taux d'amplification de la structure à la résonance mécanique ou électrique. En effet, les matériaux piézoélectriques peuvent résonner électriquement ou mécaniquement. Ces fréquences de résonance ne sont pas forcément confondues. Un facteur de qualité élevé traduit un amortissement de la structure faible et donc une minimisation des pertes.

4.2.1.4 Modes de déformation d'un matériau piézoélectrique

Le matériau piézoélectrique se déforme dans différentes manières à différentes fréquences. Ces diverses déformations s'appellent les modes de déformation. Du fait de l'anisotropie des matériaux piézoélectriques, leur déformation se fait selon une direction privilégiée sous l'action d'un champ électrique E .

Une étude des propriétés de ces matériaux nécessite donc une identification des directions. La figure 4.9 illustre ces modes dans le cas d'un barreau parallélépipédique de céramique piézoélectriques. D'une manière générale, une céramique piézoélectrique est référencée par un trièdre (O, x_1, x_2, x_3). Par convention, la direction et le sens de la polarisation sont confondus avec l'axe 3, pour un mode $i\lambda$, i correspond à l'axe d'orientation du champ électrique appliqué et λ à l'axe de la déformation mécanique générée ($i = 1, 2, 3, \lambda = 1, 2, 3, 4, 5, 6$).

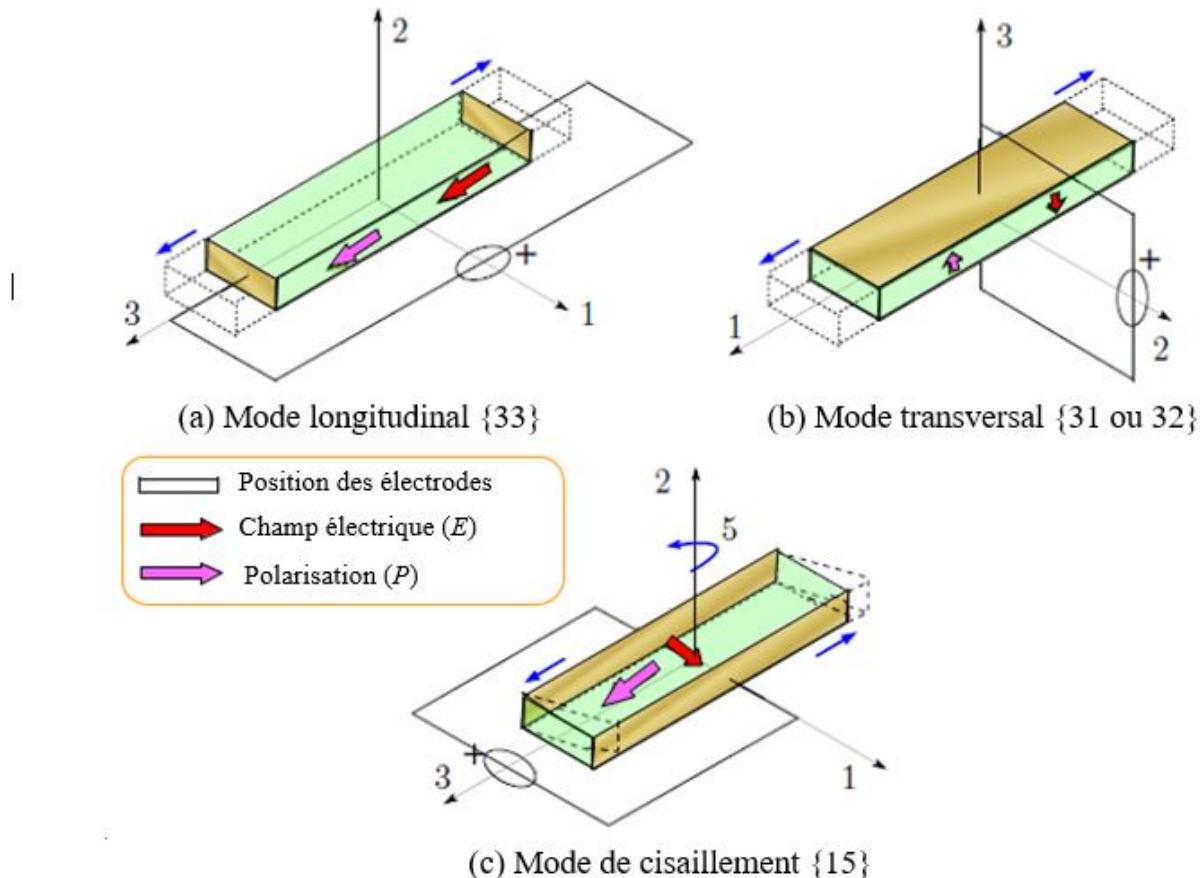


FIGURE 4.10: Modes de déformation principaux d'un matériau piézoélectrique[39].Les traits en pointillés montrent la déformation mécanique obtenue.

a. Mode longitudinal 33

Le mode longitudinal traduisant des déformations dans la même direction que l'axe du champ électrique. Ce mode possède un bon coefficient de couplage, cependant le placement des électrodes sur les surfaces vibrantes les fragilise.

b. Mode transversal 31 ou 32

Le mode transversale traduisant des déformations perpendiculaires à l'axe du champ électrique. Dans ce mode, les électrodes ne sont pas placées sur les surfaces subissant les déformations, donc offrant l'avantage de ne pas soumettre les électrodes à la contrainte. En revanche, il possède un coefficient de couplage moindre que le mode longitudinal.

c. Mode cisaillement 15

Le mode de cisaillement traduisant des déformations perpendiculaires à la direction de polarisation ou autour d'un axe. La céramique subit alors un phénomène de torsion autour de

l'axe choisi. Elle est obtenue lorsque le champ appliqué est perpendiculaire à la polarisation du matériau. Par exemple, si le champ est appliqué sur l'axe 1, la déformation se fera autour de l'axe 2 (rotation associée à l'indice 5).

* Autres modes de déformation

D'autres modes de déformation « parasites » résultant de la forme particulière de l'échantillon peuvent apparaître[37]. Ils sont d'origine mécanique par exemple, des déformations perpendiculaires à l'épaisseur (mode radial traduit par le coefficient de Poisson comme présenté sur la figure 4.10) ou d'origine électrique par déplacement dipolaire (modification des parois de blocs). En jouant sur la forme de l'échantillon (plaqué, tube, ...) et sur sa polarisation (uniforme, radiale,...), une grande variété de déformations peuvent être exploitées. Il est à noter que lors de l'utilisation d'une céramique piézoélectrique, plusieurs modes interagissent simultanément. Ces modes parasites sont souvent négligés : les dimensions des structures sont choisies pour que ces hypothèses soient vérifiées. Par exemple, il est préférable de privilégier une longueur nettement supérieure à l'épaisseur pour utiliser le mode 33.

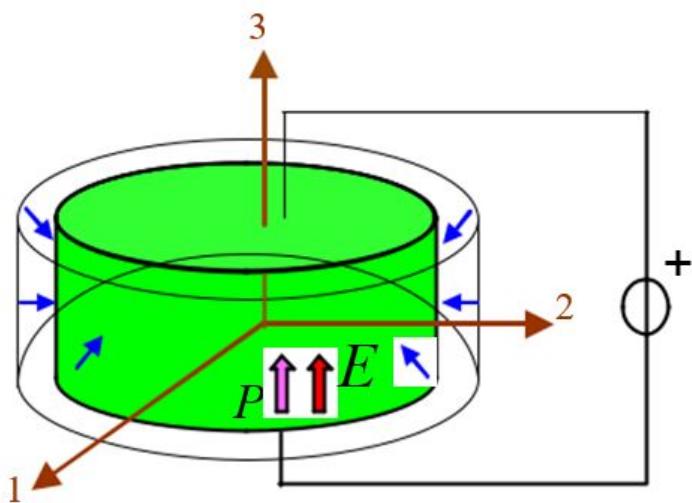


FIGURE 4.11: Déformation parasite par conservation du volume. Pour une déformation longitudinale, la conservation du volume introduit un mode transversal mécanique[37].

4.2.2 Quelques applications des matériaux piézoélectriques

Nous allons à présent citer quelques applications des matériaux piézoélectriques actuellement développées

4.2.2.1 Transformateurs piézoélectriques

Dans un transformateur électromagnétique, l'énergie électrique d'entrée est convertie en énergie magnétique, puis l'énergie magnétique est reconvertisse en énergie électrique de sortie. Le transformateur piézoélectrique a un principe de fonctionnement analogue. Il convertit l'énergie électrique d'entrée en une énergie mécanique (i.e. ondes acoustiques) et puis reconvertisse l'énergie mécanique en une énergie électrique de sortie[32,40].

Le transformateur piézoélectrique est une combinaison d'un actionneur et d'un transducteur piézoélectriques, qui servent de primaire et de secondaire respectivement comme le montre la figure 4.11. L'actionneur convertit la tension V_e en vibration mécanique, cette dernière est ensuite reconvertisse en tension V_s par le transducteur. Le rapport de V_s sur V_e dépend des dimensions géométriques, facteur de couplage électromécanique, facteur de qualité mécanique et la résistance de charge R_L . Le transformateur piézoélectrique a plusieurs avantages par rapport au transformateur électromagnétique, tel que le poids et le volume inférieurs, le meilleur isolement et l'absence du bruit électromagnétique.

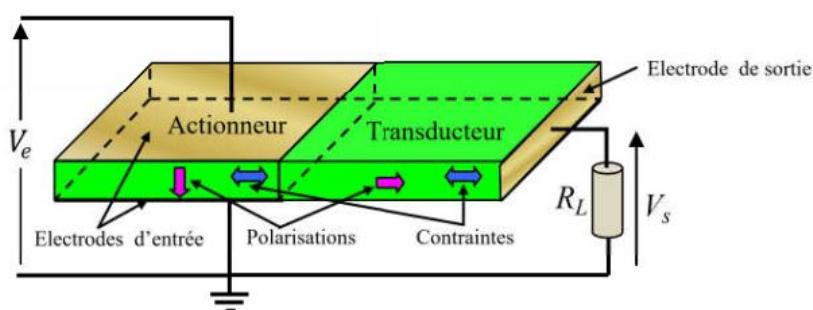


FIGURE 4.12: Transformateur piézoélectrique « Type de Rosen »[40].

4.2.2.2 Chaussures piézoélectriques

Le corps humain stocke, dissipe et peut produire une énergie considérable eu égard à la consommation de nos appareils électroniques portables habituels.

Il convertit de l'énergie constamment (mouvements, respiration, chaleur...), et on peut considérer qu'il s'agit d'une énergie renouvelable, gratuite, non polluante et de durée de vie élevée (figure 4.12.a). Même si, bien sûr, une faible part de cette énergie est exploitable, il semble que l'énergie associée aux mouvements du corps humain peut permettre d'approvisionner bon nombre d'applications et de réduire, voire supprimer les problèmes de recharge et de dépendance aux réseaux électriques ou aux piles. Cela requiert de convertir en électricité une partie de l'énergie dépensée, par des moyens à déterminer en fonction des ressources, des solutions technologiques envisageables et des besoins. Les dispositifs piézoélectriques permettent de convertir en électricité l'énergie des mouvements humains [41,42].

La figure 4.12.b montre une chaussure piézoélectrique capable de convertir en électricité l'énergie générée lors de la marche. Deux dispositifs piézoélectriques sont implantés dans la chaussure :

- Un dispositif formé de deux rubans précontraints et incurvés de céramique PZT, placé dans le talon. L'énergie récupérée (charge adapté de 500kg) : 8.4mw ;
- Une feuille de PVDF flexible, placée dans la semelle, récupère l'énergie des mouvements de flexion pendant chaque pas. L'énergie récupérée (charge 250kg) : 1.3mW.

4.2.2.3 Actionneurs bilames

Les actionneurs à base des couches épaisses piézoélectriques sont employés dans de nombreux microsystèmes. L'actionneur bilame est le système le plus simple : la couche épaisse piézoélectrique est déposée sur un substrat. Suivant le sens de la tension appliquée, le substrat se déforme comme l'illustre la figure 4.13.a. Quelques systèmes sont présentés avec des céramiques massives de fine épaisseur. Pour remplacer les ventilateurs rotatifs encombrants et bruyants, une équipe américaine propose l'utilisation d'un bilame couplé à une petite plaque métallique très fine pour ventiler certains composants électroniques placés dans les ordinateurs. Ce bilame est

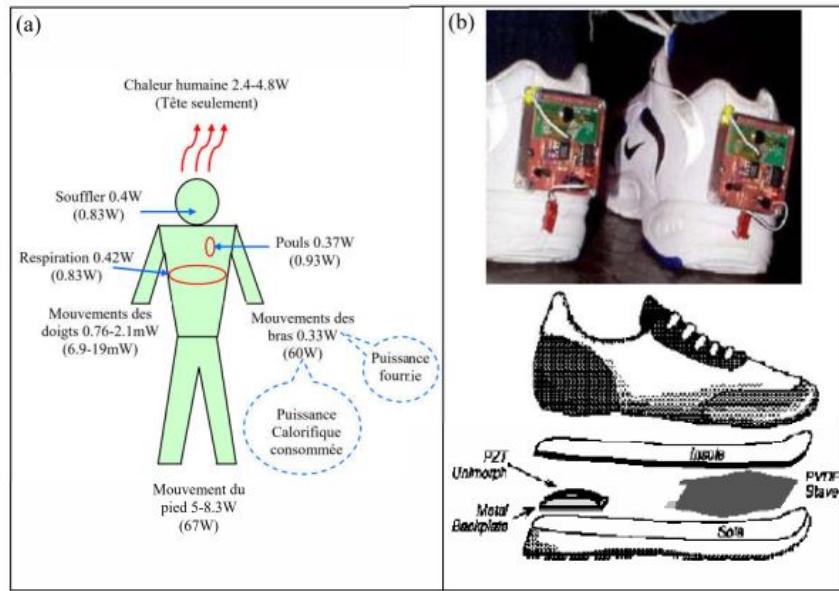


FIGURE 4.13: (a) Quelques valeurs de puissances produites par le corps humain, (b) Implantation du matériel piézoélectrique dans une chaussure et vue d'un convertisseur de remise en forme de la tension[41].

actionné grâce deux céramiques massives amincies à $300\mu\text{m}$ environ, puis collées de chaque côté de la plaque métallique à faire vibrer (cf. figure 4.13.b).

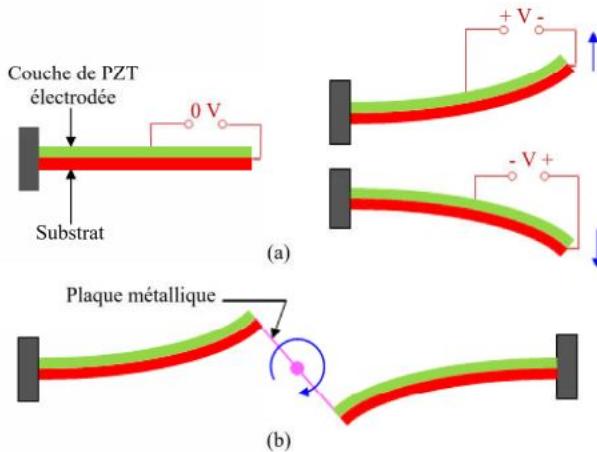


FIGURE 4.14: (a) Déformation d'une poutre par application d'une tension (b) Bilame couplé à une petite plaque métallique très fine[10].

4.2.2.4 Le pesage en mouvement (dynamique)

L'invention concerne un système de pesage en mouvement piézoélectrique de véhicules possédant des capteurs piézoélectriques sensiblement perpendiculaires au sens de circulation

sur une autoroute.

Chaque capteur piézoélectrique comprend au moins un élément piézoélectrique configuré pour produire un signal électrique indiquant la force appliquée sur ledit capteur par un véhicule passant sur ledit capteur; et un processeur recevant des signaux des dits capteurs piézoélectriques, ledit processeur étant capable de déterminer la vitesse à laquelle ledit véhicule est passé sur lesdits capteurs et la charge dudit véhicule lorsqu'il se déplace à la vitesse de circulation normale.

La station d'analyse de trafic routier, permet de mesurer plusieurs données d'un véhicule circulant sur une voie à haute vitesse (+ de 20km/h). A l'aide de capteurs piézoélectriques intrusifs, notre système fournit les données suivantes :

- Le poids ;
- La vitesse ;
- La longueur ;
- Le nombre d'essieux ;
- La détection des roues jumelées (selon l'implantation des capteurs dans la chaussée) ;
- La distance inter-essieux ;
- La catégorie ;



FIGURE 4.15: Pesage en mouvement.

4.2.3 Conditionnement du signal de capteur piézoélectrique

4.2.3.1 Analyse du signal WIM

L'objectif du traitement des signaux WIM est de convertir les sorties de tension des signaux de l'amplificateur de charge en données de charge par essieu et d'espacement des essieux pour chaque véhicule. Puisque l'essieu La détermination de l'espacement est simple et se fait sur la base des pics de tension du signal en amont et les capteurs piézoélectriques en aval, cette section se concentre sur la charge par essieu calcul.

Deux principes doivent être pris en compte dans le signal de charge à l'essieu traitement. Le premier est l'empreinte du pneu. La longueur de l'empreinte, contrôlée par le diamètre, la pression de gonflage et la charge sur le pneu, est toujours plus large que la largeur du capteur piézoélectrique (5cm). Par conséquent, la crête du signal ne représente pas la charge totale des roues mais plutôt une partie de la charge totale.

La figure 4.15 illustre la relation entre la charge et la longueur de l'empreinte d'une voiture particulière sous différents pneus les pressions inflationnistes[43]. Il convient de noter que des pressions inflationnistes plus faibles génèrent une longueur de l'empreinte avec un signal de crête plus faible. Comme toute combinaison de longueur de contact est possible, aucune hypothèse ne peut être faite quant à la longueur des empreintes de pneus. Toutefois, une La relation importante entre l'empreinte du pneu et la force est que l'aire sous la courbe est constante tant que la même charge est appliquée.

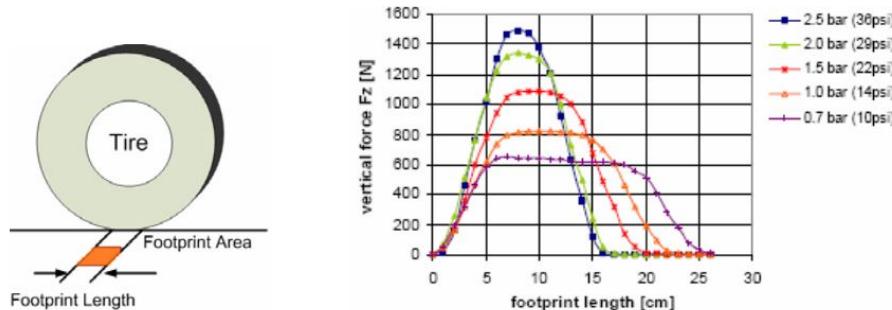


FIGURE 4.16: Longueur de l'empreinte sous différentes pressions de gonflage des pneus[43].

Un deuxième aspect du signal de charge à l'essieu est l'effet de la vitesse. La figure 4.16 montre un exemple de signaux d'essieux sous différentes vitesses. Notez que la surface sous le signal de l'essieu est approximativement inversement proportionnelle à la vitesse [43]. Bien que cette hypothèse soit généralement acceptée dans la conception des systèmes WIM, cette relation ne tient que si aucune force externe supplémentaire, comme le vent, n'influence la charge du capteur.

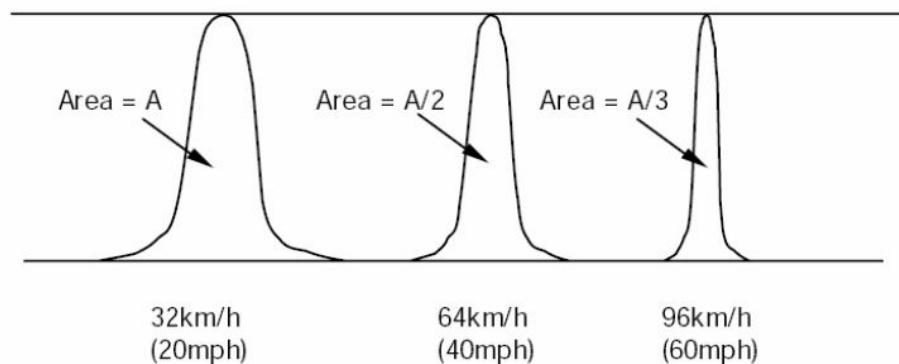


FIGURE 4.17: Signaux d'essieux à différentes vitesses[44].

Le diagramme de signal de la figure 4.17 est utilisé pour illustrer la charge à l'essieu des méthodes de calcul utilisant le signal WIM numérisé. Le signal de charge est détecté lorsque l'amplitude du signal dépasse un seuil prédéfini par rapport au niveau de repos. Une fois que la présence de le signal de charge par essieu est détecté, le signal entre $[t_1 - \Delta t, t_2 + \Delta t]$ est utilisé pour le poids où Δt est une constante proportionnelle au seuil. Il convient de mentionner que le niveau de repos du signal ne reste pas constant car il s'agit de la sortie d'un amplificateur de charge.

La sortie de l'amplificateur de charge doit être considérée comme deux signaux : le signal de ralenti changeant lentement au fil du temps et le signal de charge des roues changeant rapidement au-dessus du ralenti niveau. Par conséquent, le niveau de ralenti, $b(t)$, est déterminé en séparant les du signal global.

Il existe trois méthodes de calcul de la charge à l'essieu pour les systèmes WIM. Chacune est décrite ci-dessous.

Méthode 1 : Tension de crête

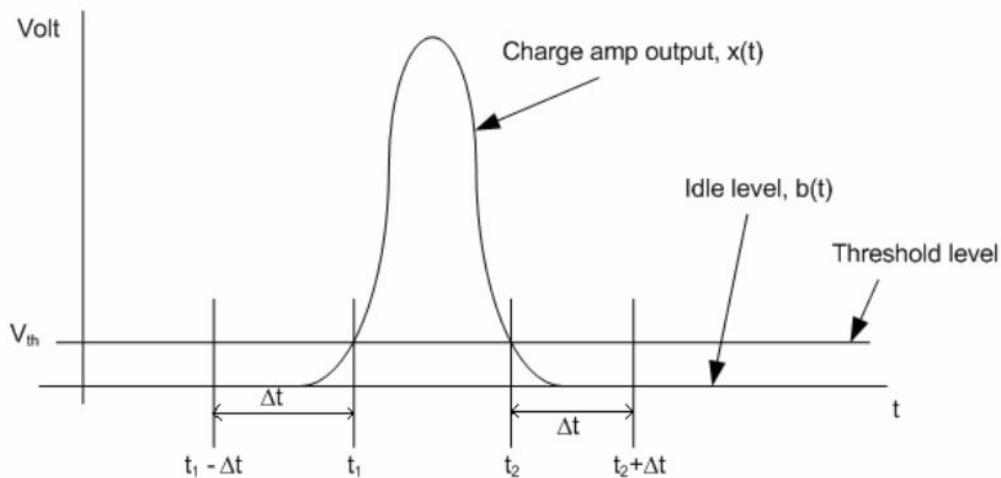


FIGURE 4.18: Signal de sortie de l'amplificateur de charge d'un seul essieu ou d'une charge de roue.

Cette approche est utilisée pour certains produits commerciaux et est très simple. La charge à l'essieu est simplement calculée en utilisant la tension de crête du signal par,

$$\omega = \alpha \text{ peak}(x_i)$$

où $\text{peak}(x_i)$ est la valeur de crête du signal numérisé $x(t)$ et α est un facteur de calibrage qui doit être déterminé en utilisant une charge d'essieu connue [44].

Cette méthode est basée sur la relation entre la charge à l'essieu et la vitesse. Il s'agit de illustrée à la figure 4.16, où la tension de crête générée par le même véhicule ne changent pour des vitesses différentes. Toutefois, cette hypothèse est incorrecte puisque la pointe change si la pression de gonflage des pneus n'est pas constante, comme l'illustre la figure 4.15. L'utilisation de la méthode simplifiée, la précision est compromise au profit de la simplicité. L'un des avantages de cette méthode est qu'une mesure de la vitesse n'est pas nécessaire. Ainsi, cette méthode pourrait être utilisée dans les applications où la précision du poids n'est pas importante, comme le comptage de volume de trafic et/ou la classification.

Méthode 2 : Zone sous le signal

Cette méthode de calcul de la charge par essieu a été recommandée à l'origine par **Kistler** et a été utilisée dans de nombreux produits commerciaux [43]. Cette méthode permet de calculer les charges par essieu en utilisant l'aire sous la courbe du signal et la vitesse du véhicule en marche. Le poids est calculé à l'aide de,

$$\omega = \frac{\alpha S \int_{t_1 - \Delta t}^{t_2 + \Delta t} (x(t) - b(t)) dt}{L} \quad (1)$$

où L est la largeur du capteur, S est la vitesse du véhicule, $x(t)$ est le signal de charge, et $b(t)$ est le niveau de ralenti à variation lente. De même, il est écrit sous forme numérique comme,

$$\omega = \frac{\alpha S \sum_i (x_i - b_i)}{L} \quad (2)$$

Avis des Équations (1) et (2) que les mesures précises du poids sont directement proportionnel à la mesure de la vitesse. Ainsi, une mesure précise de la vitesse est essentielle pour cette méthode, c'est pourquoi deux rangées de capteurs sont utilisées. Cette méthode nécessite un calibrage, comme la méthode de la tension de crête, à déterminé α .

Méthode 3 : Ré-échantillonnage de la zone (English : Re-sampling of area)

Cette méthode a été conçue à l'origine par le Dr. **Taek Kwon** et a été utilisée dans cette recherche [3,30]. Une observation attentive révèle que l'aire sous la courbe du signal n'est pas une représentation de la charge réelle par essieu mais une convolution de la charge par rapport à la largeur du capteur [44]. Supposons que la charge soit un bloc rectangulaire de la même largeur que l'empreinte du pneu et le même poids que la charge à l'essieu. Le capteur est monté au ras de la mesure surface. Faire glisser le bloc rectangulaire sur le capteur devrait avoir le même effet qu'un véhicule en mouvement. Alors que le bloc se déplace lentement, la charge sur le capteur se chevauche clairement pour la durée de la largeur du capteur. Par conséquent, la zone sous le signal n'est pas une le poids exact du bloc, à moins que la largeur du capteur soit presque égale à zéro. Cette méthode est comme une version améliorée de la **méthode 2**. Tout d'abord, une période de mesure doit être déterminée en utilisant la largeur du capteur et la vitesse du véhicule comme,

$$T_L = \frac{L}{S}$$

Les points de mesure sont ensuite déterminés comme,

$$[t_1 - \Delta t + T_L, t_1 - \Delta t + 2T_L, \dots, t_1 - \Delta t + NT_L]$$

Où,

$$N = \frac{(t_1-t_2)+2\Delta t}{T_L}$$

Ensuite, imaginez que le bloc est divisé verticalement en N tranches, la largeur du bloc étant égale à la largeur du capteur. Chaque tranche est alors mesurée une par une de façon indépendante en s'alignant précisément sur le capteur. Chaque tranche indique la période de mesure depuis qu'elle ne doit être mesurée qu'une seule fois, comme le montre la figure 4.18. Le poids de chaque tranche se reflète alors dans l'échantillon précédent au cours de la période de mesure. Si la mesure de la j^{me} tranche est notée x_j (volt), elle peut s'écrire comme suit :

$$x_j = \gamma G w_j$$

Où, γ est la sensibilité du signal piézoélectrique (pC/N), G est le gain de l'amplificateur de charge (V/pC), et w_j est le j^{me} poids de tranche (N). Le poids total du bloc est simplement une somme des différentes tranches comme indiqué dans l'équation (3).

$$\omega = \frac{\sum_j^N (x_j - b_j)}{\gamma G} \quad (3)$$

Remarquez que cette méthode ne nécessite pas de facteur d'étalonnage α , mais utilise plutôt la sensibilité mesurée en usine γ .

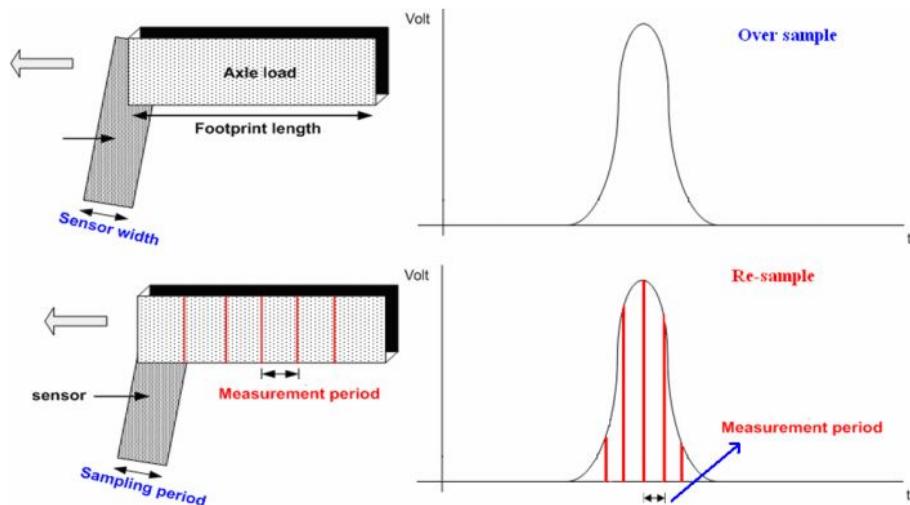


FIGURE 4.19: Zone sous signal (Méthode 2) Vs Ré-échantillonnage de la zone (Méthode 3).

4.2.3.2 Calcul de la vitesse, de la distance entre les essieux et du poids des véhicules

a. Calcul de la vitesse

La vitesse du véhicule est déterminée à l'aide de l'espacement connu entre les bandes de capteurs et du temps de parcours entre les bandes. Le temps de crête de la tension de chaque essieu dans les capteurs en amont est soustrait des pics correspondants en aval, puis on en fait la moyenne. La vitesse est calculée en utilisant :

$$S = \frac{D_{sensor}}{\Delta_{peaks}}$$

Où,

- S : Capteur de vitesse (mètres/seconde)
- D_{sensor} : La distance entre les capteurs WIM amont et aval (mètres)
- Δ_{peaks} Le nombre de périodes d'échantillonnage entre les pics en amont et en aval correspondants.

b. Calcul de la distance entre les essieux

La distance entre les essieux est calculée en utilisant la vitesse du véhicule et le temps de parcours entre les essieux consécutifs. La formule utilisée est indiquée en équation suivant :

$$D_{axle} = \frac{S}{\Delta_{axle-axle}}$$

Où,

- S : Vitesse (mètres/seconde) ;
- D_{axle} : Emplacement entre essieux (mètres) ;
- $\Delta_{axle-axle}$: Le nombre de périodes d'échantillonnage entre les pics de deux les signaux d'essieux.

c.Calcul du poids

Le poids est calculé à partir de la somme des signaux de tension ré-échantillonnes ($\sum_i v_i$).

Chaque tension est la différence entre la tension réelle et le niveau de ralenti. La formule de calcul finale est donnée dans l'équation suivant :

$$Axe_{weight} = \frac{\sum_i v_i C_m}{9.81 v_{ch} \gamma}$$

Où,

- 9,8 : Constante gravitationnelle $9,8 m/s^2$ pour convertir de Newton en kilogramme ;
- v_{ch} (=5 Volt) : Sortie maximale de l'amplificateur de charge ;

- $C_m = (=60\ 000)$: Puissance de charge maximale, 60 000 pC;
- γ : Sensibilité du capteur en pico-coulombs par Newton.

La charge à l'essieu peut être convertie en tonnes selon les besoins. Le poids brut du véhicule est simplement la somme de tous les poids des essieux.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons détaillé les phases de conception du système de pesage dynamique en entier, ensuite nous nous sommes intéressés par la conception du système de pesage mode autonome. Cette conception est nécessaire à la phase de la réalisation qui fera l'objet du chapitre suivant.

Réalisation du prototype de système de pesage dynamique

Introduction

La conception est le processus créatif de transformation du problème en solution, elle part des besoins exprimés, des moyens existants et des possibilités technologiques et aboutit à la définition d'un produit industriellement réalisable satisfaisant ces besoins.

Lors de ce chapitre, nous présentons le cœur du métier; il s'agit de la conception et de la réalisation des différents éléments de notre système.

5.1 Description de prototype

Le prototype sera principalement composé d'une unité de traitement pour l'acquisition des données et leurs traitements, une unité de mesure constituée des capteurs piézoélectrique, des capteurs de détection, une unité d'énergie (ou l'autonomie du système), une unité de communication (interne et sans fil), un environnement logiciel permettant la programmation et le développement de l'IHM qui permet d'afficher les données à traiter (le poids de camion, la vitesse, l'immatriculation, etc.).

5.1.1 Schéma synoptique

Le but de ce schéma est d'avoir une vue globale sur les différents éléments qui rentrent en jeu dans notre prototype :

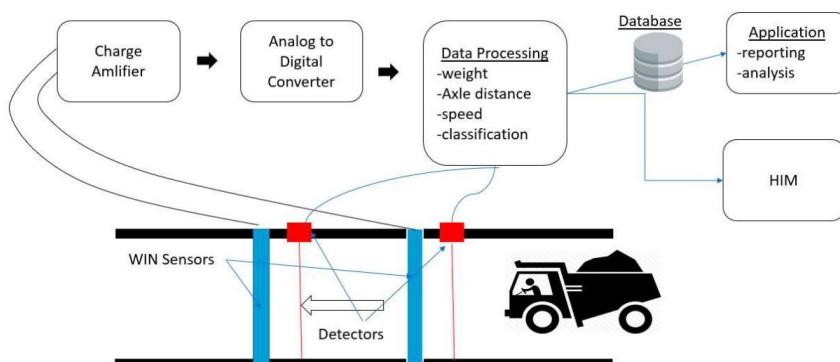


FIGURE 5.1: Schéma synoptique.

5.1.2 Matériel utilisé

5.1.2.1 Capteur de pesage en mouvement (WIM)

Les capteurs à quartz piézoélectrique de type 9195 de Kistler (illustrés à la figure 5.2) ont été largement acceptés par les services de transport, les longueurs typiques sont d'un mètre ou de trois quarts de mètre. Le capteur à quartz se compose d'un cadre en métal extrudé (alliage d'aluminium) qui supporte plusieurs disques de quartz préchargés. Les éléments en quartz sont câblés ensemble et disposés de manière à produire une sortie uniforme quel que soit l'endroit où la force est appliquée sur la longueur du capteur. Le capteur est isolé des forces latérales par un matériau élastique spécial.

Le capteur est installé perpendiculairement à la circulation en découpant une fente dans la chaussée et en utilisant un époxy / coulis spécial pour maintenir le capteur en place. Celles-ci sont généralement installées au ras de la surface, sur des revêtements de chaussée en béton ou en asphalte existants ou nouveaux.



FIGURE 5.2: Capteur à quartz piézoélectrique de type 9195 de Kistler.

Le capteur utilise la technologie de détection de force à cristaux de quartz. Avec les éléments de mesure à quartz piézoélectriques dans le capteur, la sortie du capteur piézoélectrique est une charge électrique proportionnelle à la force verticale appliquée $F(z)$.

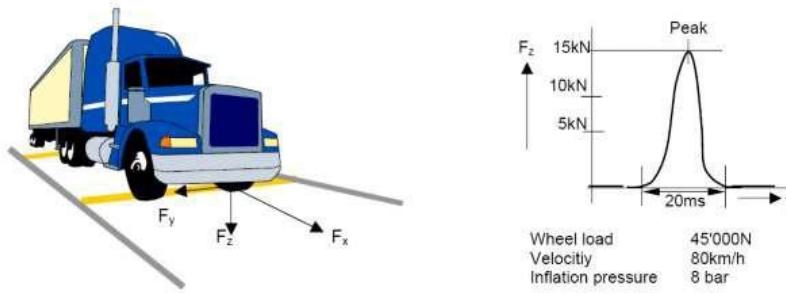


FIGURE 5.3: Véhicule passant sur le capteur et forme d'onde du signal d'essieu correspondant.

Caractéristiques :

- Technologie à quartz ;
- Haute précision de mesure et stabilité à long terme ;
- Conforme à la norme OIML R134 (classe de précision 2) ;
- Conception de capteur robuste pour une durabilité à long terme ;
- Large plage de mesures ;
- Mesures de basses à hautes vitesses ;
- Insensible aux fluctuations de température ;
- Installation rapide et facile dans la chaussée ;
- Conforme aux normes à et CEM.

5.1.2.2 Amplificateur de charge pour capteurs Lineas WIM Type 9195G

Amplificateur de charge robuste spécialement conçu pour les capteurs Kistler Lineas WIM avec sortie de charge (type 9195GC ...). L'amplificateur de charge fournit des signaux de sortie de tension bien conditionnés pour un traitement ultérieur par un système d'acquisition de données.



FIGURE 5.4: Amplificateur de charge pour les capteurs Lineas WIM Type 9195G.

Caractéristiques :

- Design compact ;
- Haute précision grâce à une linéarité élevée ;
- Haute immunité aux variations de température et aux interférences CEM ;
- Convient pour un fonctionnement continu et fiable dans une armoire électronique au bord de la route ;
- Conforme aux normes à et CEM.

5.1.2.3 Capteur de détection avec faisceau laser LS-500

La série LS-500 se compose de capteurs laser de première catégorie capable de détecter de très petits objets à une vitesse de traitement de 60s seulement. Le nouveau boîtier entièrement en acier inoxydable M6 est robuste et parfaitement adapté aux applications dans les environnements sévères. Le contrôleur unique peut contrôler les têtes de capteur laser des versions barrage, détection directe et versions rétro réflectives.

Tous les capteurs sont équipés de deux sorties numériques et les capteurs version câble sont également dotés d'une sortie analogique supplémentaire, ouvrant de nouvelles perspectives dans la détection de petits objets.

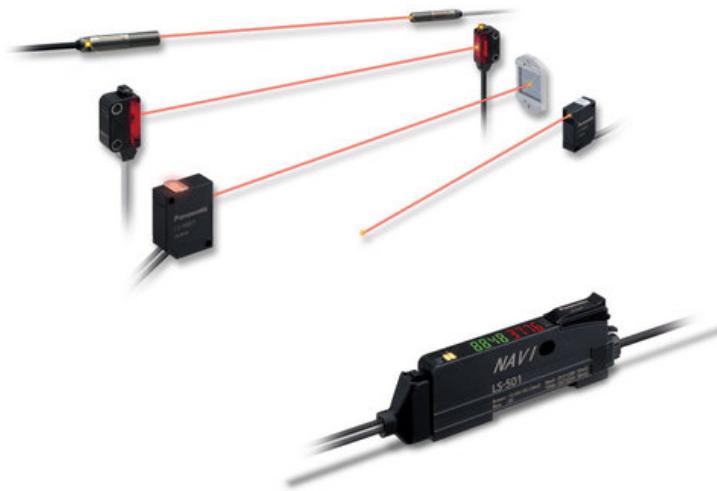


FIGURE 5.5: Capteur laser LS-500.

Caractéristiques :

- Classe laser 1 ;
- Boîtier en acier inoxydable M6 pour la version barrage (LS-H101) ;
- Version IP67 (LS-H102) ;
- Sortie analogique 4-20Ma ;
- Traitement très rapide de 60s ;
- Boîtier compact : 23,4 x 12 x 8,2mm.

5.1.2.4 Carte Raspberry Pi 3

Raspberry est un petit ordinateur sous le système d’exploitation Linux sur carte SD destiné à des applications d’informatique embarquée. Le cœur de l’ordinateur est un FPGA (Broadcom2835) intégrant un processeur ARM11 cadencé à 700MHz et de nombreux périphériques.

Raspberry peut être directement connecté à une IHM classique, souris/clavier/écran HDMI ou vidéo composite, cependant comme tout ordinateur Linux, Raspberry Pi peut intégrer ses propres outils de développement et une interface homme-machine reposant sur SSH contrôlable depuis un autre ordinateur par Ethernet ou WIFI.

Nous avons utilisé la carte Raspberry Pi 3 modèle B pour répondre à la problématique, due à la variété des ports de communication.



FIGURE 5.6: Carte Raspberry Pi 3.

5.1.2.5 Appareil photo - 8 mégapixels (V2)

La Raspberry Pi Camera v2 est la nouvelle carte de caméra officielle publiée par la Raspberry Pi Foundation. Le module de caméra Raspberry Pi v2 est une carte additionnelle spécialement conçue pour le capteur d'images Sony IMX219 de 8 mégapixels pour Raspberry Pi, avec objectif à focale fixe. Il est capable d'images statiques de 3280 x 2464 pixels et prend également en charge la vidéo 1080p30, 720p60 et 640x480p90. Il se fixe à Pi à l'aide d'une des petites prises situées sur la surface supérieure de la carte et utilise l'interface dédiée CSi, spécialement conçue pour l'interfaçage avec les caméras.



FIGURE 5.7: photo - 8 mégapixels.

Caractéristiques :

- Objectif à focale fixe intégrée ;
- Capteur de résolution native de 8 mégapixels, capable d'images statiques de 3280 x 2464 pixels ;
- Prend en charge les vidéos 1080p30, 720p60 et 640x480p90 ;
- Taille 25 mm x 23 mm x 9 mm ;
- Se connecte à la carte Raspberry Pi via un câble plat court (fourni).

5.1.2.6 Écran ACL tactile 7" Raspberry Pi

Le moniteur à écran tactile officiel de 7 pouces pour Raspberry Pi permet aux utilisateurs de créer des projets intégrés tout-en-un, tels que des tablettes et des projets intégrés. L'écran 800 x 480 se connecte via une carte d'adaptation qui gère la conversion de l'alimentation et du signal. Seulement deux connexions au Pi sont nécessaires :

L'alimentation à partir du port GPIO du Pi et un câble ruban qui se connecte au port DSI présent sur tous les Raspberry Pi. Les pilotes d'écran tactile prenant en charge le toucher tactile à 10 doigts et un clavier virtuel à l'écran seront intégrés au dernier système d'exploitation Raspbian pour une fonctionnalité complète, sans clavier ni souris physique.



FIGURE 5.8: Écran ACL tactile 7 quot;Raspberry Pi.

5.1.3 Partie Logicielle

Dans cette partie, on va repérer les différents logiciels utilisés dans notre projet.

5.1.3.1 Reconnaissance des plaques d'immatriculation

Les plaques d'immatriculation sont utilisées pour l'identification des véhicules dans toutes les nations. La plaque d'immatriculation désigne une voiture d'une manière unique, et son image représente une information importante pour identifier son propriétaire. En effet, Les véhicules s'identifient manuellement ou automatiquement.

L'identification automatique de véhicule est une technique de traitement d'image permettant d'identifier les véhicules à l'aide de leurs plaques d'immatriculation. Les systèmes d'identification automatique des véhicules sont utilisés pour contrôler efficacement la circulation et l'application de sécurité telles que le contrôle d'accès aux zones restreintes et le suivi des véhicules recherchés.

Ce que nous visons à travers notre projet est de faciliter la tâche, d'identification des caractères du matricule en exploitant les avantages que peut offrir le traitement d'image. Pour cela, nous avons développé un algorithme qui consiste à réaliser des prétraitements, la détection, l'extraction et la reconnaissance automatique des caractères d'un véhicule en mouvement sur le segment de la route.



FIGURE 5.9: Système de reconnaissance des plaques d'immatriculation.

La reconnaissance des plaques d'immatriculation comporte trois étapes principales. Les étapes sont les suivantes [45] :

1. Détection de la plaque d'immatriculation :

La première étape consiste à détecter la plaque d'immatriculation de la voiture. Nous utiliserons l'option de contour dans OpenCV pour détecter les objets rectangulaires afin de

trouver la plaque d'immatriculation. La précision peut être améliorée si nous connaissons la taille exacte, la couleur et l'emplacement approximatif de la plaque d'immatriculation. Normalement, l'algorithme de détection est formé en fonction de la position de la caméra et du type de plaque d'immatriculation utilisé dans ce pays. Cela devient plus compliqué si l'image ne contient même pas de voiture. Dans ce cas, nous effectuerons une étape supplémentaire pour détecter la voiture, puis la plaque d'immatriculation.

2. Segmentation des caractères :

Une fois la plaque d'immatriculation détectée, nous devons la rogner et la sauvegarder en tant que nouvelle image. Encore une fois, cela peut être fait avec la bibliothèque OpenCV .

3. Reconnaissance des caractères :

Maintenant, la nouvelle image obtenue à l'étape précédente est sûre d'avoir certains caractères (Nombres / Alphabets) écrits dessus. Ainsi, nous pouvons effectuer une reconnaissance optique de caractères (OCR) pour détecter le numéro.

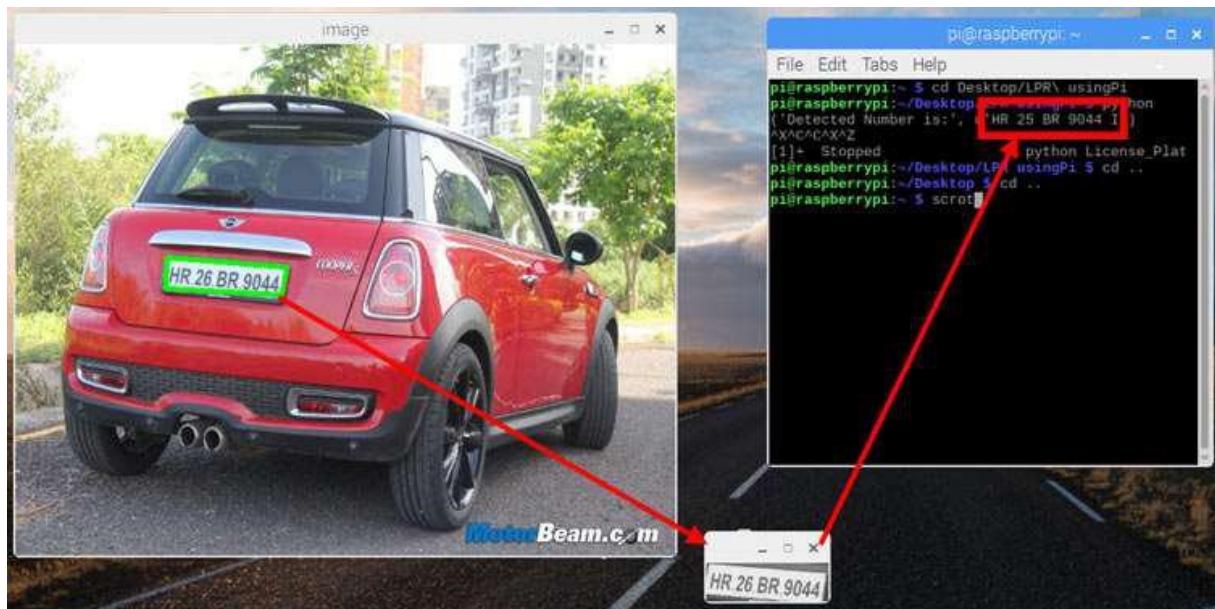


FIGURE 5.10: Appareil Exemple de reconnaissance de plaque d'immatriculation avec Raspberry Pi et OpenCV.

5.1.3.2 Développement d'une interface HIM de supervision

L'interface homme-machine (IHM) est l'interface utilisateur permettant de connecter l'opérateur à une machine, à un système ou à un appareil. Pour notre cas nous avons développé une application desktop installée sur la carte Raspberry Pi dont l'objectif est d'afficher les données mesurées.

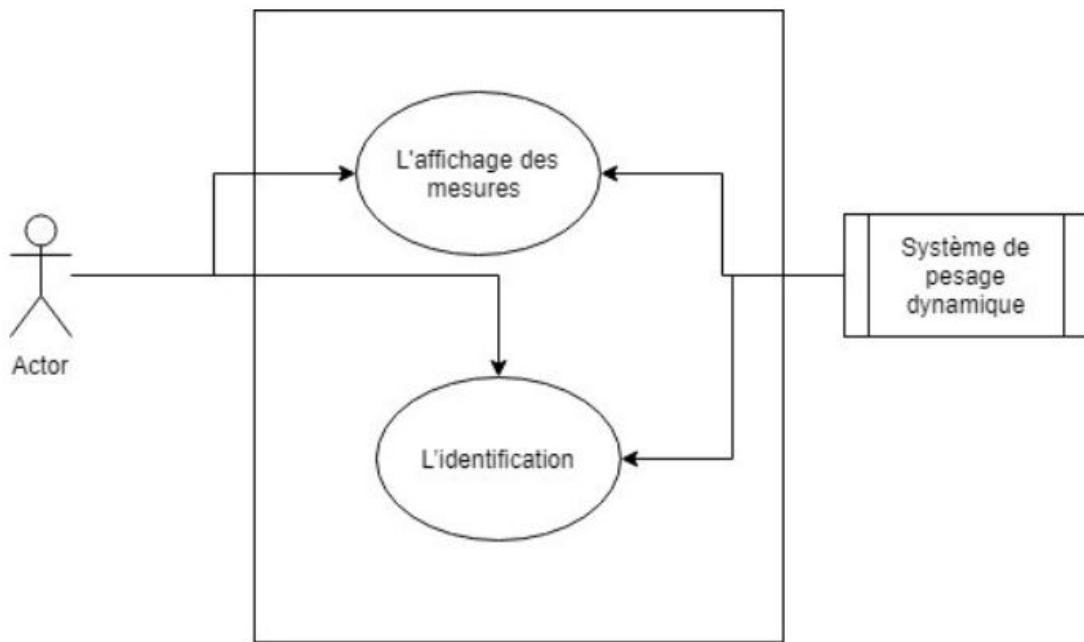


FIGURE 5.11: Diagramme de cas d'utilisation.

Pour la réalisation de cette application nous avons choisi de travailler avec :

- **Python** comme langage de programmation ;
- **PyCharm** comme un environnement de développement intégré utilisé pour programmer en Python ;
- **SQLite** comme un moteur de base de données relationnelle.

Le but du ce partie : Nous avons utilisé l'environnement Python - dont les bibliothèques Keras, Tensorflow, OpenCV, Tkinter - pour créer et utiliser un réseau de neurones à convolutions permettant de lire les caractères des plaques d'une voiture.

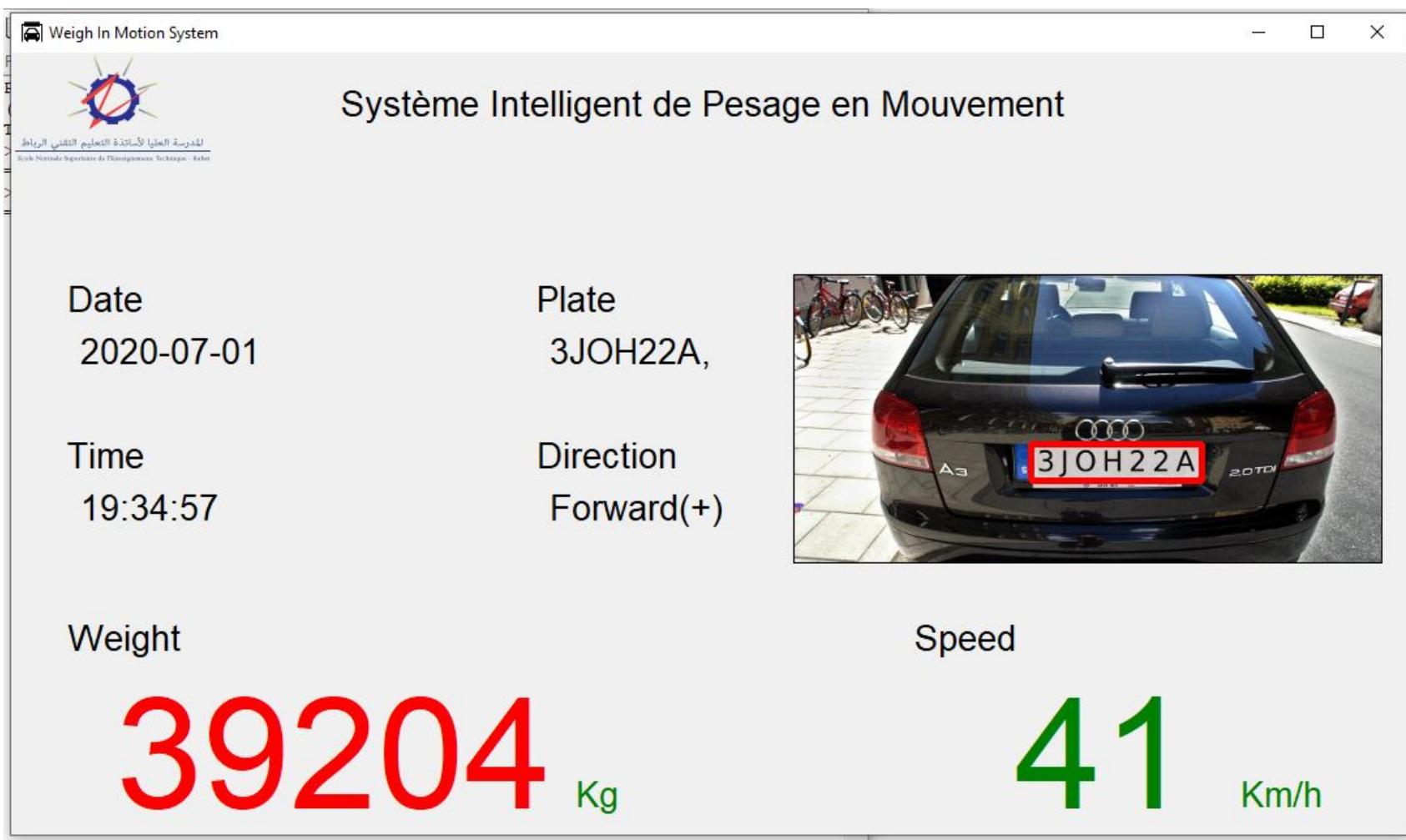


FIGURE 5.12: Interface Homme-machine HIM.

Nous avons créé un code qui permet d'isoler la plaque de l'image de la voiture entière. Une fois cela fait, les différents caractères sont isolés (avec la même méthode) et chaque caractère est lu grâce au réseau de neurones créé aupar avant.(Le code source voir l'**annexe**)

Conclusion

Dans cette partie, nous avons pu présenter toutes les étapes de la conception de notre système, ainsi que les différentes phases de la réalisation des éléments du projet.

Proposition d'un plan d'expériences afin de développer la précision

Présentation

Le pesage des camions est à une très grande importance pour une entreprise de fret, mine, ou une plateforme portuaire. La précision et la fiabilité des systèmes de pesage sont hautement importantes.

Le groupe OCP cherche à utiliser une technologie avancée pour répondre à ce besoin de pesage. Ce besoin cible de vrais problèmes qui se situent entre une connaissance exacte de la quantité de phosphate transportée et le besoin d'une certaine fermeté quant aux risques de dépassement du poids et d'éviter par la même des pénalités juridiques liées à ce dépassement. Cela sans ignorer les problèmes de sécurité inhérente à la surcharge.

Cela dit, l'OCP a souhaité équipé son infrastructure routière des moyens d'une pesée dynamique pour abandonner dans le futur les pesées statiques de ses camions qui transportent le phosphate. Notre sujet de stage cible exactement cette problématique et nous avons opté pour l'utilisation de capteurs de poids piézoélectriques et pour la technologie WIM. Cependant, après avoir préparé tous les éléments utiles à notre étude et donc à la chaîne de mesure, l'avènement de la pandémie liée au COVID19, a interdit toute étude sur le terrain. Nous avons opté pour une étude plus générale et pour la mise en place d'un protocole permettant l'amélioration du procédé d'utilisation de la technologie WIM.

6.1 Généralité

6.1.1 Introduction général

Depuis les années 1970, les entreprises se préoccupent de plus en plus de la qualité de leurs produits. Pour cela, ils essaient de mieux définir leurs besoins (analyse de la valeur, analyse fonctionnelle, QFD), d'analyser les effets et les criticités des produits, des processus et des moyens (Amdec), de suivre et piloter le processus (MSP). La qualité d'un produit est sa capacité à satisfaire les besoins du client. Elle demande de savoir écouter et exprimer les besoins du client, traduire ces besoins en cible de caractéristiques produit, définir les tolérances client,

savoir viser cette cible et réduire la dispersion autour de cette cible. Il y a un problème de qualité quand le produit livré ne correspond pas aux attentes du client ou ne respecte pas les spécifications (non-conformité). Ce problème peut venir du procédé de fabrication, qui subit un nombre important de sources de variation plus ou moins bien identifiées, maîtrisables et maîtrisées, d'une méconnaissance des liaisons, de consignes non respectées ou non adaptées...Il s'agit donc de maîtriser et améliorer le processus. Rappelons que tous les processus connaissent des variations. Ces variations ont des causes, et 20% d'entre elles produisent 80% des effets (Paréto). Si on connaît ces causes, on doit pouvoir les contrôler.

C'est vrai pour les processus, mais aussi pour les produits, les services. . . On évolue donc dans le domaine de l'aléatoire. Dans ce contexte, des décisions importantes sont prises à partir de résultats d'essais. D'où la nécessité d'une méthodologie rigoureuse pour conduire une campagne d'essais, afin d'obtenir un maximum de résultats objectifs et garantis sur le procédé ou le produit étudiés avec un minimum d'essais. Face à la variabilité, il faut disposer de méthodes de recherche expérimentale et de résolution de problèmes.

6.1.2 Comment conduire une recherche expérimentale ?

L'organigramme de conduite d'une recherche est donné en figure 6.1.Lorsque le problème est posé, bien défini avec ses objectifs ① , il faut le décomposer en une série de questions bien hiérarchisées, assorties des décisions et risques correspondants (une question est pertinente si la décision prise est différente selon la réponse) ② .

On dresse alors l'inventaire des informations dont on dispose ③, grâce aux connaissances théoriques, aux recherches bibliographiques, à l'expérience antérieure, aux raisonnements par analogie..., et on se demande si ce « capital informations » est suffisant ④ :

- Si oui, on peut alors élaborer les réponses ⑩ , et, dans une phase de réflexion, vérifier leur adéquation avec le problème posé ⑪ . Si l'on a bien répondu aux questions actualisées ⑫ , prenant en compte l'évolution possible du contexte, on a résolu le problème, sans cela il faut reprendre au début avec le nouveau contexte 1 ;

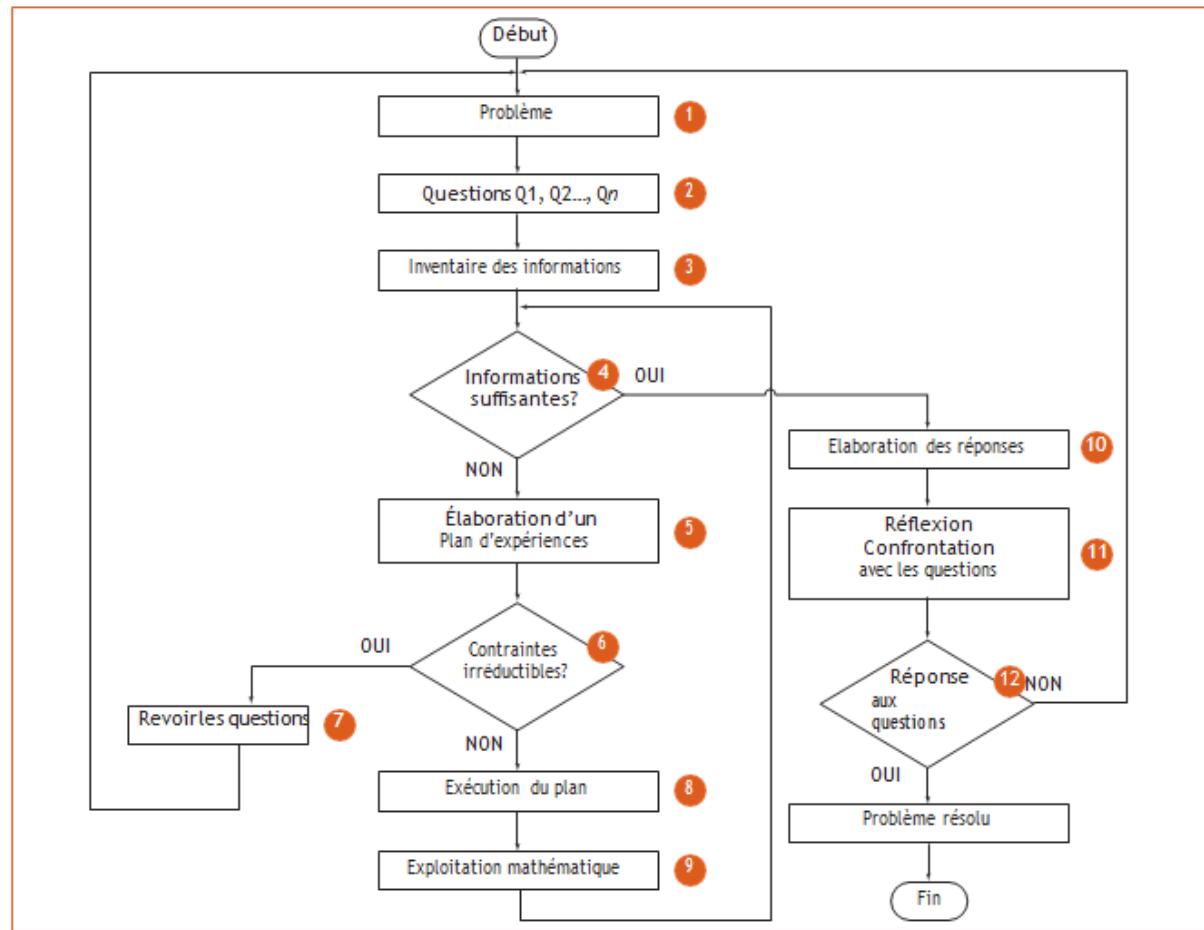


FIGURE 6.1: L'organigramme de conduite d'une recherche.

- **Sinon**, il faut réaliser des expériences pour augmenter le capital informations. Ces expériences doivent être planifiées. Leur ensemble constitue un plan d'expériences (5). L'intérêt de cette planification est double : d'une part, elle permet de vérifier que les essais prévus permettent de répondre aux questions posées, sans oubli (validité du plan) ni redondance (économie), d'autre part, elle permet d'évaluer correctement la charge de travail, les besoins en matériels et en personnels. Avant d'exécuter le plan, l'expérimentateur doit s'assurer qu'aucune contrainte irréductible ne s'oppose à sa réalisation (6) :
 - **S'il** en existe (7), il faut soit confier le problème à quelqu'un qui n'a pas ces contraintes, soit voir quelles questions peuvent être abandonnées pour que le plan soit réalisable ;
 - **Sinon**, on exécute le plan (8). Les résultats sont exploités à l'aide des outils mathématiques (9), et le capital informations est augmenté d'autant. Il est prudent de parcourir en plusieurs fois la boucle (4), (5), (6), (8) et (9). Ce traitement séquentiel évitera

des surprises désagréables s'il y a eu évolution des données du problème (contexte, changement dans la hiérarchie des questions, domaine expérimental mal défini...).

6.1.3 Les plans d'expériences

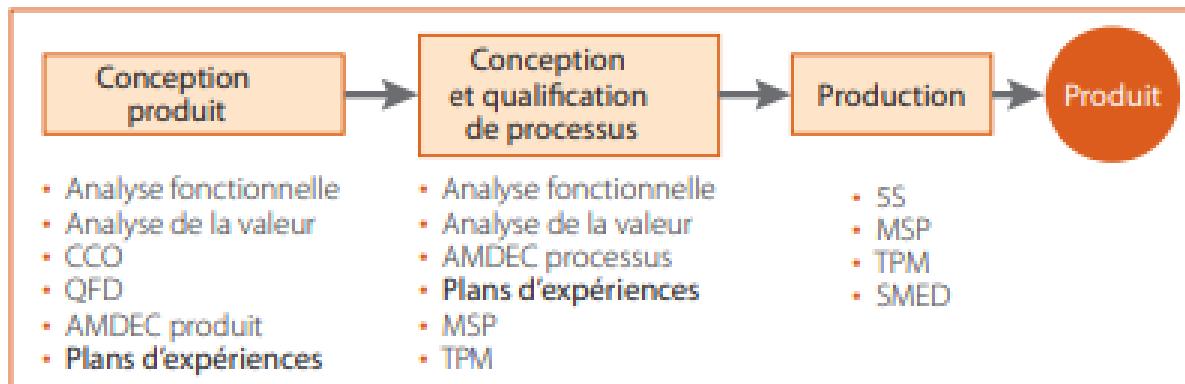


FIGURE 6.2: Place des plans d'expériences parmi les méthodes et outils de la qualité.

Beaucoup de processus dépendent d'un grand nombre de paramètres externes (appelés facteurs) pour lesquels on ne possède pas de modèles analytiques. On parle de boîte noire lorsqu'il est impossible de prévoir exactement les réponses, qui sont aléatoires. La connaissance incertaine des mécanismes ne permet que de suspecter les facteurs susceptibles d'influer sur les réponses. Se pose alors une série de questions :

- Quels sont les facteurs les plus influents ? Existe-t-il des interactions entre les facteurs (corrélations) ? Peut-on linéariser le processus en fonction de ces facteurs, et le modèle ainsi obtenu est-il prédictif ?
- Comment obtenir le maximum d'informations tout en minimalisant le nombre de points de mesure du processus ?

La méthodologie du plan d'expériences permet de répondre à ces questions. Un plan d'expériences est une suite d'essais rigoureusement organisée par avance de façon à déterminer, en un minimum d'essais et avec un maximum de précision, l'influence des différents facteurs contrôlés. Il s'agit, une fois établis des objectifs précis, de mettre en œuvre les moyens nécessaires pour les atteindre dans un délai prévu par une suite d'opérations ordonnées qui permet :

- de minimaliser le nombre d'essais ;

- d'étudier un très grand nombre de facteurs ;
- de modéliser les résultats ;
- de donner des résultats avec une bonne précision.

Les plans d'expériences s'inscrivent dans la démarche de qualité totale au même titre que les autres outils statistiques figure 6.2 . Ils cherchent les causes d'une non-qualité, ou plus positivement les paramètres pouvant améliorer la qualité actuelle. La méthode des plans d'expériences est un outil expérimental puissant indispensable pour conduire une étude de façon optimale. Elle est utilisée dans de nombreux domaines industriels ou de recherche pour la conception et l'amélioration de produits et de processus ;

6.1.4 Conduite du plan d'expérience

Étape 1 : Définition précise du sujet Pour définir le périmètre et les objectifs, on utilisera la méthode du QOQCP ;

Étape 2 : Synthèse des connaissances (brainstorming) Détermination de la réponse (par une mesure) du système étudié Recensement des paramètres pouvant influer sur la réponse (diagramme causes- effets) Établissement de la stratégie Choix des facteurs (matrice de décision) Périmètre de variation des facteurs ;

Étape 3 : Construction du plan d'expériences optimisation du plan d'expériences choix d'une stratégie rédaction du protocole d'essai ;

Étape 4 : Conduite des essais assister à tous les essais ou au minimum aux premiers essais tenir un cahier des essais ;

Étape 5 : Validation des résultats obtenus analyse des résultats synthèse provisoire ;

Étape 6 : Exploitation des résultats essais de vérification synthèse finale Si la solution est trouvée, passage à l'étape 7 Si la solution n'est pas satisfaisante, reposer le problème et recommencer la démarche ;

Étape 7 : Généralisation diffuser les résultats faciliter la méthode pour de nouvelles applications mettre en place des nouveaux modes opératoires mise en place d'un contrôle statistique (MSP) sur les caractéristiques importantes mise en place de dispositifs anti-erreur (SAE).

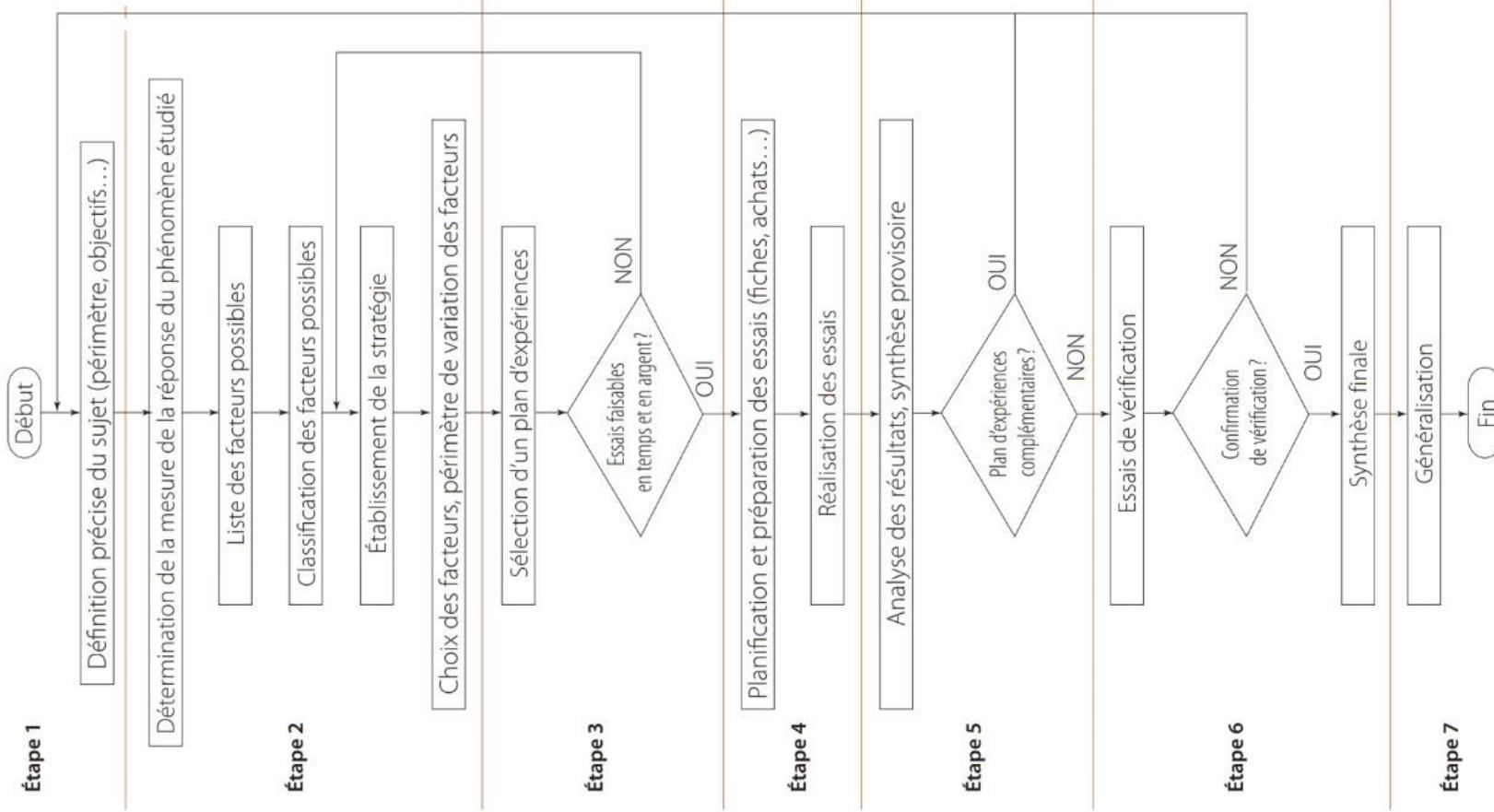


FIGURE 6.3: La conduite d'un plan d'expériences.

6.1.5 Résolution du problème

6.1.5.1 Méthodes de résolution

Le problème qui peut se poser pour la qualification et l'optimisation d'un processus industriel réside dans la variabilité des éléments d'entrée et des conditions de fabrication, qui entraîne une perte de qualité figure 6.4.

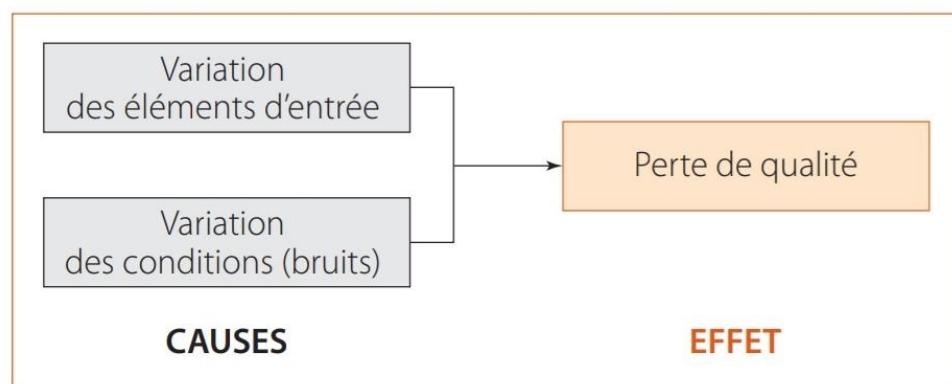


FIGURE 6.4: Les causes de perte de qualité.

Classiquement, quand on constate une dispersion ou une instabilité des caractéristiques d'un produit lors de sa fabrication ou de son utilisation, on en recherche les causes afin de les réduire, voire les éliminer. Il semble alors logique de résoudre le problème avec une méthode classique figure 6.5 , assortie de quelques essais basés sur le principe de ne faire varier qu'un seul paramètre à la fois pour justifier certaines hypothèses.

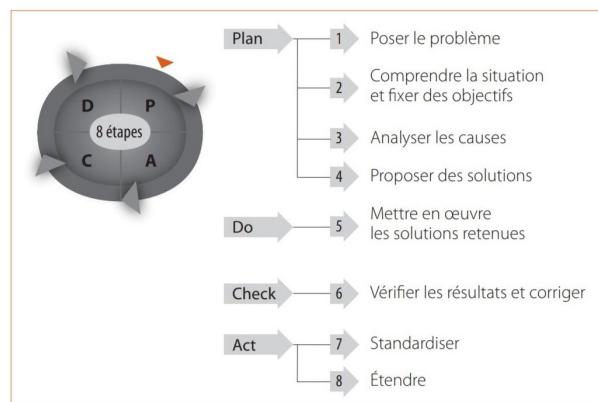


FIGURE 6.5: La roue de Deming (PDCA) adaptée à une méthode classique de résolution de problème.

CHAPITRE 6. PROPOSITION D'UN PLAN D'EXPÉRIENCES AFIN DE DÉVELOPPER LA PRÉCISION

En règle générale, les résultats de ces essais montrent que les responsables de la perte de qualité sont les facteurs de « bruit », généralement multiples et difficilement maîtrisables, dus à la variabilité des conditions d'environnement (température, hygrométrie, poussière), des caractéristiques des matières premières et des composants utilisés, des façons de procéder des différents opérateurs, etc. De ce fait, les propositions de solution s'orientent vers le resserrement des tolérances, la diversification des produits, la modification de la composition des matières premières, l'utilisation de machines plus performantes, le renforcement des procédures de réglage et de contrôle, la climatisation des locaux... Toutes ces solutions ont un coût qui souvent n'est pas négligeable, et le résultat n'est pas toujours à la hauteur de l'investissement. Et, si ce dernier est estimé trop important, on se satisfera, après une multitude de réglages, de trouver un état du processus acceptable, qui restera figé. C'est le principe du « on ne sait pas comment, mais ça marche, ne touchons plus à rien ». A contrario, les plans d'expériences ne cherchent pas à éliminer les causes, difficilement maîtrisables, mais leur effet -la dispersion ou l'instabilité des caractéristiques d'un produit. Le principe général en est de rechercher la combinaison des facteurs d'entrée qui donne systématiquement le meilleur résultat en sortie, celle où les influences cumulées des différents facteurs se compensent pour donner en sortie un écart minimal par rapport aux valeurs nominales. La seule manière de trouver cette combinaison est d'en expérimenter plusieurs, afin de mettre en évidence l'influence de chaque facteur. Cette campagne d'essais est planifiée selon une matrice d'expériences figure 6.6 .

		Paramètres							Résultats
		A	B	C	D	E	F	G	
N° des essais	1	1	1	1	1	1	1	1	
	2	1	1	1	2	2	2	2	
	3	1	2	2	1	1	2	2	
	5	1	2	2	2	2	1	1	
	6	2	1	2	2	1	2	1	
	7	2	2	2	2	1	2	1	
	8	2	2	1	2	1	1	2	
		Modalités							Résultats des essais

FIGURE 6.6: La matrice d'expériences.

On le voit, la stratégie adoptée par les plans d'expériences est diamétralement opposée à celle de la méthode classique : elle s'attache non pas à éliminer les facteurs parasites, mais à minimiser leur impact (voir en encadré « Méthode traditionnelle vs plan d'expériences »). Concrètement, elle consiste à identifier les combinaisons de paramètres qui réduisent les effets des causes, sans s'attaquer directement à celles-ci. La méthode de résolution suit le schéma global que propose la roue de Deming, mais prend en compte l'aspect expérimentation figure 6.7 .

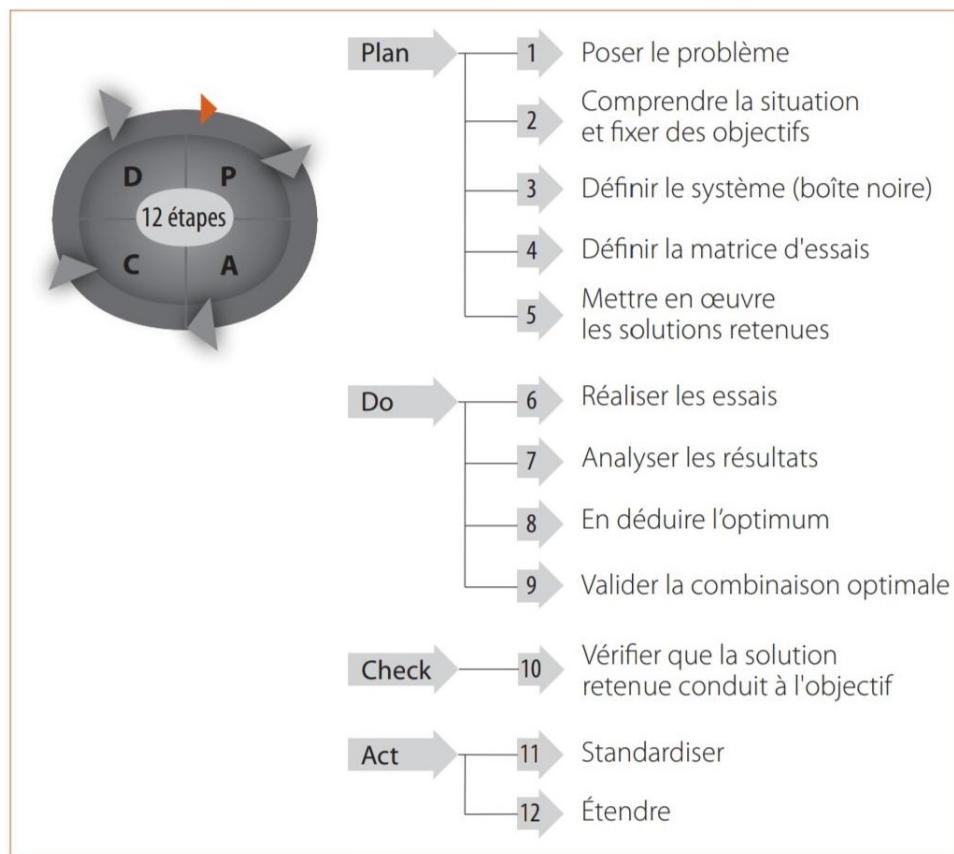


FIGURE 6.7: La roue de Deming (PDCA) adaptée au plan d'expériences.

La méthode des plans d'expériences est souvent trois à quatre fois plus efficace que les démarches habituelles de conduite d'essais, autrement dit elle permet d'arriver aux mêmes résultats avec trois à quatre fois moins d'essais. Des résultats, qui, aisément modélisables, sont faciles à présenter à des non-spécialistes. La démarche de conduite d'un plan d'expériences est détaillée à la suite.

6.1.5.2 Les points clés :

La définition de l'objectif

Le problème à résoudre doit relever de la méthode des plans d'expériences (boîte noire). L'objectif doit être parfaitement défini. On peut procéder à des investigations préalables en vue de limiter et de localiser exactement le sujet à traiter. Il convient de le formaliser par écrit, en faisant un exposé de la situation actuelle (machines utilisées, matière consommée...) et en précisant les caractéristiques à optimiser, classées par ordre de priorité. Pour chaque caractéristique, il faut préciser la valeur à atteindre. Le document de travail doit indiquer les protocoles de réalisation de l'expérimentation et de mesure des résultats, ainsi que le calendrier et le budget de réalisation.

La détermination des critères de qualité

Le choix des caractéristiques à optimiser et des modalités de leur mesure s'avère l'étape la plus critique de la conception d'une expérimentation si l'on veut que cette dernière soit fiable et efficace. D'une manière générale, il faut choisir des caractéristiques en connexion directe avec l'énergie – quelle qu'elle soit et sous toutes ses formes – mise en œuvre dans le système étudié. L'acuité, la précision et la fiabilité de la mesure des résultats sont primordiales. Il convient de définir de manière pragmatique le nombre de mesures à effectuer, en fonction des connaissances techniques quant au sujet à traiter et du budget alloué.

Le choix des facteurs à tester

Il faut respecter les mêmes conditions que pour le choix des critères de qualité. Les facteurs qui accroissent, consomment ou transforment l'énergie du système ont des chances d'influer sur les résultats. Les facteurs retenus doivent être réellement indépendants les uns des autres. Plus on teste de facteurs, plus on accroît Bon plan ou pas ? Les trois conditions qui justifient l'utilisation d'un plan d'expériences : Le problème expérimental ressemble à une « boîte noire ». On a des soupçons plutôt que des certitudes. Le problème est multifactoriel. Dans quels cas ne pas recourir à un plan d'expériences ? Quand les mécanismes pilotant la boîte noire sont connus. Un plan d'expériences n'est pas un prétexte à réinventer le fil à couper le beurre.

Quand la réponse est trop dispersée. C'est le cas des durées de vie en fiabilité, qui en outre ont la mauvaise idée de suivre une loi non normale (Weibull). Pour démontrer un niveau de fiabilité. Un plan d'expériences sert à concevoir un bon produit, vient ensuite l'essai de fiabilité, qui en démontre la longévité. 3 8 technologie 164 novembre-décembre 2009 novembre-décembre 2009 technologie 164 39 les chances de trouver les facteurs influents. Pour obtenir des effets bien différenciés, il faut choisir des modalités de réglage pertinentes.

La préparation de l'expérimentation

C'est une étape importante, qui doit mobiliser toutes les compétences requises. Elle est menée par le groupe de réflexion, réunissant les personnes qui possèdent les meilleures compétences théoriques, technologiques et pratiques quant au sujet à traiter.

La recherche de stratégie pour l'étude des interactions

Il convient d'apprécier l'utilité de la connaissance précise des interactions risquant de se produire lors de l'expérimentation et d'estimer correctement le coût de leur étude, qui doit rester raisonnable. Il y a plus à gagner à multiplier les facteurs qu'à s'appesantir sur les problèmes d'interactions. On peut procéder de manière pragmatique, en deux phases : d'abord un dégrossissement permettant d'identifier les deux à quatre facteurs les plus influents ; ensuite, si nécessaire, l'étude de l'interaction de ces facteurs à l'aide d'une petite expérimentation complémentaire destinée à affiner les résultats.

La rigueur dans la préparation et la réalisation de l'expérimentation

Rigueur et précision sont indispensables à l'obtention de résultats satisfaisants. Trois documents doivent être formalisés minutieusement : un protocole de réalisation de l'expérimentation, un protocole de mesure des résultats et une feuille d'essai pour chaque essai à réaliser.

La validation de l'expérimentation

Un essai de validation est indispensable ; si les résultats obtenus ne concordent pas avec les prévisions, il est nécessaire de chercher des explications, parfois en menant une véritable investigation pour déterminer les facteurs ayant varié.

6.1.5.3 Les conditions de la réussite :

Avoir les moyens d'expérimenter

En effet, cette méthode a quand même quelques inconvénients : elle demande l'implication d'une équipe, du temps, des fonds et du matériel.

Choisir moins de dix paramètres

Ces paramètres sont en fait les causes chiffrables ; l'expérience montre qu'en moyenne dix critères peuvent suffire, mais évidemment il faut bien les choisir sans en omettre.

Maîtriser les paramètres

Puisque la méthode consiste à faire intervenir ces paramètres afin de savoir s'ils sont conséquents pour le processus, il faut savoir donner des valeurs et les stabiliser pour que le test soit efficace et analysable.

Mesurer la réponse avec précision

Une fois tous les paramètres appliqués au processus, on sait lesquels peuvent être utilisés, mais il faut faire attention aux interactions. En effet, un paramètre qui semble insignifiant pour le processus peut interagir avec un autre de façon décisive.

Suivre rigoureusement la démarche Étant :

Donné qu'elle suit un plan ordonné, il faut bien évidemment la respecter.

6.2 Application sur le système de pesage dynamique

6.2.1 Identification du problème

6.2.1.1 Les cas justifient l'utilisation d'un plan d'expériences

Les conditions de recourir à un plan d'expérience sont :

- Le problème expérimental ressemble à une « boîte noire » ;
- On a des soupçons plutôt que des certitudes ;

- Le problème est multifactoriel.

Ou lorsque la méthode traditionnel est :

- n'est pas rigoureuse ;
- est longue et coûteuse ;
- n'expérimente pas toutes les solutions ;
- ne tient pas compte des interactions entre facteurs ;
- ne donne pas de résultats précis.

6.2.1.2 Formalisation du problème

Définition du problème

Le thème précision est souvent la principale confédération pour 1 utilisateurs finaux lors l'achat d' système de mesure cela implique dans notre cas l augmentation de la précision du système de pesage dynamique est très important. Dans ce contexte on propose un projet expérimental qui repent à la question suivante :

Question ? : Comment utiliser une approche méthodologique d'observations et d analyse pour un modèle plus précis du système de pesage ?

Réponse :Le sujet proposé consiste a une améliorer la précision des systèmes de pesage dynamique.

Définir les entrées/sorties

Un paramètre d'entrée d'un système est appelé facteur. Ce facteur est une cause possible de variation de la réponse. On défini le poids et la vitesse comme facteurs d'entrée. La repose doit être représentatif, quantifiable et la moins dispersée possible pour des variables d'entrées. On défini le paramètre voltage du capteur come sortie du système étudié.

6.2.2 Note conceptuelle

TITRE :	Expérience de collection des données sur un système de pesage dynamique.
BACKGROUND	
Contexte du projet	<p>Le système de pesage dynamique basé sur les capteurs piézoélectrique a beaucoup d'avantages par rapport aux autres technologies. Les capteurs piézoélectrique ont des très petites déformations et disposent d'une très grande rigidité. Ces caractéristiques font de ces capteurs un choix idéal pour les applications dynamique. Cependant la chaîne de mesure est influencée par les propriétés dynamiques ce qui affecte directement la précision du système. Dans ce contexte une approche expérimentale est nécessaire pour renforcer les études théoriques qui sont établies.</p> <p>Il semble que, à l'inverse de l'étude théorique, l'étude expérimentale reste largement à développer. On propose de faire une collection de données du signal obtenu du capteur avec les facteurs d'entrées correspondantes.</p>
Objectif du projet	Le projet a pour objectif récupérer une base de données à l'étudier pour trouver un modèle expérimental loin d'utiliser le modèle physique du capteur.
Objectif opérationnel	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer des connaissances sur le système de pesage. • Favoriser l'étude expérimentale et statistique pour plus de comparaisons et conclusions développantes • Arriver à une précision souhaitée du système.

FIGURE 6.8: Background.

DESCRIPTION DU PROJET	
Méthodologie/ stratégie	<p>Le projet comporte 4 phases :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Phase de cadrages : <ul style="list-style-type: none"> - choix du lieu et temps et une approche économique. - choix des options pour cadrer le champ du projet. - identification des partenaires et lancement des collaborations. • Etude de faisabilité : <ul style="list-style-type: none"> -identification de besoin en terme de donnée. -lister les raison possible de l'arrêt du projet. -élaboration d'une méthodologie de suivi et prise en charge pendant l'arrêt. • Mission et pilotage : <ul style="list-style-type: none"> -établissement d'un comité de pilotage interdisciplinaire constitué des ingénieurs et techniciens pour suivre la mise en œuvre du projet. -création d'un comité indépendant de surveillance. -préciser les missions spécifiques. -lancement des postes de validation des événements et de gestion. • L'application du protocole : <p>Le protocole consiste à enregistrer le signal du sortie du capteur de pesage en mouvement lors du passage des camions chargée du phosphate et leurs vitesse qui ne dépassent pas plus des 15 km/h. Ces données sont mises dans un élément d'enregistrement avec le poids correspondant issu de pesées statique.</p> <p>Une caméra peut être ajoutée pour identifier des paramètres utiles pour déterminer le poids.</p>
Bénéficiaires finaux :	L'OCP va être le premier bénéficiaire de ce développement de la précision.
Dure du projet	indéterminée
Résultats attendus :	Attendre une nette amélioration en matière de précision.
Le livrables attendus	Nous utilisons ce protocole afin de créer une base de données issue des capteurs, et le poids issu de pesées statiques.

FIGURE 6.9: Description du projet.

**CHAPITRE 6. PROPOSITION D'UN PLAN D'EXPÉRIENCES AFIN DE
DÉVELOPPER LA PRÉCISION**

Diagnostic préliminaire de faisabilité	
Estimation des coûts	Poste budgétaire
	personnel
	consultants
	Evaluation
	Biens d'équipement
	déplacements
	Dépenses de recherche
	Frais indirects (maximum de 13%)
	Totale
Diagnostic préliminaire d'opportunité	
Rôle potentiel du secteur privé	<p>Evaluer l'appétence du secteur privé pour le projet, par ex. :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Présence d'entreprises privées du secteur au Maroc ; • Existence de projets similaires menés dans le pays / dans la région ; • Existence d'offres spontanées.
Suites à donner	
Chronogramme prévisionnel	mm/aaaa-mm/aaaa
Prochaine étape et moyens requis	Traitement de la base de données

FIGURE 6.10: Diagnostic préliminaire .

Conclusion

Traditionnellement, un chercheur effectue des expériences de manière séquentielle en faisant varier les paramètres les uns après les autres. Cette méthode donne des résultats mais elle est coûteuse en temps et nécessite la réalisation d'un grand nombre d'expériences. Les méthodes d'analyses de données permettent de collecter, de résumer et de présenter des données de façon à en tirer le maximum d'informations pour la suite des expériences. Pour mener une recherche expérimentale planifiée, la méthodologie des plans d'expériences est utilisée. Cette démarche aide l'expérimentateur à structurer sa recherche de manière différente, à valider ses propres hypothèses, à mieux comprendre les phénomènes étudiés et à solutionner les problèmes.

L'objectif de ce chapitre thèse est de présenter, à travers des exemples d'applications liés au système de pesage dynamique, la mise en œuvre et l'intérêt de ces méthodes destinées à tout expérimentateur désirant optimiser l'efficacité de sa recherche expérimentale.

■ CONCLUSION GÉNÉRALE

Au cours de la dernière décennie, le domaine de transport industriel à rapidement évolué face à la révolution de l'industrie 4.0. Par ailleurs, le pesage des camions devenu un point stratégique de l'amélioration de l'activité industrielle, il est donc essentiel de pouvoir peser efficacement de nombreux camions en peu de temps pour facturer les biens industriels en fonction de leurs poids et éviter les surcharges des camions.

Face à cette motivation, l'objet de notre travail de fin d'études est de faire la conception et réalisation d'un système de pesage en mouvement à base des capteurs piézoélectriques. Ce projet est le fruit de cinq mois de travail en continu.

Au terme de ce travail, nous avons commencé dans un premier temps par une présentation de l'état de l'art sur les systèmes de pesage en mouvement en éclairant la problématique de pesage statique et les différentes technologies des capteurs de pesage dynamique.

Nous avons ensuite fait une étude et une modélisation du système en appliquant la démarche de l'ingénierie des systèmes complexes à l'aide du langage de modélisation SysML, puis nous avons présenté une étude de conditionnement du signal des capteurs piézoélectriques et les différentes équations déployées dans la conception de notre système.

La dernière partie du projet était la conception et la réalisation des éléments de notre système. Nous avons commencé par une présentation de l'architecture matérielle du projet. Ensuite, nous avons développé une carte d'acquisition et traitement des données des capteurs, une interface HIM de supervision et une application IoT d'acquisition des données.

Certes, un travail ne peut être épargné de limitations que ce soit en temps ou en ressources. En effet, ces limitations nous ont inspiré pour pousser les horizons de notre projet. Parmi les perspectives que nous avons tracées pour ce travail, l'amélioration d'un prototype de pesage en

CONCLUSION GÉNÉRALE

mouvement fonctionnel afin de passer de la phase de la Recherche et Développement vers la phase de l'industrialisation. Nous envisageons aussi que ce système sera un facteur important non seulement dans l'activité de transport mais aussi un facteur pour l'amélioration de la sécurité routiers de notre pays.

En somme, ce travail de fin d'études m'a permis de mettre à profit les connaissances apportées dans le cadre de la formation d'ingénieur en Génie Electrique et aussi les connaissances académiques que j'avais acquis durant mon cursus universitaire. Nous espérons qu'il aura participé à l'enrichissement de notre bibliothèque par un autre cas pratique bien détaillé qui pourrait servir de ressource pour les promotions à venir.

BIBLIOGRAPHIE & WEBOGRAPHIE

- [1] <https://eminessite.wordpress.com/2014/10/08/lemines-obtient-son-decret-de-equivalence/>
- [2] <https://www.um6p.ma/fr/recherche/laboratoires/laboratoire-dinnovation-pour-les-operations>
- [3] **Liu, W.; Hu, J.; Peng, L.** Discussion on the Urgency of Establishing Weighting Stations in China Highway Network to Control Overloading Problem. Northeastern Highway 2003, 26, 12–14. [[Google Scholar](#)]
- [4] **Wang,K.** A fiber-optic weigh-in-motion system based on fiber bragg grating technologies ;A dissertation of Stevens Institute of Technology, 2005. [[Google Scholar](#)]
- [5] **Cheng, L.; Zhang, H.; Cao, X.** Vehicle Weigh-in-motion Technology. Chinese Journal of Scientific Instrument 2006, 27, 943–948.[[Google Scholar](#)]
- [6] **Nikolaidis, D.R.** Real-time speed, classification, and weigh-in-motion using a single, spatially distributed fiber-optic sensor; A dissertation of Florida Institute of Technology, 2002. [[Google Scholar](#)].
- [7] Découvrir et comprendre l'ingénierie des systèmes, Association Française d'Ingénierie des systèmes, **AFIS 2007**
- [8] **CESAM** : CESAMES Systems Architecting Method, CESAM Community, 2017.
- [9] **F. Giraud**, “Modélisation causale et commande d'un actionneur piézoélectrique à onde progressive”, Thèse de doctorat, Université Lille I, France, Juillet 2002.
- [10] **S. Le Dren**, “Elaboration de couches épaisses piézoélectriques déposées sur substrats pour des applications microtechniques”, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, Septembre 2000.

- [11] **A. R. Streett**, “Preliminary finite element modeling of a piezoelectric actuated marine propulsion fin”, Master of science thesis, Rochester Institute of Technology, New York, USA, September 2006.
- [12] **PIEZOCRYST advanced sensors GMBH**, www.piezocryst.com, “Introduction to piezoelectric sensors”, Austria, August 2005.
- [13] **R. Periasamy**, “Shape control of composite structures with optimally placed piézoelectric patches”, Master of science thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2008.
- [14] Measurement Specialties, www.msiusa.com, “Piezo film sensor-technical manual”, April 1999.
- [15] **L. Delmas**, “Etude et réalisation de capteurs à sortie fréquentielle en orthophosphate de gallium (GaPO4)”, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, France, Septembre 2005.
- [16] **H. Frayssignes**, “Etude des effets non-linéaires et des pertes dans les moteurs ultrasonores : Introduction au problème de couplage mécanique entre les voies”, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, Novembre 2001.
- [17] **M. Wilm**, “Etude et réalisation de transducteurs composites pour l'imagerie acoustique et le contrôle non-destructif”, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, France, Novembre 2004.
- [18] **A. V. Carazo**, “Novel piezoelectric transducers for high voltage measurements”, doctoral thesis, Universitat politècnica de catalunya, Barcelona, Spain, January 2000.
- [19] **James R. Phillips**, “Piezoelectric technology primer”, Albuquerque, New Mexico.
- [20] **C. Millon**, “Contribution à l'étude de procédés de réalisation de structures métal/PZT/métal sur silicium pour microsystèmes piézoélectriques”, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, Juillet 2003.
- [21] **N. S. Almind, S. H. Brodersen**, “MEMS PZT based accelerometer : design, fabrication and characterization”, Bachelor thesis, Technical University of Denmark, Denmark, October 2007.

- [22] **E. Gaboriaud**, “Etude des résonateurs piézoélectriques dans le domaine des micoondes : application au filtrage”, Thèse de doctorat, Université de Limoges, France, Octobre 2004.
- [23] **M. Hubain**, “Capteurs de pression et de force”, <http://perso/orange.fr/michel.hubain/capteurs/phys/chap-p3.htm>. (Consulté le 12.04.2007).
- [24] **Wenkang Qi**, Wenwu Cao, “Finite element analysis and experimental studies of the thickness resonance of piezocomposite transducers”, Ultrasonic imaging, Vol. 18, 1996.
- [25] **N.J.Renault, C. Martelett, P. Clechet**, “Capteurs chimiques et biochimiques”, Techniques de l’Ingénieur, Doc. R 420 ; P 360, France.
- [26] **C.A.Paget**, “Active health monitoring of aerospace composite structures by embedded piezoceramic transducers”, Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, November 2001
- [27] **J. M. Haussonne**, “Céramiques pour l’électronique et l’électrotechnique”, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 2002.
- [28] **A. Aydi**, “Elaboration et caractérisations diélectriques de céramiques ferroélectriques et/ou relaxeur de formule $MSO_3 - NNbO_3$ ($M = Ba, Ca$)”, Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Sfax, Tunisie, Mars 2005.
- [29] **A. Faiz**, “Amortissement vibratoire et anéchoïsme par traitement non-linéaire d’éléments piézoélectriques”, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences appliquées de Lyon, France, Mai 2006
- [30] **C. Tilhac**, “Développement d’architectures de filtres à base de résonateurs à ondes acoustiques de volume et contribution à l’intégration dans une technologie avancée silicium industrielle pour des applications radiofréquences”, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, France, Juillet 2007.
- [31] **B. Fu**, “Piezoelectric actuator design via multiobjective optimization methods”, Doctoral thesis, Universität Paderborn, Germany, June 2005.
- [32] **J. F. Lopez**, “Modeling and optimization of ultrasonic linear motors”, Doctoral thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, November 2006.

- [33] **S. O. Reza Moheimani and Andrew J. Fleming**, “Piezoelectric transducers for vibration control and damping”, Springer-Verlag, London, UK, 2006.
- [34] **Saint-Gobain Quartz**, www.quartz.saint-gobain.com, “Céramique piézoélectriques”, France, 2004.
- [35] **T. L. Jordan, Z. Ounaies**, “Piezoelectric ceramics characterization”, ICASE, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA, September 2001.
- [36] **M. Malhis**, “Contrôle actif modal flou des rotors flexibles par plan d'action piézoélectrique”, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, Décembre 2002.
- [37] **L. Garbuio**, “Etude du phénomène de lubrification électroactive à l'aide d'actionneurs piézoélectriques : application à la réduction des forces de frottement sec dans un moteur à combustion interne”, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Juin 2006.
- [38] **Z. Ghalmi**, “Contribution au développement d'un capteur ultrasonique pour mesurer l'épaisseur de la glace”, Mémoire de la maîtrise en ingénierie, Université du Québec, Chicoutimi, Canada, Mars 2006.
- [39] **C. Viguier**, “Contribution au développement d'actionneurs électroactifs pour l'assistance circulatoire : application à la mise au point d'une fonction antithrombotique”, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Décembre 2005.
- [40] **W. Huang**, “Design of a radial mode piezoelectric transformer for a charge pump electronic ballast with high power factor and zero voltage switching”, Master of science thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia , USA, April 2003.
- [41] **S. Turri, G. Poulin**, “Dispositifs électromécaniques permettant l'exploitation de l'énergie des mouvements humain”, Colloque Energie portable : autonomie et intégration dans l'environnement humain (Journées Electrotechniques du Club EEA), Cachan, France, Mars 2002.

BIBLIOGRAPHIE & WEBOGRAPHIE

- [42] **B. Multon, S. Turri, M. Ruellan, D. Miller, H. Ben Ahmed**, “Produire de l'énergie pour les appareilles électroniques portables grâce aux ressources disponibles dans l'environnement humain”, AS n°106CNRS-STIC(Conception faible consommation) , Paris, France, Mai 2004.
- [43] **C. Helg and L. Pfohl**, “Signal processing requirements for WIM LINEAS Type 9195,” Kistler Instrumente Corp., Amherst, NY.
- [44] **Taek M. Kwon**, “Signal processing of piezoelectric weigh-in-motion systems,” Proceedings of the Fifth IASTED International Conference on Circuits, Signals, and Systems (CSS 2007), Banff, Canada, pp. 233-238, Banff, Canada, July 2-4, 2007.
- [45] **Prathamesh Kulkarni, Ashish Khatri, Prateek Banga, Kushal Shah**, Automatic Number Plate Recognition (**ANPR**) System for Indian conditions.



ANNEXES

A.1 Management des ressources humaines du projet

Fiche de suivi

Thème Méthodes, technologies et procédés innovants



Titre du projet		Date de début	Mars. 2020	Durée	4 mois	Chef de Projet OCP	Chef de Projet UM6P																													
PESAGE DYNAMIQUE (Définition et développement d'un standard industriel)																																				
Contexte / Motivation	<p>Les surcharges de poids lourds contribuent à l'insécurité routière, sont responsables de l'endommagement précoce des chaussées et des ouvrages d'art, et engendrent une concurrence déloyale entre les différents modes de transports et entre les sociétés de transport routier. Ce problème touche particulièrement le Maroc et de manière plus sévère, à quelques exceptions près, le reste du continent Africain</p>						Abdelaali KOSSIR Youssef DAAFI																													
Objectifs	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Automatisation du système de pesage , ✓ Enregistrement de tous les véhicules, quel que soient, l'heure du jour, le nombre d'essieux, leur vitesse, ✓ Communication avec sale de contrôle et préparation des dashboard de reporting. 						Abdeljalil BENDANI																													
Livrables	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Phase1:Etude de faisabilité ✓ Phase2:Etude de conception ✓ Phase3:Développement du POC (proof of concept) ✓ Phase4:Rapport prototyping & testing ✓ Recommandation perspective 						Equipe OCP																													
Gantt	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="4">Gantt</th> </tr> <tr> <th>mois</th> <th>Mars</th> <th>Avril</th> <th>Mai</th> <th>Juin</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Phase1</td> <td style="background-color: yellow;"></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Phase2</td> <td style="background-color: lightgreen;"></td> <td style="background-color: lightgreen;"></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Phase3</td> <td></td> <td style="background-color: lightblue;"></td> <td style="background-color: lightblue;"></td> <td style="background-color: lightblue;"></td> </tr> <tr> <td>Phase4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td style="background-color: purple;"></td> </tr> </tbody> </table>						Gantt				mois	Mars	Avril	Mai	Juin	Phase1					Phase2					Phase3					Phase4					Equipe UM6P
	Gantt																																			
mois	Mars	Avril	Mai	Juin																																
Phase1																																				
Phase2																																				
Phase3																																				
Phase4																																				
	<p>I</p> <ul style="list-style-type: none"> • LAASSIRI YASSER • Djamal FIFEL • Rahili simohamad • Tebbai mohamed 						Etat YTD																													
	<p>Budget OPEX : 150 000 DH Délai : 4 mois</p>						Budget																													
	<p>Demandes de modification</p>						Demandes de modification																													

A.2 Fiches techniques des composants

A.2.1 La fiche technique de la carte Raspberry :

Type	Raspberry Pi 3 model B
Dimension	8.6 x 5.4 x 1.7 cm
SoC	Broadcom BCM2837
CPU	1,2 GHz quadricœur ARM Cortex-A53
Mémoire vive (SDRAM)	1 Go
Nombre de ports USB 2.0	4
Sorties vidéos	HDMI et Composite (via un connecteur Jack)
Sorties audio	stéréo Jack 3,5 mm (sortie son 5.1 sur la prise HDMI) et Composite
Unité de lecture/écriture	MicroSD
Carte/connectique réseau	10/100/1000 Ethernet, Wifi 802.11ac, Bluetooth 4.2
Périphériques bas niveau	17 x GPIO, UART, I ² C bus, SPI bus avec deux chip selects, I ² S audio, +3.3 V, +5 V
Puissance nominale	800 mA (4 W)
Source d'alimentation	Micro-B USB
Capacité multitâche	Oui

A.2.2 La fiche technique de capteur de poids

Electrical data

Sensitivity	pC/N	1.7 ($\pm 12\%$)
Max sensitivity shift over sensor length ²⁾	%	< ± 2
Linearity	%FSO	< $\pm 1,0$
Insulation resistance	Ω	$>1 \cdot 10^9$
Capacitance		
with 40 m cable	nF	4 ... 16
with 100 m cable	nF	7 ... 25

General data

Accuracy class (OIML R134) ¹⁾		2
max. error	%	± 1
Range wheel load	kN	0 ... 150
at a reference tire contact area (thread length x thread width)	mm	200x320
Load-bearing capacity on the sensor surface	N/mm ²	6
Operating temperature range	°C	-40 ... 80
Temperature coefficient (sensitivity)	%/°C	-0,02
Sensor length	m	1.50/1.75/2.00
Cable length	m	40/100
Weight (with 40 m/100 m cable)		
sensor length: 1.50 m	kg	7.4/8.3
sensor length: 1.75 m	kg	8.3/9.2
sensor length: 2.00 m	kg	9.2/10.1
Degree of protection (EN60529)		IP68



A.2.3 La fiche technique de l'amplificateur de charge

Electrical data

Supply voltage	VDC	18 ... 30
Power consumption 2 / 4 / 8 channels	mA	<10 / <20 / <40
Output voltage	V	0 ... ±5
Output current	mA	0 ... ±1
Offset	mV	< ±100
Output impedance	Ω	10
Output noise signal (0,1 Hz ... 1 MHz)	mVpp	<5
Time constant	s	100 (±2,5)
Frequency range -3dB	kHz	0,0016 ... >5

General data

Number of input channels		
Type 5163A1...		2 / 4 / 8
Type 5163A2...		2 / 4
Measuring range		
Type 5163A1... (wheel load meas.)	pC	±60 000 (±600)
Type 5163A2... (axle load meas.)	pC	±100 000 (±1 000)
Operating temperature range	°C	-20 ... 65
Degree of protection (EN60529)		IP67
Dimensions	mm	185,5x64x34,5
Weight	kg	0,4
Connector signal input		Spring terminal through cable gland
Connector signal output		
Type 5163A102		Spring terminal through cable gland
All other Types		D-Sub 15 pin male



A.3 Code source Python

```
1
2 import tkinter as ttk
3 from tkinter import*
4 import time as tm
5 from datetime import*
6 import datetime as dt
7 from tkinter import filedialog
8 import cv2
9 from tkinter import filedialog
10 import random
11 import os
12 import numpy as np
13 import matplotlib.pyplot as plt
14 window=ttk.Tk()
15
16 import cv2
17 from PIL import Image, ImageTk
18 import pytesseract
19 pytesseract.pytesseract.tesseract_cmd=r'C:\Users\Rahili\AppData\Local
20 \tesseract.exe'
21
22
23
24 window.title("Weigh In Motion System ")
25 window.configure()
26 window.geometry("1071x600")
27
28 window.iconbitmap(r'C:\Users\Rahili\Desktop\rapport de stage\python\
29 carinagaragesilhouette_89232.ico')
30
31 img11 = PhotoImage(file= "ENSETR-LOGO-PNG.png")
32 img21 = ttk.Label(window, image=img11,width='153',height='85')
33 img21.place(x=0, y=0)
```

ANNEXES

```
34
35 lab_titl=ttk.Label(window,text='Syst me Intelligent de Pesage en
36 Mouvement ',font='ariel 20',fg='black')
37 lab_titl.place(x=250, y=20)
38
39
40
41
42 #Date
43 lab_d=ttk.Label(window,text='Date',font='ariel 20',fg='black')
44 today=date.today()
45 lab_date=ttk.Label(window,font='ariel 20',fg='black',text=today)
46
47 lab_d.place(x=40, y=170)
48 lab_date.place(x=50, y=210)
49
50 #Time
51 lab_t=ttk.Label(window,text='Time',font='ariel 20',fg='black')
52 time=tm.strftime('%H:%M:%S')
53 lab_time=ttk.Label(window,font='ariel 20',fg='black',text=time)
54
55 lab_t.place(x=40, y=290)
56 lab_time.place(x=50, y=330)
57
58 #Direction
59 lab_di=ttk.Label(window,text='Direction',font='ariel 20',fg='black')
60 #plate=date.today()
61 lab_direction=ttk.Label(window,text='Forward(+)',font='ariel 20',
62 fg='black')
63
64 lab_di.place(x=400, y=290)
65 lab_direction.place(x=410, y=330)
66
67 #Weight
68 lab_w=ttk.Label(window,text='Weight',font='ariel 20',fg='black')
```

ANNEXES

```
69 #today=date.today()
70 lab_weight=ttk.Label(window,font='ariel 90',fg='red',text='39204')
71 lab_kg=ttk.Label(window,text='Kg',font='ariel 20',fg='green')
72
73 lab_w.place(x=40, y=430)
74 lab_weight.place(x=77, y=470)
75 lab_kg.place(x=430, y=550)
76
77 #Speed
78 lab_s=ttk.Label(window,text='Speed',font='ariel 20',fg='black')
79 #today=date.today()
80 lab_speed=ttk.Label(window,font='ariel 90',fg='green',text='41')
81 lab_km=ttk.Label(window,text='Km/h',font='ariel 20',fg='green')
82
83 lab_s.place(x=690, y=430)
84 lab_speed.place(x=767, y=470)
85 lab_km.place(x=940, y=550)
86
87 #Plate
88 lab_p=ttk.Label(window,text='Plate',font='ariel 20',fg='black')
89 lab_p.place(x=400, y=170)
90 imga = PhotoImage(file= "car_1.png")
91 img23 = ttk.Label(window, image=imga,width='450',height='220',bd=1,
92 relief='solid')
93 img23.place(x=600, y=170)
94 imgo = cv2.imread("car_1.png")
95 b,g,r = cv2.split(imgo)
96 imgo = cv2.merge((r,g,b))
97
98
99 # Convert to Grayscale Image
100 gray_image = cv2.cvtColor(imgo, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
101
102 #Canny Edge Detection
103
```

ANNEXES

```
104 canny_edge = cv2.Canny(gray_image, 170, 200)

105

106 # Find contours based on Edges

107 contours, new = cv2.findContours(canny_edge.copy(), cv2.RETR_LIST,
108 cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

109 contours=sorted(contours, key = cv2.contourArea, reverse = True)[:30]

110

111 # Initialize license Plate contour and x,y coordinates

112 contour_with_license_plate = None

113 license_plate1 = None

114 x = None

115 y = None

116 w = None

117 h = None

118

119 # Find the contour with 4 potential corners and creat ROI around it

120 for contour in contours:

121     # Find Perimeter of contour and it should be a closed contour

122     perimeter = cv2.arcLength(contour, True)

123     approx = cv2.approxPolyDP(contour, 0.01 * perimeter, True)

124     if len(approx) == 4: #see whether it is a Rect

125         contour_with_license_plate = approx

126         x, y, w, h = cv2.boundingRect(contour)

127         license_plate1 = gray_image[y:y + h, x:x + w]

128         break

129

130 # Removing Noise from the detected image, before sending to Tesseract

131 license_plate1 = cv2.bilateralFilter(license_plate1, 11, 17, 17)

132 (thresh, license_plate1) = cv2.threshold(license_plate1, 150, 180,
133 cv2.THRESH_BINARY)

134

135 #Text Recognition

136

137 text1 = pytesseract.image_to_string(license_plate1)

138 #Draw License Plate and write the Text
```

ANNEXES

```
139 imgo = cv2.rectangle(imgo, (x,y), (x+w,y+h), (255,0,0), 3)
140
141
142 #####Fin extraction
143
144
145 im1 = Image.fromarray(imgo)
146 imgt = ImageTk.PhotoImage(image=im1)
147 img23 = ttk.Label(window, image=imgt, width='450', height='220', bd=1,
148 relief='solid')
149 img23.place(x=600, y=170)
150 lab_plate1=ttk.Label(window,font='ariel 20',fg='black',text=text1)
151 lab_plate1.place(x=410, y=210)
152 ##########
153
154
155
156
157 #####
158 def openfilename():
159
160     # open file dialog box to select image
161     # The dialogue box has a title "Open"
162     filename = filedialog.askopenfilename(title = 'Open')
163
164
165
166 def open_img():
167     # Select the Imagename from a folder
168     x = openfilename()
169
170     # opens the image
171     img = Image.open(x)
172
173     # resize the image and apply a high-quality down sampling filter
```

ANNEXES

```
174 img = img.resize((250, 250), Image.ANTIALIAS)
175
176 # PhotoImage class is used to add image to widgets, icons etc
177 img = ImageTk.PhotoImage(image=img)
178
179 # create a label
180 panel = ttk.Label(window, image = img,width='450',height='220',bd=1,
181 relief='solid')
182 panel.place(x=600, y=170)
183 # set the image as img
184 panel.image = img
185 #panel.grid(row = 2)
186 ######
187
188 # Read the image file
189
190 ig=openfilename()
191
192 btn = Button(window, text ='open image', command = open_img).
193 place(x=600, y=170)
194
195
196 img = cv2.imread(ig)
197
198
199
200 b,g,r = cv2.split(img)
201 img = cv2.merge((r,g,b))
202
203
204 # Convert to Grayscale Image
205
206 gray_image = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
207
208 #Canny Edge Detection
```

ANNEXES

```
209 canny_edge = cv2.Canny(gray_image, 170, 200)
210
211 # Find contours based on Edges
212 contours, new = cv2.findContours(canny_edge.copy(), cv2.RETR_LIST,
213 cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
214 contours=sorted(contours, key = cv2.contourArea, reverse = True)[:30]
215
216 # Initialize license Plate contour and x,y coordinates
217 contour_with_license_plate = None
218 license_plate = None
219 x = None
220 y = None
221 w = None
222 h = None
223
224 # Find the contour with 4 potential corners and creat ROI around it
225 for contour in contours:
226     # Find Perimeter of contour and it should be a closed contour
227     perimeter = cv2.arcLength(contour, True)
228     approx = cv2.approxPolyDP(contour, 0.01 * perimeter, True)
229     if len(approx) == 4: #see whether it is a Rect
230         contour_with_license_plate = approx
231         x, y, w, h = cv2.boundingRect(contour)
232         license_plate = gray_image[y:y + h, x:x + w]
233         break
234
235 # Removing Noise from the detected image, before sending to Tesseract
236 license_plate = cv2.bilateralFilter(license_plate, 11, 17, 17)
237 (thresh, license_plate) = cv2.threshold(license_plate, 150, 180,
238 cv2.THRESH_BINARY)
239
240 #Text Recognition
241 text = pytesseract.image_to_string(license_plate)
242 #Draw License Plate and write the Text
243 img = cv2.rectangle(img, (x,y), (x+w,y+h), (255,0,0), 3)
```

ANNEXES

```
244  
245  
246 #print("License Plate : ", text)  
247 #cv2.imshow("License Plate Detection",image)  
248 #cv2.waitKey(0)  
249 #####Fin extraction  
250  
251  
252  
253 lab_plate=ttk.Label(window,font='ariel 20',fg='black',text=text)  
254  
255 lab_p.place(x=400, y=170)  
256 lab_plate.place(x=410, y=210)  
257  
258 #Matricule Image  
259  
260 #cv2.imshow("License Plate Detection",image)  
261 #cv2.waitKey(0)  
262  
263 im = Image.fromarray(img)  
264 imgtk = ImageTk.PhotoImage(image=im)  
265 img2 = ttk.Label(window, image=imgtk,width='450',height='220',bd=1,  
266 relief='solid')  
267 img2.place(x=600, y=170)  
268  
269  
270 window.mainloop()
```

ANNEXES