

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE ÉCOLE DE GÉNIE

**Conception et développement d'un analyseur inertiel  
pour la détection de défaillance des rails d'un  
élevateur minier.**

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR  
Mohamad El Hajj Khalil

Novembre 2022



## REMERCIEMENTS

À l'issue de la rédaction de cette recherche, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui ont cru en moi et qui m'ont permis d'arriver au bout de cette thèse.

Je tiens à remercier tout d'abord mon directeur de recherche, professeur Nahi Kandil , pour m'avoir fait confiance dès le début, pour ses multiples conseils et pour sa participation scientifique.

Je suis également reconnaissant à mon codirecteur de thèse, professeur *Nadir Hakem*, pour m'avoir guidé et encouragé tout au long de ce travail. J'aimerais également lui dire à quel point j'ai apprécié toutes les heures qu'il a consacrées à diriger cette recherche.

Un grand merci à mes collègues *Reine Ibrahim, Ali Issa, Bassam Zahreddine, Mohamad madi, Nabih Allaw* et *Nour Zaarour* pour la bonne ambiance de travail qui a rendu cette formation très sympathique.

## Contents

.....	
RÉSUMÉ .....	1
INTRODUCTION .....	2
I. <i>Motivation et problématique</i> .....	2
II. <i>Solution proposée</i> .....	4
III. <i>Méthodologie</i> .....	6
IV. <i>Hypothèse</i> .....	7
CHAPITRE 1 .....	8
ÉTAT DE L'ART:.....	8
1.1. <i>Détermination du profil vertical du rail par des méthodes inertielles</i> .....	8
1.1.1. <i>Introduction</i> .....	8
1.1.2. <i>Description du modèle de détermination du profil vertical du rail</i> .....	9
1.1.3. <i>Mesures expérimentales</i> .....	11
1.1.4. <i>Résultat</i> .....	11
1.2. <i>Diagnostic des défauts de l'accéléromètre</i> .....	13
1.2.1. <i>Architecture</i> .....	13
1.2.2. <i>Conclusion</i> .....	14
CHAPITRE 2 .....	15
ANALYSEUR INERTIEL PLAT-FORME .....	15
2.1. <i>Analyseur inertiel</i> .....	15
2.2. <i>Dispositif d'acquisition des données</i> .....	19
2.3. <i>Matériel Et Logiciel</i> .....	22
2.3.1. <i>Prototype D'un Élévateur Minier</i> .....	22
2.3.2. <i>TÉLÉPHONE INTELLIGENT</i> .....	24
2.3.3. <i>Software de développement utilisé</i> .....	25
CHAPITRE 3 .....	28
ANALYSEUR INERTIEL ARCHITECTURE .....	28
4.1. <i>Détection du mouvement du transporteur</i> .....	30
4.2. <i>Ajustement de system de référence (Matrice de transformation)</i> .....	36
4.3. <i>Création du registre de données</i> .....	39
4.4. <i>Analyse des données</i> .....	41

• <i>Calcule vitesse et position</i> .....	42
• <i>Calcule les impacts et les anomalies.</i> .....	46
CHAPITRE 4.....	51
VALIDATION DU SYSTÈME.....	51
TEST/RESULTAT .....	51
4.1. <i>Validation du fonctionnement d'acquisition</i> .....	53
4.2. <i>Validation test du programme et marge d'erreur d'analyse de données</i> .....	57
4.3. <i>Validation test du programme de détection d'anomalie et marge d'erreur</i> .....	62
CONCLUSION.....	68
REFERENCES .....	70

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: général diagramme de l'élévateur .....	4
Figure 2: Méthodologie de programme .....	7
Figure 3: Modèle de deux masses .....	9
Figure 4: Différence entre les profils de rail .....	12
Figure 5: Comparaison entre les profils verticaux des rails obtenus avec des méthodes inertielles et optiques. Section de 134,5 m, rail droit. Inertiel: — ; optique:---.....	12
Figure 6: Cinq états de câblage des accéléromètres IEPE observés lors de la maintenance et des opérations en usine. ....	14
Figure 7: Méthodologie simplifier du système d'analyse des anomalies .....	18
Figure 8: Fréquence d'acquisition en fonction de la vitesse maximale du transporteur et la précision de la détection .....	21
Figure 9: Prototype .....	23
Figure 10: Block Diagramme .....	26
Figure 11: Schéma fonctionnel du programme de détections d'anomalies .....	30
Figure 12: Détection de mouvement.....	35
Figure 13: Système de référence utilisé sur le transporteur, système de référence du téléphone et angles de la matrice d'Euler .....	37
Figure 14: Schéma fonctionnel du programme d'analyse des données.....	41
Figure 15: Schéma simplifié de la maquette utilisé en laboratoire .....	52
Figure 16: Détection de mouvement du programme d'acquisition.....	55
Figure 17: Accélération mesurées par le programme d'acquisition selon le système de référence du téléphone .....	56
Figure 18: Accélération mesurées par le programme d'acquisition selon le système de référence du transporteur .....	56
Figure 19: Vérification du calcul de la vitesse effectué par le programme d'analyse des données .....	57
Figure 20: Histogramme d'erreur .....	59
Figure 21: Vérification du calcul de la position du programme d'analyse.....	60
Figure 22: Différence entre la position calculée et celle mesurée – Position maximale du transporteur .....	61
Figure 23: Différence entre la position calculée et celle mesurée – Position minimale du transporteur .....	61
Figure 24: Anomalies détectées pendant les déplacements du transporteur .....	64
Figure 25: Bilan des anomalies détectées pendant le parcours .....	65
Figure 26: Bilan des positions problématiques .....	66
Figure 27: Erreur de détection .....	67

## LISTE DES TABLES

Table 1: Caractéristiques des capteurs du téléphone utilise .....	24
Table 2: Exemple du tableau tampon.....	33
Table 3: Registre de données .....	40
Table 4:Étapes effectuées par le programme d'analyse .....	41
Table 5: Table de données et de calculs utilisés par le programme d'analyse.....	45
Table 6: Paramètre d'entrées associes a l'expérimentation. ....	54
Table 7: Paramètres d'entrées associés utilisés avec le programme de détection pour l'expérimentation .....	63
Table 8: Probabilité de fréquence relative .....	67

## RÉSUMÉ

L'innovation et la technologie jouent un rôle crucial dans nos vies où la communication entre machines est un outil essentiel et nécessaire pour améliorer l'efficacité de ses processus, réduire les coûts et répondre aux besoins du monde en évolution rapide qui nous entoure. L'Internet des objets (IoT) implique de nombreux attributs qui le distinguent des autres. Il s'agit d'un système intégré avancé connectant des appareils, tels que des machines, des capteurs et des infrastructures, via Internet, et communiquant des messages entre machines en collectant, analysant et envoyant des données via Internet sans intervention humaine. Ce projet propose et met en œuvre une application IoT pour détecter la déformation ou la rupture des poutres de guidage d'un puits de mine souterrain. Cette détection importante assurera la sécurité des travailleurs, réduira les blessures et préviendra les accidents dans cet environnement industriel difficile. En remplacement de l'ancien contrôle visuel peu précis opéré par le mineur, ce travail propose de concevoir et de construire un localisateur d'anomalie sur les poutres ou la structure ferroviaire servant à guider la cage de transport qui circule dans le puits souterrain de la mine. L'application IoT proposée mesure et traite, en temps réel et en continu, les accélérations et les utilise pour détecter et localiser les dommages aux rails. Plusieurs tests sont menés pour prouver l'efficacité de notre solution proposée. Les résultats montrent son efficacité dans le positionnement de la cage de transport, ainsi que la détection de toute anomalie et sa position dans l'environnement complexe de la mine. Ce travail présente la procédure détaillée ainsi que les bancs d'essai réalisés dans différentes conditions opérationnelles. Les erreurs sur l'estimation de positionnement sont calculées en montrant la précision de la méthode. De plus, l'erreur sur la détection des dommages au rail est calculée prouvant la fiabilité de la solution proposée.



## INTRODUCTION

### *I. Motivation et problématique*

Le Canada possède l'un des plus grands départements d'approvisionnement minier, offrant des services miniers tels que l'ingénierie, l'ingénierie géotechnique, l'environnement et les finances. Au total, il regroupe plus de 3 772 entreprises. En 2017, l'industrie minière du Canada a contribué pour 97 milliards de dollars américains au produit intérieur brut (PIB) du Canada. À l'échelle nationale, l'industrie emploie directement plus de 426 000 travailleurs et emploie indirectement 208 000 autres travailleurs. Les travaux effectués couvrent de multiples domaines tels que l'exploitation minière, la fonte et la fabrication [1].

La détérioration des guides est connue par les minières, elle est un paramètre d'opération surveillé par les gens d'entretien d'une mine souterraine. La réglementation minière québécoise (S-2.1, r.14) [2] oblige les compagnies minières d'effectuer une inspection visuelle des guides de chaque compartiment du puits une fois par semaine en plus d'une inspection minutieuse une fois par mois. Les inspections sont effectuées par un travailleur installé sur le toit du transporteur qui inspecte visuellement les guides sur toute la longueur du puits à vitesse réduite et en cognant sur les guides à l'aide d'un marteau pour en déceler des luxations. Il faut noter que les cognements sont intimement liés à la vitesse du transporteur, donc, une inspection à basse vitesse ne reflète pas le cognement réel provoqué à vitesse d'opération normale. Le seul moyen que dispose la minière pour prendre en compte des cognements à vitesse normale est avec le ressenti de l'opérateur de la cage qui passe la majeure partie de son temps à circuler dans le transporteur. L'opérateur ne peut cependant pas quantifier ni localiser avec précision la position de l'impact dans le puits de la mine. De plus, les inspections peuvent être subjectives d'une mine à l'autre, car elles reposent essentiellement sur l'expérience de l'employé effectuant la tâche et les mines peuvent

avoir des critères d'inspection différents.

Comme le puits d'une mine souterraine est la voie d'accès principal d'une mine souterraine, un bris mécanique sur l'un des transporteurs ou sur l'un des guides d'alignement peut provoquer une baisse de productivité importante pour la minière. Il est donc paradoxal que la surveillance d'un élément aussi critique soit faite avec des techniques d'inspection et de prévention aussi rudimentaires. Le développement d'un dispositif de surveillance utilisant des technologies plus modernes pourrait rendre les inspections plus objectives, plus précises et permettrait de fixer des standards de comparaison plus adéquate entre les minières. En général, et sans aucun doute, la nature des travaux souterrains pose de grands défis tels que la traçabilité de la sécurité des travailleurs, la mobilité et bien d'autres [2]. Par conséquent, avec le développement continu du secteur minier canadien et de l'équipe expérimentale du CANMET, dans les zones complexes, le défi consistait à utiliser la localisation et l'analyse inertielle verticale pour détecter la défaillance des rails et localiser l'élévateur dans le tunnel vertical, de détecter le mouvement du transporteur et éliminer l'erreur de vibration qui en cause dans l'environnement complexe de la mine.

## II. Solution proposée

Pour résoudre les problèmes existants, une application Android capable de collecter des données à partir d'un téléphone doté de capteurs intégrés et de les envoyer à un système d'analyse sur un serveur distant. La figure 1, illustre la conception de l'élévateur attache à une grue tandis que les points rouges illustrent les rails, cibles de notre étude. En général, grâce à cette application, l'accélération, la vitesse, la distance de déplacement, la pression, l'humidité et la température de chaque point de la trajectoire jusqu'à la destination peuvent être mesurées.

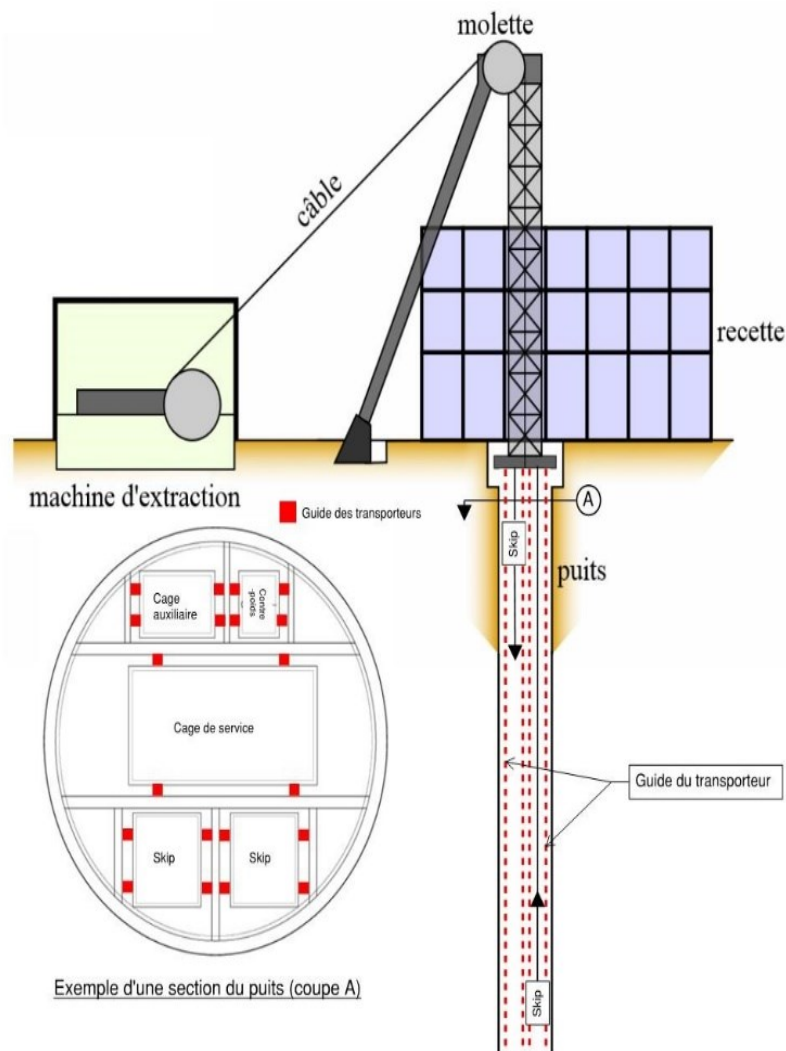


Figure 1: Diagramme général d'un système de cage minier

Ces informations peuvent être stockées dans la base de données du programme et utilisées à tout moment une fois collectées. Par conséquent, en utilisant ces données collectées, et après divers calculs on peut localiser la position de l'élévateur et l'anomalie des rails peut être détecté.

D'une manière générale, il existe un certain nombre de dangers auxquels les travailleurs sous terre seront confrontés. Cela inclut les strates instables (les collines et les toits s'effondrent), la pollution de l'air, les explosions d'incendie et les inondations (si la mine n'est pas couverte). L'élévateur contient plusieurs dispositifs de sécurité pour empêcher la cage de heurter le fond du puits, le dispositif de sécurité installé sur la cage empêche de tels accidents en cas de défaillance du frein de la machine ou de rupture du câble de la grue. Cependant, la conception inhérente du dispositif de sécurité le rend inefficace dans le sens ascendant [3]. De là, on peut remarquer la difficulté de l'environnement traversera par la cage pour atteindre la destination désirer dans le mine,

Après de nombreux tests utilisant différentes formules, nous avons pu mesurer et rapporter les taux/nombres filtres sous forme de tableau pour la force/accélération spécifique de l'élévateur dans les deux sens. Les sorties des données pour l'IMU sont généralement des accélérations du corps et des mesures de champ magnétique [4].

Ce travail présente une nouvelle approche basée sur la localisation et la détection des défaillances des rails d'un élévateur en utilisant une application construite sur un téléphone Android en utilisant les accélérations sur 3 axes et en les envoyant à un serveur qui calcule la vitesse et la position de la cage de transport. Les résultats montrent l'efficacité de la solution proposée. Principalement, ce travail a permis de contribuer aux points suivants :

- Détecter, quantifier, localiser les anomalies associées aux guides des transporteurs miniers verticaux.
- Analyser, en continu et en opération normale, la qualité d'alignement des guides des transporteurs miniers verticaux installés dans le puits de la mine.

- Aider les minières dans leurs travaux d'entretiens préventifs du puits en indiquant la position et l'amplitude des anomalies à réparer.
- Diminuer les arrêts imprévus associés aux transporteurs miniers.
- Fournir les conditions d'opération des transporteurs (position, vitesse et accélération) lors d'arrêts imprévus (panne électrique, arrêt d'urgence, etc.). Ces informations peuvent servir lors d'enquête d'incident ou pour l'optimisation du système de contrôle.
- De visualiser l'effet des réparations des guides une fois la réutilisation des transporteurs. En effet, la réparation d'une anomalie doit en principe diminuer l'impact mesuré par l'analyseur d'anomalie à l'endroit où la réparation a été effectuée.
- De mesurer les impacts ressentis par le transporteur minier pendant le fonctionnement.

### *III. Méthodologie*

Le flux de système de la figure 2 commencer après avoir placé le téléphone avec ses capteurs intégrés dans l'élévateur en le déplaçant dans le tunnel, avec le mouvement, le système commencera à collecter les données d'accélération en fonction des paramètres définis. Une fois l'élévateur arrêté et en fonction de la disponibilité du réseau de communication entre le téléphone et le serveur où l'application est déployée les données seront transférées afin de calculer la vitesse et la position de l'élévateur sur le rail du tunnel. Après les résultats seront affichés et les actions nécessaires seront prises par l'équipe d'exploitation, tant que l'élévateur se déplace, les données continueront d'être collectées jusqu'à ce que l'élévateur atteigne sa destination et qu'un accès Wi-Fi soit disponible. Si le téléphone ne peut joindre un réseau Wi-Fi, les capteurs resteront en mode de collecte de données jusqu'à ce que la communication soit établie et que les données soient envoyées.

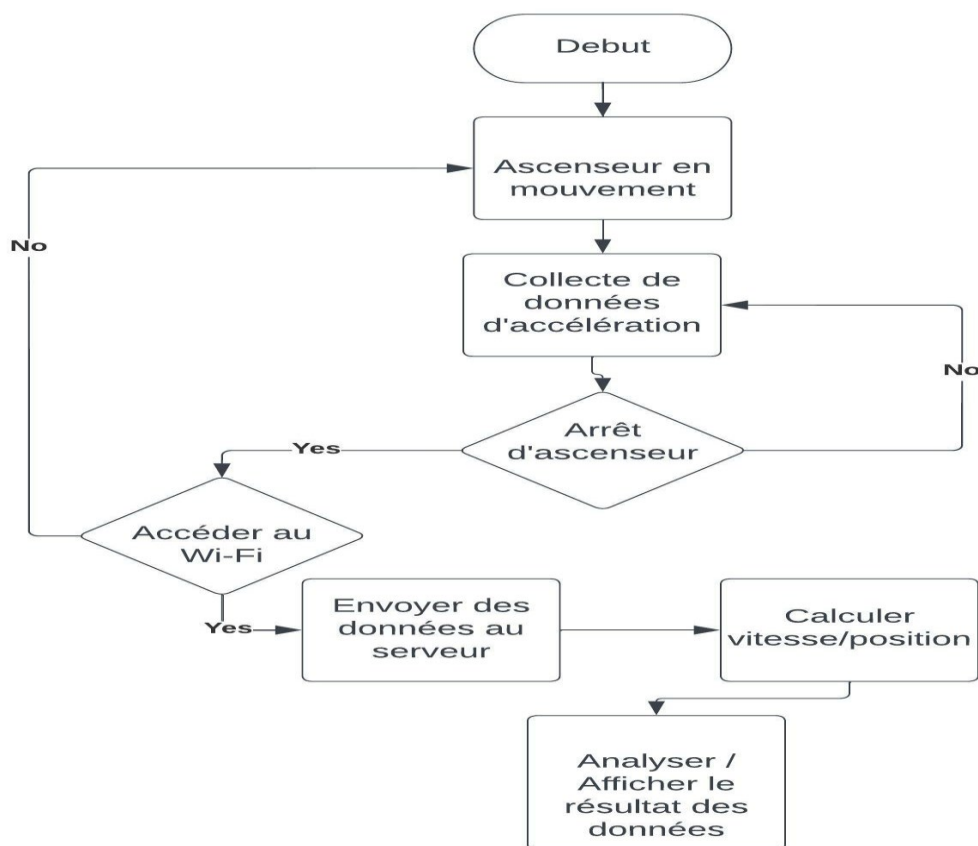


Figure 2: Organigramme du programme proposé

#### IV. Hypothèse

Dans une zone complexe, telle qu'un environnement minier, le défi consiste à utiliser la localisation verticale inertielle pour localiser le transporteur minier dans le tunnel vertical et détecté les anomalies, pour cela plusieurs hypothèse ont été développées afin de simuler le system de transport vertical de la mine, tel qu'un prototype d'un élévateur minier est réaliser au laboratoire, une pièce métallique qui joue le rôle d'anomalie sur les rails du prototype. Dans notre étude on a supposé l'existence des réelles vibrations afin de les éliminer, comme nous avons également effectué des simulations pour la vitesse maximale et minimale du transporteur. Donc on a créé un environnement simulant à l'environnement minier.

## CHAPITRE 1

### ÉTAT DE L'ART:

Le centrale inertielle a fourni son utilité dans l'industrie moderne, ou il a été introduit pour aider et surveiller les activités des humaines et des machines. Dans ce chapitre, on présente plusieurs travaux qui utilisent les capteurs d'accéléromètre comme instrument de mesure pour traiter leurs données. Comme la détermination du profil des rails d'un train en étudiant les données d'accélération et le diagnostic des informations du système de gestion de la maintenance intègre dans une industrie. Ces deux projet sont base sur les capteurs d'accéléromètre pour collecte les données et les traites par différentes méthodes.

#### *1.1. Détermination du profil vertical du rail par des méthodes inertielles*

##### *1.1.1. Introduction*

Pour obtenir le profil du rail une nouveau méthode inertielle est introduise dans ce projet par la détermination du profil des rails verticaux. Le modèle développé est basé sur les accélérations verticales produites par les essieux ferroviaires mesurées dans des trains circulant normalement et calcule les irrégularités ferroviaires qui les provoquent. Le modèle résout les équations à l'aide de la transformée de Fourier et trouve la fonction de transfert dans le domaine fréquentiel qui relie les fonctions d'entrée et de sortie. Ce programme fournit une solution de retour dans le domaine temporel impliquant des transformées de Fourier inverses, et les données sous-jacentes de ce projet sont des données mesurées à Madrid. L'efficacité du modèle est analysée en comparant les résultats donnés avec les profils de rail obtenus par des méthodes optiques [5].

En plus les travaux réalisés est basé à partir de la procédure déjà développée à l'aide d'accélération pour déterminer le rail profil vertical. Ce projet compare et utilise deux procédures pour obtenir le profil des rails d'un processus de filtrage en bande passe et d'une décomposition en ondelette [6].

### 1.1.2. Description du modèle de détermination du profil vertical du rail

L'idée principale de ce projet est d'approximer le profil des rails vertical par la méthode inertielle dans le but de savoir s'il y a besoin de maintenance ou non. Un accéléromètre est placé sur le début et la fin des rails pour mesurer l'accélération verticale en fonction du temps et par double intégrale le déplacement est calculé [7].

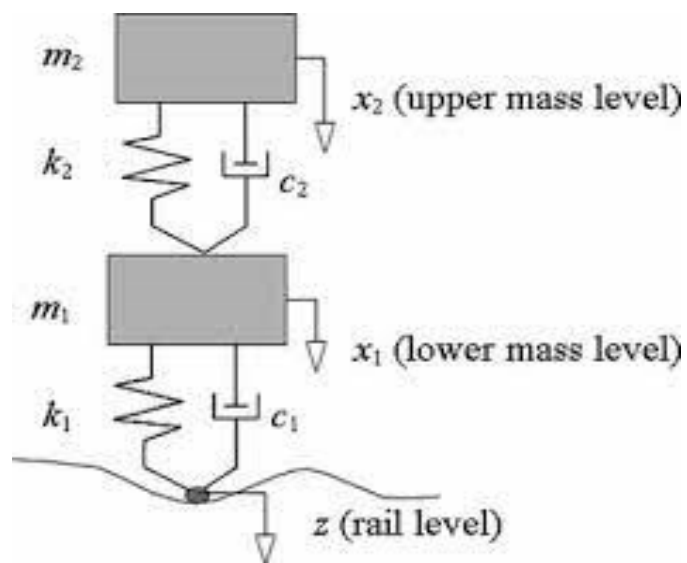


Figure 3: Modèle de deux masses



Le projet présente une nouvelle procédure pour déterminer le profil vertical du rail au moyen de méthode inertielle [8].

Ce modèle, illustré sur la figure 3, considère le train comme deux masses, simulant seulement un quart de bogie. La masse inférieure représente la moitié d'un essieu, la masse supérieure représente la masse d'un quart d'un châssis de bogie, et le ressort et l'amortisseur  $K_2$ ,  $C_2$  respectivement situées entre ces deux masses qui représentent la suspension primaire. La piste est représentée par la profile  $Z$ , la raideur  $K_1$  et l'amortisseur  $C_1$  sont pour le contact entre la roue et le rail.

Par conséquent, les équations de ce modèle exprimées dans le domaine temporel sont [9] :

$$(1a) \quad m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1) = 0$$

$$(1b) \quad m_1 \ddot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - k_2 x_2 + (k_1 + k_2) x_1 - c_1 \dot{z} - k_1 z = 0$$

Où  $x_1$  représente le déplacement vertical de la masse,  $\dot{x}_1$  représente la première dérivée par rapport au temps (vitesse verticale) et  $\ddot{x}_1$  représente la seconde dérivée (accélération verticale).

Le modèle est exécuté et trouve la solution dans le domaine fréquentiel, et donc les équations doivent être transformées dans ce domaine en appliquant la transformée de Fourier. De cette manière, les équations (1a) et (1b) deviennent :

$$-\omega^2 m_2 X_2(\omega) - i\omega c_2 (X_2(\omega) - X_1(\omega)) + k_2 (X_2(\omega) - X_1(\omega)) = 0 \quad (2a)$$

$$-\omega^2 m_1 X_1(\omega) + i\omega c_2 X_2(\omega) - i\omega c_1 X_1(\omega) - k_2 X_2(\omega) + (k_1 + k_2) X_1(\omega) - k_1 Z(\omega) = 0 \quad (2b)$$

Où  $i$  est l'unité imaginaire,  $\omega$  est la fréquence angulaire et  $X_1(\omega)$ ,  $X_2(\omega)$  et  $Z(\omega)$  sont les fonctions transformées pour  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  et  $z(t)$ , respectivement.

### *1.1.3. Mesures expérimentales*

Les données réelles de l'application numérique proviennent du tronçon de voie entre les stations Ibiza et Príncipe de Vergara sur la ligne 9 du métro de Madrid. La distance totale entre les deux stations de métro est de 2863 mètres. Ce tronçon comprend une courbe de rayon 1000 m et une autre de rayon 290 m. Longitudinal avec trois rampes de 5, 18,2 et 7 mm/m. Les données numériques sont collectées par VAI (Vehículo de Auscultación de Instalaciones, qui signifie Plant Monitoring Vehicle), un nouveau type de véhicule que le métro de Madrid utilise depuis 2008 pour surveiller différentes infrastructures et autres installations ferroviaires.

### *1.1.4. Résultat*

La figure 1 montre les différences de niveau orbital des sections utilisées pour l'étalonnage dans le domaine spatial pour les deux méthodes. Puisque la moyenne des deux chemins est nulle, la différence entre eux est également nulle. L'écart type est de 1,74 mm, ce qui signifie que 95 % des données des deux échantillons diffèrent de moins de 3,48 millimètres.

La figure 4 montre les trajectoires verticales des rails de guidage pour les deux méthodes dans la section utilisée pour l'étalonnage. Comme mentionné précédemment, grâce à un bon accord de phase, les pics sont uniformément localisés dans l'espace, et comme les amplitudes moyennes des deux spectres sont cohérentes, les pics les plus grands ont des amplitudes similaires, même si les méthodes inertielles ont tendance à sous-estimer ces derniers pics. En raison de certaines différences spécifiques dans les amplitudes de ces longueurs d'onde, des pics plus petits montrent des décalages plus importants.

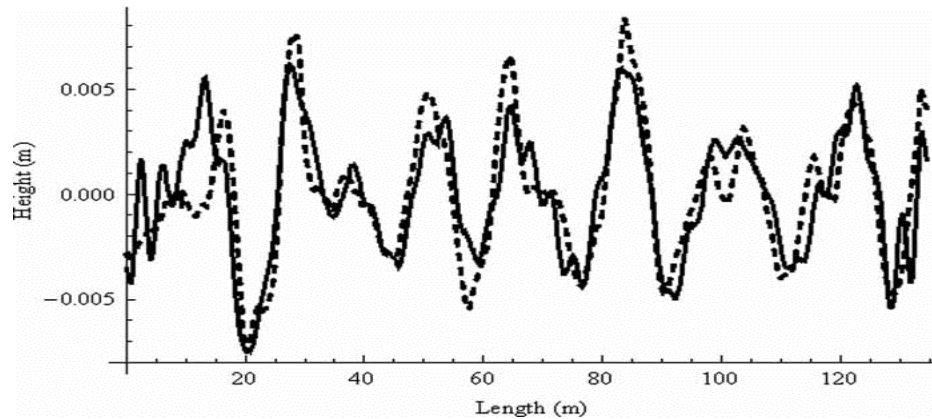


Figure 4: Différence entre les profils de rail

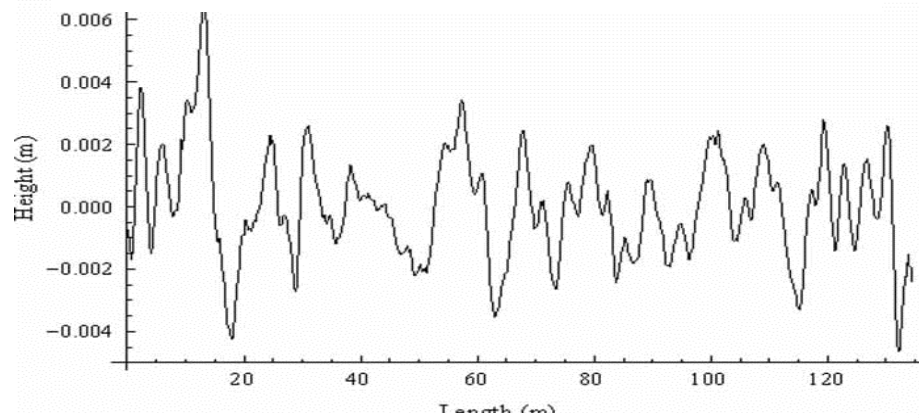


Figure 5: Comparaison entre les profils verticaux des rails obtenus avec des méthodes inertielles et optiques. Section de 134,5 m, rail droit. Inertiel: — ; optique:----

Une nouvelle procédure pour obtenir des profils verticaux d'orbite à l'aide de méthodes inertielles est présentée. Ces méthodes inertielles consistent à rechercher des défauts verticaux dans le rail en mesurant l'accélération verticale dans l'essieu ferroviaire provoquée par ces défauts dans le rail. Le programme est basé sur un modèle représentant l'interaction entre le train et la voie, qui est modélisé comme un système de ressort et d'amortisseur à deux degrés de liberté. Toute une routine est en place pour mesurer ces accélérations afin de déterminer si une voie doit être conservée.

## *1.2. Diagnostic des défauts de l'accéléromètre.*

Ce projet a été utilisé à Taïwan pour diagnostiquer l'intégrité des informations des systèmes de gestion de la maintenance dans l'industrie lourde. Il a obtenu des signaux de vibration en attachant des capteurs aux machines et aux systèmes d'entraînement des machines pour obtenir des signaux de réponse au stress et en enregistrant les ondes de vibration. Pour garantir la fiabilité et la précision du diagnostic, il est important d'assurer un suivi et un entretien appropriés des capteurs et des systèmes de surveillance [10].

### *1.2.1. Architecture*

Pour les accéléromètres fonctionnant dans des environnements chauds et humides imprévisibles, les défauts du capteur électronique piézoélectrique intégré (IEPE) doivent être identifiés par une inspection humaine. Cinq classes d'états de santé généraux ont été généralement considérées dans cette étude, y compris la connexion inversée, le court-circuit, la déconnexion et le circuit ouvert [11].

Si le système de gestion des installations peut diagnostiquer et juger automatiquement ces cinq états de fonctionnement, il évitera non seulement un diagnostic inexact en raison d'erreurs de capteur, mais également un gain de temps et une réduction des temps d'arrêt dans les opérations de l'installation, ainsi que des économies d'efforts de maintenance. Les cinq conditions de santé courantes du câblage et de l'accéléromètre observé sur la ligne de fabrication ont été illustrées à la Figure 6.

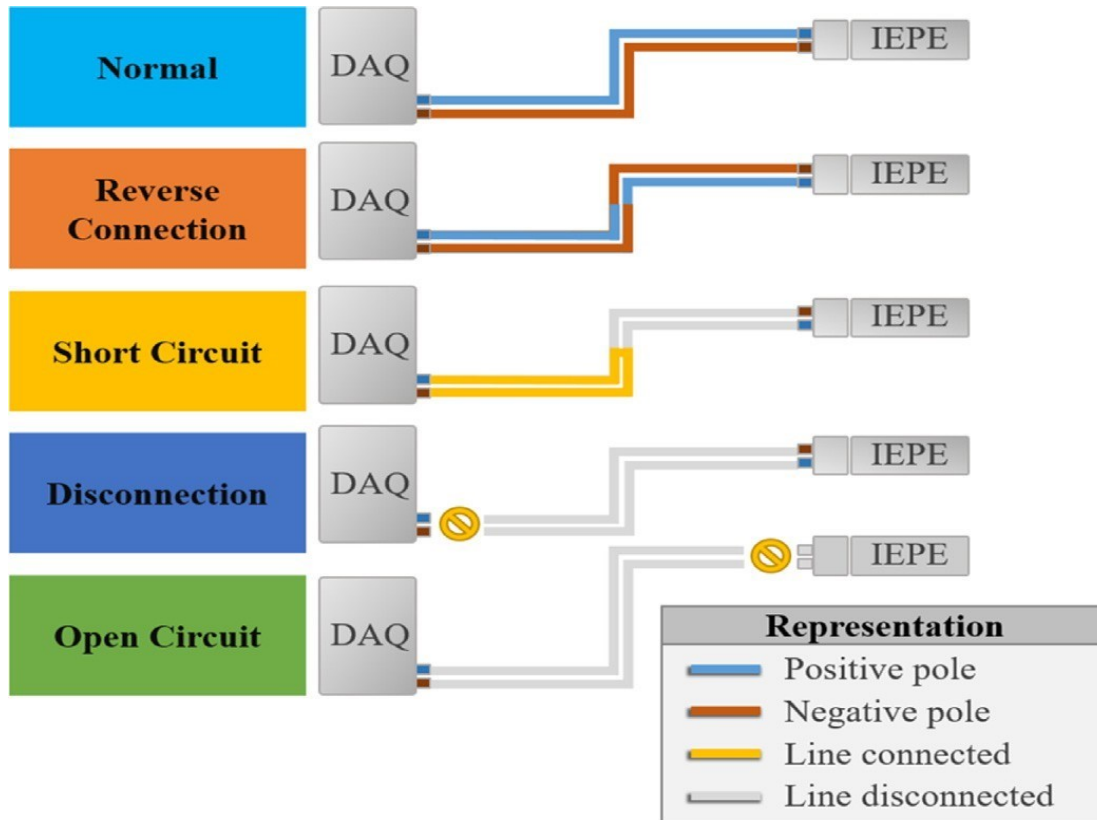


Figure 6: Cinq états de câblage des accéléromètres IEPE observés lors de la maintenance et des opérations en usine.

### 1.2.2. Conclusion

Ce projet a présenté un algorithme de diagnostic de capteur d'accéléromètre IEPE pour poursuivre une application d'usine intelligente. La méthode proposée a été testée et a atteint une précision  $> 99\%$  dans la détermination de cinq conditions de santé des accéléromètres. La réduction de dimension proposée peut réduire les paramètres requis pour établir un modèle de suivi à long terme.

## CHAPITRE 2

### ANALYSEUR INERTIEL PLAT-FORME

Dans ce chapitre, on va présenter les points de vue de l'analyseur inertiel, l'importance de ce system dans l'environnement minier, la méthodologie simplifier de système d'analyse des anomalies, les matériaux et les logiciel utiliser pour tester le fonctionnement de system proposer.

#### *2.1. Analyseur inertiel*

Le système de détection d'anomalie proposé par CMIN repose sur le principe de la première loi de Newton notamment nommé « principe d'inertie ». Selon le livre de référence « Engineering Mechanics Dynamics » [12], la première loi de Newton stipule que tout corps conservera son état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins qu'une force ne soit appliquée sur le corps, l'équation 1 montre la relation de cette loi. Les transporteurs miniers se comportent comme des objets en mouvement uniforme en ligne droite, donc toutes accélérations ressenties pendant un déplacement à vitesse constant proviennent d'une force externe associée à un problème en lien avec les guides d'alignement des transporteurs. En mesurant les accélérations pendant les déplacements des transporteurs, il devient possible de quantifier les problématiques rencontrées sur les guides d'alignements.

Le système de détection repose également sur la relation mathématique qui existe entre la vitesse, la position et l'accélération. Selon le livre de référence « Engineering Mechanics Dynamics », l'accélération d'un objet se définit par le rapport entre le changement de vitesse et le temps nécessaire pour effectuer ce changement et peut être exprimée avec l'équation 2. La vitesse d'un objet correspond au rapport entre la variation de la position de l'objet et le temps nécessaire pour faire ce changement et peut être exprimée avec l'équation 3. En combinant l'équations 2 et 3, il devient

possible de calculer la position d'un objet rectiligne uniquement avec l'accélération qui est appliquée sur l'objet et peut être calculée avec L'équation 4. En mesurant l'accélération appliquée parallèlement au déplacement du transporteur, il devient possible de calculer sa vitesse et sa position. Dans le cadre des transporteurs miniers verticaux, toutes les accélérations parallèles à l'axe de déplacement sont provoquées par le système de mécanisation du transporteur.

En considérant les deux principes ci-dessus, toutes les anomalies en lien avec les guides des transporteurs miniers peuvent être associées à des positions du puits de la mine uniquement en mesurant les accélérations ressenties par le transporteur en fonction du temps pendant les déplacements. La méthodologie utilisée pour la réalisation du prototype s'exécutera en trois étapes.

La première étape consiste à faire l'acquisition des mesures d'accélération dans le transporteur pendant les déplacements avec l'utilisation d'un dispositif d'acquisition installé sur le transporteur et d'un programme d'acquisition adapté pour cette tâche. Les données enregistrées par l'appareil seront par la suite transmises vers un espace de stockage externe par lien de communication sans fil chaque fois que le transporteur revient à sa position initiale.

La deuxième étape consiste à analyser des données pour déterminer la vitesse, la position et les impacts transversaux ressentis par le transporteur pendant ces déplacements. Cette étape est effectuée par un programme installé sur un ordinateur situé à l'extérieur du site minier. Cette étape n'est pas effectuée par l'appareil d'acquisition installé sur le transporteur pour limiter la puissance de calcul du dispositif d'acquisition, prolonger l'autonomie de l'appareil et réduire le risque de bogues en lien avec l'acquisition des données. Chaque fois qu'un nouveau bloc de données est enregistré sur l'espace de stockage externe, le programme d'analyse est exécuté. Le programme commence par calculer la vitesse, la position et l'accélération perpendiculaire au déplacement pendant ses déplacements. Tous les calculs effectués

par le programme d'analyse et une partie des données transmises par le programme d'acquisition du transporteur sont enregistrés sur l'espace de stockage externe dans un registre de données globales.

La troisième étape consiste à détecter des anomalies présentes dans le registre de données. Pour ce faire, une approche statistique de distribution normale effectuée indépendamment pour chacun des déplacements contenus dans le registre est effectuée. La détection est produite par un programme adapté pour cette fin et est installée sur le poste de contrôle de l'opérateur. Le programme montre toutes les positions du puits où des anomalies ont été détectées. Pour chaque position où des anomalies ont été détectées, le programme affiche également l'impact minimal, moyen et maximal mesuré. L'opérateur peut, en cliquant sur une des positions, afficher les impacts en fonction du temps ou de la vitesse du transporteur. Le programme affiche les anomalies selon un code de couleur associé à la gravité de l'anomalie (vert, jaune et rouge). Si l'une des anomalies dépasse un certain seuil de tolérance fixé par l'opérateur, une alarme est déclenchée par le programme.

La figure 7 montre le fonctionnement simplifié du système de détection d'anomalies proposé pour le prototype.



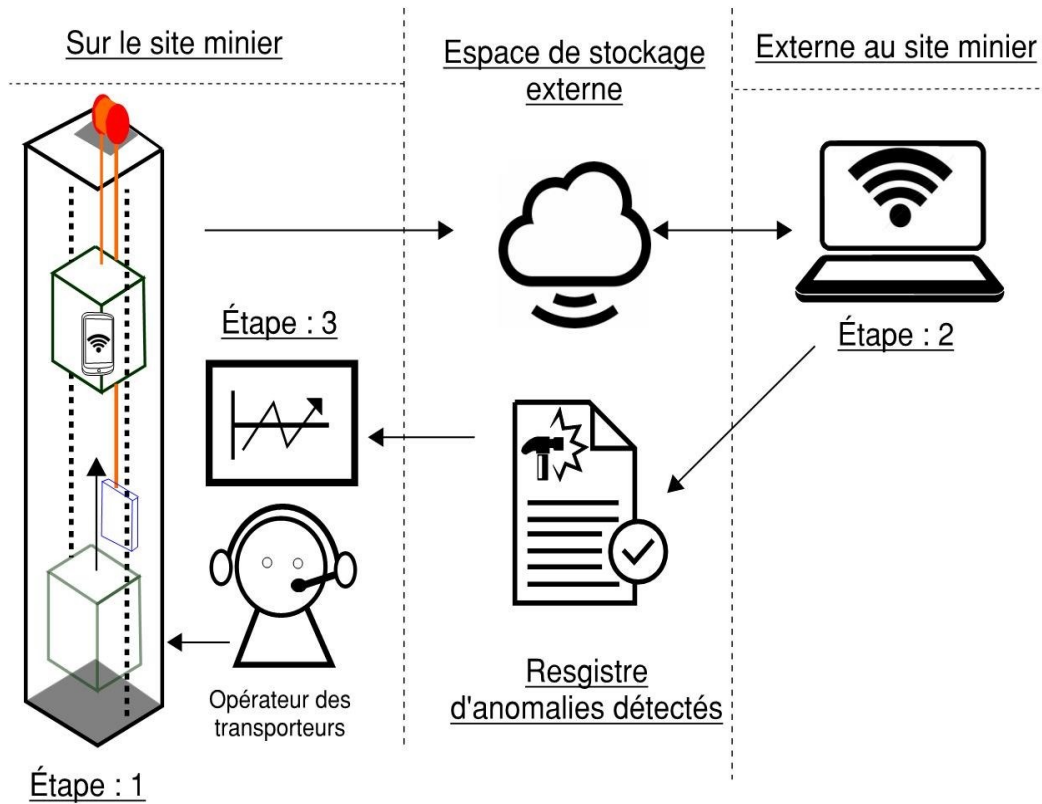


Figure 7: Méthodologie simplifier du système d'analyse des anomalies

Étape 1 : Programme d'acquisition des données.

Étape 2 : Programme d'analyse des données.

Étape 3 : Programme de détection d'anomalies.

$$F = ma \quad (1)$$

$$a = \frac{dv}{dt} \rightarrow dv = a * dt \rightarrow v = \int a * dt + v_0 = at + v_0 \quad (2)$$

$$v = \frac{ds}{dt} \rightarrow ds = v * dt \rightarrow s = \int v * dt + s_0 = vt + s_0 \quad (3)$$

$$s = \int v * dt + s_0 \rightarrow s = \int (at + v_0)dt + s_0 = \frac{at^2}{2} + v_0t + s_0 \quad (4)$$

### Légende

$F$  : Force appliquée sur la masse (N).

$m$  : Masse de l'objet (kg).

$a$  : Accélération ( $m/s^2$ ).

$v$  : Vitesse de déplacement de l'objet (m/s).

$v_0$  : Vitesse de déplacement de l'objet avant l'application de l'accélération (m/s).

$t$  : Temps d'application de l'accélération sur l'objet (s).

$s$  : Déplacement de l'objet par rapport à son point de référence (m).

$s_0$  : Déplacement initial de l'objet par rapport à son point de référence (m).

### *2.2. Dispositif d'acquisition des données.*

Le dispositif d'acquisition des données nécessite l'utilisation d'accéléromètres, d'un espace mémoire, un processeur, un système d'alimentation et un mode de communication sans fil pour pouvoir fonctionner d'une manière fiable. Les accéléromètres et le processeur doivent pouvoir fonctionner avec une fréquence de lecture de données permettant une bonne détection des anomalies pendant les déplacements des transporteurs.

Cette fréquence d'acquisition dépend de la vitesse du transporteur et la précision de détection désirée et peut être exprimée avec l'équation 5. Selon le règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines [13], la vitesse des transporteurs miniers transportant du personnel ne peut dépasser 8 m/s. En ce qui concerne les transporteurs du minerai, il n'y a pas de règlement limitant la vitesse et en pratique celle-ci peut atteindre 18 m/s. Pour la précision de détection, cette valeur correspond à la distance parcourue par le transporteur entre chaque acquisition, lorsque celui-ci atteint sa vitesse maximale. Si une anomalie survient entre deux lectures, l'anomalie ne pourra être détectée par le système de détection. Dans le cadre du développement du prototype, cette précision a été fixée entre 0,02 à 0,15 m. L'équation 4 montre les fréquences d'acquisition devant être utilisées en fonction de la vitesse maximale du transporteur

et la précision de détection choisie. Selon la figure 8, le dispositif d'acquisition doit pouvoir fonctionner avec une fréquence de lecture d'au moins 850 Hz. Les accéléromètres doivent également pouvoir lire les accélérations appliquées sur les transporteurs miniers pendant leurs utilisations. Selon le règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines [14], la décélération permise pour un système de freinage d'urgence pour un transporteur transportant du personnel doit être comprise entre 5 à 7,5 m/s<sup>2</sup>. Selon l'étude référencée [15], les accélérations maximales permises pour les cognements pendant le déplacement des transporteurs ne doivent pas dépasser 4.9 m/s<sup>2</sup> (0.5G). Les accéléromètres prévus pour le dispositif d'acquisition doivent donc être en mesure de mesurer des accélérations maximales de 20 m/s<sup>2</sup>.

$$f = \left[ \frac{D}{v_{max}} \right]^{-1} \quad (5)$$

### Légende

$f$  : Fréquence d'acquisition nécessaire (Hz).

$D$  : Précision de la détection des anomalies ( $\pm$  m).

$V_{max}$  : Vitesse maximale du transporteur (m/s).

$v$  : Vitesse de déplacement de l'objet (m/s).

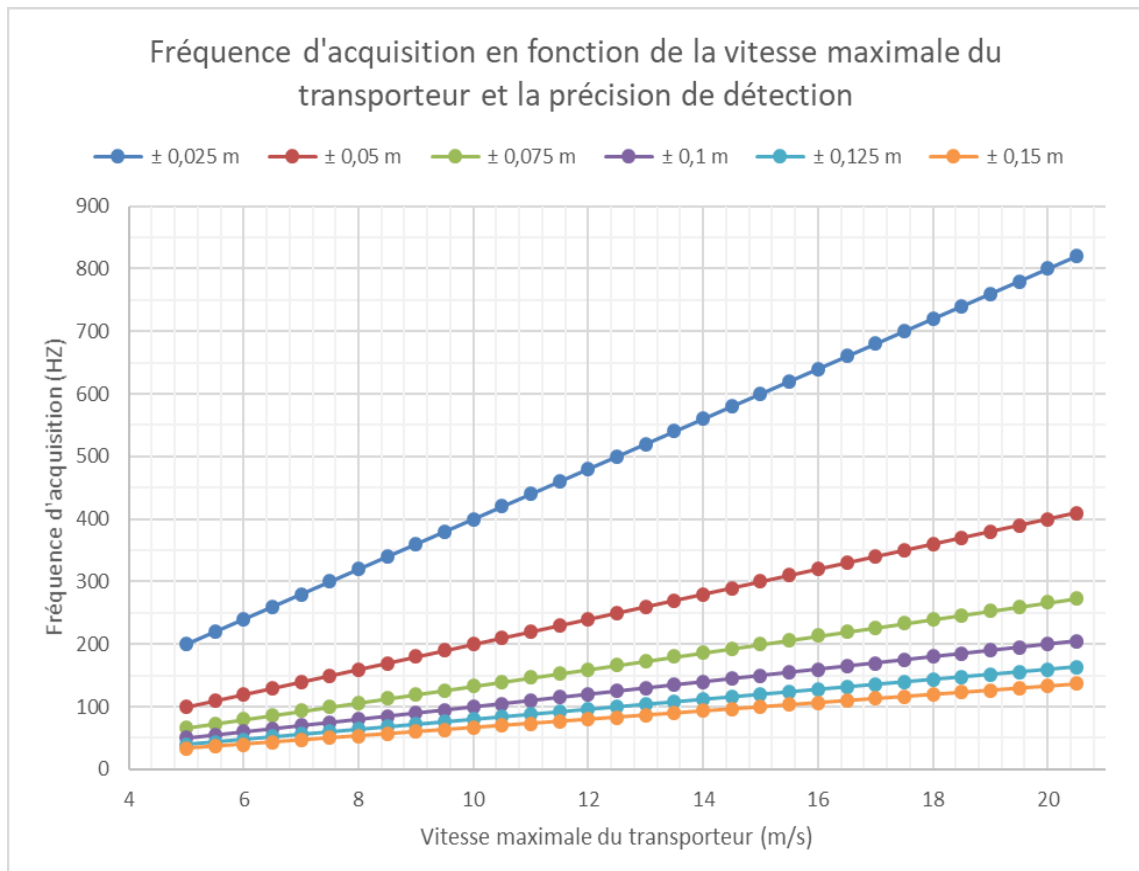


Figure 8: Fréquence d'acquisition en fonction de la vitesse maximale du transporteur et la précision de la détection

### *2.3. Matériel Et Logiciel.*

#### *2.3.1. Prototype D'un Élévateur Minier*

Un prototype est réalisé par CMIN au laboratoire figure 9, pour réaliser les tests du système de localisation et de détection des anomalies des rails. Le prototype utilisé est construit par l'équipe expérimentale de CANMET, avec deux élévateurs (cages) de dimension 20x40 cm en position opposée attachés à une corde de 297 cm reliée sur quatre poulies fixées aux coins d'une tour métallique structurée simulant un vrai rail d'élévateur, un moteur connecté à la corde fonctionne au courant alternatif (AC) 50 watts et peut atteindre une vitesse jusqu'à 7000 rpm avec les dimensions suivantes 24x19.8x9.6 cm et 1/8 Horse power (HP) est placé afin de déplacer les élévateurs dans les deux sens à l'aide d'un bâton d'accélération ON/OFF ou l'opérateur peut contrôler la vitesse du moteur en déplaçant le bâton vers les deux sens.



Figure 9: Prototype

### 2.3.2. TÉLÉPHONE INTELLIGENT

Le téléphone utilise c'est le Samsung Galaxy S10 choisi par CMIN. Cet appareil a de bonnes caractéristiques. Tel que c'est dimension est de 149.9x70.4x7.8 mm, la capacité du mémoire est de 512 GB, 8 GB RAM. Il fonctionne avec le logiciel Android 11 (Pie). Ce téléphone comporte plusieurs capteurs intègres par Samsung l'accéléromètre (capteur principale utilise dans mon projet), gyroscope, baromètre, géomagnétique, et autre capteurs qui facilite la fonctionnalité de cet appareil [16]. Le tableau 1 suivante montre les caractéristiques du téléphone et des capteurs implémentés dans ce téléphone.

Tableau 1: Caractéristiques des capteurs du téléphone utilisé

Nom	Description	Vendeur	Version	Max intervalle	Résolution
Accéléromètre	accéléromètre mesure l'accélération, y compris la gravité le long des trois axes	STM	15932	78.453 m/s <sup>2</sup>	0.002 m/s <sup>2</sup>
Accéléromètre linéaire	Accéléromètre linéaire mesure l'accélération de l'appareil. hors gravité	Samsung Électroniques	3	78.453 m/s <sup>2</sup>	0.002 m/s <sup>2</sup>
Gravite	Ce capteur mesure l'accélération de la pesanteur, à l'exclusion de toute autre accélération	Samsung Électroniques	3	19.6133003 2 m/s <sup>2</sup>	0.00000006 m/s <sup>2</sup>
Gyroscope	le gyroscope mesure la vitesse angulaire par rapport aux trois axes de l'appareil.	STM	1	1000.0°/s	0.04 °/s
Champ Magnétique	le magnétomètre mesure le champ magnétique le long des trois axes des appareils	Microdevices	1	2000.00 μT	0.06 μT
Pression	Ce capteur mesure la pression atmosphérique	STM Microélectronique	1	1260.00 hPa	0.0002 hPa

Vecteur de rotation	ce capteur mesure l'orientation de l'appareil par rapport à la terre comme une combinaison d'un angle et d'un axe de rotation	Samsung Électronique	1	1.0000	0.0000006
---------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------	---	--------	-----------

### 2.3.3. *Software de développement utilisé*

Android studio est un logiciel de développement pour développer des applications mobiles Android. Il est basé sur IntelliJ IDEA et utilise le moteur de production Gradle. Il est téléchargé sous les systèmes d'exploitation Windows, macOS, chrome OS et Linux [17]. JAVA est le langage de programmation qu'on a utilisé pour développer l'application sur le téléphone, cette partie concerne la lecture des accélérations et la transmission vers le serveur pour traitement et analyse.

Python est un langage de programmation à interprétation de commande, multi paradigme et multiplateformes [18]. On a utilisé le python pour analyser les données et collecter par le téléphone est estimé à la vitesse et de la position de l'élévateur, l'analyse des impacts et envoyer des rapports pour le system de contrôle de la mine.



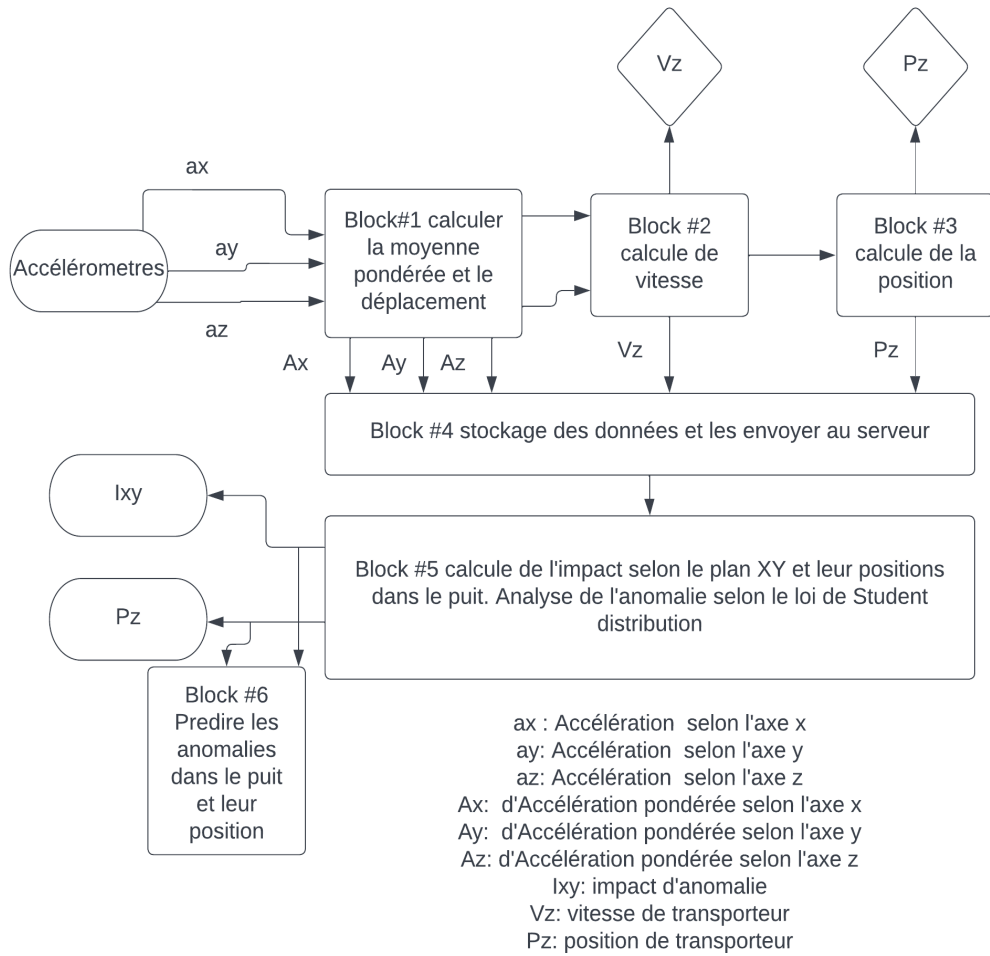


Figure 10: Block Diagramme

L'application utilise le capteur accéléromètre linéaire qui nous fournit une trajectoire tridimensionnelle représentant l'accélération le long de chaque axe de l'appareil, à l'exclusion de l'accélération gravitationnelle. Cette valeur est utilisée pour effectuer la détection de gestes. Typiquement, nous utilisons ce capteur lorsque nous voulons obtenir des données d'accélération sans influence de la gravité.

Après la lecture de l'accélération sur 3 dimensions (X, Y, Z) figure 10 :

- Bloc #1 : la moyenne pondérée et le mouvement d'élévateur sont calculés. Le résultat sera envoyé au bloc #2.
- Bloc #2 : les valeurs d'accélération du bloc #1 ont été utilisées pour calculer la vitesse qui sera envoyée au bloc #3.
- Bloc #3 : les valeurs de vitesse sont utilisées pour calculer la position de l'élévateur sur le rail.
- Bloc #4 : les données reçues et collectées à partir des blocs ci-dessus seront enregistrées et envoyées à un serveur externe afin d'être préparées pour l'analyse.
- Bloc #5 : à partir du bloc #4, l'impact est calculé selon l'axe X, Y, association position de l'élévateur dans le puits et analyse l'anomalie selon la loi de Student.
- Bloc #6 : une fois les données reçues, l'application les analyse et estime la présence d'anomalie tout en estimant la position de cette anomalie sur le rail.

## CHAPITRE 3

### ANALYSEUR INERTIEL ARCHITECTURE

Dans ce chapitre on présente l'architecture de système, la méthode de détection de mouvement du transporteur, comment on a ajusté le système de référence, ainsi que la création de registre de données et l'analyse des données. Alors cette chapitre explique et décrit le trajet comment l'application est développé et tout ça fonctionnalistes.

Le programme d'acquisition des données doit être installé sur le téléphone intelligent qui permet d'acquisition les données pendant les déplacements du transporteur minier. Ce dernier transmet les données enregistré chaque fois que le transporteur revient à sa position initiale. Dans le cadre du développement du programme, l'utilisation du programme « Phyphox » a été utilisé comme programme de base. Ce programme est spécialisé dans l'acquisition de donnée pour les téléphones intelligent et peut faire de l'acquisition de données sur tous les capteurs que dispose le téléphone.

Ce programme est spécialisé dans l'acquisition de donnée pour les téléphones intelligents et peut faire de l'acquisition de données sur tous les capteurs que dispose le téléphone. Une fois le programme démarré, les lectures mesurées par le programme sont affichées sur l'écran du téléphone en temps réel et les données sont enregistrées sur l'espace mémoire du téléphone une fois l'arrêt du programme. La figure 11 montre le schéma simplifié du programme « phyphox » et celui du programme d'acquisition développé

Sur cette application j'ai réalisé tous les algorithmes qu'on a besoin pour réussir à avoir les données correctes qui font l'objet de notre travail, à savoir :

- La détection du mouvement.
- La matrice de transformation.
- Création de registre de donnée et les envoyées.
- Programme de l'ordinateur (Analyse les données).
  - Calcule vitesse et position.
  - Calcule les impacts et les anomalies.

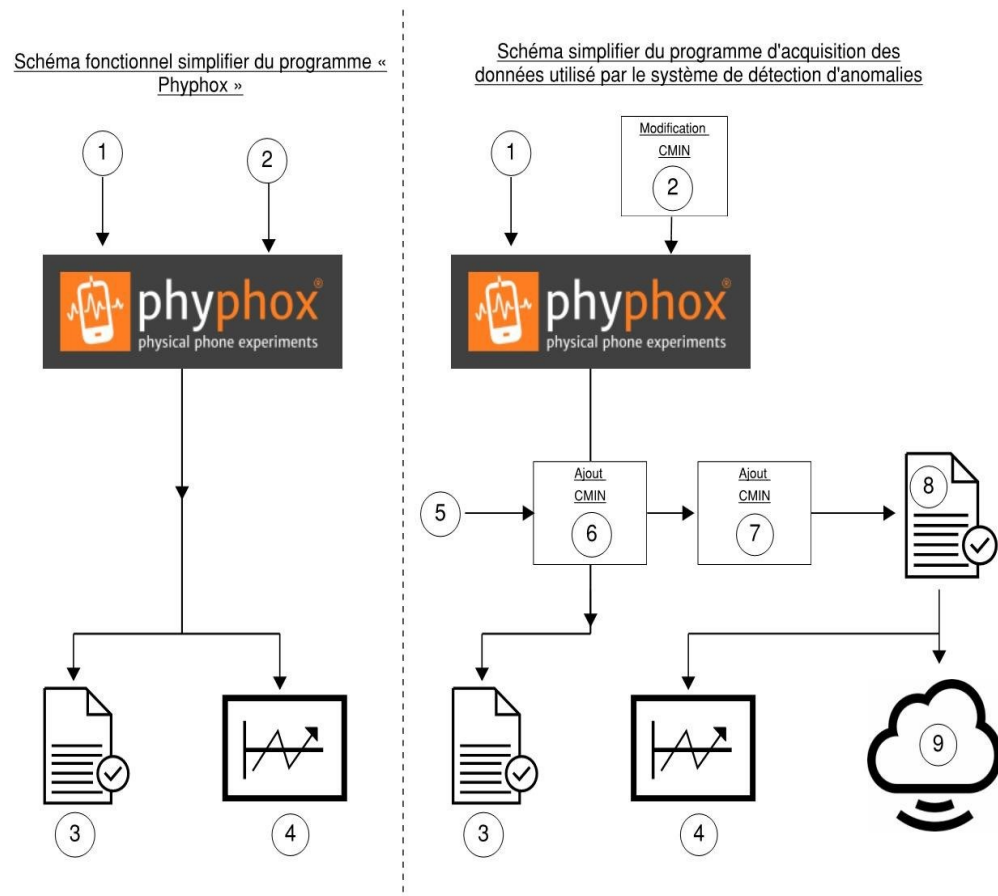


Figure 11: Schéma fonctionnel du programme de détections d'anomalies

#### 4.1. Détection du mouvement du transporteur

La technique utilisée pour calculer le déplacement du transporteur repose sur une double intégration des valeurs mesurées par les accéléromètres du téléphone (équation 4). Cette technique à l'inconvénient d'accumuler une imprécision à chaque intégration effectuée. Pour diminuer cette problématique, une détection de mouvement a été ajoutée au programme. Cette détection permet de déterminer si le transporteur est en mouvement ou immobile. De cette manière, seules les données associées aux déplacements sont considérées dans les calculs, ce qui réduit l'erreur. De plus, lorsque la détection de mouvement conclut que le transporteur est immobile, le programme force la vitesse du transporteur à zéro, ce qui élimine la vitesse résiduelle provoquée

par l'intégration.

Pour faire la détection de mouvement, un tableau tampon a été créé pour conserver les dernières données mesurées pendant une période temporelle (T) fixée dans les paramètres d'entrée du programme.

Le nombre de lignes du tableau tampon peut être calculé avec l'équation 6, ce nombre doit être arrondi au nombre impair le plus près. Le tableau tampon comprend un nombre de colonnes correspondant aux nombres de données pertinentes à l'analyse des anomalies et trois colonnes supplémentaires utilisées pour la détection de mouvement. Chaque fois que le programme mesure de nouvelles données, ces données sont enregistrées dans le tableau tampon à la première ligne et toutes les données initialement inscrites sont descendues d'une ligne. L'information inscrite à la dernière ligne est supprimée. Le tableau 1 montre un exemple de tableau tampon utilisé par le programme.

Le tableau tampon doit être rempli pour pouvoir conclure si le transporteur est en mouvement. Cela implique que lorsque le programme est démarré il faut attendre au moins le temps équivalent à la variable temporelle (T) utilisée dans l'analyse de la détection de mouvement avant de commencer à déplacer le transporteur. Cette valeur est modifiable par l'utilisateur et varie normalement entre 0.5 à 4 secondes. Utiliser une période d'analyse plus grande permet de discréditer plus facilement les vibrations externes pouvant être mesurées par les accéléromètres et n'ayant aucune incidence sur le déplacement du transporteur.

La détection de mouvement se fait en trois étapes. Le programme commence par calculer l'accélération résultante « R » associée aux lectures des accéléromètres (x, y et z) avec l'équation 7 Par la suite, l'on soustrait le résultat obtenu par la moyenne de la résultante en position immobile (A) et on compare cette différence avec l'erreur absolue associée aux accéléromètres (E). Si la différence est supérieure à la marge

d'erreur des capteurs ( $E$ ), cela implique que le transporteur accélère ou décélère et la variable «  $D_1$  » correspondant aux lectures est fixée à 1 (équation 8), dans le cas contraire la variable est fixée à 0. Les variables «  $E$  » et «  $A$  » utilisées dans les calculs sont des paramètres d'entrées devant être inscrites par l'utilisateur dans les paramètres de la détection de mouvement.

La détection de type ( $D_1$ ) détermine seulement s'il existe une accélération ou une décélération appliquée sur le transporteur, cette détection ne permet pas de conclure hors de tout doute que le transporteur est en mouvement. En effet, lorsque le transporteur se déplace à vitesse constante, il peut arriver que la détection ( $D_1$ ) soit fixée à zéro et le programme va donc forcer la vitesse du transporteur à zéro provoquant une mauvaise analyse du déplacement.

Selon une expérimentation effectuée en laboratoire, environ 20% des données mesurées pendant les déplacements ont une détection de ( $D_1$ ) nulle.

Pour corriger cette situation, le programme utilise le pourcentage des détections de type ( $D_1$ ) contenu dans le tableau tampon pour conclure à un mouvement (équation 9). Si cette moyenne dépasse une certaine valeur minimale «  $K$  » fixée dans les paramètres d'entrée de la détection de mouvement, le programme conclut que le transporteur se déplace réellement et la variable ( $D_2$ ) est fixée à 1, dans le cas contraire elle est fixée à 0 (équation 10). Plus la variable ( $K$ ) est enlevée, plus la sensibilité de détection du programme est faible.

La variable  $D_2$  est calculée chaque fois qu'une nouvelle donnée est inscrite dans le tableau tampon, mais ne figure pas dans le tableau. Cette variable permet uniquement de donner l'autorisation au programme de transférer les données inscrites au milieu du tableau tampon vers le registre de donnée et de compter le nombre de déplacements effectués depuis la dernière transmission des données vers l'espace de stockage externe. Le nombre de déplacements peut être compté en incrémentant un compteur chaque fois que l'état de variable ( $D_2$ ) passe de zéro à un. La transmission des données

du registre vers l'espace de stockage externe est faite seulement si certaines conditions sont respectées, ce que nous défierons plus tard. La figure 12 montre un exemple d'analyse de mouvement réalisé en laboratoire à partir de lectures d'accéléromètre compris avec l'analyse de détection de mouvement.

Table 2: Format du tableau tampon des données durant la T dernière période

Donnée	R	D <sub>1</sub>	a <sub>x</sub>	a <sub>y</sub>	a <sub>z</sub>	Temps relatif (s)	Temps Absolu (heure)
1	Calcul	Calcul	lecture	lecture	lecture	lecture	lecture
2	Calcul	Calcul	lecture	lecture	lecture	lecture	lecture
***			***	***	***		***
(Nb - 1) / 2	***	***	***	***	***	***	***
***			***	***	***	***	***
Nb-1	Calcul	Calcul	lecture	lecture	lecture	lecture	lecture
Nb	Calcul	Calcul	lecture	lecture	lecture	lecture	lecture

Si D<sub>2</sub>  
=1  
Vers  
registre

Moyenn  
e

%D<sub>1</sub>



$$NB = f * T \quad (6)$$

(Valeur arrondie au nombre impair le plus près)

$$R = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (7)$$

$$D_1 = 0 \text{ si } |R - A| < E \quad D_1 = 1 \text{ si } |R - A| > E \quad (8)$$

$$\%D_1 = \frac{\sum_{i=0}^{NB} D_{1,i}}{NB} \quad (9)$$

$$D_2 = 1 \text{ si } \%D_1 > K \quad D_2 = 0 \text{ si } \%D_1 < K \quad (10)$$

### Variables d'entrée du programme

$f$  : Fréquence d'acquisition du programme (Hz).

$T$  : Période temporelle d'analyse du tableau tampon (s).

$A$  : Accélération résultante en position immobile (m/s<sup>2</sup>).

$E$  : Erreur associée au calcul de l'accélération résultante avec intervalle de confiance de 95%.

$K$  : Pourcentage minimal à respecter pour considérer le mouvement.

$A = 9.74 \text{ m/s}^2$  : Cette valeur a été déterminé par expérimentation avec l'utilisation du téléphone « Samsung Galaxy S10 ».

$E = \pm 0.07 \text{ m/s}^2$  : Cette valeur a été déterminée par expérimentation avec l'utilisation du téléphone « Samsung Galaxy S10 ».

$K = 20\%$  : Cette valeur a été déterminée avec les essais effectués sur le modèle réduit.

### Variables calculées par le programme

$Nb$  : Nombre de lignes nécessaire pour respecter l'intervalle temporel (T).

$R$  : Accélération résultante provoquée par les accélérations sur les axes X, Y et Z ( $m/s^2$ ).

$D_1$  : Détection de mouvement de type # 1 (1 = accélération ou décélération ; 0 = immobile)

$\%D_1$  : Pourcentage du nombre de détection de type # 1 contenue dans le tableau tampon (%).

$D_2$  : Variable associé au déplacement du transporteur (1 = déplacement ; 0 = immobile).

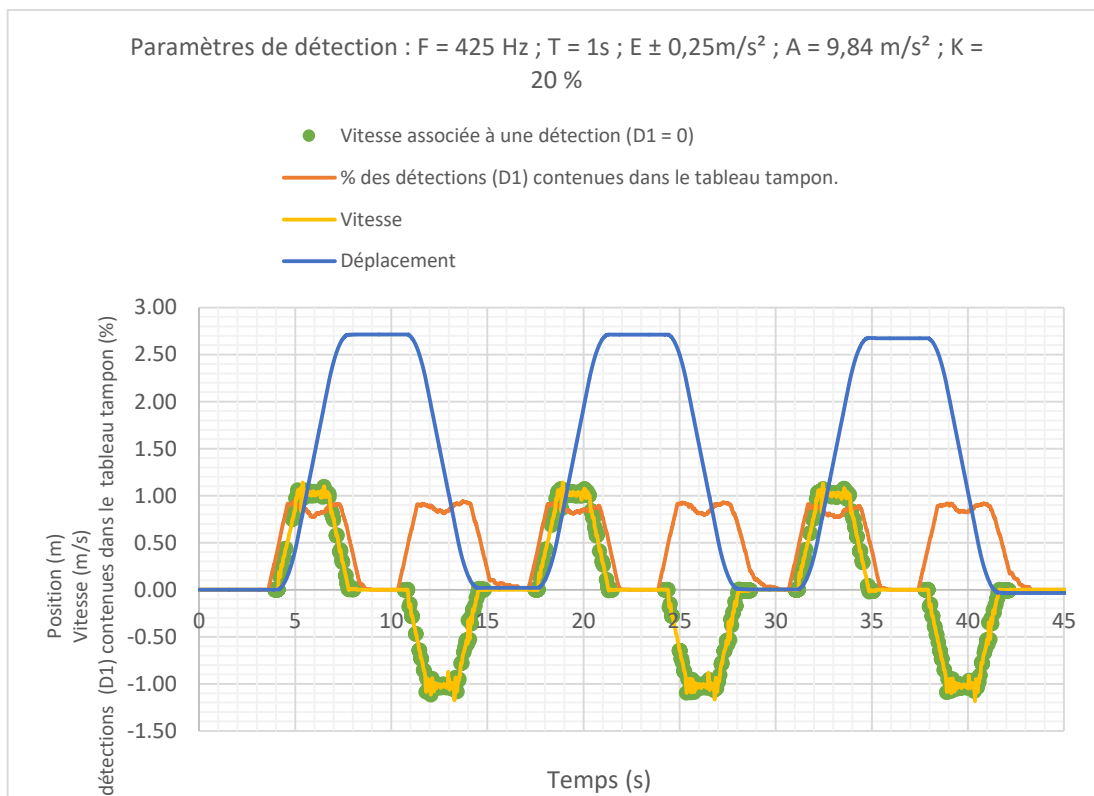


Figure 12: détection de mouvement

#### 4.2. *Ajustement de system de référence (Matrice de transformation)*

L'Ajustement de référence permet de transposer les données mesurées par le téléphone dans le système de référence du transporteur. Cette transformation est nécessaire, car le système de référence du téléphone n'est jamais 100% orienté de la même manière que le système de référence du transporteur. Comme les données mesurées par le téléphone sont utilisées pour analyser le déplacement du transporteur, il est important qu'une soit exprimée selon le système de référence de ce dernier. Cette transformation peut être effectuée avec l'utilisation de la matrice de transformation d'Euler (équation 11). Cette matrice peut être définie avec les angles de rotation effectués sur chacun des axes de référence du système du transporteur qui permettent de reproduire l'orientation des axes du système de référence du cellulaire.

Les angles de rotation (thêta) et (phi) utilisés dans la matrice d'Euler peuvent être calculés avec les accélérations mesurées par le téléphone lorsque ce dernier est immobile. L'angle (phi) peut être calculé avec l'équation 12 et l'angle (thêta) avec l'équation 13. L'angle (psi) correspond à l'angle de rotation autour de l'axe Z du système de référence et permet de modifier l'orientation des axes X et Y du téléphone par rapport à celui du transporteur. Cependant, comme l'analyse d'impacts utilise le module du vecteur projeté sur le plan XY l'angle (psi) peut être fixé à zéro. Pendant les déplacements ces angles sont supposés constants pendant tout le déplacement et le programme peut recalculer les valeurs chaque fois que le pourcentage des détections  $D_1$  contenues dans le tableau tampon est égal à 0.

Une fois la matrice de transformation obtenue, on effectue la multiplication matricielle de la matrice d'Euler avec le vecteur correspondant aux mesures des accéléromètres du téléphone. Le résultat obtenu correspond à un vecteur exprimé selon le système de référence du transporteur ou les composantes peuvent être calculées avec l'équation 14, 15, 16. Cette multiplication doit être faite chaque fois que des données sont transférées entre le tableau tampon et le registre de donnée du programme d'acquisition. La figure 13 montre les systèmes de référence utilisés pour le

transporteur et le téléphone et les angles utilisés par la matrice d'Euler.

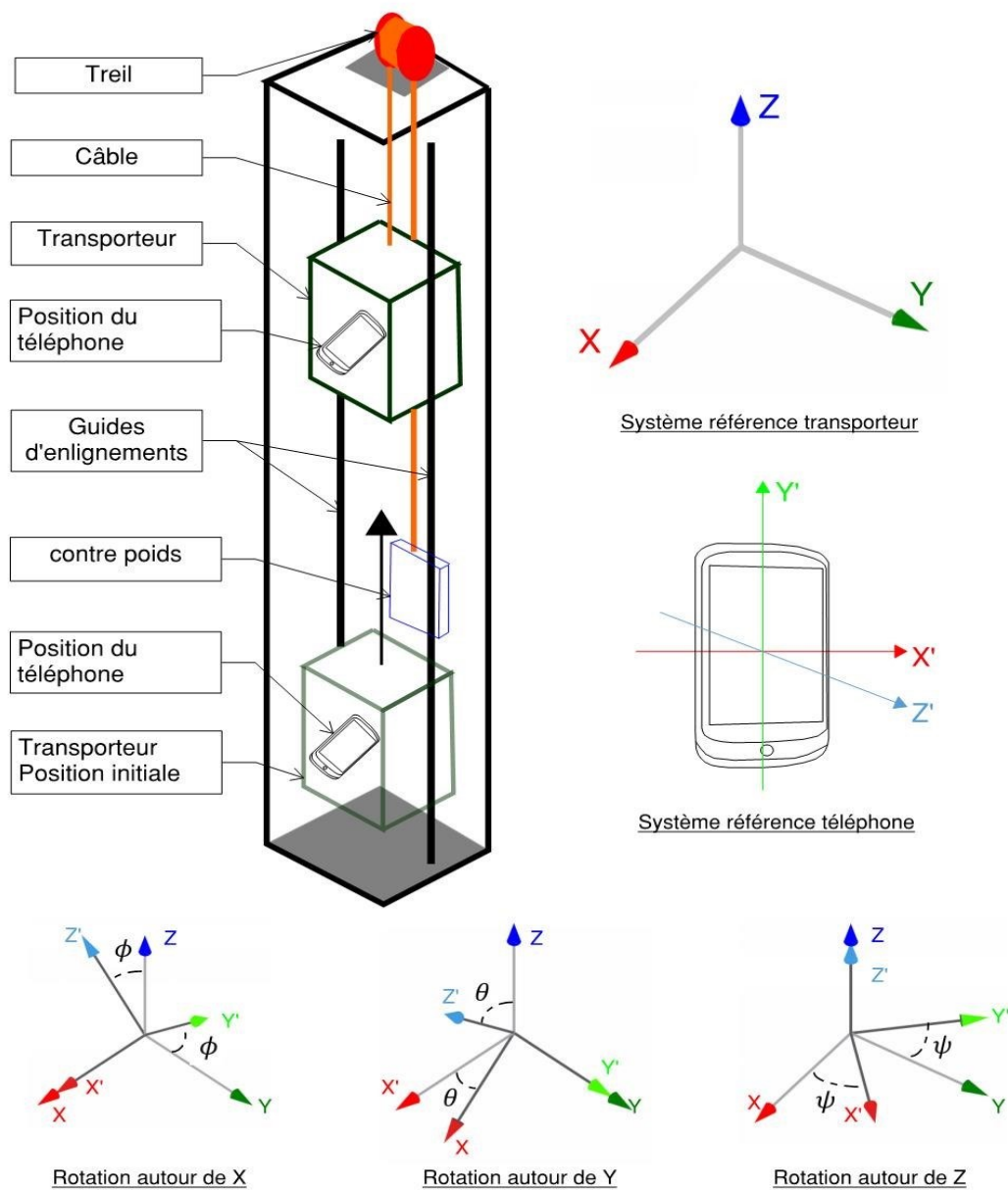


Figure 13: Système de référence utilisé sur le transporteur, système de référence du téléphone et angles de la matrice d'Euler

$$R_I^B = \begin{bmatrix} \cos(\psi) \cos(\theta) & \cos(\theta) \sin(\psi) & -\sin(\theta) \\ \cos(\psi) \sin(\phi) \sin(\theta) - \cos(\phi) \sin(\psi) & \cos(\phi) \cos(\psi) + \sin(\phi) \sin(\psi) \sin(\theta) & \cos(\theta) \sin(\phi) \\ \sin(\phi) \sin(\psi) + \cos(\phi) \cos(\psi) \sin(\theta) & \cos(\phi) \sin(\psi) \sin(\theta) - \cos(\psi) \sin(\phi) & \cos(\phi) \sin(\theta) \end{bmatrix}$$

(11)

$$Z \text{ positif : } \phi = \sin^{-1} \left[ \frac{a_y}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right] \quad Z \text{ négatif : } \phi = -\sin^{-1} \left[ \frac{a_y}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right] \quad (12)$$

$$Z \text{ positif : } \theta = \sin^{-1} \left[ \frac{-a_x}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}} \right] \quad Z \text{ négatif : } \theta = -\sin^{-1} \left[ \frac{a_x}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}} \right] +$$

180 (13)

$$A_X = a_x \cos(\theta) + a_y \sin(\phi) \sin(\theta) + a_z \cos(\phi) \sin(\theta) \quad (14)$$

$$A_Y = a_y \cos(\phi) - a_z \sin(\phi) \quad (15)$$

$$A_Z = -a_x \sin(\theta) + a_y \cos(\theta) \sin(\phi) + a_z \cos(\phi) \sin(\theta) \quad (16)$$

Note: l'équation 12 et 13 peuvent être utilisées seulement si le transporteur est immobile.

$\phi$  : Angle de rotation (phi) autour de l'axe X du système de référence du transporteur.

$\theta$  : Angle de rotation (thêta) autour de l'axe Y du système de référence du transporteur.

$\psi$  : Angle de rotation (psi) autour de l'axe Z du système de référence du transporteur.

$R_I^B$  : Matrice de transformation permettant de passer du système de référence (I) vers celui de B.

$a_x$  : Accélération mesurée par l'accéléromètre sur l'axe (X) du système de référence du téléphone (m/s<sup>2</sup>).

$a_y$  : Accélération mesurée par l'accéléromètre sur l'axe (Y) du système de référence du téléphone (m/s<sup>2</sup>).

$a_y$  : Accélération mesurée par l'accéléromètre sur l'axe (Z) du système de référence du téléphone (m/s<sup>2</sup>).

$A_x$  : Accélération équivalente associée à l'axe (X) du système de référence du transporteur (m/s<sup>2</sup>).

$A_y$  : Accélération équivalente associée à l'axe (Y) du système de référence du transporteur (m/s<sup>2</sup>).

$A_z$  : Accélération équivalente associée à l'axe (Z) du système de référence du transporteur (m/s<sup>2</sup>).

#### 4.3. *Création du registre de données*

Le registre de données contient toutes les données pertinentes qui permettent de déterminer les anomalies et de faire l'analyse des déplacements du transporteur. Pour ce faire, l'on utilise la variable de détection de mouvement ( $D_2$ ) pour conserver uniquement les données en mouvement. Pour chaque nouvelle donnée ajoutée au tableau tampon, si la détection de mouvement ( $D_2$ ) est égale à un, toutes les données inscrites sur la ligne du milieu dans le tableau tampon sont transférées dans le registre de données et enregistrées sur la mémoire interne du téléphone. Lorsque la variable de déplacement ( $D_2$ ) redevient égale à zéro, le registre arrête d'enregistrer les données du tableau tampon et attendant une nouvelle détection de mouvement.

Toutes les données transférées vers le registre de données doivent également être associées au numéro de déplacement. Ce nombre correspond au nombre de déplacements effectués par le transporteur depuis la dernière transmission de données vers l'espace de stockage externe. Le nombre de déplacements peut être compté en incrémentant un compteur chaque fois que l'état de variable ( $D_2$ ) passe de zéro à un. Toutes les valeurs d'accélération enregistrées dans le registre de données sont exprimées selon le système de référence du transporteur et doivent donc être passées par la matrice de transformation avant d'être enregistrées. Les déplacements étant dépendants de l'opérateur de la cage, chaque déplacement se voit associer différent

nombre de lignes.

Le programme d'acquisition doit transférer les données enregistrées dans sa mémoire interne automatiquement chaque fois que le transporteur revient à sa position d'origine. Les données sont transmises par lien de communication Wi-Fi vers l'adresse IP de l'espace de stockage externe. L'adresse IP doit être définie dans les paramètres d'entrée du programme d'acquisition ainsi que le nom de la minière et du transporteur ou les données ont été mesurées. Les conditions à respecter pour transmettre les données vers le lien externe sont inscrites dans le tableau 2.

Après le transfert du registre, le programme supprime le fichier de la mémoire interne du téléphone, réinitialise le compteur des déplacements à zéro et le programme est en attente d'un nouveau déplacement pour recommencer un nouveau registre de donnée.

Table 3: Exemple de registre de données

État de la variable $D_2$		Déplacement	Temps relatif (s)	R	$A_X$	$A_Y$	$A_Z$	Temps absolu
0->1	Début	1	lecture	Calcul	lecture	lecture	lecture	lecture
1		1	lecture	Calcul				
1		***	***	***	***	***	***	***
1		1	lecture	Calcul				
1->0	Fin	1	lecture	Calcul	lecture	lecture	lecture	lecture
0->1	Début	2	lecture	Calcul	lecture	lecture	lecture	lecture
1		2	lecture	Calcul				
1		***	***	***	lecture	lecture	lecture	lecture
1		2	lecture	Calcul				
1->0	Fin	2	lecture	Calcul	lecture	lecture	lecture	lecture
****		***	***	***	***	***	***	***
0->1	Début	N	lecture	Calcul	lecture	lecture	lecture	lecture
1		N	lecture	Calcul				
1		***	***	***	lecture	lecture	lecture	lecture
1		N	lecture	Calcul				
1->0	Fin	N	lecture	Calcul	lecture	lecture	lecture	lecture

#### 4.4. Analyse des données.

Le programme d'analyse permet et fait l'analyse des déplacements du transporteur chaque fois qu'un bloc de données est enregistré sur l'espace de stockage externe par le programme d'acquisition. À ce moment, le programme d'analyse s'active et analyse de manière indépendante chacun des déplacements qui sont contenus dans le registre. Une fois l'analyse des déplacements complétée, toutes les données sont enregistrées dans un registre d'archive enregistré sur l'espace de stockage externe. Ce registre contient toutes les données qui sont utilisées par le programme de détection d'anomalies. La figure 14 montre le schéma simplifié du programme d'analyse et le tableau 4 résume les différentes étapes effectuées par le programme.

Table 4: Étapes effectuées par le programme d'analyse

Éléments	Description de l'élément
1	L'élément 1 de la figure 7 correspond à la réception de nouvelles données mesurée par le programme d'acquisition
2	L'élément 2 de la figure 7 correspond à l'analyse des données pour en déterminer les vitesses, les positions et les impacts transversaux
3	L'élément 3 de la figure 7 correspond à l'ajout des nouvelles données et les résultats de l'analyse aux registres de données qui est sauvegardée sur le lien externe.

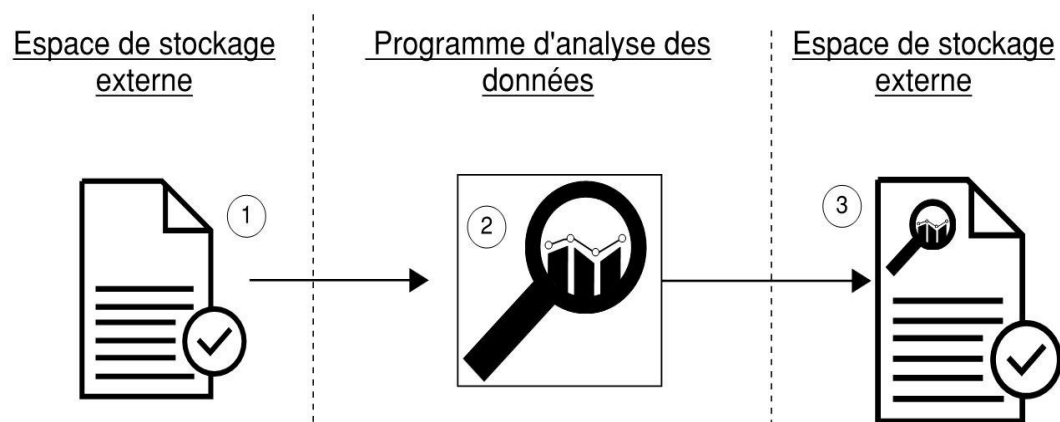


Figure 14: Schéma fonctionnel du programme d'analyse des données



Comme le programme d'acquisition enregistre les données du transporteur juste avant et après un déplacement, les vitesses initiales et finales du transporteur doivent être égales à zéro. Selon les lois de la physique, si les vitesses initiales et finales d'un objet soumis à des accélérations sont égales à zéro, cela implique que la somme des accélérations soumises à l'objet l'est également. En pratique, comme les accélérations sont mesurées avec des accéléromètres qui possèdent une certaine marge d'erreur, cette sommation n'est jamais parfaitement égale à zéro et si ces accélérations sont utilisées pour calculer la vitesse, une vitesse résiduelle non nulle sera observée à la fin du déplacement. Cette vitesse est relativement faible, mais peut avoir un effet non négligeable sur la position du transporteur si elle est appliquée pendant une durée de temps prolongé.

Pour corriger cette problématique, le programme ajuste les valeurs d'accélération transmises par le programme d'acquisition de manière à ce que la sommation de toutes les accélérations, selon l'axe Z et pour chacun des déplacements, soit parfaitement égale à zéro. Pour ce faire, le programme soustrait, pour toutes les accélérations, la moyenne des accélérations mesurée selon l'axe Z, et ce pour tous les déplacements contenus dans le registre de données. L'équation 17 et l'équation 18 montrent les relations mathématiques utilisées par le programme pour déterminer l'accélération résiduelle et l'accélération ajustée.

- *Calcule vitesse et position*

Une fois les accélérations ajustées, la vitesse peut être calculée à partir des accélérations. Comme l'acquisition des données est très rapide, l'intégration peut être simplifiée en additionnant les produits de chacune des accélérations avec le temps écoulé entre chacune des acquisitions. Pour chaque intégration successive, la vitesse calculée de la donnée précédente doit être additionnée à la donnée en cours d'analyse. L'équation 19 illustre l'équation mathématique utilisée par le programme pour évaluer la vitesse du transporteur. Comme la vitesse est calculée à partir d'accélérations

ajustées, les vitesses initiales et finales pour chacun des déplacements seront toujours égales à zéro.

Une fois les vitesses calculées, la position du transporteur peut être calculée en intégrant la vitesse en fonction du temps. Encore une fois l'intégration peut être calculée en additionnant les produits de chacune des vitesses avec le temps écoulé entre chacune des acquisitions. Pour chaque intégration successive, la position calculée de la donnée précédente doit être additionnée à la donnée en cours d'analyse. L'équation 20 illustre l'équation mathématique utilisée par le programme pour évaluer le déplacement du transporteur. La position initiale du transporteur pour le premier déplacement est toujours égale à zéro et sa position finale est utilisée pour débiter le calcul du déplacement succédant jusqu'à ce que tous les déplacements aient été analysés. Comme le registre de données produit par le programme d'acquisition est transmis chaque fois que le transporteur revient à sa position initiale, la position finale du dernier déplacement devrait en théorie être égale à zéro. En pratique, comme les calculs sont effectués à partir d'accéléromètre ayant une erreur sur les lectures, la position finale ne sera jamais parfaitement égale à zéro. Cette différence permet d'évaluer la précision d'analyse du programme et est conservée dans le registre de données.

Pendant le déplacement du transporteur, des impacts sont ressentis sur le plan XY et sont provoqués par les anomalies présentes sur les guides qui alignements du transporteur. Ces amplitudes correspondent à l'accélération résultante mesurée sur le plan XY. Ces accélérations sont mesurées par le programme d'acquisition et disponible dans le registre de données enregistré sur l'espace de stockage externe. Le programme utilise l'équation 21 pour calculer les impacts associés à chacune des données mesurées par le programme d'acquisition.

Le tableau 4 montre un exemple des données utilisées par le programme d'analyse et les calculs effectués par ce dernier, chaque fois qu'un bloc de données est transmis

par le programme d'acquisition. Une fois toutes les données analysées, elles sont transférées dans le registre de données qui est enregistré sur l'espace de stockage externe. Ce bloc de données comprend la plupart des données transmises par le programme d'acquisition et les calculs effectués par le programme d'analyse. Le tableau 5 montre le format utilisé pour le registre de données.

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n A_{Z_i}}{n} \quad (17)$$

$$A'_{Z_i} = A_{Z_i} - K \quad (18)$$

$$V_{Z_i} = A'_{Z_i} * (T_i + T_{i-1}) + V_{Z_{i-1}} \quad (19)$$

$$D_{Z_i} = V_{Z_i} * (T_i + T_{i-1}) + D_{Z_{i-1}} \quad (20)$$

$$I_i = \sqrt{A_{X_i}^2 + A_{Y_i}^2} \quad (21)$$

### Légende

$K$  : Accélération moyenne selon l'axe Z pour le déplacement en cours d'analyse (m/s<sup>2</sup>)

$n$  : Nombre de données associé au déplacement.

$i$  : Position de la mesure analysée pendant le déplacement ( $1 < i < n$ )

$A'_Z$  : Accélération ajustée associée à l'axe Z (m/s<sup>2</sup>)

$V_{Z_i}$  : Vitesse du transporteur selon l'axe (Z) à la position i du déplacement (m/s)

$i$  : Temps relatif associé à la position i (m/s)

$T_{i-1}$  : Temps relatif associé à la position i-1 (m/s)

$D_{Z_i}$  : Déplacement du transporteur sur l'axe (Z) à la position (n) du déplacement (m)

$I_i$  : Impacts transversaux ressentis par le transporteur pendant son déplacement (m/s<sup>2</sup>).

Table 5: Format de table de données et de calculs utilisés par le programme d'analyse

Données fournies par le programme d'acquisition						Calcul fait par le programme d'analyse			
Déplacement	Temps relatif (s)	A <sub>x</sub> (m/s <sup>2</sup> )	A <sub>y</sub> (m/s <sup>2</sup> )	A <sub>z</sub> (m/s <sup>2</sup> )	Temps absolu	A' <sub>z</sub> (calcul)	Vitesse (m/s)	Position (m)	Impact selon le plan XY
1	lecture	lecture	lecture	lecture	lecture	$A_z - K_1$	0	Calcul	Calcul
1	lecture						Calcul	Calcul	Calcul
***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
1	lecture					$A_z - K_1$	Calcul	Calcul	Calcul
1	lecture	lecture	lecture	lecture	lecture	$A_z - K_1$	0	Calcul	Calcul
2	lecture	lecture	lecture	lecture	lecture	$A_z - K_2$	0	Calcul	Calcul
2	lecture					$A_z - K_2$	Calcul	Calcul	Calcul
***	***	lecture	lecture	lecture	lecture		***	***	***
2	lecture					$A_z - K_2$	Calcul	Calcul	Calcul
2	lecture	lecture	lecture	lecture	lecture	$A_z - K_2$	0	Calcul	Calcul
***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
N	lecture	lecture	lecture	lecture	lecture	$A_z - K_n$	0	Calcul	Calcul
N	lecture					$A_z - K_n$	Calcul	Calcul	Calcul
***	***	lecture	lecture	lecture	lecture		***	***	***
N	lecture					$A_z - K_n$	Calcul	Calcul	Calcul
N	lecture	lecture	lecture	lecture	lecture	$A_z - K_n$	0	Calcul	Calcul

Erreur associée à l'analyse des données	
-----------------------------------------	--

- *Calcule les impacts et les anomalies.*

Le registre de données produit par le programme d'analyse, est utilisé comme intrant par le programme détection d'anomalie. Toutes les données comprises dans ce registre sont traitées par le programme et chaque déplacement est analysé de manière indépendante. Les anomalies rencontrées pendant les déplacements du transporteur sont déterminées avec une approche statistique selon la distribution-t de Student en fonction de l'intervalle de confiance par un seuil. Ainsi, tous les impacts considérés comme anormaux par le programme sont en dehors de la distribution-t d'un élève avec un intervalle de confiance de 99 %. La distribution t de Student est une loi de probabilité, impliquant le quotient entre une variable suivant une loi normale centrée réduite et la racine carrée d'une variable. Cette technique a l'avantage de s'adapter à la vitesse du transporteur, ce qui implique qu'une anomalie située à une position particulière va toujours être détectée par le programme de détection, mais va avoir une amplitude différente si la vitesse du transporteur lorsqu'il a passé à cet endroit était plus basse.

Les impacts anormaux correspondent aux impacts mesurés qui sont exclus d'une distribution normale possédant un certain intervalle de confiance qui peut être modifié avec une variable de sensibilité, qui peut être modifiée dans les paramètres d'entrée du programme. Plus la variable de sensibilité est élevée, plus les anomalies détectées auront des amplitudes importantes. L'équation 22 montre l'équation mathématique utilisée par le programme pour détecter les impacts anormaux. Comme chacun des déplacements est analysé de manière indépendante, chaque déplacement contenu dans le registre de données possède une moyenne et un écart-type respectif, qui peuvent être calculés avec l'équation 23. Chaque fois qu'un impact anormal est détecté, le programme l'identifie en fixant une variable binaire ( $I_{max}$ ) égale à un. Cette variable permet de repérer facilement toutes les données du registre qui sont associées à des anomalies.

L'amplitude des impacts ressentie sur les anomalies est exprimée en  $m/s^2$  et est proportionnellement liée à la fréquence d'acquisition qui a été utilisée par le programme d'acquisition. Plus la fréquence d'acquisition est élevée, plus les impacts contenus dans le registre ont des amplitudes importantes, mais appliquées sur une plus courte période. Si le programme de détection affiche les amplitudes selon la fréquence utilisée par le programme d'acquisition, elles peuvent avoir des valeurs d'accélération plus grande à ce qu'un corps humain est capable d'encaisser. Pour éviter cette incohérence, le programme de détection d'anomalie exprime ces impacts selon une échelle plus réaliste à un être humain.

Pour ce faire le programme utilise l'impact moyen observé à chaque position où une anomalie a été détectée. Le nombre de données utilisé pour le calcul de cette moyenne correspond aux données avant et après l'anomalie pendant un délai de temps qu'un être humain est normalement capable de détecter avec ces sens et ce délai de temps peut être modifié dans les paramètres d'entrées du programme. Le nombre de données utilisé par le programme doit tenir compte de la fréquence de mesurage utilisé par le programme d'acquisition et le délai de temps sélectionné dans les paramètres d'entrées. L'équation 24 et l'équation 25 sont utilisées par le programme pour déterminer ce nombre de données et l'équation 26 montre le calcul d'une moyenne pour une anomalie détectée à une position quelconque.

La position du puits doit également être ajustée lorsqu'une anomalie est détectée. En effet, comme le transporteur possède une certaine hauteur, lorsque ce dernier se déplace du bas vers le haut le guide supérieur touche les anomalies en premier et les impacts sont mesurés par le programme d'acquisition en les associant à la position associée au plancher du transporteur. Donc toutes les positions associées à des anomalies ayant des vitesses positives doivent donc additionner la distance entre le guide inférieur et supérieur du transporteur à la position contenue dans le registre de donnée pour refléter la position réelle de l'anomalie. La hauteur entre les roulements

inférieur et supérieur doit être inscrite dans les paramètres d'entrée du programme de plus, comme les réparations des guides d'alignement s'effectuent en principe sur le toit du transporteur, le programme peut modifier le point de référence des positions (plancher ou plafond) pour faciliter le positionnement du transporteur lorsque des réparations doivent être réalisées. L'équation 27 montre les calculs utilisés par le programme pour ajuster les positions des anomalies détectées selon la référence choisie par l'utilisateur et la distance entre les roulements inférieurs et supérieurs.

Une fois toutes les anomalies détectées, les amplitudes exprimées selon des références humaines et l'ajustement des positions des anomalies complétées, toutes les anomalies détectées dans le registre de données doivent être regroupés en fonction de leurs positions. Comme il existe de nombreux déplacements dans le registre, une même anomalie peut être détectée plusieurs fois par le programme.

De plus la détection d'une anomalie ne permet pas de conclure hors de tout doute qu'un problème est associé aux guides d'alignements du transporteur. En effet les capteurs du dispositif d'acquisition mesurent les impacts pendant les déplacements qui sont normalement associés aux problèmes des guides d'alignement, mais d'autres types d'impact peuvent survenir, par exemple, par un mauvais enroulement du câble, une chute d'un objet contenue dans le transporteur, le déplacement d'un travailleur, etc. La présence de nombreuse détection pour une même position augmente la probabilité que l'impact soit bel et bien provoqué par une anomalie en lien avec les guides d'alignement du transporteur.

Le programme divise donc le puits de la mine en plusieurs petites sections d'une longueur fixée dans les paramètres d'entrées du programme et regroupe toutes les anomalies qui sont contenues dans chacune des sections. Une fois les regroupements complétés, il devient possible d'observer les positions du puits qui sont problématiques. Le programme regroupe graphiquement le nombre de détections

mesurées en fonction de la profondeur totale du puits et sur un autre graphique, le bilan des impacts minimal, maximal et moyen mesurée sur chacune des sections où des anomalies ont été détectées.

$$I_{max} = 1 \quad \text{si } |I - \bar{I}| > A * \sigma \quad (22)$$

$$\bar{I} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n} \quad \rightarrow \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{I} - I_i)^2}{n}} \quad (23)$$

$$f = \left( \frac{T_F - T_I}{n} \right)^{-1} \quad (24)$$

$$NB = f * T \quad (25)$$

$$I_{moy} = \frac{\sum_{i=I_{max} - \frac{(NB-1)}{2}}^{I_{max} + \frac{(NB-1)}{2}} I_i}{NB} \quad (26)$$

*Pour référence au plancher :  $S' = S + H$  pour  $V > 0$*  (27)

*Pour référence au plafond :  $S' = S - H$  pour  $V < 0$*

#### Variables d'entrée du programme

$A$  : Variable de sensibilité utilisée par le programme pour la détection d'anomalie ( $1 < A < 10$ ).

$T$  : Période temporelle pour l'évaluation des amplitudes des anomalies ( $0.1 < T < 1s$ ).

$Ref$  : Référence utilisée pour le positionnement des anomalies (plancher / plafond).

$H$  : Distance entre les points d'appui du transporteur.

$P$  : Profondeur totale du puits (m).

$K$  : Longueur de regroupement des anomalies (m).

#### Variables calculées par le programme

$T_F$  : Temps relatif final associé à la fin du déplacement en cours d'analyse (s).

$T_I$  : Temps relatif initial associé à la fin du déplacement en cours d'analyse (s).

$S$  : Position du transporteur inscrite dans le registre de donné.



$S'$  : Position ajusté selon la référence utilisée par le programme de détection d'anomalie.

$n$  : Nombre de données associées au déplacement en cours d'analyse.

$f$  : Fréquence d'acquisition moyenne du déplacement en cours d'analyse.

$NB$  : Nombre de données utilisé pour l'évaluation de l'amplitude de l'anomalie.

$\bar{I}$  : Impact moyen du plan XY pendant les déplacements ( $m/s^2$ ).

$I_{max}$  : Donnée associée à une anomalie. Retient la position (1 = Anormal ; 0 = normal).

$I_{moy}$  : Amplitude moyenne ressentie pendant le déplacement du transporteur ( $m/s^2$ ).

$\sigma$  : Écart-type des impacts transversaux pendant le déplacement du transporteur ( $m/s^2$ ).

## CHAPITRE 4

### VALIDATION DU SYSTÈME TEST/RESULTAT

Le système de détection d'anomalies a été vérifié en laboratoire en l'utilisant avec une maquette de transporteur minier figure 18. La maquette est contrôlée par un système de commande manuelle qui lui permet d'effectuer des déplacements verticaux sur une distance totale de 2,7 mètres. La maquette a été modifiée en lui ajoutant un système d'attache qui permet d'installer facilement le téléphone. Un instrument de mesure électronique et un enregistreur de signaux ont également été ajoutés sur le système pour mesurer et enregistrer tous les déplacements du transporteur avec précision. La figure 15 montre le schéma simplifié de la maquette utilisée en laboratoire.

La maquette est utilisée dans le but de valider les différentes fonctionnalités des programmes et valider la précision du système de détection d'anomalie avant son utilisation en condition réelle. Les expérimentations doivent permettre de valider les éléments suivants :

- Validation test du programme d'acquisition.
- Validation test du programme d'analyse des données.
- Validation test du programme de détection des anomalies.
- Validation test de la précision du système.

Cette section explique les différentes expérimentations effectuées en laboratoire pour valider les fonctionnalités du système de détection.

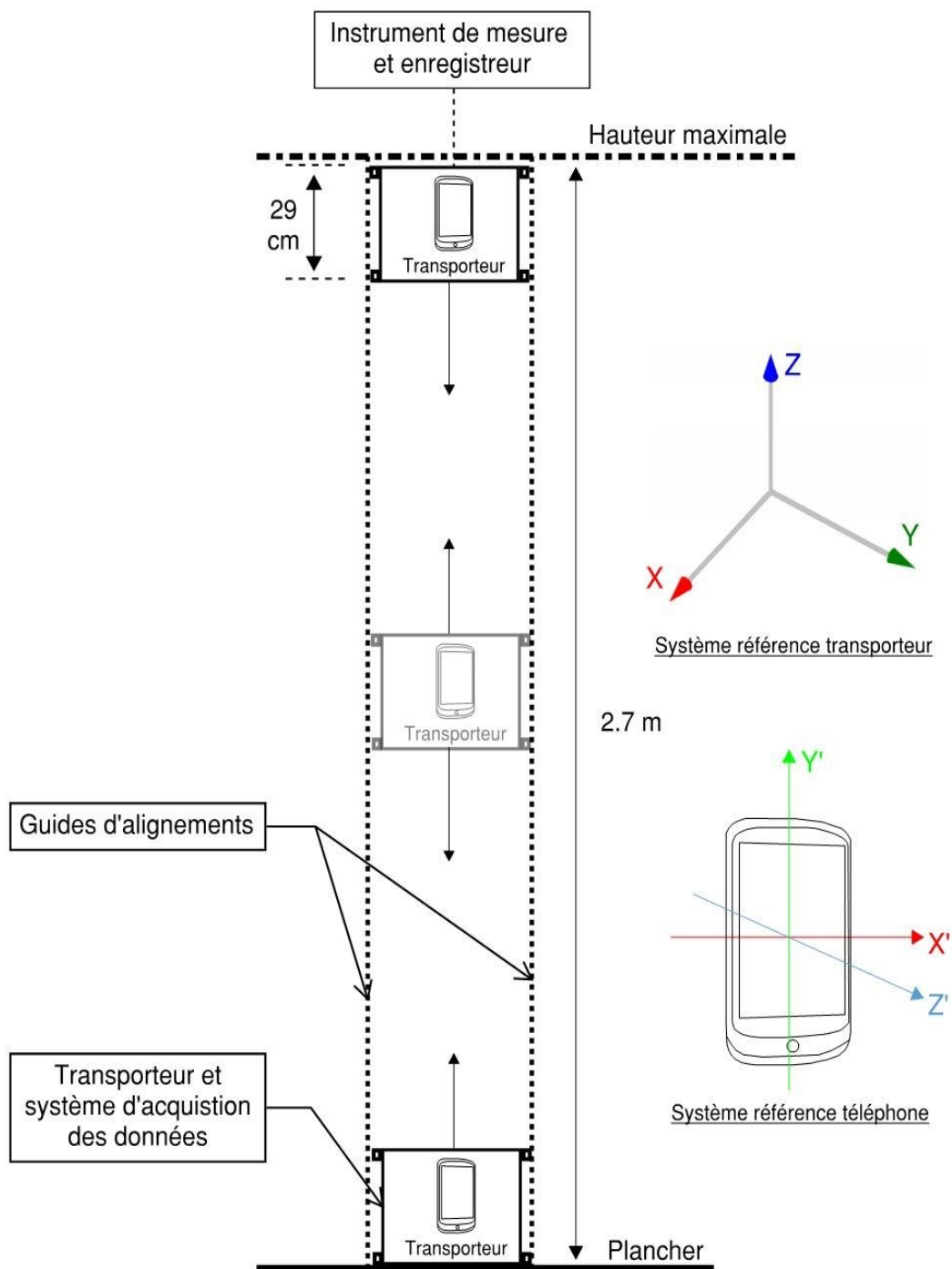


Figure 15: Schéma simplifié de la maquette utilisé en laboratoire

#### *4.1. Validation du fonctionnement d'acquisition*

Pour vérifier le programme d'acquisition, un scénario simple a été réalisé. Le scénario consiste à faire trois montée et descentes. Pour le programme d'acquisition de données, trois montées et descente correspondent à 6 déplacements. En principe, le programme de détection de mouvement doit conserver uniquement les mesures des accéléromètres du téléphone seulement pendant les déplacements et exclure toutes les données en position immobile. Les paramètres d'entrées utilisés pour le programme d'acquisition sont présentés dans le tableau 5.

La figure 16 illustre les données brutes mesurées pendant l'expérimentation combinées avec la détection de mouvement du programme d'acquisition. Le programme d'acquisition a bien détecté les 6 mouvements du transporteur. La figure 19 montre également le pourcentage des détections de mouvement de type 1 contenues dans le tableau tampon du programme qui permet de faire la détection de mouvement. Le graphique montre que le pourcentage diminue lorsque le transporteur atteint une vitesse constante sans toutefois être en dessous du seuil minimal permettant de conclure un mouvement.

Le téléphone a également été installé volontairement sur le transporteur pour que l'accélération gravitationnelle soit mesurée selon l'axe Y du téléphone. En principe, le programme d'acquisition doit transposer ces données avec la matrice de transformation et les exprime selon le système de référence du transporteur. Pour le transporteur, la force gravitationnelle est associée à l'axe Z, le programme d'acquisition doit donc transposer les données brutes mesurées par le téléphone selon ce système. La figure 17 montre les données mesurées par le téléphone pendant l'expérimentation et la figure 18, les données qui ont été transmises vers l'espace de stockage externe. La matrice de transformation du programme d'acquisition a bien convertit les mesures d'accélération selon le système de référence du transporteur.

Table 6: Paramètre d'entrées associées à l'expérimentation.

<b>Paramètre d'entrée du programme</b>		
<b>Type de détection</b>	<b>Description</b>	<b>Valeur</b>
Détection de mouvement	Fréquence d'acquisition	425 Hz
	Période temporelle utilisé pour la détection de mouvement (T)	1 seconde
	Valeur de l'accélération résultante moyenne en position immobile (A)	9.84 m/s <sup>2</sup>
	Erreur absolue associé à l'accélération résultante (E) (Selon une expérimentation effectuée au laboratoire)	± 0.05 m/s <sup>2</sup>
	Seuil de tolérance pour la détection de mouvement (K) (Selon une expérimentation effectuée au laboratoire)	30 %

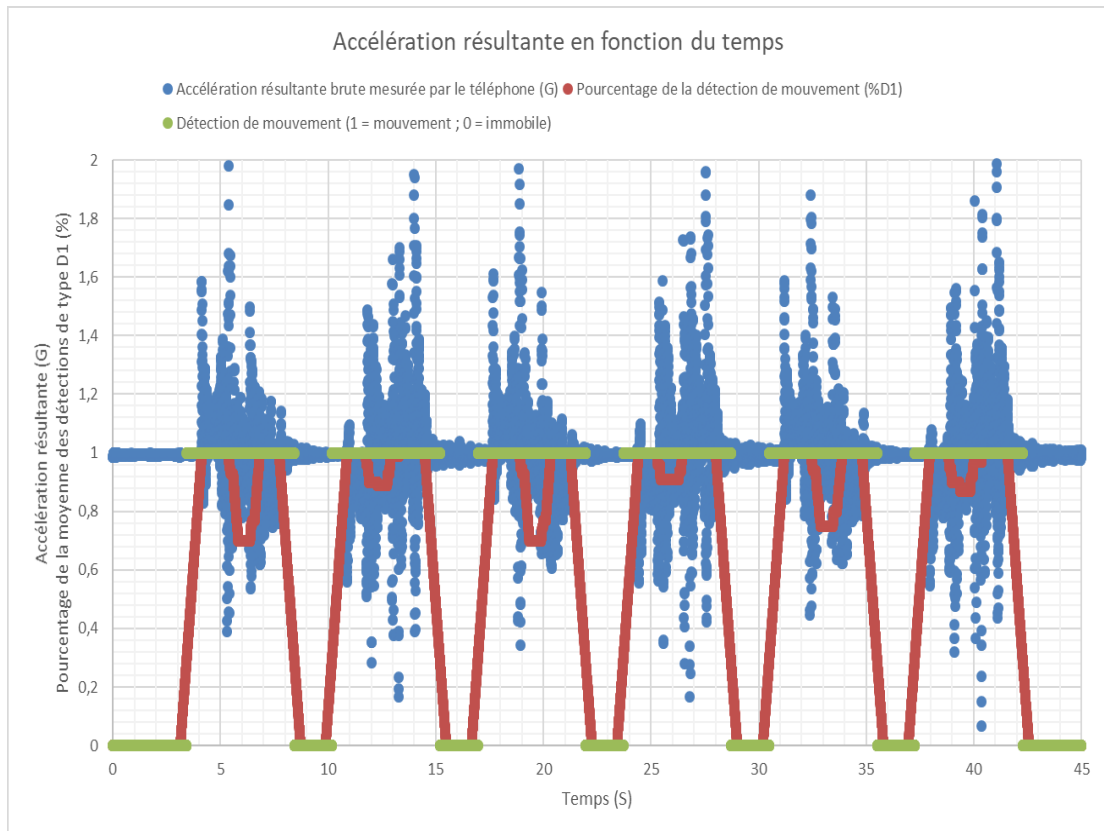


Figure 16: Détection de mouvement du programme d'acquisition

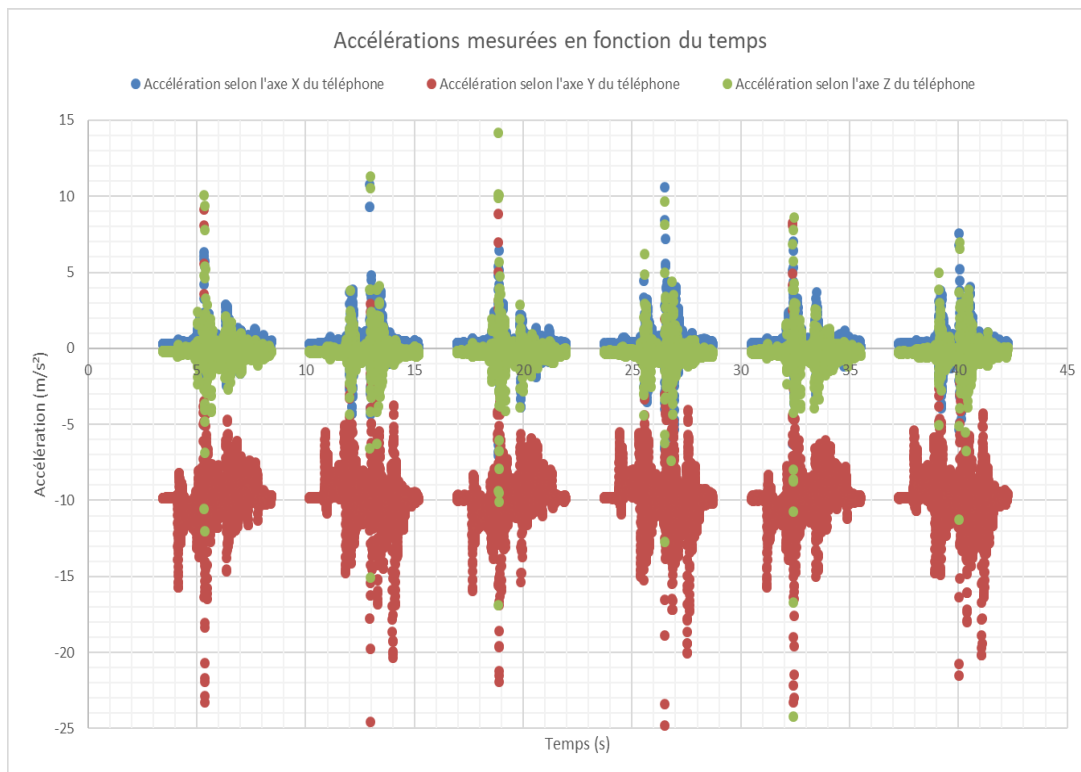


Figure 17: Accélération mesurées par le programme d'acquisition selon le système de référence du téléphone

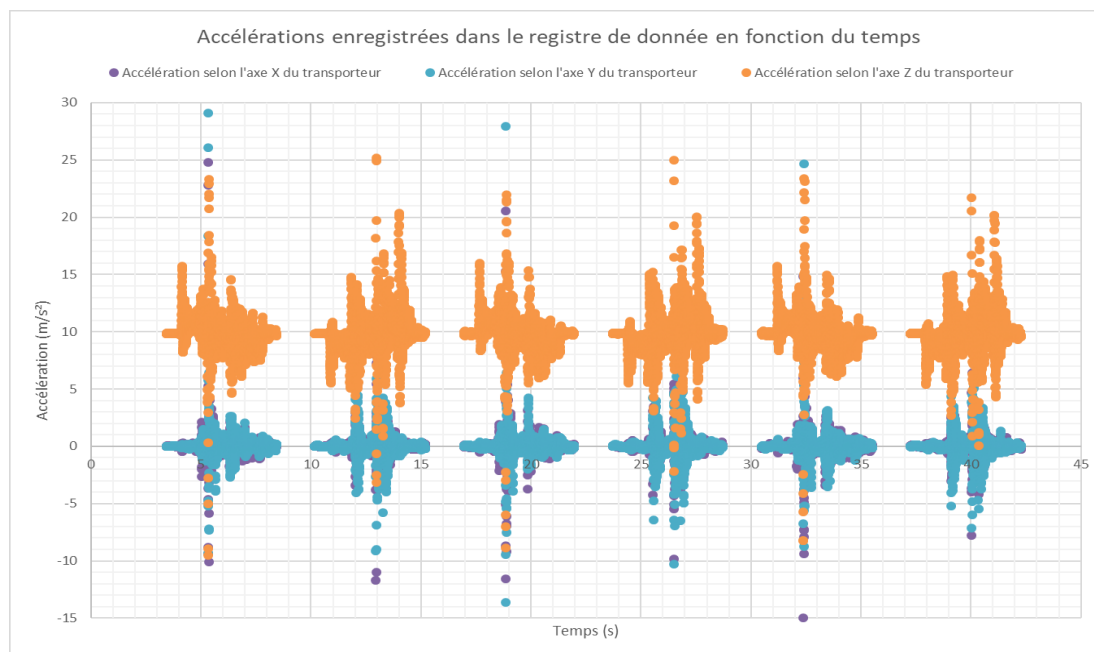


Figure 18: Accélération mesurées par le programme d'acquisition selon le système de référence du transporteur

#### 4.2. Validation test du programme et marge d'erreur d'analyse de données

Le programme d'analyse des données permet de compiler les données enregistrées par le programme d'acquisition et calculer la vitesse, la position et les impacts ressentis sur le plan XY du transporteur. Pour valider le programme, les données calculées ont été comparées avec les données mesurées par l'instrument de mesure ajouté à la maquette pendant un essai en laboratoire. L'essai en question consiste à faire 2 montées et descente du transporteur à vitesse réduite. En principe la position calculée par le programme doit être la même que celle mesurée par l'instrument de mesure.

Le programme d'analyse commence son analyse en ajustant les données d'accélération contenue dans le registre de donnée de manière à avoir des vitesses de déplacements parfaitement nuls au début et à la fin de chacun des déplacements. Cette étape est importante, car si les vitesses calculées par le programme sont mauvaises, le calcul de la position le sera également parce que le calcul de la position utilise la vitesse dans son calcul. Selon la figure 19, la vitesse calculée par le programme commence et termine bien avec des vitesses égales à zéro pour tous les déplacements. De plus les

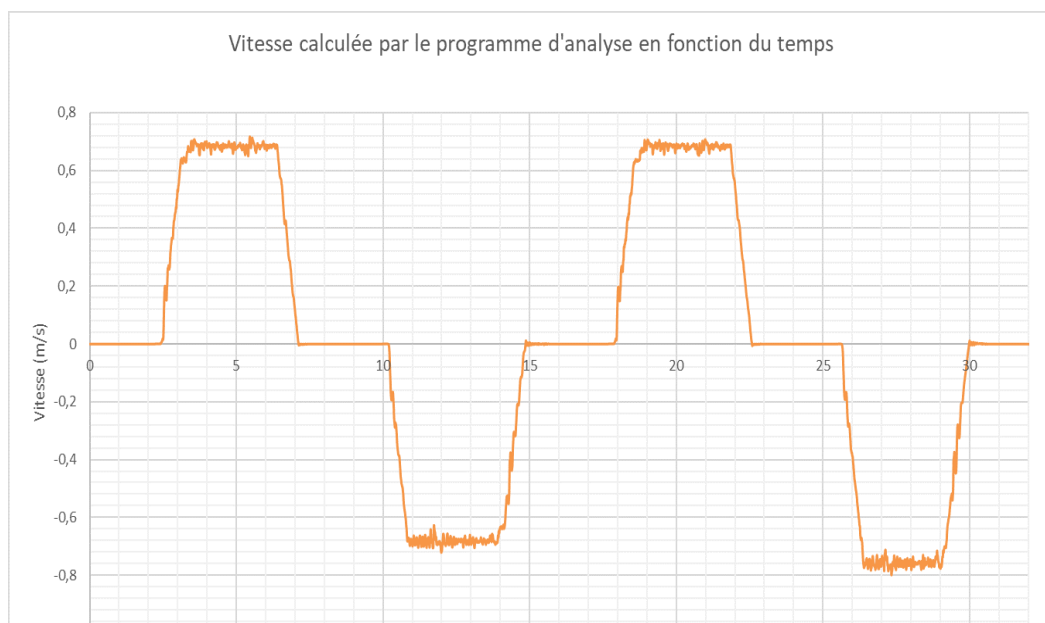


Figure 19: Vérification du calcul de la vitesse effectué par le programme d'analyse des données



vitesse maximale et minimale restent stables pour chacun des déplacements et sont de l'ordre de  $\pm 0.7$  m/s.

La position calculée par le programme et celle mesurée par l'instrument de mesure de la maquette sont illustrées sur la figure 21. La position calculée est pratiquement identique à celle mesurée par l'instrument de mesure pendant toute l'expérimentation. La figure 22 et la figure 23 montrent les différences obtenues sur la hauteur maximale et minimale du transporteur. Il existe une différence de 1.7 cm entre la position calculée et celle mesurée pour la position maximale du transporteur et 2 mm pour la position minimale. Et cette différence est stable après plusieurs tests effectués.

Après un test avec 200 de déplacement, la position  $P_{cal}$  est estimée avec une erreur  $E=0,017$  m lorsque le convoyeur est à sa position maximale, et  $E=0,002$  m lorsqu'il est à la position minimale. La figure 20 montre la marge d'erreur de 200 mouvements, l'erreur de plage sur la position minimale est  $[0,002, 0,001]$  mètre, l'erreur de plage sur la position maximale  $[0,018, 0,017]$  mètre et la valeur 0 définissent le résultat sans erreur. La moyenne d'erreur dans ce test était  $\bar{E} = 0,00721$  m calculée en (29).

L'erreur obtenue sur la hauteur maximale du convoyeur est calculée comme suit :  $E = |P_{cal} - P_{real}|$  (28)

Où  $P_{cal}$  est la position calculée par l'application et  $P_{real}$  est la position réelle des convoyeurs.

La moyenne d'erreur est calculée par l'équation :

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=0}^{NB} E}{NT} \quad (29)$$

Où  $E$  est la valeur d'erreur dans chaque position et  $NT$  est le nombre de mouvements réalisés pendant le test.

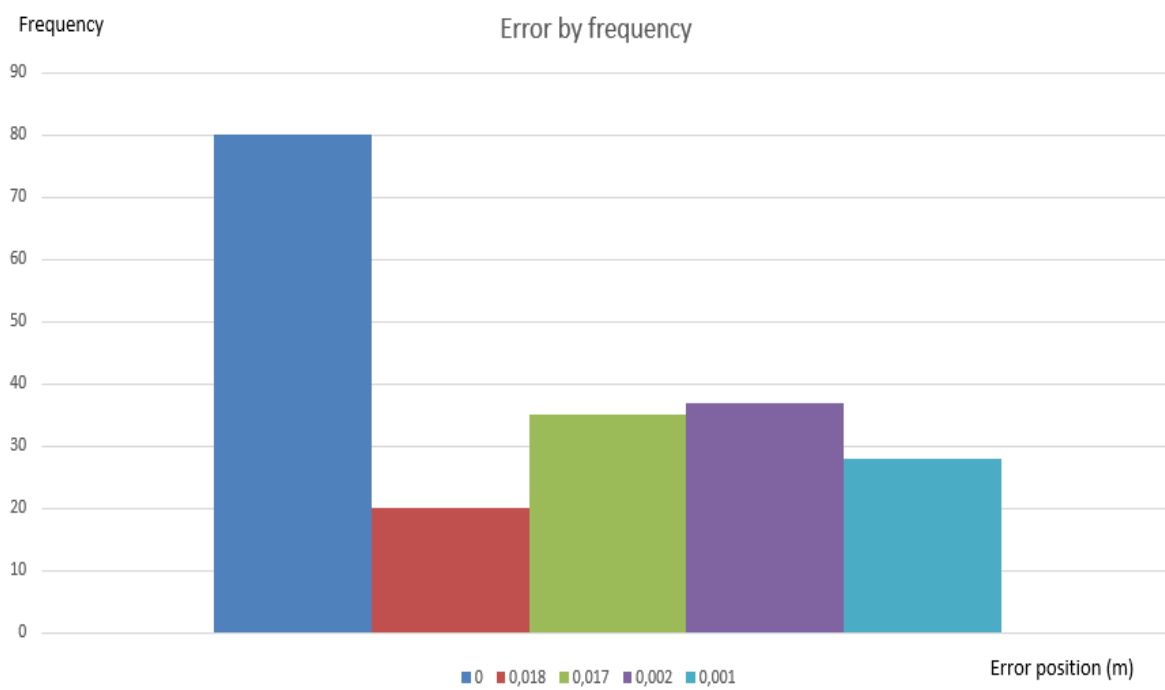


Figure 20: Histogramme d'erreur

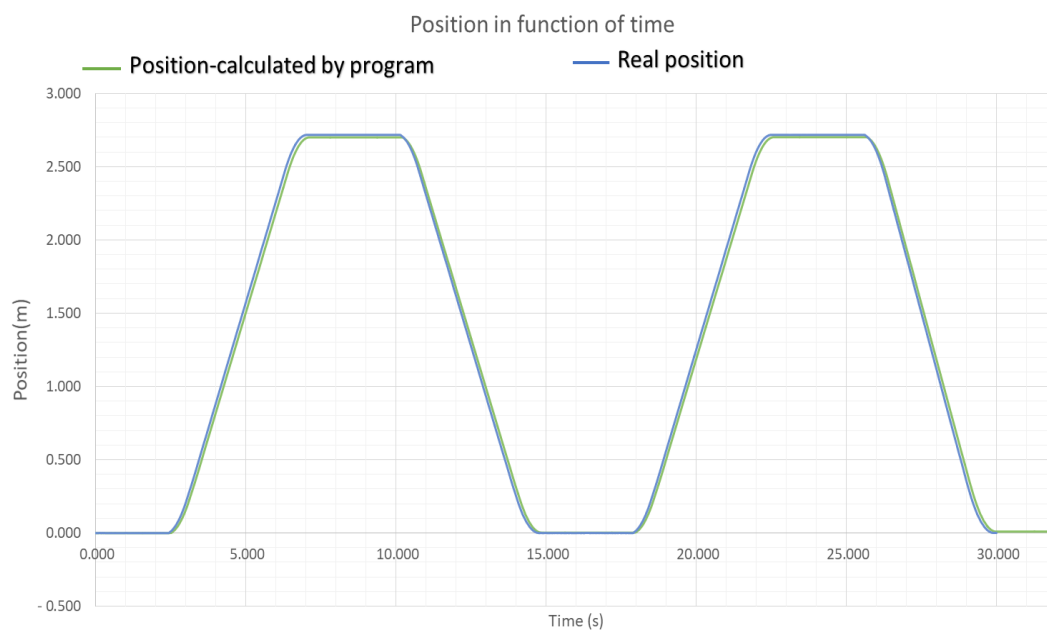


Figure 21: Vérification du calcul de la position du programme d'analyse

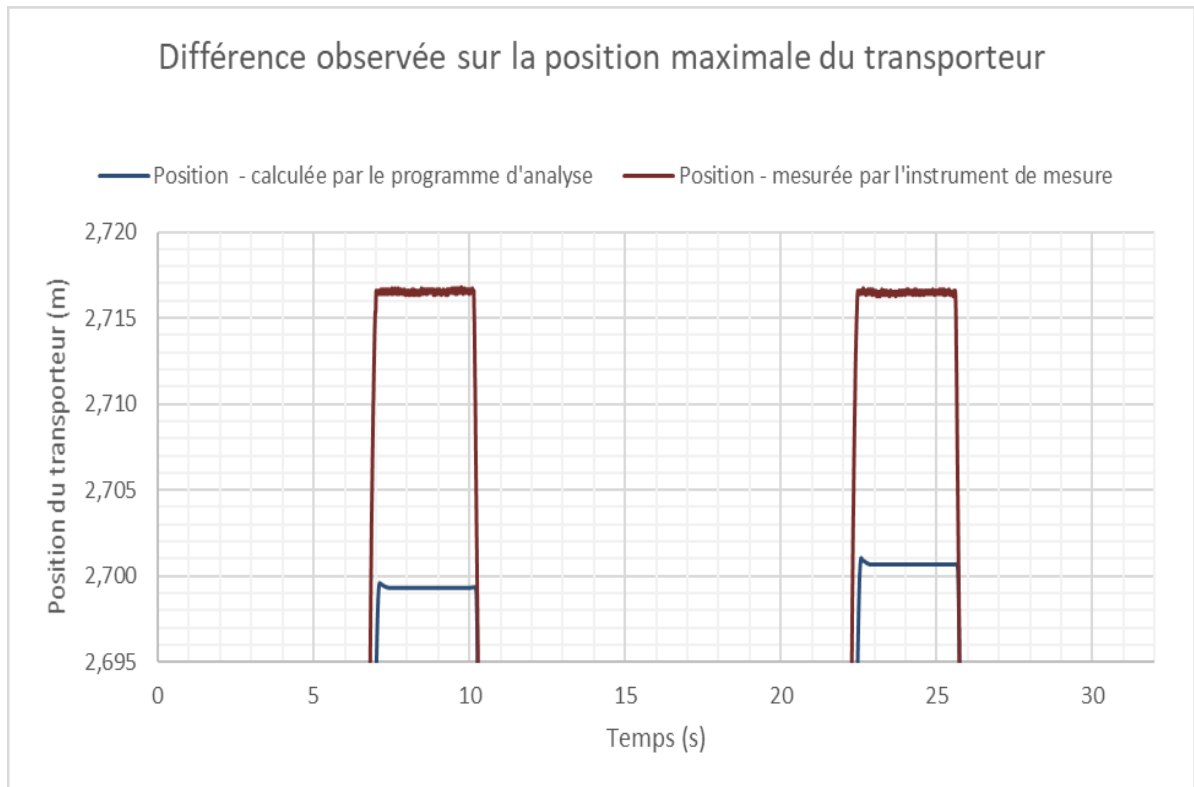


Figure 22: Différence entre la position calculée et celle mesurée – Position maximale du transporteur

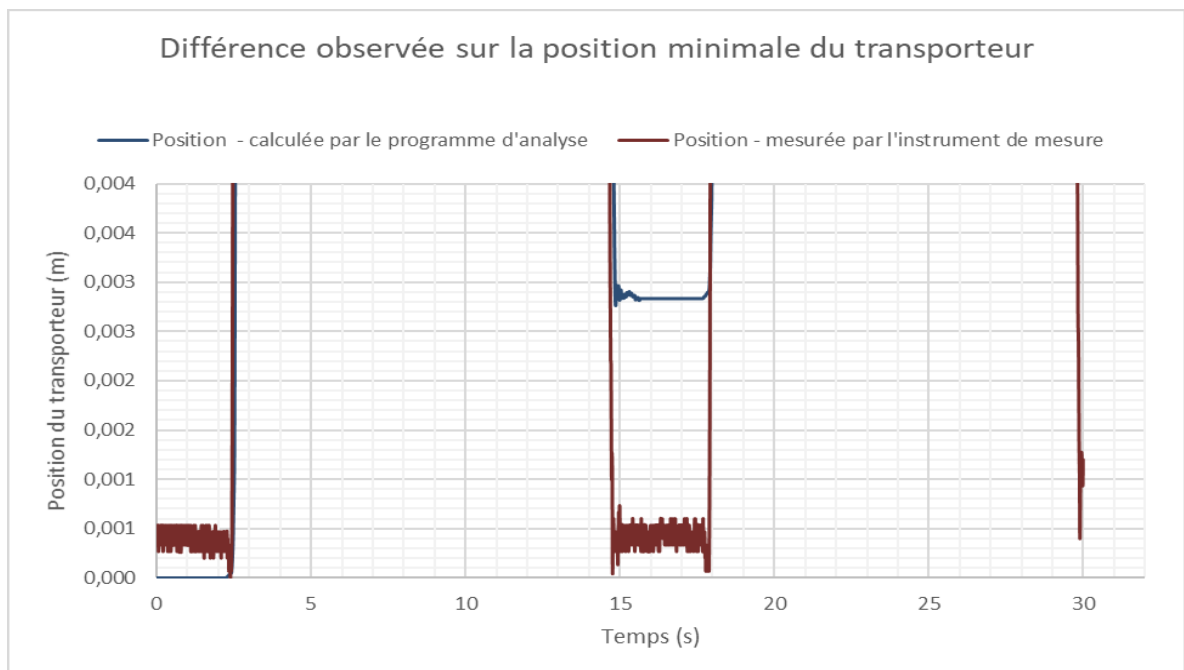


Figure 23: Différence entre la position calculée et celle mesurée – Position minimale du transporteur

#### *4.3. Validation test du programme de détection d'anomalie et marge d'erreur*

Le programme de détection d'anomalie doit associer les anomalies détectées pendant le déplacement du transporteur à leurs positions où elles ont été détectées. Pour valider le programme, une expérimentation en laboratoire a été effectuée avec la maquette. Cette expérience consiste à faire trois montées et descente en insérant une pièce métallique sur l'un des guides du transporteur à une distance d'environ 1 mètre par rapport à la position minimale du transporteur. En principe, il devra déterminer la position où l'anomalie a été ajoutée et la détecter pendant tous les déplacements du transporteur.

Les paramètres d'entrées utilisés pour la détection d'anomalies sont présentés dans le tableau 6. La figure 24 montre la position calculée par le programme avec les anomalies détectées sans l'ajustement de la position. Selon le programme 58 anomalies ont été détectées par le programme de détection et la pièce métallique ajoutée sur l'un des guides d'alignement a bien été détectée pour tous les déplacements du transporteur. Lorsque le transporteur monte, l'anomalie est détectée en moyenne à 0.74 m et 1.03 mètre pendant une descente. Cette différence s'explique en raison de la longueur du transporteur qui fait 29 cm et lors d'une montée, le plafond touche l'anomalie en premier et le programme l'associe à la position du plancher soit 29 cm trop vite. Lors d'une descente, le plancher touche l'anomalie en premier et correspond donc à la position réelle de l'anomalie. En précisant au programme de détection que les anomalies doivent être associées à la position du plancher, il est possible de corriger la différence de position associée à la détection lors des montées et des descentes.

Selon le tableau 6, la longueur de regroupement utilisé par le programme est de 0.1m. Cela implique que la distance totale parcourue par le transporteur est divisée en sections de 0.1 mètre sur toute la longueur et toutes les anomalies détectées autour de chaque section à  $\pm 0.05$  mètre sont regroupées ensemble. La figure 25 montre les regroupements pour chacune des sections et selon cette figure, 49 anomalies ont été

détectées à l'endroit où la pièce métallique a été installée sur un total de 58 détections.

Les autres sections ayant des anomalies correspondent à des disjonctions sur le câble d'enroulement du transporteur pendant l'expérimentation. Aux totales, 4 sections ont été associées à des anomalies pendant l'expérimentation. La figure 26 montre la position moyenne et l'impact minimal, maximal et moyen du regroupement d'anomalies associé pour ces sections problématiques.

En résumé le problème de détection d'anomalie a fonctionné, car 84 % des détections ont été associés à la position de la pièce métallique ajoutée sur l'un des guides d'alignement du transporteur.

Table 7: Paramètres d'entrées associés utilisés avec le programme de détection pour l'expérimentation

Paramètre d'entrée du programme		
Type de détection	Description	Valeur
Détection d'anomalies	Sensibilité de la détection (A)	5
	Période temporelle pour l'amplitude des impacts (T)	0,2
	Référence utilisée pour le positionnement des anomalies (REF)	Plancher
	Distance entre les points d'appui du transporteur (H)	0,29
	Profondeur totale du puits (P)	2,7
	Longueur de regroupement des anomalies (K)	0,15

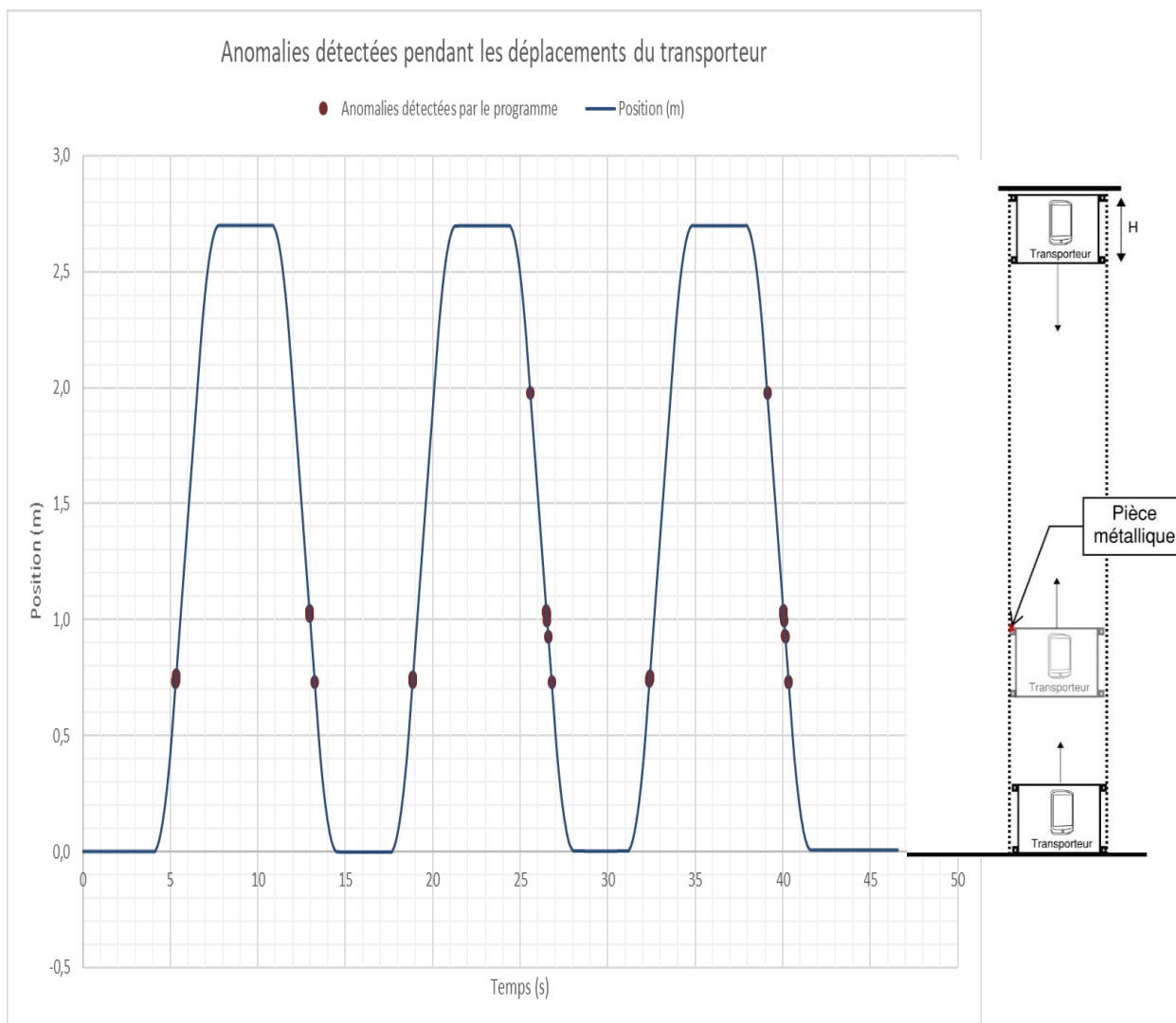


Figure 24: Anomalies détectées pendant les déplacements du transporteur

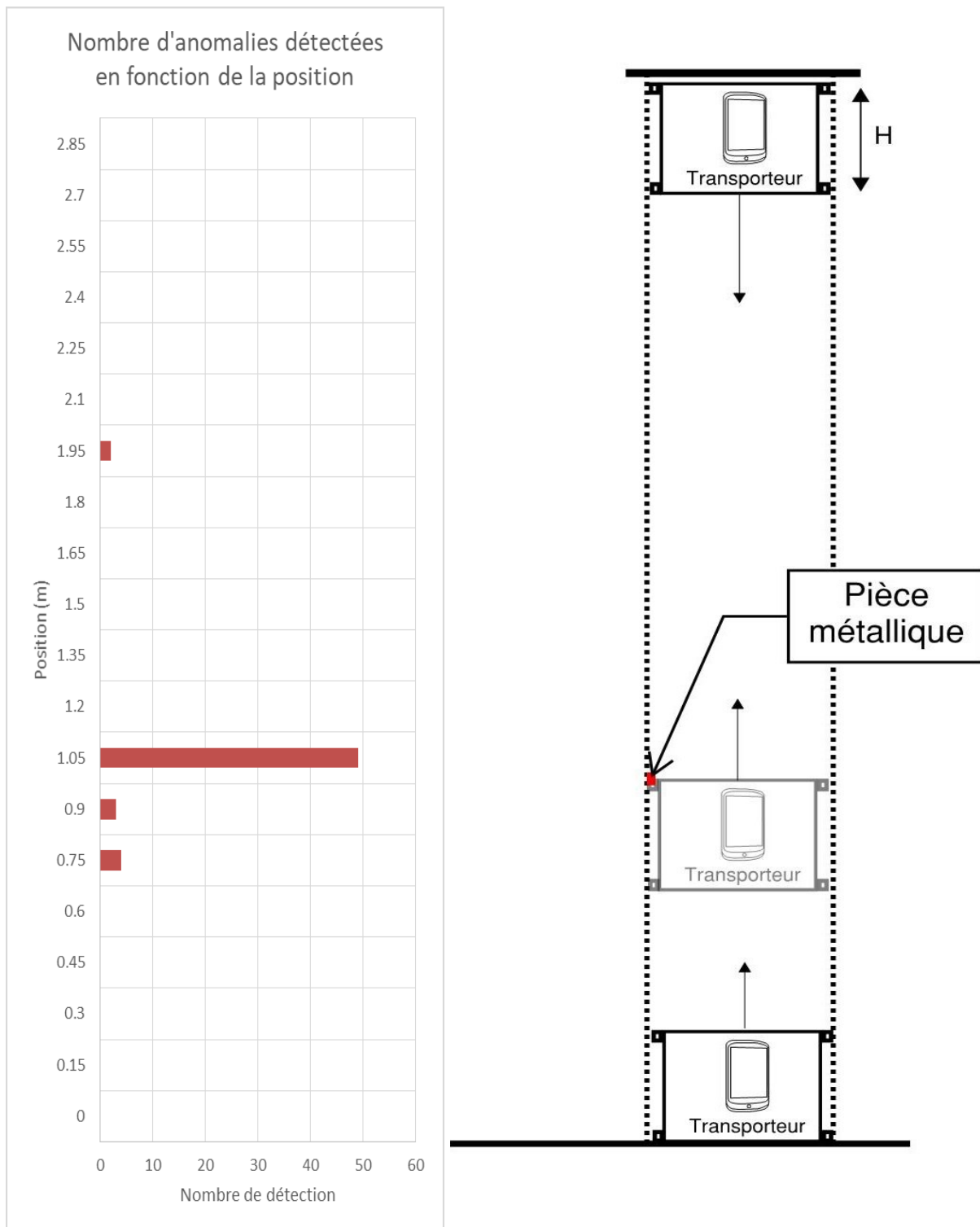


Figure 25: Bilan des anomalies détectées pendant le parcours



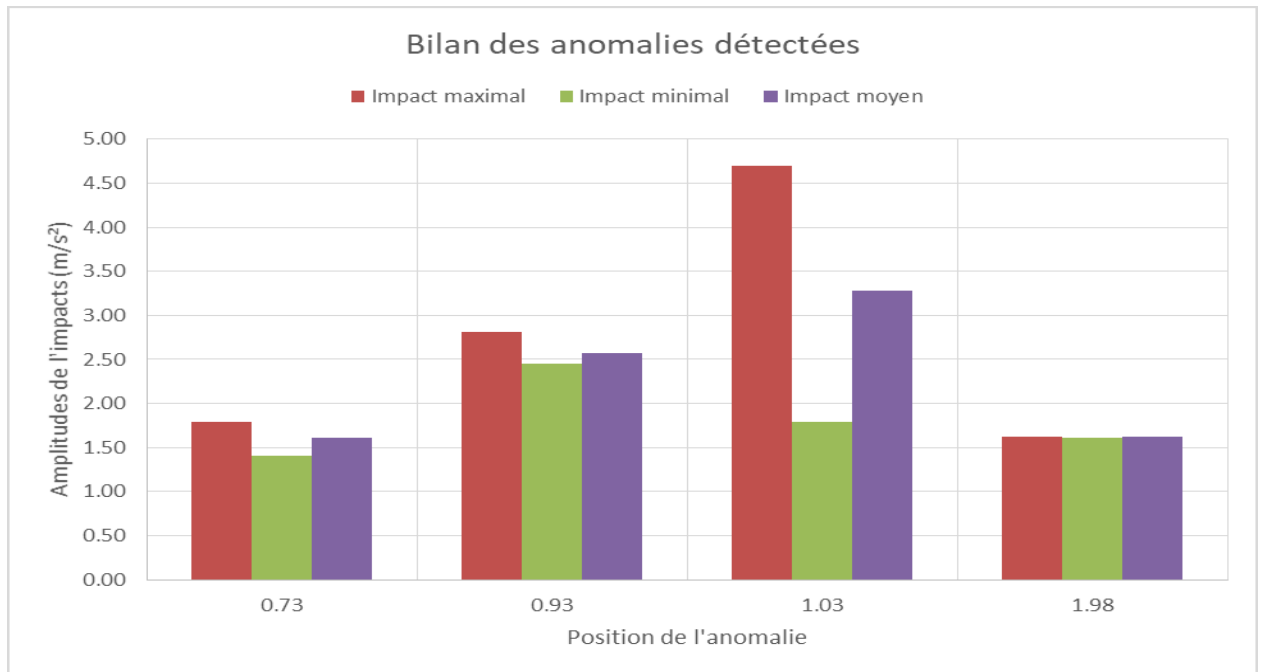


Figure 26: Bilan des positions problématiques

De plus, nous étudions la marge d'erreur de la détection d'anomalies dans 200 tests consécutifs en utilisant différentes valeurs de S, la figure 30 montre les valeurs d'erreur de détection pour différentes valeurs de S. Les résultats montrent que l'augmentation de la valeur S augmente l'erreur de détection, car le système considère la défaillance des rails comme une vibration dans ce cas. L'erreur minimale obtenue est égale à  $E=0,035$  lorsque la valeur de sensibilité est fixée à  $S=2,5$ .

$$P_R = \frac{Nf}{N} \quad (30)$$

Afin d'étudier la fiabilité du système dans la détection des pannes, nous calculons la probabilité relative de fréquence de détection des pannes par l'équation 30, et le tableau 8 montre les résultats obtenus pour  $S = 2,5$ , comme indiqué dans le tableau l'erreur de détection réalisée dans la somme de deux valeurs de P (panne détectée/pas d'anomalie) = 0,025 et P (panne non détectée/anomalie) = 0,01.

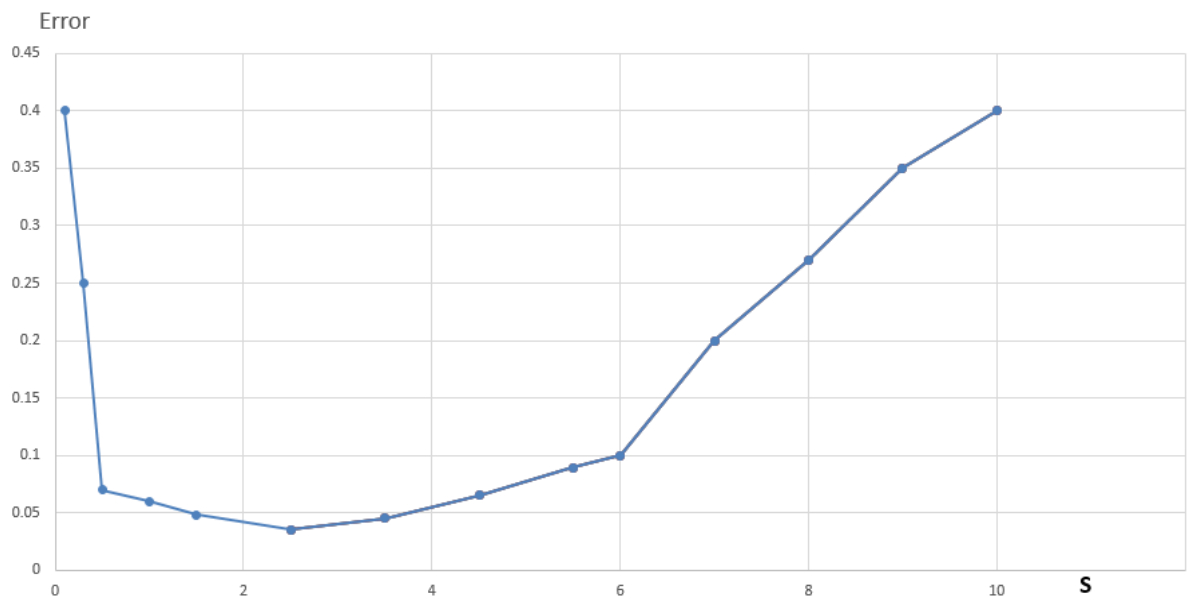


Figure 27: Erreur de détection

Table 8: Probabilité de fréquence relative

	<b>Anomalie</b>	<b>Non anomalie</b>
<b>Échec détecté</b>	0.975	0.025
<b>Échec non détecté</b>	0.01	0.99

## CONCLUSION

La communication de machine à machine est déjà appliquée dans de nombreux systèmes à travers le monde. En introduisant l'IMU dans l'industrie minière, les travailleurs et les équipes responsables de l'installation peuvent désormais recevoir des données valides, instantanées, correctes et précises sur la défektivité des rails et la durée de vie prévue.

Ce système peut être déployé sur un ou plusieurs rails, il peut également être installé dans différentes mines connectées ensemble dans un centre de contrôle et d'inspection centralisé.

Dans cette étude, nous présentons une solution pour localiser un élévateur minier vertical, ainsi que pour détecter toute anomalie sur les rails ainsi que leurs positions. Ce travail se fait en prenant en considération l'environnement complexe (mine) qui produit des vibrations éliminées par notre solution proposée.

Nous utilisons une unité de mesure inertielle représentée par une application développée sur un téléphone en utilisant les capteurs d'accélération intégrés. La première étape de notre système consiste à éliminer les vibrations à l'aide de la table tampon. Ensuite, l'application calcule la position et la vitesse du convoyeur après réglage de l'accélération. Enfin, la solution est capable de détecter les défaillances des rails et leur position en fonction de la position réelle calculée par l'application.

Afin de prouver l'efficacité de notre système, de nombreux tests sont effectués en laboratoire. Les résultats montrent la capacité du système à éliminer les vibrations et à calculer la vitesse et la position. Pour valider notre proposition de solution, nous avons réalisé deux types de bancs d'essai. La première est effectuée dans des conditions de fonctionnement normales, les positions des convoyeurs sont estimées et l'erreur de position obtenue est très faible avec une plage de [0,001, 0,018] mètre. Le deuxième banc d'essai est effectué pour déterminer la position des convoyeurs et la position de

défaillance dans les rails, et l'erreur mineure obtenue avec une probabilité de 0,035 à  $S = 2,5$ , qui est la variable sensible idéale  $S$  dans notre système.

Des options plus avancées pour le projet à venir peuvent bénéficier de la configuration présentée dans ce sujet, comme la détection de l'anomalie des rails en analysant les données d'accélération et trouver l'anomalie et la détérioration des rails par une autre méthode telle que, mais sans s'y limiter jusqu'au passage du téléphone aux capteurs industriels fixés sur les convoyeurs et les rails lui-même transmettant toutes les données au centre de contrôle, ainsi l'utilisation de l'intelligence artificiel pour prédire les anomalies afin de faire la maintenance avant une grande défaillance des rails, on plus d'installer une écran dans le transporteur qui affiche les résultats de vitesse, de position et des anomalies détecter instantanément d'une façon fiable et rapide ce sujet fait l'objet d'un futur travail.

## REFERENCES

- [1] Facts and Figures of the Canadian Mining Industry (*Mining Association of Canada*).
- [2] DU QUÉBEC, Gouvernement. Règlement sur la santé et la sécurité du travail. *Gazette officielle du Québec, Partie*, 2014, vol. 2, p. 5020-5133.
- [3] E. Hodo et al., "Threat analysis of IoT networks using artificial neural network intrusion detection system," in 2016 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), 2016: IEEE, pp. 1-6.<https://www.ettus.com/>
- [4] T. D. Barkand, "Ascending elevator accidents: Give the miner a brake," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 28, no. 3, pp. 720-729, 1992. A. Ghosh, T. Thomas, M. Cudak, R. Ratasuk, P. Moorut, F. Vook, T. Rappaport, G. Maccartney, S. Sun, S. Nie, Millimeter-wave enhanced local area systems: a high-data-rate approach for future wireless networks, *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 32 (6) (2014) 1152– 1163, doi: 10.1109/JSAC.2014.2328111.
- [5] H. Lohne-Seiler, B. H. Hansen, E. Kolle, and S. A. Anderssen, "Accelerometer-determined physical activity and self-reported health in a population of older adults (65–85 years): a cross-sectional study," *BMC Public Health*, vol. 14, no. 1, pp. 1-10, 2014.<https://searchsdn.techtarget.com/definition/software-defined-networking-SDN>.
- [6] J. Real, P. Salvador, L. Montalbán, and M. Bueno, "Determination of rail vertical profile through inertial methods," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 225, no. 1, pp. 14-23, 2011.
- [7] Coudert, F., Sunaga, Y., and Takegami, K. Use of axle box accelerations to detect track and rail irregularities.
- [8] J. Real, P. Salvador, L. Montalbán, and M. Bueno, "Determination of rail vertical profile through inertial methods," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 225, no. 1, pp. 14-23, 2011.
- [9] **Melis, M.** *Introducción a la dinámica Vertical de la vía y Señales Digitales en Ferrocarriles (Introduction to track vertical dynamics and digital signals in railways)*, 2008 (Polytechnical University, Madrid).
- [10] **Melis, M.** *Introducción a la dinámica Vertical de la vía y Señales Digitales en Ferrocarriles (Introduction to track vertical dynamics and digital signals in railways)*, 2008 (Polytechnical University, Madrid).
- [11] C.-C. Peng and L.-G. Tsan, "IEPE accelerometer fault diagnosis for maintenance management system information integration in a heavy industry," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 17, p. 100120, 2020.
- [12] C.C. Peng, C.H. Kuo, C.Y. Wu, Graphical histogram for integrated-circuit-piezoelectric-type accelerometer for health condition diagnosis and monitoring, *Sens. Mater.* 29 (11) (2017).
- [13] G. T. Burgess, A. S. Issa, and S. S. Hamad, *Race, revolution, and the struggle for human rights in Zanzibar: The memoirs of Ali Sultan Issa and Seif Sharif Hamad (no. 119)*. Ohio University Press, 2009.
- [14] <https://lois-laws.justice.gc.ca/fr/reglements/DORS-90-97/TexteCompleet.html>
- [15] <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/s-2.1.%20r.%2013>
- [16] <https://lois-laws.justice.gc.ca/fr/reglements/DORS-90-97/TexteCompleet.html>
- [17] <https://www.samsung.com/global/galaxy/galaxy-s10/specs/>
- [18] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Android\\_Studio](https://fr.wikipedia.org/wiki/Android_Studio)
- [19] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Python\\_\(langage\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Python_(langage))
- [20] Weston, P. F., Ling, C. S., Roberts, C., Goodman, C. J., Li, P., and Goodall, R. M. Monitoring vertical track irregularity from in-service railway vehicles. *Proc. IMechE, Part F: J. Rail and Rapid Transit*, 2007, 221, 75–88.
- [21] Caprioli, A., Cigada, A., and Raveglia, D. Rail inspection in track maintenance: a benchmark between the wavelet approach and the more conventional Fourier analysis. *J. Mech. Syst. Signal Process.*, 2007, 21, 631–652.

- [22] D. Evans, "The Internet of Things - How the Next Evolution of the Internet is Changing Everything," CISCO white Pap., no. April, pp. 1–11, 2011. M. HadZialic, B. Dosenovic, M. Dzaferagic, and J. Musovic, "CloudRAN: Innovative radio access network architecture," In ELMAR, 2013 55th International Symposium, pages 115-120, Sept 2013.
- [23] N. T. T. Van and T. N. Thinh, "Accelerating Anomaly-Based IDS Using Neural Network on GPU," in 2015 International Conference on Advanced Computing and Applications (ACOMP), 2015, pp. 67–74. C. J. Bernardos et al., "An architecture for software defined wireless networking," in IEEE Wireless Communications, vol. 21, no. 3, pp. 52- 61, June 2014.
- [24] D. Evans, "The Internet of Things - How the Next Evolution of the Internet is Changing Everything," CISCO white Pap., no. April, pp. 1–11, 2011.
- [25] L. Talbi, I. B. Mabrouk, and M. Nedil, "Progress research on wireless communication systems for underground mine sensors," Remote Sensing - Advanced Techniques and Platforms, no. 10.5772/37577, 2012. [Online]. Available: <https://goo.gl/0Iz34a>
- [26] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "Understanding the internet of things: definition, potentials, and societal role of a fast evolving paradigm," Ad Hoc Networks, vol. 56, pp. 122 – 140, 2017. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.12.004>