BIBLIOTHÈQUE
CÉGEP DE L'ABITIBI-TÉMISCAMINGUE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de la personne autrice de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'autrice ou l'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

VALIDATION ET OPTIMISATION DES SOLUTIONS D'INSTRUMENTATION PROACTIVE DES ÉQUIPEMENTS DE POMPAGE

Mémoire
présenté
comme exigence partielle
de la maîtrise en ingénierie

Par
Sirine El Mnif

Juin 2026

© Sirine El Mnif, 2026

REMERCIEMENTS

Au terme de cette maîtrise réalisée en collaboration entre l'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax et l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à mon encadrant à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Monsieur Hatem Mrad, pour la qualité de son encadrement, sa disponibilité, ses conseils avisés et son accompagnement constant tout au long de ce projet.

Mes remerciements s'adressent également à mon encadrante à l'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Madame Mouna Baklouti, pour son suivi rigoureux, ses orientations pertinentes et son soutien précieux durant la réalisation de cette maîtrise.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à l'équipe de TECHNOSUB pour son accueil, sa collaboration et les moyens mis à disposition pour la réalisation de ce travail. Mes remerciements les plus sincères vont particulièrement à Monsieur Félix-Antoine Cardinal pour son professionnalisme, sa disponibilité et sa contribution significative à ce projet.

Je remercie également l'ensemble de l'équipe pédagogique de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue et de l'École Nationale d'Ingénieurs de Sfax pour la qualité de la formation dispensée et pour l'environnement académique enrichissant offert tout au long de mon parcours.

À toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, j'exprime ma sincère reconnaissance.

DÉDICACE

À mes très chers parents,

Les mots ne suffiront jamais pour exprimer toute la gratitude et l'amour que je vous porte. Merci pour vos sacrifices, vos prières, votre patience et votre soutien indéfectible tout au long de mon parcours. Vous avez été ma force dans les moments de doute et ma lumière dans les moments d'incertitude. Ce travail est avant tout le vôtre.

À mon frère Safwen, à mes sœurs Nihel et Farah, à mon beau-frère Sami et à ma belle-sœur Anwar,

Merci pour votre amour, vos encouragements constants et votre présence rassurante tout au long de ce parcours. Votre bienveillance, votre soutien et vos paroles motivantes ont été d'un réconfort précieux. Vous êtes une partie essentielle de ma réussite et l'une de mes plus grandes richesses.

À mon neveu Adem et à mes deux nièces Ayet et Mariam,

Vous êtes ma joie et mon sourire au quotidien. Que ce travail vous inspire à croire en vos rêves et à ne jamais abandonner.

À mon fiancé Houssem,

Merci pour ton amour sincère, ta patience infinie et ton soutien sans faille. Tu as été mon pilier, mon refuge et ma motivation durant tout ce parcours. Ta confiance en moi m'a donné la force d'aller jusqu'au bout.

À vous tous,

Je dédie ce travail avec tout mon cœur, avec amour, reconnaissance et une immense affection.

RÉSUMÉ

La surveillance conditionnelle des systèmes de pompage constitue un enjeu majeur pour améliorer la fiabilité des installations industrielles et réduire les coûts liés aux arrêts non planifiés. Ce mémoire présente la validation expérimentale d'un capteur multimesures sans fil, l'instrument TAG, destiné à la mesure simultanée de la pression, de la température, de l'humidité et des vibrations dans les systèmes de pompage.

Les performances de l'instrument TAG ont été évaluées à travers une série d'expériences et de tests contrôlés réalisés en laboratoire et sur une pompe réelle, en comparaison avec des capteurs de référence. Les résultats démontrent une forte concordance entre l'instrument TAG et les mesures de référence pour les paramètres environnementaux, confirmant la précision et la stabilité de la solution proposée. Des tests combinés ont en outre montré que le capteur maintien des performances constantes malgré des variations simultanées de plusieurs paramètres.

L'analyse des vibrations a constitué une partie centrale de ce travail. Une attention particulière a été accordée à l'influence des paramètres de traitement utilisés pour calculer les indicateurs de vibration, en particulier la taille de la fenêtre appliquée au calcul de la valeur moyenne quadratique RMS (σ). Une taille de fenêtre de $N = 50$ s'est avérée suffisante dans les conditions de laboratoire, offrant un équilibre approprié entre réactivité et stabilité, tandis que des conditions de fonctionnement plus dynamiques sur le banc d'essai industriel ont nécessité $N \geq 400$ pour obtenir une convergence stable. Malgré certaines difficultés techniques rencontrées au cours du processus de validation, des mises à jour successives ont permis d'améliorer la fiabilité de l'acquisition des données.

Dans l'ensemble, les résultats confirment la pertinence et le potentiel de l'instrument TAG pour la surveillance multiparamétrique de l'état des systèmes de pompage dans les environnements industriels et fournissent une base solide pour les développements futurs en matière de maintenance prédictive et d'instrumentation intelligente.

Mots-clés : surveillance conditionnelle, systèmes de pompage, capteur multimesures, analyse vibratoire, validation expérimentale.

ABSTRACT

Condition monitoring of pumping systems is a critical issue for improving equipment reliability and reducing costly unplanned downtime, particularly in industrial and mining environments. This thesis presents the experimental validation of a wireless multisensor device, referred to as the TAG sensor, designed for the simultaneous measurement of pressure, temperature, humidity, and vibrations in pumping systems.

The performance of the TAG sensor was evaluated through a series of controlled laboratory experiments and tests conducted on a real centrifugal pump, in comparison with reference sensors. The results demonstrate a strong agreement between the TAG sensor and the reference measurements for environmental parameters, confirming the accuracy and stability of the proposed solution. Combined tests further showed that the sensor maintains consistent performance under simultaneous variations of multiple parameters.

Vibration analysis constituted a central part of this work. Particular attention was given to the influence of the processing parameters used to compute vibration indicators, especially the window size applied to the RMS (σ) calculation. A window size of $N = 50$ was found to be sufficient under laboratory conditions, providing a suitable balance between responsiveness and stability, while more dynamic operating conditions on the industrial test bench required $N \geq 400$ to achieve stable convergence. Despite some technical challenges encountered during the validation process, successive updates allowed improvements in data acquisition reliability.

Overall, the results confirm the relevance and potential of the TAG sensor for multi-parameter condition monitoring of pumping systems in industrial environments and provide a solid basis for future developments in predictive maintenance and smart instrumentation.

Keywords: conditional monitoring, pumping systems, multi-measurement sensor, vibration analysis, experimental validation.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS III
DÉDICACE IV
RÉSUMÉ V
ABSTRACT VI
TABLE DES MATIÈRES VII
LISTE DES FIGURES X
LISTE DES TABLEAUX XIII
LISTE DES ABRÉVIATIONS XIV
INTRODUCTION 1
1. MISE EN CONTEXTE DU PROJET 3
1.1 Introduction 3
1.2 Contexte et problématique 3
1.2.1 Objectif principal 5
1.2.2 Objectifs spécifiques 5
1.3 Originalité de recherche 6
1.4 Conclusion 7
2. ETAT DE L'ART 8
2.1 Introduction 8
2.2 Systèmes de pompage dans le secteur minier 8
2.2.1 Anomalies des pompes 9
2.2.2 Technologies de détection 13
2.3 Traitement des signaux et extraction de caractéristiques pour la surveillance des pompes 16
2.3.1 Méthodes de traitement du signal pour le diagnostic des machines tournantes 17
2.3.2 Indicateurs de diagnostic et défauts mécaniques associés 19
2.4 Surveillance de l'état des pompes 21
2.5 Caractéristiques métrologiques des capteurs de mesure 24
2.5.1 Linéarité 25
2.5.2 Stabilité 27

2.5.3 Répétabilité 27
2.5.4 Réversibilité 28
2.6 Choix des paramètres de surveillance 29
2.7 Conclusion 30
3. MATÉRIELS ET MÉTHODOLOGIE 31
3.1 Introduction 31
3.2 Présentation de l'instrument TAG 31
3.3 Architecture matérielle de l'instrument TAG 33
3.4 Méthodologie de validation de l'instrument TAG 35
3.4.1 Capteurs témoins 36
3.4.2 Dispositifs expérimentaux 37
3.4.3 Méthodes statistiques d'évaluation de la concordance entre l'instrument TAG et les capteurs témoins 42
3.5 Organisation des essais expérimentaux 47
3.6 Conclusion 48
4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS 49
4.1 Introduction 49
4.2 Validation des mesures de pression 49
4.3 Validation des mesures de température 54
4.4 Validation des mesures d'humidité 57
4.5 Validation des mesures de vibrations en laboratoire 59
4.5.1 Principe de calcul vibratoire embarqué dans l'instrument TAG 59
4.5.2 Conformité de l'algorithme vibratoire du TAG avec l'état de l'art 61
4.5.3 Analyse comparative des signaux RMS (σ) en laboratoire 62
4.5.4 Analyse des signaux vibratoires bruts (RAW) 64
4.5.5 Influence de la taille de la fenêtre de calcul N 66
4.5.6 Analyse de l'influence de la taille de la fenêtre de calcul N 67
4.6 Validation des mesures de vibrations sur pompe réelle 73
4.6.1 Conditions des essais sur pompe réelle 74
4.6.2 Points de fonctionnement de la pompe 74
4.6.3 Scénarios d'essais réalisés 75

4.6.4 Traitement des données 76
4.6.5 Analyse vibratoire en régime permanent 76
4.6.6 Analyse vibratoire en phase de marche et d'arrêt 78
4.6.7 Analyse vibratoire en sens de rotation inverse 79
4.7 Résultats des essais combinés 81
4.8 Problèmes rencontrés lors de la validation de l'instrument TAG 82
4.9 Conclusion 84
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES 86
ANNEXE A – TABLE DE LA LOI DE STUDENT 88
ANNEXE B – TABLE DU TEST U DE MANN-WHITNEY 89
BIBLIOGRAPHIE 90

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Station de pompage dans une mine 9
Figure 2 : Défaut de désalignement dans une pompe : (a) Désalignement angulaire. (b) Désalignement parallèle 11
Figure 3 : Défaut de roulement 12
Figure 4 : Cycle de vie d'une bulle de cavitation dans une pompe 12
Figure 5 : Défaut de cavitation dans la roue d'une pompe centrifuge 13
Figure 6 : Technologies de détection pour la maintenance conditionnelle 14
Figure 7 : Classification des principales méthodes de traitement du signal et d'extraction de caractéristiques 17
Figure 8 : Comparaison des signaux vibratoires en conditions de cavitation et de non-cavitation : (a) et (b) Domaine temporel, (c) et (d) Domaine fréquentiel 20
Figure 9 : Architecture du système 23
Figure 10: (a) Mesures de vibrations (enveloppe) pour le moteur 2 ; (b) Fréquences des roulements pour le moteur 2 24
Figure 11 : Exemple de linéarisation de caractéristiques 26
Figure 12 : Caractéristiques statistiques d'un capteur 28
Figure 13 : Courbe d'hystérésis 29
Figure 14 : Instrument TAG 32
Figure 15 : (a) Pompe submersible Tsurumi. (b) Emplacement de l'instrument TAG dans les pompes Tsurumi 34
Figure 16: (a) Carte "nRF52 DK". (b) carte de connexion en série 35
Figure 17 : Méthodologie de validation de l'instrument TAG 36
Figure 18 : Dispositif expérimental pour la mesure des vibrations 38
Figure 19 : Montage expérimental pour la validation de l'instrument TAG dans les trois directions de mesure 39
Figure 20 : Montage des capteurs (TAG + Témoin) sur la pompe 39
Figure 21 : Dispositif de mesure de pression : (a) chambre hermétique en verre, (b) cellule métallique 40
Figure 22 : Chambre environnementale 41
Figure 23 : Dispositif expérimental pour les essais combinés 42

Figure 24 : Exemple de données non normalement distribuées 46
Figure 25 : Répétabilité des mesures de pression de l'instrument TAG 50
Figure 26 : Variation croissante et décroissante de la pression : comparaison entre l'instrument TAG et le capteur témoin 51
Figure 27 : Résultats du test de Mann-Whitney pour l'essai de la variation croissante de la pression 52
Figure 28 : Essais à pression constante : (a) 2000 mbar, (b) 3000 mbar et (c) 4000 mbar 52
Figure 29 : Réponse de l'instrument TAG à des séquences de pression aléatoire .. 54
Figure 30 : Variations de la température en plage positive : (a) Température croissante; (b) Température décroissante 55
Figure 31 : Réponse de l'instrument TAG en plage de températures négatives 56
Figure 32 : Résultats du test de Mann-Whitney pour l'essai de la variation croissante de la température 57
Figure 33 : Variation de l'humidité relative : comparaison entre l'instrument TAG et le capteur témoin; (a) Première série de mesures, (b) Deuxième série de mesures ... 58
Figure 34 : Résultats du test de Mann-Whitney pour l'essai de la variation croissante de l'humidité 59
Figure 35 : Évolution temporelle de l'écart type des vibrations mesurées selon la direction Z (N=10) 63
Figure 36 : Signaux vibratoires bruts (RAW) en régime permanent à 30 Hz 65
Figure 37 : Signaux vibratoires bruts (RAW) en régime transitoire 65
Figure 38 : Comparaison de l'écart type mobile en régime permanent à 30 Hz pour différentes valeurs de N ; (a) Instrument TAG, (b) Capteur témoin 68
Figure 39 : Comparaison de l'écart type mobile entre l'instrument TAG et le capteur témoin pour deux tailles de fenêtre représentatives (N = 10 et N = 50) 68
Figure 40 : Influence de la taille de la fenêtre N sur l'écart type mobile de l'instrument TAG en régime transitoire 70
Figure 41 : Comparaison des signaux RMS (σ) de l'instrument TAG et du capteur témoin en régime transitoire pour N = 50 71
Figure 42 : Évolution du RMSE en fonction de la taille de la fenêtre N 71

Figure 43 : Signal d'accélération brut (RAW) mesuré au cours de phases alternées de marche et d'arrêt..... 72
Figure 44 : Influence de la taille de la fenêtre N sur l'écart type mobile de l'instrument TAG lors d'une phase de marche et d'arrêt..... 73
Figure 45 : Courbe de performance de la pompe centrifuge Tsurumi LH311W et points de fonctionnement sélectionnés..... 75
Figure 46 : Schéma du processus de traitement des données vibratoires..... 76
Figure 47 : Signaux d'accélération bruts mesurés sur l'axe X au point de fonctionnement P3..... 77
Figure 48 : Comparaison des indicateurs RMS (σ) pour N=10 et N=100..... 78
Figure 49 : Signal d'accélération brut en phase de marche/arrêt 78
Figure 50 : Indicateurs RMS (σ) en phase de marche/arrêt pour N=10 et N=400.... 79
Figure 51 : Signal d'accélération brut en sens de rotation inverse avec ouverture progressive de la valve 79
Figure 52 : Comparaison des indicateurs RMS (σ) pour N=10 et N=400..... 80
Figure 53 : Comparaison des mesures de pression, température et humidité de l'instrument TAG et des capteurs témoins lors des essais combinés 81
Figure 54 : Exemple de lacunes dans les données enregistrées par l'instrument TAG 83
Figure 55 : Comparaison des signaux d'accélération bruts au point de fonctionnement P1..... 84

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Types de défauts qui se produisent souvent lors du fonctionnement des pompes 10
Tableau 2 : Résumé des articles sur la CM des pompes en fonction du domaine d'intérêt et du signal utilisé 15
Tableau 3 : Divers signaux acquis pour la pompe et leur emplacement sur l'ensemble motopompe (cas de MC) 16
Tableau 4 : Exemples de signaux analysés, indicateurs extraits et défauts mécaniques associés 19
Tableau 5 : Différents capteurs intégrés dans l'instrument TAG 33
Tableau 6 : Capteurs témoins utilisés pour la validation de *l'instrument TAG* 37
Tableau 7 : Indicateurs statistiques des essais de répétabilité de l'instrument TAG pour la mesure de pression 50
Tableau 8 : Indicateurs statistiques des mesures de pression de l'instrument TAG lors des essais à pression constante 53
Tableau 9 : Influence de la taille de la fenêtre N sur le RMSE en régime permanent 69

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ANC	Active Noise Cancellation
DIF	Difference Signal
FFT	Fast Fourier Transform
HR	Humidité relative
IOT	Internet of Things
MBVI	Model-Based Virtual Instrumentation
MC	Maintenance conditionnelle
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
MSCA	Motor Current Signature Analysis
RMS	Root Mean Square
RMSE	Root Mean Square Error
STFT	Short-Time Fourier Transform
TSA	Time Synchronous Averaging
WT	Wavelet Transform

INTRODUCTION

Les systèmes de pompage occupent une place essentielle dans de nombreux secteurs industriels, en particulier dans le secteur minier, où ils assurent des fonctions critiques telles que l'extraction, le transport et la gestion des fluides. Le bon fonctionnement de ces équipements conditionne directement la continuité des opérations, la sécurité des installations et la maîtrise des coûts d'exploitation. Toutefois, les pompes sont soumises à des conditions de fonctionnement sévères, pouvant entraîner divers mécanismes de dégradation et des défaillances parfois soudaines, générant des arrêts non planifiés et coûteux.

Dans ce contexte, la surveillance conditionnelle des systèmes de pompage constitue un levier majeur pour améliorer leur fiabilité et optimiser les stratégies de maintenance. Les avancées récentes de l'industrie 4.0, de l'Internet des objets (IoT) et des capteurs intelligents ont permis le développement de solutions d'instrumentation capables de mesurer en continu plusieurs paramètres physiques pertinents, tels que la pression, la température, l'humidité et les vibrations. Parmi ces paramètres, les vibrations occupent une place centrale, car elles constituent un indicateur sensible de l'état mécanique des machines tournantes.

Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique et porte sur la validation expérimentale d'un capteur multisensoriel sans fil, dénommé TAG, développé en collaboration avec notre partenaire industriel TECHNOSUB. Ce capteur vise à assurer une surveillance multiparamètres des systèmes de pompage dans des environnements industriels contraints. L'objectif principal de ce travail est d'évaluer les performances métrologiques de l'instrument TAG, d'analyser la fiabilité des mesures acquises et de valider son comportement aussi bien en laboratoire que sur une pompe réelle. Une attention particulière est portée à l'analyse vibratoire, notamment au choix et à l'optimisation des indicateurs de traitement des signaux en fonction des conditions de fonctionnement.

Le mémoire est structuré comme suit. Le chapitre 1 présente le contexte général du projet, en mettant en évidence les enjeux industriels liés à la surveillance des systèmes de pompage, la problématique abordée ainsi que les objectifs poursuivis dans le cadre de ce travail. Le chapitre 2 est consacré à l'état de l'art et traite des principes de la maintenance industrielle et de la surveillance conditionnelle, des paramètres pertinents pour le suivi de l'état des pompes, ainsi que des méthodes de traitement des signaux et des indicateurs de performance utilisés pour l'évaluation des capteurs.

Le chapitre 3 décrit le matériel expérimental et l'instrumentation utilisée, incluant la présentation de l'instrument TAG et des capteurs témoins, ainsi que les protocoles expérimentaux mis en œuvre pour la validation des mesures en laboratoire et sur banc d'essai. Les méthodes d'acquisition, de synchronisation et de traitement des données y sont également détaillées.

Le chapitre 4 présente les résultats expérimentaux obtenus pour les différents paramètres mesurés (pression, température, humidité et vibrations), suivis d'une analyse comparative avec les capteurs de référence. Ce chapitre met également en évidence les résultats des analyses statistiques, l'étude des signaux vibratoires RMS (σ) et bruts, ainsi que l'évaluation du comportement du système en régimes transitoire et permanent.

Enfin, le dernier chapitre synthétise les principales conclusions de ce travail, souligne les contributions apportées par la validation de l'instrument TAG et propose des perspectives d'amélioration, tant au niveau du traitement des données que du déploiement industriel et des travaux futurs.

1. MISE EN CONTEXTE DU PROJET

1.1 Introduction

L'avènement de l'Industrie 4.0 a marqué une transformation significative dans la manière dont les entreprises abordent la gestion de leurs opérations. L'Industrie 4.0 peut être définie comme l'intégration des technologies numériques avancées, telles que l'Internet des Objets (IoT), le cloud computing, l'intelligence artificielle et l'analyse de données, dans les systèmes industriels afin d'améliorer l'automatisation, la connectivité et la prise de décision basée sur les données (Xu, 2020). À mesure que les technologies de l'IoT et de la connectivité ont gagné en maturité, de nouvelles opportunités se sont ouvertes pour améliorer l'efficacité, réduire les coûts opérationnels et renforcer la fiabilité des systèmes industriels.

La connectivité a profondément modifié la façon dont les entreprises abordent la gestion de leurs ressources. Des secteurs variés, allant de la fabrication à l'énergie, ont adopté des systèmes connectés pour optimiser leurs processus, anticiper les défaillances, et améliorer leur compétitivité sur le marché mondial (Jesús Hamilton Ortiz, 2020). Grâce à ces innovations numériques, l'industrie assiste à un changement de paradigme dans la façon dont les systèmes de pompage sont surveillés, entretenus et optimisés, soulignant l'importance de la prise de décision fondée sur les données et le potentiel d'améliorations significatives de l'efficacité opérationnelle et de la durabilité environnementale dans le contexte du milieu industriel.

1.2 Contexte et problématique

La maintenance conditionnelle est l'un des domaines clés pour que les machines critiques fonctionnent sans arrêt. Elle est basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement (indicateurs ou facteurs d'alerte) afin de mettre en évidence les points faibles et préconiser les actions qui en découlent.

Grâce aux avancées des nouveaux capteurs et réseaux de capteurs dans l'industrie 4.0, il est possible de surveiller l'état des machines en temps réel. En outre, grâce aux progrès des technologies de détection, il est possible d'analyser les données en temps

réel, de déduire l'état in situ des machines pour la maintenance et la réparation, et d'améliorer encore la productivité des machines afin de réduire les pannes et les dépenses importantes liées à la maintenance et aux temps d'arrêt.

De nombreuses entreprises, notamment dans le secteur minier, utilisent des pompes qui ne sont pas équipées de technologies de surveillance de l'état de santé et de pronostic (Lakal et al., 2022). Ces pompes jouent un rôle essentiel dans le déplacement et le transfert d'eau tout au long des différentes phases des opérations minières, que ce soit pour l'extraction, le transport ou le traitement des minéraux.

Cependant, en raison des conditions de travail extrêmes dans les mines, telles que la présence d'humidité élevée, de poussières abrasives, de vibrations mécaniques importantes, de variations de température, ainsi que l'exposition à des milieux corrosifs, et à la complexité des systèmes de pompage, ces équipements sont exposés à divers risques de défaillance. Les pannes imprévues des pompes peuvent entraîner des interruptions de la production et des pertes de rendement. Afin de réduire ces risques et d'optimiser la gestion des actifs, de nombreuses entreprises minières ont recours à des solutions d'instrumentation avancées. L'utilisation de capteurs intelligents et de systèmes de surveillance permet d'anticiper les besoins de maintenance et d'optimiser les performances des équipements.

Cependant, en raison des conditions de travail extrêmes dans les mines, ainsi que la complexité des systèmes de pompage, ces équipements sont exposés à divers risques de défaillance. Les pannes imprévues des pompes peuvent entraîner des interruptions de la production et des pertes de rendement. Afin de réduire ces risques et d'optimiser la gestion des actifs, de nombreuses entreprises minières ont recours à des solutions d'instrumentation avancées. L'utilisation de capteurs intelligents et de systèmes de surveillance, mais aussi d'anticiper les besoins de maintenance et d'optimiser les performances des équipements.

Cette étude s'inscrit dans une démarche collaborative avec la société Technosub afin de relever les défis pratiques auxquels sont confrontées les entreprises minières dans le domaine de la surveillance des réseaux de pompage. Les performances d'un

capteur multimesures, développé au sein de cette société et permettant de mesurer des paramètres physiques et dynamiques, seront comparées à celles des capteurs témoins afin d'évaluer sa fiabilité. Une étude expérimentale, appuyée par des analyses statistiques, permettra d'assurer cette validation.

1.2.1 Objectif principal

Le présent projet s'inscrit dans une démarche de validation expérimentale de l'instrument TAG multimesures développé par Lynkz (une société partenaire de Technosub), destiné à la surveillance des équipements de pompage. Ce dispositif, capable de mesurer simultanément la pression, la température, l'humidité et les vibrations, représente une solution d'instrumentation compacte et innovante. Afin d'assurer son intégration future dans un environnement industriel, il est essentiel d'évaluer sa fiabilité, sa précision et sa robustesse dans des conditions contrôlées.

Dans le contexte des opérations minières, les solutions d'instrumentation existantes reposent généralement sur des capteurs unitaires, souvent câblés et difficiles à intégrer sur les équipements de pompage. Cette configuration complique l'installation, la maintenance et le suivi simultané de plusieurs paramètres critiques. Afin de répondre à ces limites, Technosub a développé le capteur intelligent TAG, un capteur sans fil et autonome capable de mesurer plusieurs paramètres en temps réel. Cette validation vise à déterminer si l'instrument TAG peut constituer une alternative fiable aux capteurs témoins actuellement utilisés pour l'instrumentation et le suivi des équipements de pompage, en offrant une solution plus intégrée et adaptée aux besoins de surveillance industrielle.

1.2.2 Objectifs spécifiques

Dans le cadre de cette étude, plusieurs objectifs spécifiques ont été établis afin de répondre à la problématique de validation de l'instrument TAG:

1. Évaluer la précision des mesures de l'instrument TAG pour chacun des paramètres : pression, température, humidité et vibrations en les comparant aux valeurs de référence fournies par des capteurs témoins de haute précision. Cette

évaluation permettra de déterminer le degré d'exactitude du capteur et sa capacité à reproduire fidèlement les variations réelles des grandeurs mesurées.

2. Vérifier la stabilité et la répétabilité des mesures effectuées par l'instrument TAG dans le temps, en conditions contrôlées et sous différentes combinaisons de paramètres. Cet objectif vise à confirmer que le capteur maintien des performances constantes et fiables, indépendamment des variations environnementales ou de la durée d'exposition.
3. Analyser la corrélation entre les mesures de l'instrument TAG et celles des capteurs témoins à l'aide d'outils statistiques. Cette analyse permettra de quantifier la similitude entre les données et de vérifier la cohérence des réponses obtenues pour différents scénarios de test.
4. Déterminer les limites de fonctionnement de l'instrument TAG, notamment en ce qui concerne les plages de mesure, la sensibilité, la réponse dynamique et la tolérance aux conditions extrêmes. L'identification de ces limites est essentielle pour définir le domaine d'application optimal de l'instrument et prévenir les situations de mesure non fiables.
5. Confirmer la performance de l'instrument TAG lors d'essais réalisés sur une pompe réelle, en conditions industrielles représentatives. Cet objectif vise à valider expérimentalement le comportement du capteur dans un contexte opérationnel, en observant sa réponse face aux vibrations générées par le fonctionnement de la pompe.

1.3 Originalité de recherche

L'originalité de cette recherche réside dans la validation d'un capteur multimesures compact, l'instrument TAG, capable de mesurer simultanément la pression, la température, l'humidité et les vibrations pour la surveillance des équipements de pompage. Très peu d'études ont exploré cet axe, la plupart des travaux existants se limitant à la validation de capteurs spécialisés pour un seul paramètre. Ce projet se distingue par son approche intégrée, combinant la mesure de plusieurs grandeurs physiques au sein d'un même dispositif et évaluant ses performances à la fois en laboratoire et sur une pompe réelle. L'originalité de l'évaluation repose également sur la mise en place de cinq dispositifs expérimentaux simples, mais efficaces, permettant

une validation progressive et rigoureuse de l'instrument, et ayant conduit à des résultats concluants quant à ses performances. L'utilisation d'analyses statistiques rigoureuses et la mise en contexte industrielle confèrent à cette étude une valeur scientifique et appliquée, contribuant au développement de solutions novatrices en instrumentation et en maintenance prédictive des systèmes de pompage.

1.4 Conclusion

Ce premier chapitre a permis de présenter le contexte général du projet ainsi que la problématique liée au suivi et à l'instrumentation des équipements de pompage dans des environnements industriels exigeants. Les objectifs du travail ont également été définis, visant principalement à évaluer la fiabilité de l'instrument TAG en comparaison avec les capteurs témoins afin de déterminer sa pertinence pour le suivi des paramètres clés des équipements. Cette démarche constitue une étape essentielle pour appuyer la validation expérimentale du capteur et orienter les travaux vers des solutions adaptées aux besoins de l'entreprise.

2. ÉTAT DE L'ART

2.1 Introduction

Dans les opérations de maintenance industrielle, l'objectif principal est de maintenir ou de rétablir un équipement dans un état lui permettant d'assurer correctement sa fonction et de garantir la continuité des opérations. Traditionnellement, la gestion des équipements reposait principalement sur une approche réactive, consistant à intervenir après l'apparition d'une panne. Bien que cette stratégie permette de corriger rapidement les défaillances, elle entraîne souvent des arrêts imprévus et des coûts de réparation élevés.

Face à ces limites, les pratiques de maintenance ont progressivement évolué vers des approches plus structurées et anticipatives. La maintenance préventive, basée sur des interventions planifiées selon des intervalles de temps ou des conditions d'utilisation, a constitué une première amélioration en réduisant la fréquence des pannes inattendues. Plus récemment, l'intégration de systèmes de surveillance et de capteurs intelligents a favorisé l'émergence de la maintenance conditionnelle et prédictive, qui s'appuie sur l'analyse continue des données mesurées pour détecter précocement les anomalies et optimiser les décisions d'intervention. Cette transition vers une maintenance proactive permet non seulement d'améliorer la fiabilité des équipements, mais également de réduire les coûts d'exploitation et d'augmenter la durée de vie des équipements.

2.2 Systèmes de pompage dans le secteur minier

Les mines ont besoin d'eau. Dans le même temps, comme de nombreuses zones de travaux miniers se trouvent sous la nappe phréatique, l'élimination de l'eau est un défi majeur. Les pompes sont donc l'une des machines les plus utilisées dans les mines. Un exemple d'une station de pompage d'eau dans une mine est présenté dans la Figure 1.



Figure 1 : Station de pompage dans une mine

Source : (*Secteur - Technosub*, s. d.)

L'action sur l'eau de la mine peut être envisagée de deux manières différentes :

- Élimination de l'eau de la zone minière (assèchement de la mine) afin de permettre l'accès aux ressources minières ;
- À l'inverse, le traitement des minéraux nécessite l'ajout d'eau à différents stades, qui peut être soit de l'eau récupérée à l'intérieur de la zone minière, soit, si elle n'est pas suffisamment disponible, importée de sources externes telles que l'eau de ville, de rivière ou de mer.

2.2.1 Anomalies des pompes

En raison de la structure et du principe de fonctionnement des pompes, en cas de vieillissement de l'équipement ou de fluide anormal, certaines défaillances mécaniques et fluidiques peuvent se produire. Le Tableau 1 présente ces formes de défaillance.

Tableau 1 : Types de défauts qui se produisent souvent lors du fonctionnement des pompes

Défauts courants dans le fonctionnement des pompes	**Défaillance mécanique**	Défaut d'équilibre
		Défaut d'alignement
		Défaut de roulement
	Défaillance fluidique	Cavitation
		Coups de bélier

- Défaut d'équilibre

En raison d'erreurs de traitement ou d'assemblage, d'un problème de répartition de la qualité des matériaux, ou de défauts d'encrassements, les pièces rotatives de la pompe se trouvent avec des masses excentriques ou déséquilibrées, donnant lieu à des forces déséquilibrées (Wang et al., 2021). Lorsqu'une force déséquilibrée est stimulée, la réponse vibratoire du système évolue. Le déséquilibre entraîne principalement un changement de vibration à la fréquence de puissance, et l'amplitude de la vibration change avec la vitesse (Chen et al., 2022).

- Défaut d'alignement

Un déplacement ou une déviation angulaire de l'axe de l'arbre aux deux extrémités de l'accouplement de la pompe entraîne un désalignement et une augmentation des vibrations (Figure 2).

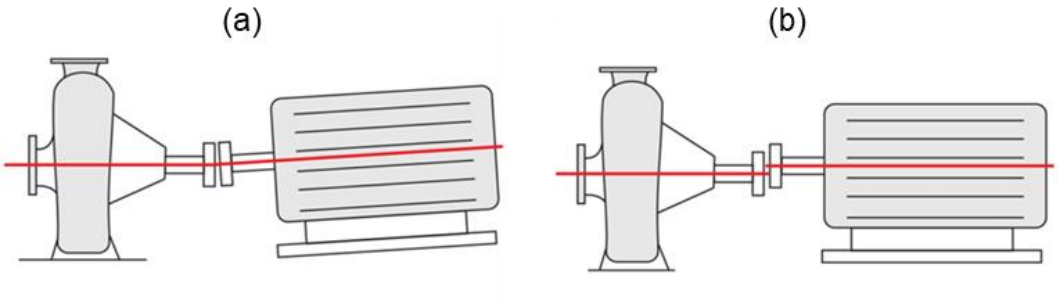


Figure 2 : Défaut de désalignement dans une pompe : (a) Désalignement angulaire. (b) Désalignement parallèle

Source: (Alignment of Pumps, s. d.)

En termes de caractéristiques du spectre de fréquence, cela entraîne souvent des changements dans l'amplitude des vibrations à deux fois la fréquence de fonctionnement (Hu et al., 2021). En fonction de la cause du désalignement, de l'écart angulaire ou de l'écart de déplacement, qui provoque des changements de vibration dans la direction axiale, radiale ou dans deux directions à la fois, il peut être surveillé et évalué par les données des deux directions axiales du capteur à trois axes.

- Défaut de roulement

Les roulements sont parmi les composants les plus sollicités des machines et représentent une source de panne fréquente. Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage), comme représenté dans la Figure 3.

Dans la plupart des cas, la dégradation se traduit par un écaillage d'une des pistes ou d'un élément roulant du roulement, produisant un choc à chaque passage (Rapur & Tiwari, 2019). Les roulements défectueux génèrent des vibrations de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce du roulement. Ils correspondent notamment à la rotation des billes, des rouleaux ou de la cage et au passage des billes sur les bagues. Au fur et à mesure que l'usure se poursuit et s'intensifie, elle s'accompagne souvent d'une augmentation de la température.



Figure 3 : Défaut de roulement

Source : (Jamadar et al., 2019)

- Cavitation

La fonction de toutes les pompes est de produire une basse pression à l'entrée et de permettre à la pression atmosphérique (ou du système) de pousser le fluide dans la pompe. Ce processus expose toutes les pompes à un phénomène appelé cavitation. Lorsque la pression locale diminue rapidement en dessous de la pression de vapeur du liquide, on observe la cavitation, c'est-à-dire la formation de cavités de vapeur (bulles) à l'intérieur du liquide. Cela forme une bulle de vapeur à l'intérieur du liquide qui dure généralement peu de temps avant de retomber dans le liquide.

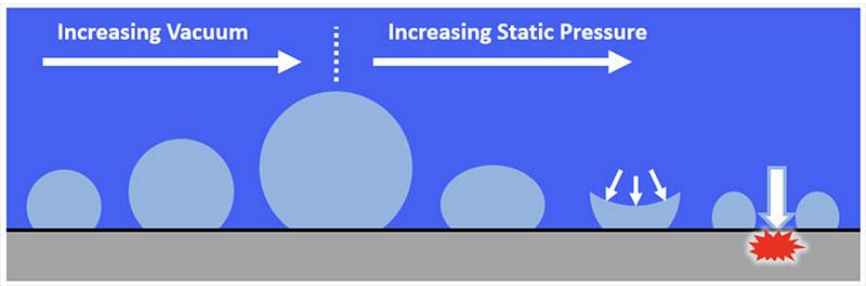


Figure 4 : Cycle de vie d'une bulle de cavitation dans une pompe

Source : (Kaempf, 2022)

L’effondrement est violent, produisant un fort bruit d’éclatement et endommageant souvent les surfaces avoisinantes (Figure 4). Même les métaux forts seront piqués lorsqu’ils sont soumis au jet puissant et localisé résultant de l’implosion de la bulle.

La cavitation peut être repérée par un bruit fort et des vibrations. Les bulles de vapeur dans l'eau explosent bruyamment, ce qui entraîne un impact mécanique lourd qui peut entraîner la détérioration de la pompe si le phénomène persiste. La cavitation provoque des dommages causés par la corrosion sur la roue et le corps de pompe. Cela peut considérablement affecter la performance de la pompe (Figure 5).

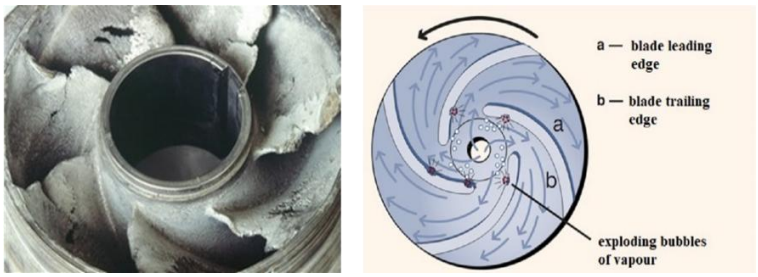


Figure 5 : Défaut de cavitation dans la roue d'une pompe centrifuge

Source : (Lomakin & Bibik, 2019)

- Coups de bélier

En raison de l'ouverture et de l'arrêt soudains de la pompe ou du changement soudain de la vanne, le phénomène de choc causé par le changement soudain du débit dans le corps de la pompe et la canalisation environnante est appelé coup de bélier (Water Hammer) (Kan et al., 2021). Un coup de bélier léger est souvent accompagné d'une vibration et d'un bruit faibles et brefs. Un coup de bélier grave peut rendre la pression dans le corps de la pompe ou dans la canalisation des centaines de fois supérieure à la normale, ce qui peut endommager les composants de la pompe ou provoquer l'éclatement de la canalisation, etc.

2.2.2 Technologies de détection

L'objectif clé est de prévenir les défaillances en détectant les anomalies dès qu'elles se produisent. Les capteurs surveillent en permanence les paramètres critiques tels

que la pression, le débit, les vibrations et la température, signalant toute déviation par rapport aux normes préétablies.

Dans le cadre de la maintenance conditionnelle (MC), divers signaux peuvent être employés pour surveiller l'état des machines. Les signaux fréquemment utilisés sont catégorisés en tant que signaux primaires, tandis que ceux qui pourraient être utilisés à des fins de surveillance sont classés comme signaux potentiels (Figure 6).

Les signaux primaires sont classés en trois groupes : structurels, fluides et moteurs.

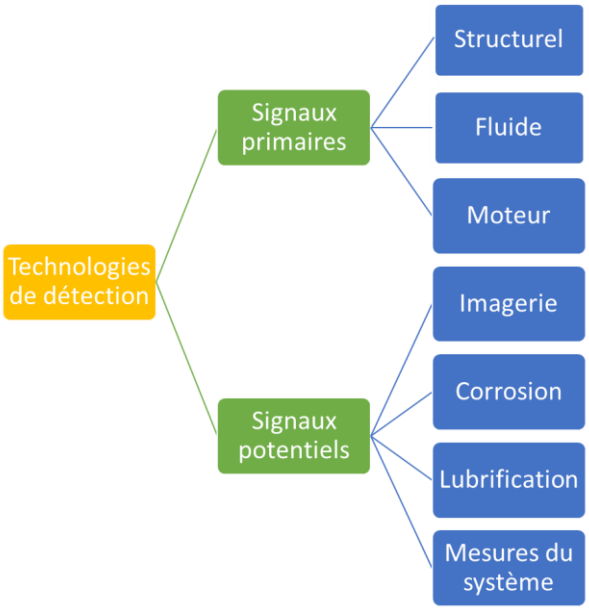


Figure 6 : Technologies de détection pour la maintenance conditionnelle

Source : (Lakal et al., 2022)

Les signaux structurels comprennent la surveillance des vibrations, des contraintes, des déformations et des forces dans la machine et ses composants. Les conditions de fonctionnement normales ou défectueuses des machines sont étroitement liées aux niveaux de ces signaux structurels (Lakal et al., 2022). Lorsque les machines fonctionnent normalement, les signaux restent dans la plage normale, alors qu'en cas de défaillance, les valeurs de ces signaux dépassent la plage normale. En outre, dans les signaux structurels, différents paramètres sont contrôlés, notamment les

vibrations, les émissions acoustiques, le courant, la vitesse, l'usure et l'état du lubrifiant. Parmi tous ces signaux, la vibration est le signal le plus utilisé pour la MC. La surveillance des vibrations est effectuée en termes d'accélération, de vitesse ou de déplacement, c'est-à-dire de position.

De même, les signaux de fluides peuvent être surveillés en termes de température locale, de pression, de débit massique, de débit volumique et de niveau d'humidité. Parmi ces signaux de fluide, la température est l'un des signaux importants et largement utilisés pour la MC (Reges et al., 2021).

Comme le montre le Tableau 2, bien que la vibration soit le signal le plus utilisé pour la MC, d'autres signaux comme le MCSA (Motor Current Signature Analyses) et les signaux acoustiques sont également largement utilisés pour la détection des défauts.

Tableau 2 : Résumé des articles sur la CM des pompes en fonction du domaine d'intérêt et du signal utilisé

Domaine d'application	Signal utilisé	Référence
Cavitation de la pompe	Vibration	(A. R. Al-Obaidi & Towsyfyan, 2019)
CM des pompes centrifuges	Vibration, MCSA, MBVI	(Popaleny & Peton, 2019)
Cavitation de la pompe	Acoustique et vibration	(A. Al-Obaidi, 2020)
Corrélation entre le bruit de la pompe et son efficacité	Acoustique	(Liu et al., 2021)
Détection des défauts des pompes submersibles	Vibration, température, pression	(Reges et al., 2021)

Source : (Lakal et al., 2022)

Les pompes sont surveillées pour vérifier leurs états de fonctionnement à l'aide de signaux capturés à l'endroit approprié sur la pompe ou dans l'environnement. Le Tableau 3 présente les différents signaux utilisés, l'emplacement des capteurs correspondants et les références des études respectives.

Tableau 3 : Divers signaux acquis pour la pompe et leur emplacement sur l'ensemble motopompe (cas de MC)

Paramètre/ signal	Emplacement du capteur	Référence
Vibration	Extrémités libres et motrices de la pompe	(Lin et al., 2017)
	Corps de la pompe	(Ranjbar et al., 2020)
	Roulements de la pompe	(Stan et al., 2018)
	Roulements du moteur et de la pompe	(Jones et al., 2014)
Température	Extrémité libre et motrice du moteur	(Lin et al., 2017)
	Enroulements du moteur et huile lubrifiante	(Jones et al., 2014)
Débit	Sortie	(Li et al., 2018)
Pression	Huile de lubrification	(Jones et al., 2014)
Déformation	Roulements du moteur	(Jones et al., 2014)

Source : adapté de (Lakal et al., 2022)

Comme les signaux primaires, les avancées technologiques ont permis d'ouvrir la voie à de nouveaux signaux MC potentiels. Grâce au développement des technologies d'imagerie et à l'aide des techniques de traitement d'images, l'imagerie peut être utilisée comme signal potentiel. Elle peut être utilisée pour surveiller la température à l'aide de la cartographie thermique de la machine et pour surveiller la rugosité de surface. La corrosion des composants de la machine peut servir comme signal potentiel pour surveiller l'état structurel des machines et elle peut être contrôlée par l'impédance électrique. De même, le lubrifiant des machines peut servir pour vérifier l'état de la machine et son usure. Parfois, l'état général du système est contrôlé par des signaux au niveau du système, comme le niveau de bruit de la machine; en cas de défaillance, les niveaux de bruit dépassent le niveau normal (Lakal et al., 2022).

2.3 Traitement des signaux et extraction de caractéristiques pour la surveillance des pompes

Les signaux mesurés sur les systèmes de pompage nécessitent un traitement adapté afin d'extraire des informations pertinentes pour la détection et le diagnostic des défauts.

2.3.1 Méthodes de traitement du signal pour le diagnostic des machines tournantes

La littérature propose une grande variété de méthodes de traitement du signal et d'extraction de caractéristiques, dont le choix dépend à la fois de la nature du signal, des défauts recherchés et des contraintes liées à l'application industrielle.

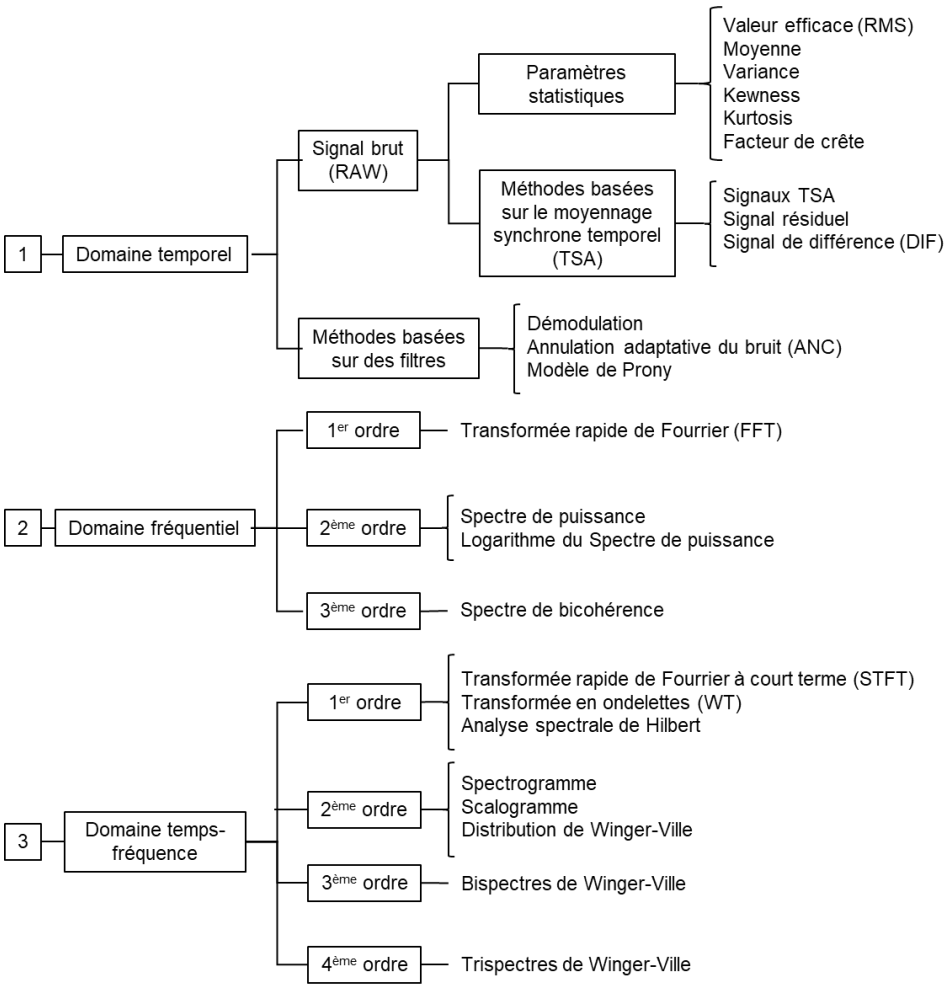


Figure 7 : Classification des principales méthodes de traitement du signal et d'extraction de caractéristiques

Source : adapté de (Tiboni et al., 2022)

La Figure 7 présente une classification des méthodes de traitement du signal les plus couramment utilisées pour la surveillance des machines tournantes. Ces approches peuvent être regroupées en trois grandes catégories : les méthodes du domaine temporel, du domaine fréquentiel et du domaine temps-fréquence.

Les méthodes du domaine temporel reposent sur l'analyse directe du signal mesuré en fonction du temps. Elles consistent principalement à calculer des indicateurs statistiques tels que la valeur efficace (RMS), l'écart type, le facteur de crête ou le kurtosis. Ces indicateurs permettent de caractériser l'intensité et la variabilité des vibrations et sont largement utilisés en milieu industriel en raison de leur simplicité de mise en œuvre et de leur faible coût de calcul (A. Al-Obaidi, 2020).

Les approches du domaine fréquentiel, basées notamment sur la transformée de Fourier (FFT), permettent d'analyser la répartition énergétique du signal en fréquence. Elles sont particulièrement adaptées à l'identification de défauts mécaniques présentant des signatures fréquentielles spécifiques, comme les défauts de roulements ou de désalignement (He, G, 2017).

Enfin, les méthodes du domaine temps-fréquence, telles que la transformée en ondelettes ou la transformée de Hilbert-Huang, offrent une représentation plus fine des signaux non stationnaires en combinant les informations temporelles et fréquentielles (Mousmoulis et al., 2021). Bien que très performantes pour l'analyse de phénomènes transitoires, leur complexité de calcul limite souvent leur intégration dans des systèmes de mesure embarqués à ressources contraintes.

Dans un contexte industriel, le choix d'une méthode de traitement du signal ne peut être dissocié des indicateurs extraits et des défauts mécaniques ciblés. Au-delà de la classification des approches de traitement, il est donc essentiel d'établir un lien clair entre les signaux analysés, les indicateurs calculés et les anomalies qu'ils permettent de détecter.

2.3.2 Indicateurs de diagnostic et défauts mécaniques associés

L'analyse des signaux mesurés sur les systèmes de pompage permet d'extraire des indicateurs caractéristiques dont l'évolution est directement liée à la présence ou au développement de défauts mécaniques. Selon le type de défaut recherché et le domaine de traitement considéré, certains indicateurs se révèlent plus pertinents que d'autres pour le diagnostic.

Afin de synthétiser les informations issues de la littérature, le Tableau 4 présente des exemples de signaux analysés, d'indicateurs extraits et des défauts mécaniques associés couramment étudiés dans le cadre de la surveillance des pompes et des machines tournantes.

Tableau 4 : Exemples de signaux analysés, indicateurs extraits et défauts mécaniques associés

Signal mesuré	Domaine d'analyse	Indicateur principal	Défauts associés	Références
Accélération vibratoire	Temporel	RMS, écart type (σ)	Déséquilibre, désalignement	(Tandon & Choudhury, 1999)
Accélération vibratoire	Fréquentiel	Amplitudes spectrales (FFT)	Défauts de roulements, cavitation	(Jardine et al., 2006) (Buono et al., 2017)
Pression	Temporel	Moyenne, fluctuations	Cavitation, instabilité hydraulique	(Lakal et al., 2022)
Température	Temporel	Évolution temporelle	Échauffement, frottements	(Jardine et al., 2006)

Au-delà des synthèses présentées sous forme de tableaux, plusieurs travaux de la littérature illustrent clairement l'impact des défauts sur la forme des signaux mesurés. En particulier, la cavitation dans les pompes centrifuges induit des modifications significatives des signaux vibratoires, observables aussi bien dans le domaine temporel que fréquentiel.

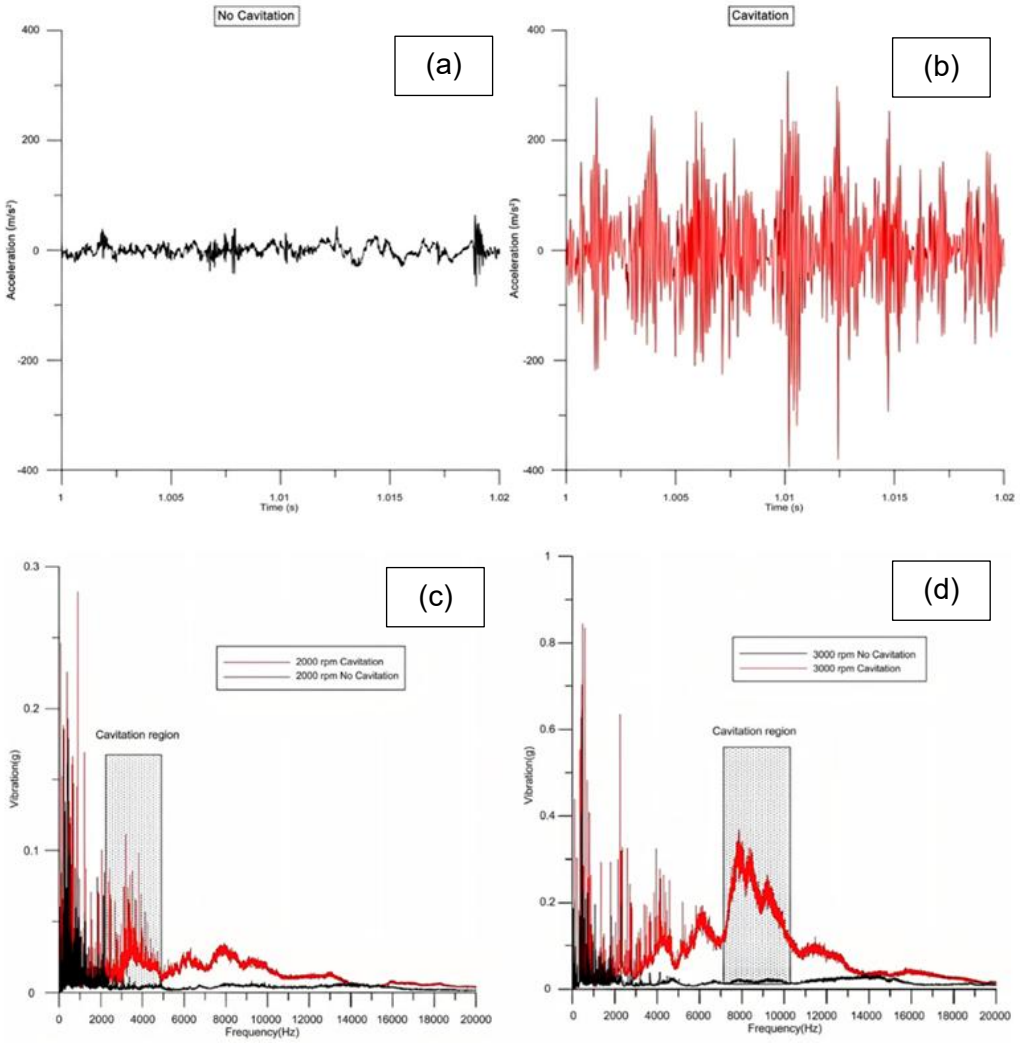


Figure 8 : Comparaison des signaux vibratoires en conditions de cavitation et de non-cavitation : (a) et (b) Domaine temporel, (c) et (d) Domaine fréquentiel

Source : (Buono et al., 2017)

La Figure 8 illustre un exemple de signaux de vibration analysés dans les domaines du temps (Figure 8, a-b) et de la fréquence (Figure 8, c-d), comparant un état de fonctionnement avec cavitation et sans cavitation. Les résultats montrent des différences marquées entre les deux états, tant au niveau de l'amplitude du signal temporel que de la distribution spectrale de l'énergie. En présence de cavitation, le signal vibratoire présente une augmentation de la variabilité ainsi qu'un enrichissement du contenu fréquentiel, traduisant un comportement plus instable du système.

Cette illustration met en évidence la capacité des signaux vibratoires, et des indicateurs qui en sont extraits, à discriminer efficacement différents états de fonctionnement d'une pompe, confirmant leur pertinence pour la détection précoce des défauts hydrauliques.

Cette synthèse met en évidence que les indicateurs du domaine temporel, tels que la valeur efficace (RMS) ou l'écart type, sont largement utilisés en pratique industrielle. Leur adoption s'explique par leur simplicité de calcul, leur robustesse et leur compatibilité avec des systèmes de mesure embarqués, ce qui justifie leur utilisation dans le cadre du présent travail.

2.4 Surveillance de l'état des pompes

Plusieurs travaux ont porté sur le développement de systèmes de surveillance en temps réel pour les pompes opérant dans des environnements industriels contraints.

(Ruirong & Gan, 2021) ont proposé un système de surveillance en temps réel destiné aux pompes électriques submersibles opérant dans des puits de pétrole, avec pour objectif de superviser à distance l'état de fonctionnement de ces équipements. Leur étude repose sur l'utilisation de cartes à microprocesseur associées à différents capteurs, permettant la mesure de paramètres physiques tels que les vibrations, la température, la pression et le débit. Les auteurs ont ainsi développé une architecture complète de communication et de surveillance des paramètres de fonctionnement en temps réel, adaptée aux sites isolés.

Toutefois, bien que ce système permette une acquisition continue des données, les informations collectées ne sont pas exploitées pour l'évaluation de l'état de santé ni pour la prédiction du comportement futur de la pompe. Cette limitation met en évidence l'intérêt de travaux complémentaires visant à intégrer des méthodes d'analyse et d'interprétation des données pour une surveillance conditionnelle plus avancée.

(Ranjbar et al., 2020) ont proposé un système de surveillance de l'état des pompes à huile industrielles basé sur les données de vibration. Pour extraire les caractéristiques des données de vibration, ils ont utilisé la méthode de la transformée en ondelettes avec un algorithme génétique. Ils ont utilisé les caractéristiques pour identifier cinq types de défauts tels que la distorsion de la carcasse, la cavitation, le relâchement, le désalignement et le déséquilibre de la masse à l'aide d'un réseau neuronal à perceptron multicouche. Ils ont utilisé les données du journal de maintenance d'une pompe à huile industrielle pour entraîner et valider le modèle. Leur étude a utilisé les capteurs de vibration disponibles avec la pompe pour détecter les données de vibration et s'est concentrée davantage sur les étapes d'extraction des caractéristiques et de classification des défauts.

(B. Myhre et al., s. d.) ont présenté une étude visant à déterminer si la surveillance des vibrations sans fil peut être utilisée pour permettre une maintenance basée sur l'état des machines tournantes dans les industries de l'eau et des eaux usées. Une solution de surveillance sans fil a été déployée sur plusieurs pompes d'eau opérationnelle. Les capteurs de vibrations sans fil, du type WiMon 100 d'ABB, ont été installés sur les moteurs et les pompes, communiquant sans fil. L'architecture du système est présentée dans la Figure 9.

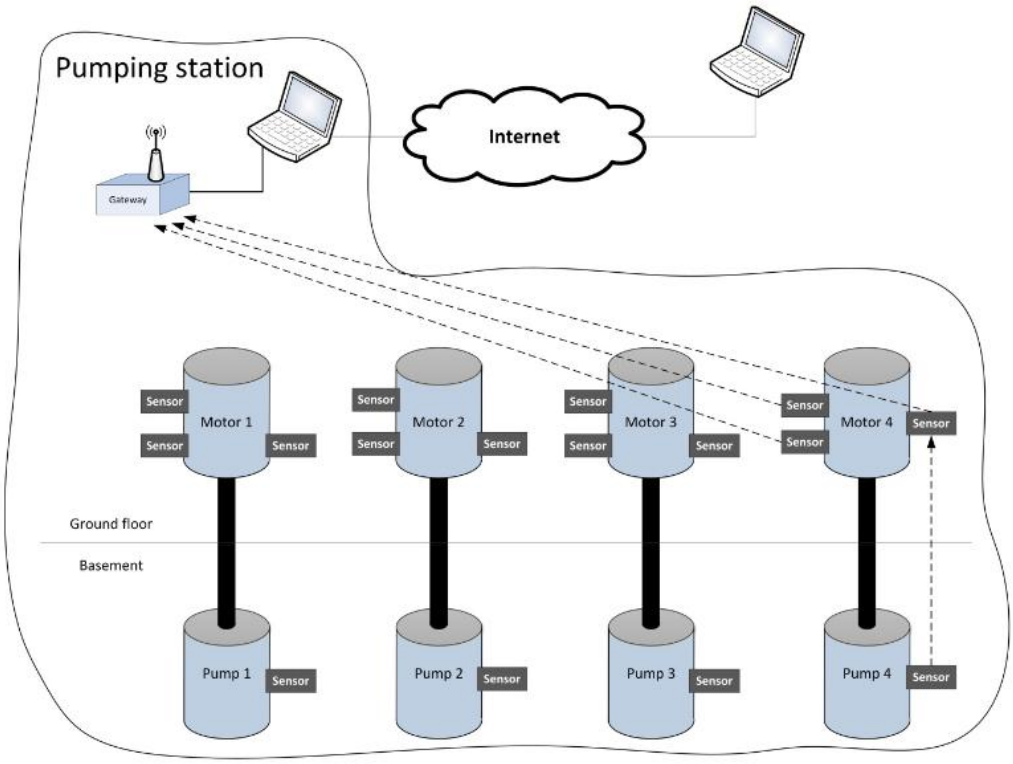


Figure 9 : Architecture du système

Source : (B. Myhre et al., s. d.)

Les données collectées sur une période de trois mois ont été analysées. Un exemple de résultat montre des pics d'énergie répétitifs à une fréquence correspondant à un défaut dans la bague extérieure du roulement du moteur 2 (Figure 10), démontrant le potentiel de la surveillance des vibrations pour détecter les défauts.

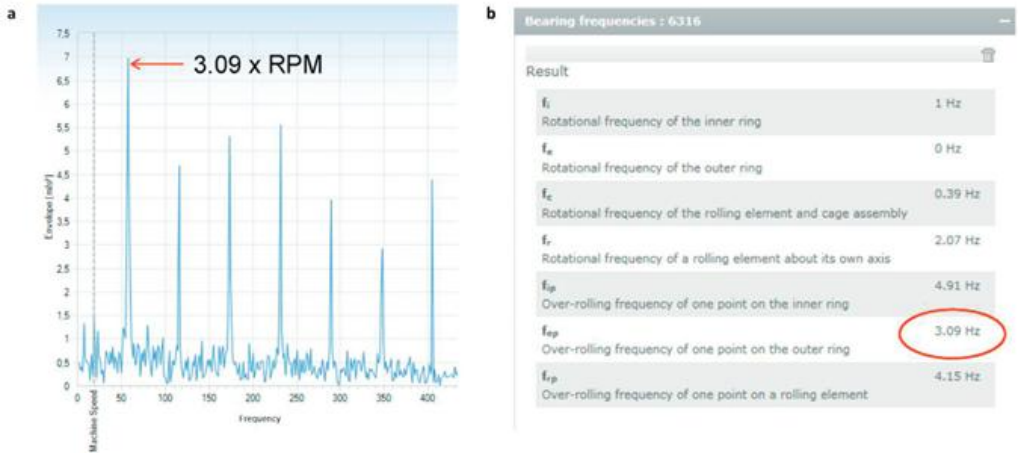


Figure 10: (a) Mesures de vibrations (enveloppe) pour le moteur 2 ; (b) Fréquences des roulements pour le moteur 2

Source : (B. Myhre et al., s. d.)

2.5 Caractéristiques métrologiques des capteurs de mesure

Au-delà du choix des signaux et des méthodes de traitement, la qualité des mesures acquises dépend directement des performances métrologiques des capteurs utilisés. Dans le cadre de la surveillance conditionnelle des systèmes de pompage, plusieurs critères sont couramment employés pour évaluer la fiabilité et la pertinence des capteurs, notamment l'exactitude, la linéarité, la répétabilité et la résolution, qui seront définies plus en détail ci-après. Ces paramètres constituent des éléments essentiels pour comparer différents capteurs et valider leur aptitude à une utilisation industrielle.

La fiabilité d'un capteur est la probabilité que celui-ci remplisse ses fonctions de manière adéquate pendant une période définie et dans des conditions de fonctionnement spécifiées (A. Bsata, 1994). Les utilisateurs ont souvent tendance à choisir un capteur fiable qui résiste aux conditions bien supérieures à celles imposées par le milieu de fonctionnement (Mouapi et al., 2020).

Dans le cadre de ce projet, notre objectif est d'évaluer le niveau de performance de l'instrument TAG afin de mieux comprendre ses qualités et ses défauts. La maîtrise des imperfections d'un instrument de mesure est indispensable pour en obtenir le meilleur rendement.

En étude des capteurs, il est possible d'évaluer plusieurs performances métrologiques; celles-ci sont définies dans plusieurs livres d'instrumentations industrielles (G. Asch and B. Poussery, 2017) (A. Bsata, 1994). Dans cette étude, nous ne considérons que les éléments les plus importants pour les exigences industrielles.

2.5.1 Linéarité

Quelle que soit la fonction à laquelle est dédié un capteur, il est nécessaire pour une exploitation aisée des données mesurées, de pouvoir vérifier la linéarité du capteur (Mouapi et al., 2020).

La linéarité d'un capteur désigne sa capacité à produire une réponse proportionnelle à la variation de la grandeur qu'il mesure. En d'autres termes, un capteur est considéré comme linéaire si la sortie du capteur est proportionnelle à l'entrée sur toute la plage de mesure. Cette propriété est importante, car elle permet d’éviter un post-traitement des données et de prédire avec précision les réponses du capteur à différentes conditions d'entrée.

La linéarité est une caractéristique qui détermine la permanence de la sensibilité sur toute la plage de mesure. C'est dans cette zone que la sensibilité du capteur ne dépend pas de la valeur du mesurande. On peut définir cette zone en utilisant la définition d'une droite obtenue, en s'assurant qu'elle correspond le mieux aux caractéristiques réelles du capteur, par exemple en utilisant la méthode des moindres carrés comme représenté dans la Figure 11 où s et e sont respectivement l’entrée et la sortie du capteur.

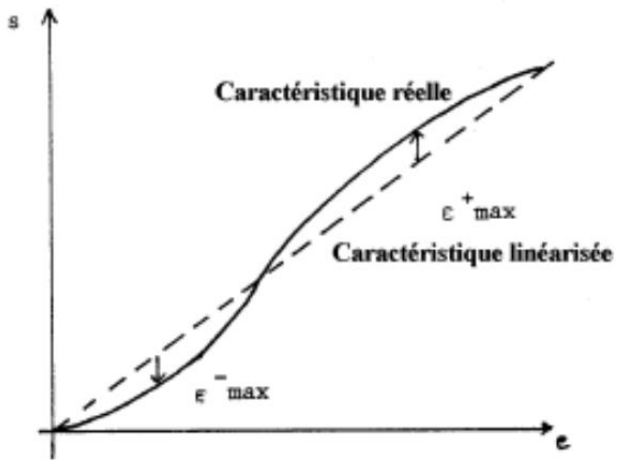


Figure 11 : Exemple de linéarisation de caractéristiques

Source : (Yacouba Sanogo, 2012)

En se basant sur la courbe d'étalonnage, on peut définir la sensibilité du capteur de la manière suivante :

$$Sensibilité = \frac{\Delta(Grandeur\ de\ sortie)}{\Delta(mesurande)} | pt\ d'étude \qquad (1)$$

En se basant sur la courbe d'étalonnage du capteur, on établit également la meilleure droite reliant l'entrée à la sortie du capteur en utilisant l'équation suivante (Mouapi et al., 2020) :

$$y = Mx + b \qquad (2)$$

En utilisant y comme sortie du capteur et x comme mesurande, on peut déterminer les constantes M et b en utilisant les équations suivantes (Montgomery & Runger, 2011) :

$$M = \frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \qquad (3)$$

$$b = \frac{\sum y_i}{n} - M\frac{\sum x_i}{n} \quad (4)$$

Avec n est le nombre de points d'étalonnage.

2.5.2 Stabilité

La stabilité d'un capteur est une caractéristique essentielle qui décrit sa capacité à maintenir des performances constantes et précises sur une période prolongée. Un capteur stable doit être capable de fournir des mesures fiables et reproductibles sans dérive significative, malgré les variations des conditions environnementales.

Pour évaluer la stabilité d'un capteur, on effectue généralement des essais sur une longue période, en surveillant les mesures du capteur dans des conditions de fonctionnement constantes (Mouapi et al., 2020). Chaque changement dans les lectures du capteur est analysé pour détecter des tendances de dérive ou des changements soudains de performance. Ces variations sont souvent exprimées en termes de pourcentage de la pleine échelle par unité de temps.

2.5.3 Répétabilité

Lors de ces tests, on évalue l'incertitude liée à la répétition des mesures dans des conditions incluant les mêmes dispositifs, opérateurs et environnements. Pour y parvenir, il est indispensable de respecter les recommandations des normes ISO 5725-1 : 2023 (I. O. f. Standardization, 2023) et ISO 5725-2 : 2019 (I. O. f. Standardization, 2019).

La Figure 12 montre la fidélité, la précision et la justesse d'un capteur. Un capteur précis garantit à la fois une fidélité et une justesse optimales. Afin d'atteindre cet objectif, on utilise la fonction densité de probabilité d'une valeur x du mesurande, en suivant la loi de Gauss (Montgomery & Runger, 2011) définie par :

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

Où $\bar{x}$ et σ représentent respectivement la valeur moyenne et l'écart type obtenus sur un ensemble de n mesures, définis par les équations suivantes :

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7)$$

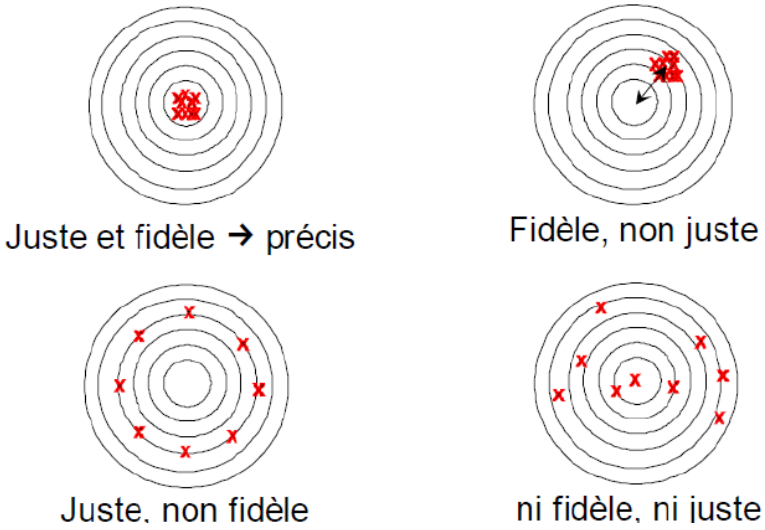


Figure 12 : Caractéristiques statistiques d'un capteur

Source : (*Acquérir l'information - la mesure par un capteur*, s. d.)

2.5.4 Réversibilité

La réversibilité d'un capteur se réfère à sa capacité à retrouver son état initial après l'élimination d'un stimulus appliqué(Mouapi et al., 2020) (Figure 13). Cela implique que le capteur peut fournir des mesures précises et cohérentes, même en présence de variations de la grandeur mesurée. Assurer une réversibilité adéquate est essentiel pour assurer la fiabilité des mesures dans des conditions de fonctionnement variées.

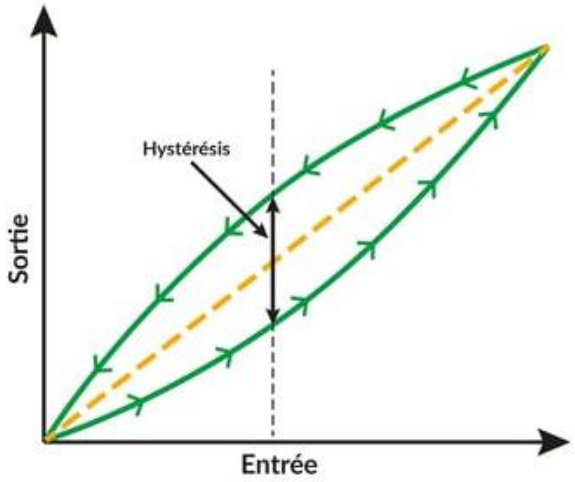


Figure 13 : Courbe d'hystérésis

Source : (Laurila, s. d.)

2.6 Choix des paramètres de surveillance

Le choix des paramètres surveillés (température, pression, humidité et vibration) repose sur leur importance reconnue dans la surveillance de l'état de santé des équipements de pompage. En effet, les vibrations constituent l'un des indicateurs les plus utilisés pour la détection précoce des défauts mécaniques (Lakal et al., 2022), tels que le désalignement, le déséquilibre ou l'usure des roulements, car elles reflètent directement le comportement dynamique de la pompe en fonctionnement (*ISO 20816-3*, s. d.). La température représente également un paramètre clé, puisqu'une élévation anormale peut indiquer une surcharge, un problème de lubrification ou une dégradation progressive des composants mécaniques. De plus, la pression est étroitement liée aux performances hydrauliques de la pompe; des variations inhabituelles peuvent signaler des problèmes tels que la cavitation, l'obstruction des conduites ou des dysfonctionnements internes. Enfin, l'humidité constitue un facteur environnemental important, particulièrement dans les milieux industriels sévères, car elle peut accélérer la corrosion, affecter les composants électroniques et influencer la fiabilité globale du système de mesure. Ainsi, le suivi combiné de ces paramètres permet d'obtenir une vision globale de l'état de fonctionnement des pompes et

constitue une base pertinente pour la mise en œuvre de stratégies de maintenance conditionnelle et prédictive.

2.7 Conclusion

Ces critères de performance métrologique constituent le cadre de référence utilisé dans ce travail pour la validation expérimentale de l'instrument TAG. Le chapitre suivant présente le matériel utilisé ainsi que la méthodologie expérimentale mise en œuvre afin d'évaluer ces paramètres dans des conditions contrôlées et représentatives.

3. MATÉRIELS ET MÉTHODOLOGIE

3.1 Introduction

Dans le cadre de ce projet, nous nous concentrons sur l'évaluation des performances de l'instrument TAG pour mesurer plusieurs paramètres environnementaux essentiels dans des conditions de fonctionnement variées, y compris la pression, la température, l'humidité et les vibrations. Ce capteur, destiné à des applications industrielles de surveillance, est comparé à des capteurs témoins pour valider sa précision et sa fiabilité.

Nous aborderons les protocoles expérimentaux utilisés, les équipements de référence, ainsi que les méthodes d'analyse des données recueillies. L'objectif est de montrer que l'instrument TAG est capable de fournir des mesures précises et cohérentes dans les diverses conditions auxquelles il est susceptible d'être exposé.

3.2 Présentation de l'instrument TAG

Les capteurs sans fil sont de plus en plus préférés aux capteurs filaires, notamment en raison de leur facilité de déploiement, de leur flexibilité et de leur intégration dans des environnements complexes (Puccinelli & Haenggi, 2005). L'Internet des Objets (Internet of Things - IoT) constitue l'un des principaux domaines d'applications des capteurs sans fil (Ponnimbaduge Perera et al., 2018). L'IoT repose sur l'interconnexion d'objets dits intelligents, capables de comprendre et de réagir à leur environnement, de collecter des données via des capteurs intégrés, et de les transmettre à des systèmes de traitement.

L'instrument TAG, présenté dans la Figure 14, est un dispositif multimesures sans fil développé dans le but de répondre aux besoins de surveillance des systèmes de pompage opérant dans des environnements industriels contraignants, notamment dans le secteur minier. Ce capteur a été conçu pour fournir une solution d'instrumentation compacte et intégrée, capable de regrouper la mesure de plusieurs paramètres physiques critiques au sein d'un seul dispositif.

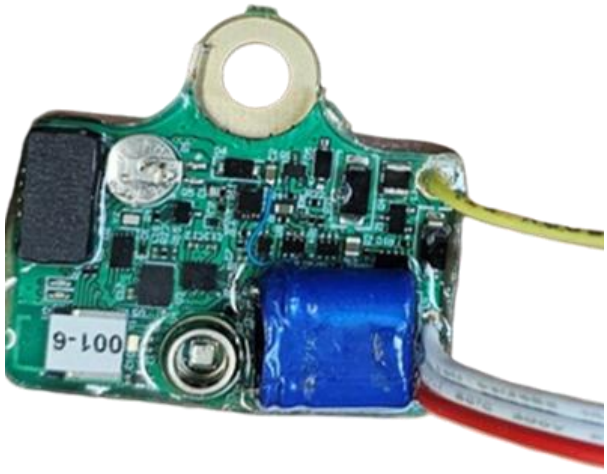


Figure 14 : Instrument TAG

L'objectif principal de l'instrument TAG est d'assurer le suivi continu de l'état de fonctionnement des équipements de pompage en mesurant simultanément des grandeurs environnementales et dynamiques représentatives de leur comportement. Ces mesures constituent des indicateurs essentiels pour l'évaluation des performances, la détection précoce des défaillances et la mise en œuvre de stratégies de maintenance conditionnelle et prédictive.

L'instrument TAG a été développé comme un prototype interne, développé et utilisé uniquement à l'intérieur de Technosub, avec une architecture pensée pour une intégration future dans des pompes submersibles, où les contraintes liées à l'encombrement, à l'étanchéité, à l'autonomie énergétique et à la robustesse sont particulièrement élevées. Son caractère sans fil permet de réduire les contraintes d'installation associées aux systèmes de capteurs filaires traditionnels, tout en facilitant le déploiement dans des environnements difficiles d'accès.

Dans le cadre de ce travail, l'instrument TAG fait l'objet d'une validation expérimentale approfondie visant à évaluer sa fiabilité, sa précision et sa stabilité de mesure. Cette validation repose sur une comparaison systématique avec des capteurs témoins de référence, dans des conditions contrôlées reproduisant les sollicitations rencontrées lors du fonctionnement réel des systèmes de pompage.

3.3 Architecture matérielle de l'instrument TAG

L'architecture matérielle de l'instrument TAG repose sur l'intégration de plusieurs capteurs embarqués permettant la mesure simultanée de paramètres physiques essentiels à la surveillance des systèmes de pompage. Ces capteurs ont été sélectionnés afin de couvrir à la fois les paramètres environnementaux et dynamiques influençant directement le comportement et la fiabilité des équipements. Le Tableau 5 présente l'ensemble des capteurs intégrés au sein du dispositif TAG ainsi que les grandeurs mesurées.

Tableau 5 : Différents capteurs intégrés dans l'instrument TAG

Capteur	Mesure	Plages de mesures	Image
BMI270 de BOSCH	Accéléromètre et gyroscope (3 axes)	(A): ± 2 g ~ ±16 g (G): ± 125 °/s ~ ± 2000 °/s	
ILPS22QSTR	Pression	260 ~ 4060 mbar	
SHT30-DIS-B2.5KS	Température et humidité	(T) : -40°C ~ 125°C (H) : 0 ~ 100% RH	

Ce capteur multimesures sera positionné dans la zone des câbles d'alimentation électrique des pompes submersibles de type Tsurimi (Figure 15).

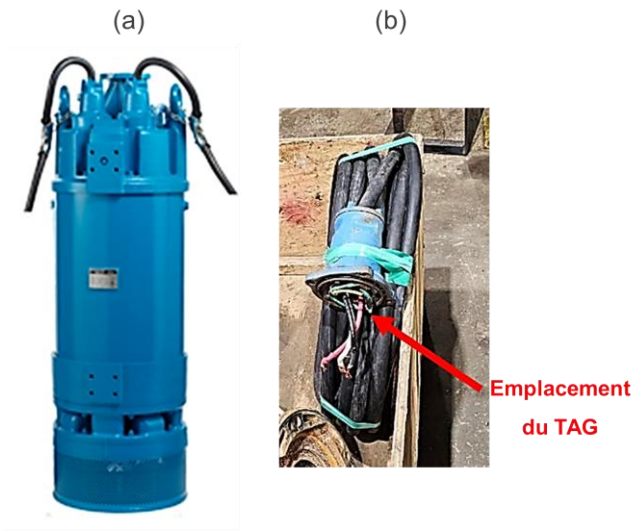


Figure 15 : (a) Pompe submersible Tsurumi. (b) Emplacement de l'instrument TAG dans les pompes Tsurumi

L'instrument TAG propose deux méthodes principales de connexion qui permettent de configurer le capteur et d'acquérir les données mesurées : la connexion via Bluetooth et la connexion filaire en série.

Une fois connecté, l'instrument TAG peut être configuré et les données peuvent être acquises en temps réel. L'interface utilisateur pour cette connexion est une application desktop développée par Lynkz, installée et exécutée directement sur un ordinateur et fonctionne indépendamment d'un navigateur Internet. Cette interface propose des fonctionnalités complètes pour la gestion des données, incluant la configuration des paramètres du capteur, la visualisation en temps réel des mesures et l'acquisition des données pour une analyse ultérieure.

L'instrument TAG peut être connecté sans fil à des appareils externes en utilisant une carte de développement "nRF52 DK", présentée dans la Figure 16.a. Cette méthode de connexion est particulièrement pratique pour les environnements où une connexion câblée n'est pas possible ou désirée. PlateformenRF52 DK" est une plateforme de développement robuste qui permet de simplifier le développement d'applications basées sur des solutions sans fil.

En plus de la connectivité sans fil, l'instrument TAG peut aussi être connecté en série par une carte de connexion dédiée, présentée dans la Figure 16.b. Cette méthode de connexion filaire est parfaite pour les environnements où une connexion stable et sécurisée est nécessaire. L'utilisation d'une connexion en série permet une communication directe et fiable entre le capteur et les appareils externes.

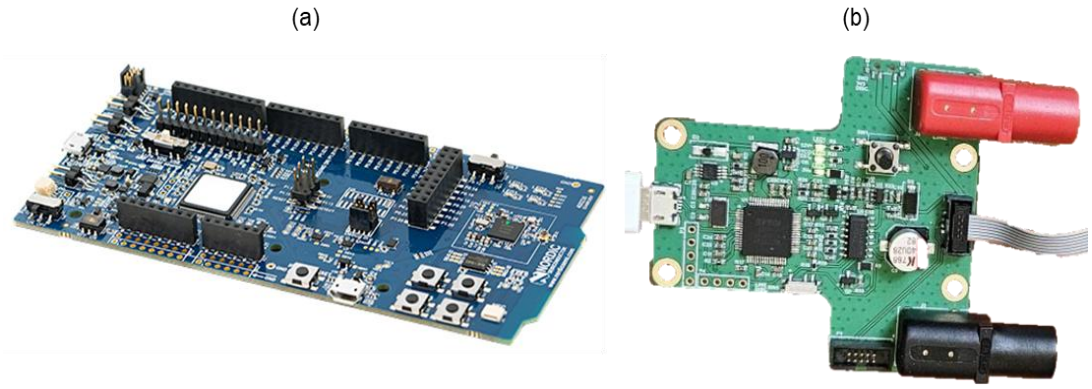


Figure 16: (a) Carte "nRF52 DK". (b) carte de connexion en série

3.4 Méthodologie de validation de l'instrument TAG

Dans le but de valider les performances de l'instrument TAG, nous avons mis en place une méthode qui repose sur l'utilisation de capteurs témoins. Les capteurs témoins jouent un rôle de référence dans l'évaluation de la précision, de la fidélité et de la stabilité des mesures fournies par l'instrument TAG. En comparant les données fournies par l'instrument TAG avec celles des capteurs témoins, il est possible de vérifier l'exactitude et la fiabilité des mesures prises dans des conditions contrôlées.

Notre approche sera de valider chaque paramètre mesuré par l'instrument TAG individuellement. Une fois que nous aurons validé chaque paramètre isolément, nous procéderons à la vérification de l'interférence entre les différents paramètres afin d'évaluer comment la mesure d'un paramètre peut affecter les autres. La méthodologie de validation de l'instrument TAG est représentée dans la Figure 17

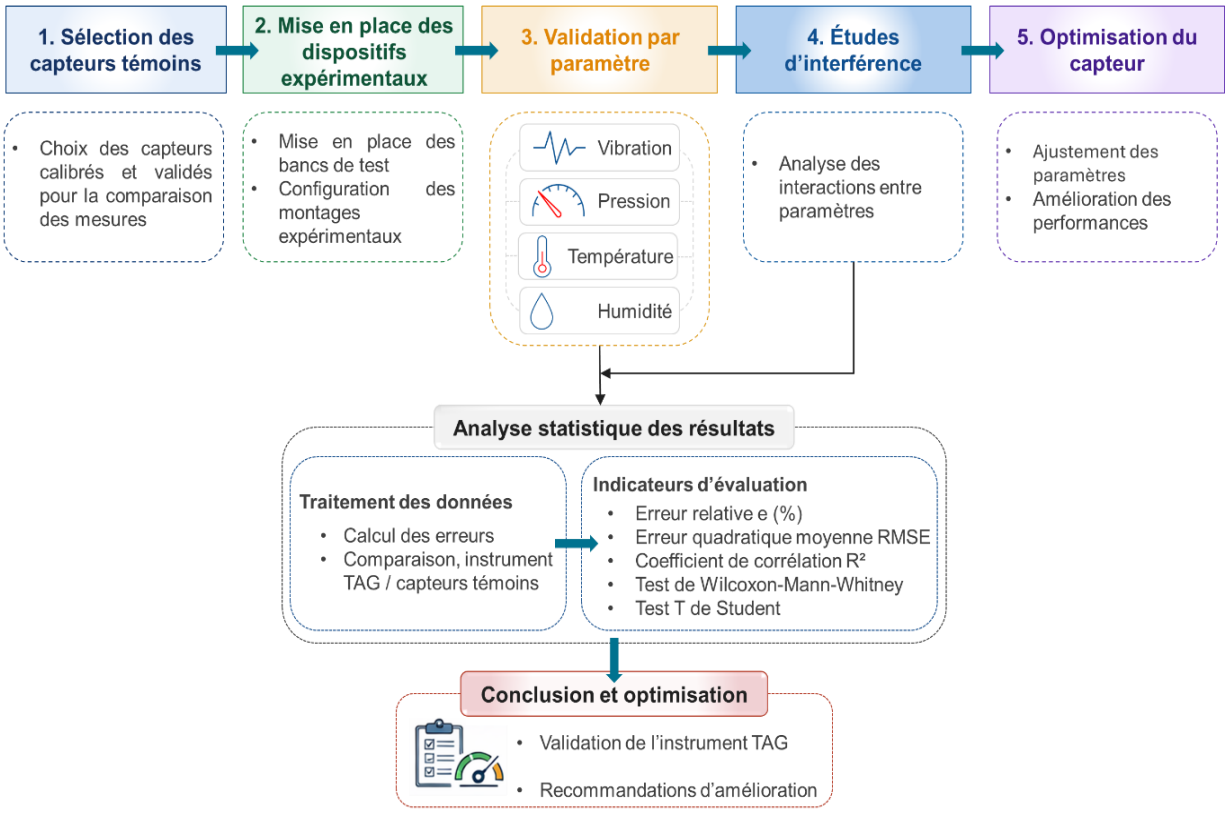
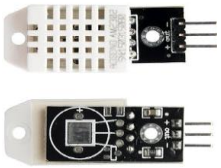


Figure 17 : Méthodologie de validation de l'instrument TAG

3.4.1 Capteurs témoins

Le Tableau 6 présente les capteurs témoins que nous avons utilisés dans les différents protocoles de validation de chaque paramètre (vibration, pression, température et humidité).

Tableau 6 : Capteurs témoins utilisés pour la validation de *l'instrument TAG*

Capteur témoin	Grandeur mesurée	Plages de mesures	Image
Pressure Sensor 400 de Vernier	Pression	0 à 4000 mbar	
Go Direct® Temperature Probe	Température	Q040 à 125°C	
DHT22	Température + Humidité	-40°C ~ 80°C 0 ~ 100% RH	
ADXL345	Vibration	± 2 g ~ ±16 g	

3.4.2 Dispositifs expérimentaux

Afin de valider l'instrument TAG, un ensemble de dispositifs expérimentaux a été mis en place. L'objectif de ces dispositifs est de simuler des conditions de fonctionnement réelles pour les pompes submersibles et de recueillir des données précises à partir du TAG et des capteurs témoins. Les dispositifs expérimentaux utilisés dans cette étude sont décrits en détail dans cette description :

- Mesure des vibrations

La mesure des vibrations a été réalisée selon deux approches expérimentales complémentaires, comprenant des essais en laboratoire ainsi que des essais sur une pompe réelle.

Dans un premier temps, les essais en laboratoire ont été effectués à l'aide d'un amplificateur de puissance et d'un générateur de vibrations afin d'évaluer la

performance du capteur dans la détection des vibrations. Le dispositif expérimental utilisé pour ces essais est présenté à la Figure 18.

L'amplificateur de puissance agit comme un dispositif d'amplification en fournissant la puissance nécessaire pour reproduire les signaux oscillants qui définissent la fréquence des vibrations appliquées. Il permet de produire une gamme variée de fréquences allant de 0 à 10kHz, simulant ainsi divers scénarios de vibrations, allant des vibrations légères aux vibrations plus intenses, rencontrées en conditions réelles. Le générateur de vibrations, quant à lui, est utilisé pour produire des mouvements vibratoires mécaniques.

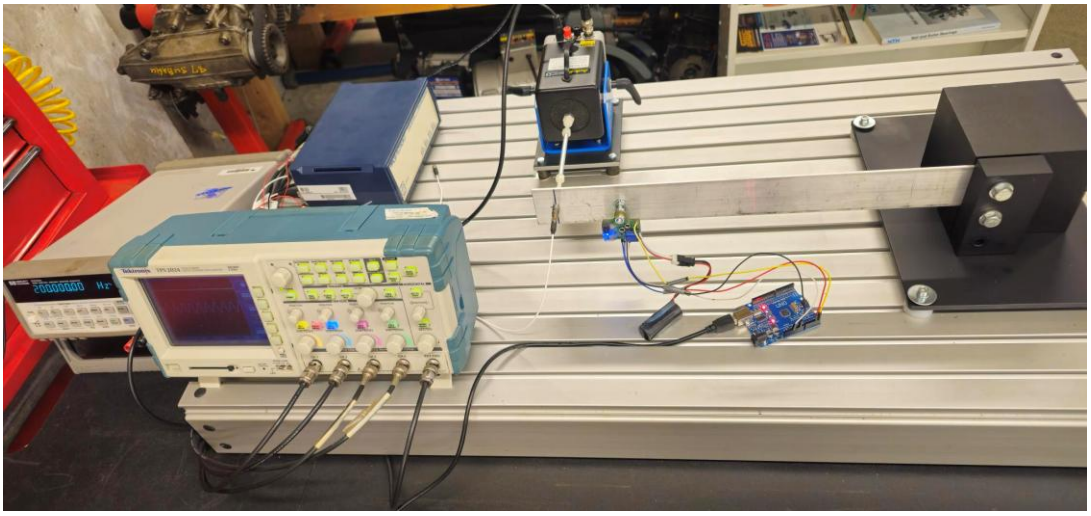


Figure 18 : Dispositif expérimental pour la mesure des vibrations

Pour ces essais, l'instrument TAG et le capteur témoin ont été montés simultanément sur le même support expérimental, selon les trois directions orthogonales X, Y et Z, afin de mesurer les vibrations suivant les trois axes de l'espace. La Figure 19 présente le montage expérimental et l'orientation respective des deux capteurs. Les acquisitions ont été réalisées de manière synchronisée, garantissant que les deux capteurs étaient soumis exactement aux mêmes sollicitations vibratoires au même instant.

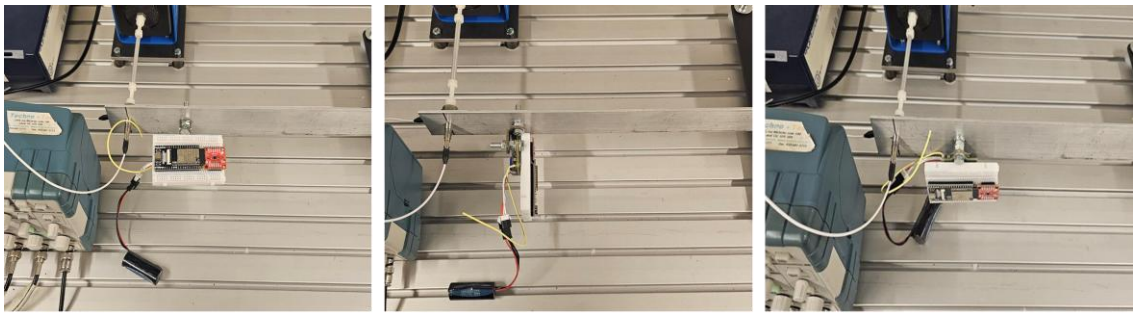


Figure 19 : Montage expérimental pour la validation de l'instrument TAG dans les trois directions de mesure

L'instrument TAG et le capteur témoin ont été installés simultanément sur la pompe LH311W, montée sur le banc d'essai de Technosub, afin de garantir une acquisition synchrone des signaux vibratoires. Le montage expérimental des deux capteurs sur la pompe est présenté à la Figure 20.



Figure 20 : Montage des capteurs (TAG + Témoin) sur la pompe

- Mesure de la pressionLe dispositif expérimental pour la mesure de la pression, présenté dans la Figure 21 , se compose principalement de deux systèmes. Le premier dispositif (Figure 21.a) est une cloche de verre hermétique reliée à

un moteur à courant alternatif monophasé EMERSON, utilisé pour les applications de pompe à vide. Ce moteur, d'une puissance de 1/3 HP et d'une vitesse de rotation nominale de 1725 tr/min, permet d'aspirer l'air contenu dans la cloche, ce qui permet de diminuer la pression interne de manière contrôlée. Initialement, la pression de l'air dans la cloche est égale à la pression atmosphérique (environ 101,325 kPa). Le système permet de réduire la pression à l'intérieur de la cloche jusqu'à 0 Pa.

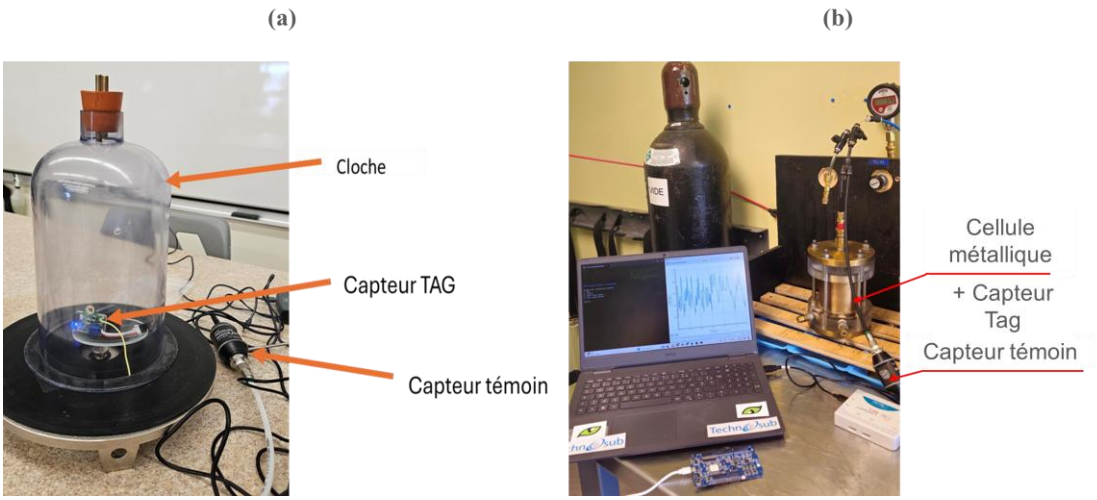


Figure 21 : Dispositif de mesure de pression : (a) chambre hermétique en verre, (b) cellule métallique

Le deuxième dispositif (Figure 21.b) est constitué d'une cellule métallique. Dans cette cellule, l'instrument TAG est placé, et la pression est augmentée de manière contrôlée à l'aide d'air comprimé. Ce dispositif permet de faire varier la pression de la pression atmosphérique jusqu'à 5 kPa, offrant ainsi une large plage de mesure dans un environnement contrôlé.

- Mesure de la température et de l'humidité

Afin de valider les mesures de température et d'humidité de l'instrument TAG, nous avons utilisé une chambre environnementale, présentée dans la Figure 22. La programmation de cette chambre permettra de générer des plages de température

précises, allant de -10°C à 85°C, et de contrôler de manière précise les niveaux d'humidité, allant de 20% HR à 98% HR, ce qui nous permettra de tester la réponse du capteur dans différentes conditions.



Figure 22 : Chambre environnementale

- Essais combinés

Des tests combinés ont été réalisés afin d'évaluer la réponse de l'instrument TAG sous des variations simultanées de plusieurs paramètres physiques. La pression a été contrôlée à l'aide d'une pompe à vide. La température a été augmentée à l'aide de deux éléments chauffants à résistance électrique installés à l'intérieur de l'enceinte. L'humidité a été ajustée à l'aide d'un humidificateur capable de produire des variations de l'humidité relative. Les vibrations ont été générées à l'aide d'un excitateur de vibrations vertical, fournissant des oscillations mécaniques sinusoïdales contrôlées. L'instrument TAG et les capteurs de référence ont été placés dans le même environnement contrôlé afin de garantir une exposition synchronisée à toutes les sources d'excitation. Cette configuration a permis d'évaluer le comportement du

capteur dans des conditions de fonctionnement complexes et couplées, représentatives des systèmes de pompage réels. La configuration complète du dispositif d'essai combiné est illustrée à la Figure 23.

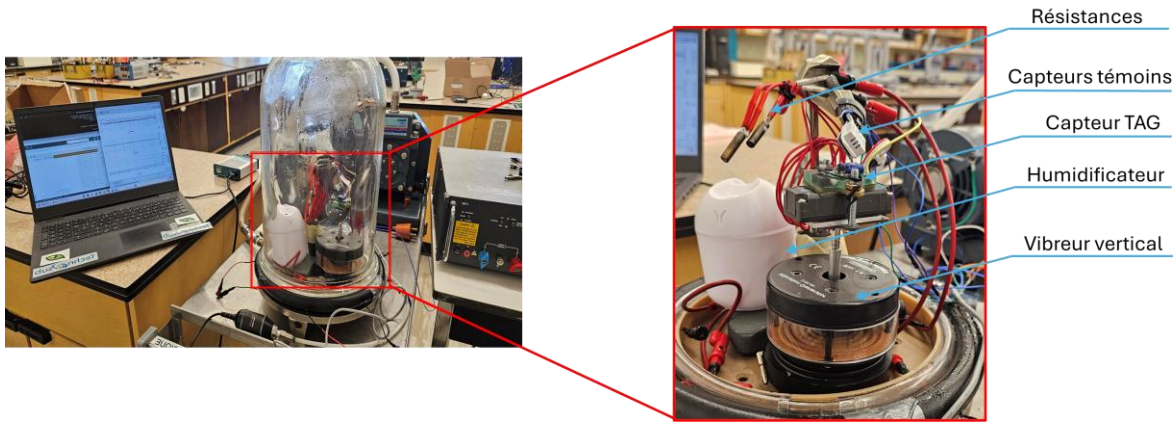


Figure 23 : Dispositif expérimental pour les essais combinés

3.4.3 Méthodes statistiques d'évaluation de la concordance entre l'instrument TAG et les capteurs témoins

Dans cette étude, les données ont été collectées simultanément à partir de l'instrument TAG et des capteurs témoins, dans des conditions expérimentales identiques, puis traitées en vue d'une analyse comparative. La fréquence d'acquisition ainsi que la synchronisation des systèmes de mesure ont été soigneusement configurées afin d'assurer un alignement temporel précis des séries de données et de garantir la fiabilité des comparaisons. En pratique, une fréquence d'échantillonnage commune a été définie pour les différents capteurs afin d'éviter les erreurs liées au sous-échantillonnage ou aux décalages temporels. De plus, le démarrage simultané des acquisitions et l'utilisation d'une référence temporelle commune ont permis de limiter les écarts entre les signaux mesurés. Lorsque nécessaire, un traitement de synchronisation supplémentaire a été appliqué lors de l'analyse des données afin de corriger les légers décalages résiduels. Cette approche assure que les variations observées entre l'instrument TAG et les capteurs témoins reflètent réellement leurs performances respectives et non des différences dues aux conditions d'acquisition. La méthodologie de traitement des données s'inspire de l'approche analytique

proposée dans des travaux antérieurs (Mouapi et al., 2020), qui établit un cadre structuré pour la validation des capteurs et l'évaluation de leurs performances.

L'évaluation de la concordance entre l'instrument TAG et les capteurs témoins repose sur l'utilisation de quatre indicateurs complémentaires : l'erreur relative, le coefficient de corrélation, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et les tests de signification statistique. Selon la distribution des données, le test de Mann-Whitney U est appliqué aux séries non normalement distribuées, tandis que le test T de Student est utilisé pour les données suivant une loi normale. Ces méthodes permettent d'analyser conjointement la précision des mesures, la relation linéaire entre les signaux et la similarité statistique des distributions des deux séries de données.

- Erreur relative

L'erreur relative permet de mesurer l'écart entre les mesures de l'instrument TAG et celles des capteurs témoins, en exprimant cet écart sous forme de pourcentage. Elle permet d'évaluer la précision de l'instrument TAG par rapport aux valeurs de référence fournies par les capteurs témoins.

La formule utilisée pour calculer l'erreur relative est la suivante (Douglas C. Montgomery & George C. Runger, 2018):

$$e(\%) = \frac{1}{N}\sum\left(\frac{|mesure\ capteur\ témoin - mesure\ TAG|}{mesure\ capteur\ témoin}\right) * 100 \qquad (8)$$

Une erreur relative faible indique que les valeurs de l'instrument TAG suivent de près celles des capteurs témoins. En revanche, une erreur relative élevée suggère que l'instrument TAG présente des écarts importants par rapport aux capteurs témoins, ce qui indiquerait une moins bonne précision.

- Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation est utilisé pour mesurer la relation linéaire entre les valeurs mesurées par l'instrument TAG et celles des capteurs témoins. Il permet de

quantifier à quel point les deux séries de mesures sont liées. Le coefficient de corrélation de Pearson est le plus couramment utilisé pour cette analyse.

La formule du coefficient de corrélation de Pearson est la suivante (Douglas C. Montgomery & George C. Runger, 2018):

$$R = \frac{\sum(x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \overline{x})^2 \sum(y_i - \overline{y})^2}} \quad (9)$$

Où :

- x_i représente les valeurs de l'instrument TAG,
- y_i représente les valeurs des capteurs témoins,
- $\overline{x}\ et\ \overline{y}$ sont les moyennes des valeurs des deux capteurs respectivement.

Un coefficient de corrélation R proche de 1 indique une relation linéaire forte et positive, ce qui signifie que les valeurs de l'instrument TAG suivent bien les tendances des capteurs témoins. Si R est proche de 0, cela signifie qu'il n'y a pas de relation linéaire, et une valeur proche de -1 indiquerait une relation négative.

- Erreur moyenne quadratique

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est une mesure couramment utilisée pour quantifier la différence entre deux ensembles de mesures. Elle indique l'amplitude moyenne de l'erreur entre un signal de référence et le capteur évalué (Steven M. Kay, 1993). Une RMSE plus faible reflète une meilleure concordance entre les deux signaux.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}(x_i - y_i)^2} \quad (10)$$

- Test T de student

Le test T de Student est un test statistique paramétrique utilisé pour comparer les moyennes de deux séries de données lorsque celles-ci suivent une distribution normale (Douglas C. Montgomery & George C. Runger, 2018). Dans ce travail, il est appliqué afin de déterminer si les différences observées entre les mesures de l'instrument TAG et celles des capteurs témoins sont statistiquement significatives. Le test repose sur l'hypothèse nulle selon laquelle les moyennes des deux séries de mesures sont égales. Lorsque la valeur de p, déterminée à partir de la statistique du test à l'aide de la table de Student présentée en Annexe A –, est supérieure au seuil de signification retenu (généralement 0,05), l'hypothèse nulle est acceptée, indiquant l'absence de différence significative entre les deux séries de mesures. La statistique du test pour deux échantillons indépendants est définie par l'expression suivante (Douglas C. Montgomery & George C. Runger, 2018):

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \tag{11}$$

Où $\bar{x}_1$et $\bar{x}_2$représentent les moyennes des deux séries de données, s_1^2 et s_2^2 leurs variances respectives, et n_1 et n_2 les tailles des échantillons. La valeur calculée de "t" est comparée à une valeur critique issue de la loi de Student en fonction du nombre de degrés de liberté et du niveau de signification choisi.

- Test de Wilcoxon-Mann-Whitney

Le test de Wilcoxon-Mann-Whitney, également appelé test U de Mann-Whitney ou test de la somme des rangs de Wilcoxon, est un test statistique non paramétrique utilisé pour comparer deux groupes de données indépendants. Il permet de tester l'hypothèse selon laquelle les distributions des deux groupes sont statistiquement similaires, sans supposer que les données suivent une distribution normale (Myles Hollander et al., 2013). Cette méthode est donc particulièrement appropriée dans le cas où les distributions des mesures ne respectent pas l'hypothèse de normalité comme présentée dans la Figure 24.

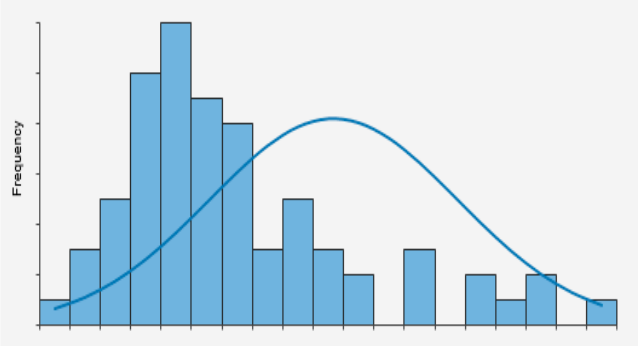


Figure 24 : Exemple de données non normalement distribuées

Source : (Gul, 2022)

Le test de Mann-Whitney repose sur les hypothèses suivantes :

H_0 : Les distributions des deux groupes (les mesures de l'instrument TAG et celles des capteurs témoins) sont identiques.

H_1 : Les distributions des deux groupes sont différentes.

La formule pour calculer la statistique U du test de Mann-Whitney, lorsque l'on compare deux échantillons indépendants, est la suivante :

$$U = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1 \qquad (12)$$

Où :

- $n_1 \, et \, n_2$ représentent les tailles des deux échantillons (respectivement l'instrument TAG et les capteurs témoins),
- R_1 est la somme des rangs attribués aux observations du premier échantillon (instrument TAG).

Alternativement, on peut aussi calculer U pour le second échantillon avec la formule suivante :

$$U = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - R_2 \quad (13)$$

Ensuite, la statistique du test retenue est la plus petite des deux U calculés. La valeur obtenue pour U peut être utilisée pour obtenir la valeur p à partir d'une table de distribution du test de Mann-Whitney présenté en Annexe B –. Si la valeur p est inférieure au seuil alpha (généralement fixé à 0,05), cela signifie qu'il existe une différence significative entre les distributions des deux groupes, et on rejette l'hypothèse nulle H_0. Dans le cas contraire, on conclut que les deux groupes ont des distributions statistiquement similaires.

Le test de Wilcoxon-Mann-Whitney est donc une méthode prouvée pour comparer les performances de l'instrument TAG et des capteurs témoins, même lorsque les données ne suivent pas une distribution normale. Il permet de déterminer si les mesures des deux capteurs sont statistiquement comparables en termes de distribution.

3.5 Organisation des essais expérimentaux

Les essais expérimentaux présentés dans ce chapitre ont été réalisés conformément aux normes ISO 5725-1:2023 (I. O. f. Standardization, 2023) et ISO 5725-2:2019 (I. O. f. Standardization, 2019) , relatives à l'exactitude des méthodes de mesure, incluant les notions de justesse et de fidélité. Ces normes fournissent un cadre méthodologique rigoureux pour l'évaluation des performances des systèmes de mesure et garantissent la fiabilité des résultats expérimentaux.

Les essais ont été menés dans plusieurs environnements expérimentaux afin de couvrir à la fois des conditions contrôlées et des conditions proches de l'utilisation réelle. Les essais de pression, de température et d'humidité ont été réalisés au laboratoire de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) ainsi qu'au laboratoire de physique du Cégep, dans des conditions contrôlées. Les essais de vibrations ont été effectués à la fois en laboratoire et sur une pompe réelle installée sur le banc d'essai de Technosub, permettant d'évaluer le comportement de l'instrument TAG en conditions opérationnelles.

Conformément aux recommandations des normes ISO, chaque essai a été répété au minimum trois fois dans des conditions expérimentales identiques afin d'évaluer la répétabilité des mesures. Lors de l'ensemble des expérimentations, l'instrument TAG et les capteurs témoins ont été soumis simultanément aux mêmes sollicitations, garantissant une comparaison directe et cohérente des données recueillies. Les résultats présentés dans les sections suivantes correspondent à des essais représentatifs de l'ensemble des séries d'essais réalisées pour chaque paramètre étudié.

3.6 Conclusion

Les dispositifs expérimentaux et la méthodologie de validation présentés dans ce chapitre constituent le cadre de référence pour l'analyse des performances de l'instrument TAG. Les protocoles définis, les moyens de mesure utilisés ainsi que les méthodes de traitement des données permettent d'évaluer de manière rigoureuse la précision, la stabilité et la fiabilité des mesures fournies par le capteur.

Le chapitre suivant est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus pour chacun des paramètres étudiés. Les performances de l'instrument TAG y sont évaluées par comparaison avec les capteurs témoins, tant pour les essais individuels que pour les essais combinés, afin de valider son comportement dans des conditions représentatives du fonctionnement réel des systèmes de pompage.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus par les divers tests de validation du TAG. Les performances du capteur sont analysées à partir des essais réalisés sur les paramètres de pression, de température, d'humidité et de vibrations, puis comparées à celles des capteurs témoins. Des méthodes statistiques d'évaluation sont appliquées sur les données collectées afin d'analyser la précision, la répétabilité et la fiabilité de l'instrument TAG dans des conditions contrôlées.

4.2 Validation des mesures de pression

Les essais de pression visent à évaluer les performances de l'instrument TAG sous différentes conditions de variation représentatives du fonctionnement des systèmes de pompage. Les résultats présentés couvrent des essais de répétabilité ainsi que des séquences de pression croissantes, décroissantes, constantes et aléatoires, et sont comparés aux mesures fournies par les capteurs témoins.

La répétabilité de l'instrument TAG a été évaluée à partir de trois essais successifs réalisés dans des conditions expérimentales identiques, en faisant varier la pression de la pression atmosphérique jusqu'à 0 mbar. Les résultats montrent une forte superposition des courbes de mesure, traduisant une réponse cohérente et stable du capteur sur l'ensemble des répétitions.

La Figure 25 ci-dessous illustre l'évolution de la pression au cours du temps pour les trois essais. Les courbes quasi superposées renforcent l'observation selon laquelle l'instrument TAG fournit des mesures répétables et fiables dans des conditions identiques.

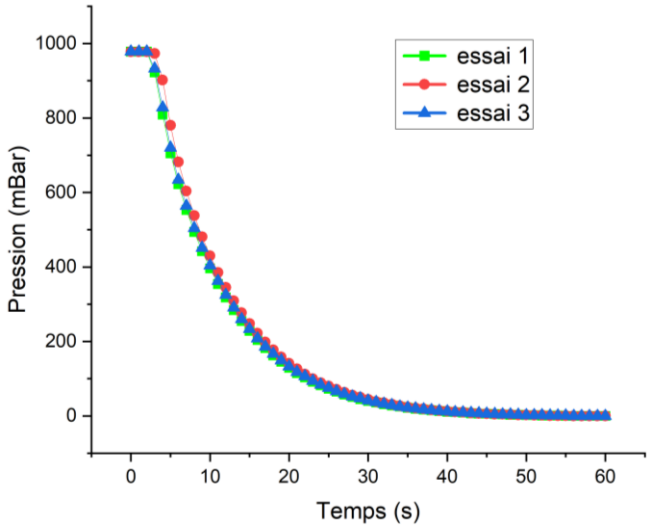


Figure 25 : Répétabilité des mesures de pression de l'instrument TAG

Cette observation est confirmée par les indicateurs statistiques calculés pour chaque essai, présentés dans le Tableau 7, et atteste de la bonne reproductibilité des mesures.

Tableau 7 : Indicateurs statistiques des essais de répétabilité de l'instrument TAG pour la mesure de pression

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Moyenne (mbar)	182,59	178,77	185,49
Erreur-type	36,04	35,49	36,37
Médiane	40	39	41

Ces résultats démontrent que l'instrument TAG présente une très bonne répétabilité, avec des variations minimes entre les répétitions.

Pour évaluer la performance de l'instrument TAG dans des conditions variées, plusieurs essais de pression ont été réalisés.

Des essais complémentaires ont été menés en appliquant des variations de pression de type croissant et décroissant afin d'analyser le comportement du capteur lors de changements progressifs. Les résultats correspondants sont présentés sur la Figure 26. On constate que l'instrument TAG suit correctement les évolutions imposées, sans dérive notable ni retard significatif par rapport au capteur témoin avec un facteur de corrélation $R^2 = 0,99$ pour les deux essais.

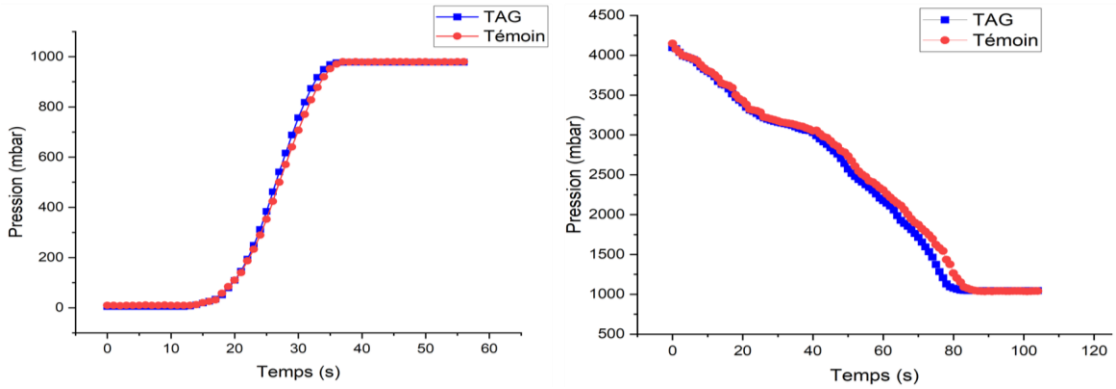


Figure 26 : Variation croissante et décroissante de la pression : comparaison entre l'instrument TAG et le capteur témoin

Les résultats du test de Mann-Whitney obtenus pour l'essai de la variation croissante de la pression sont présentés à la Figure 27. L'analyse statistique montre une valeur de p égale à 0,89, supérieure au seuil de signification retenu ($\alpha = 0,05$). Par conséquent, l'hypothèse nulle est acceptée, indiquant qu'aucune différence statistiquement significative n'est observée entre les mesures comparées. Ces résultats confirment la cohérence des données et le bon comportement du capteur dans les conditions d'augmentation progressive de la pression.

Différence supposée (D) : 0	
Niveau de signification (%) : 5	
Test de Mann-Whitney / Test bilatéral :	
U	6657
U (normalisé)	-0,138
Espérance	6728
Variance (U)	261266,147
p-value (bilatérale)	0,890
alpha	0,05
Interprétation du test :	
H0 : La différence de position des échantillons est égale à 0.	
Ha : La différence de position des échantillons est différente de 0.	
Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de	
signification seuil alpha=0,05, on ne peut pas rejeter l'hypothèse	

Figure 27 : Résultats du test de Mann-Whitney pour l'essai de la variation croissante de la pression

Les essais réalisés à pression constante ont permis d'évaluer la stabilité des mesures de l'instrument TAG, les résultats correspondants sont présentés sur la Figure 28.

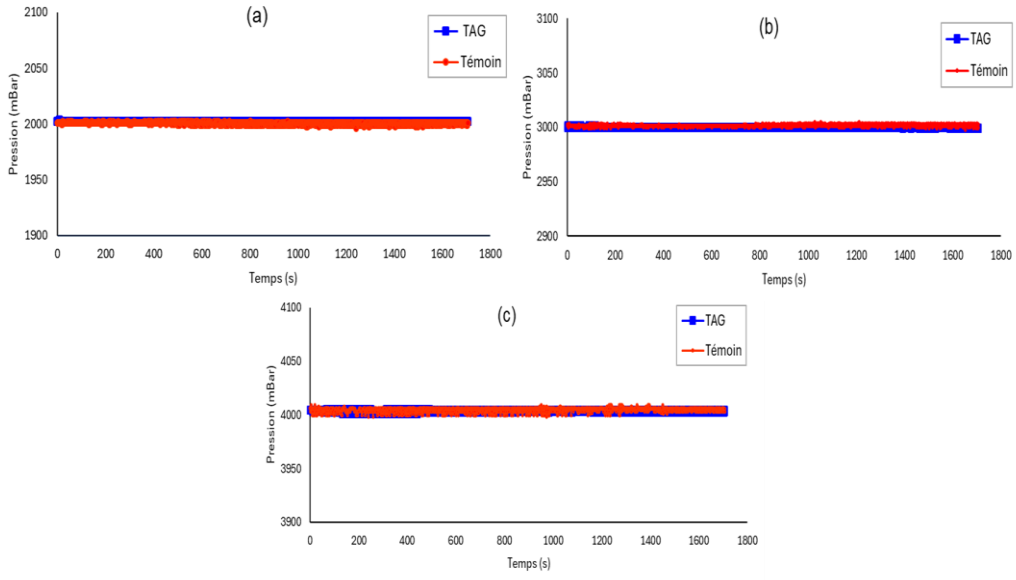


Figure 28 : Essais à pression constante : (a) 2000 mbar, (b) 3000 mbar et (c) 4000 mbar

Les indicateurs statistiques associés à ces essais sont présentés dans le Tableau 8 et mettent en évidence des fluctuations limitées autour de la valeur consigne, confirmant la stabilité des mesures dans des conditions stationnaires.

Tableau 8 : Indicateurs statistiques des mesures de pression de l'instrument TAG lors des essais à pression constante

Pression	**2000 mbar**		**3000 mbar**		**4000 mbar**	
Capteur	**TAG**	**Témoin**	**TAG**	**Témoin**	**TAG**	**Témoin**
Moyenne	2002	2000,33	2999,94	3001,73	4003,16	4004,45
Médiane	2002	2000,83	3000	3001,35	4003	4005,45
Écart type	0,024	0,97	0,31	0,98	0,89	2,03
Erreur moyenne (%)	0,083		0,06		0,053	

Enfin, deux séquences de pression aléatoires ont été appliquées afin d'évaluer la capacité des capteurs témoin et TAG à suivre des variations rapides et non périodiques. Les résultats obtenus, présentés sur la Figure 29, montrent que l'instrument TAG reproduit fidèlement les fluctuations observées par le capteur témoin, démontrant une bonne réactivité face aux sollicitations irrégulières avec un facteur de corrélation $R^2 > 0.88$ pour les deux essais.

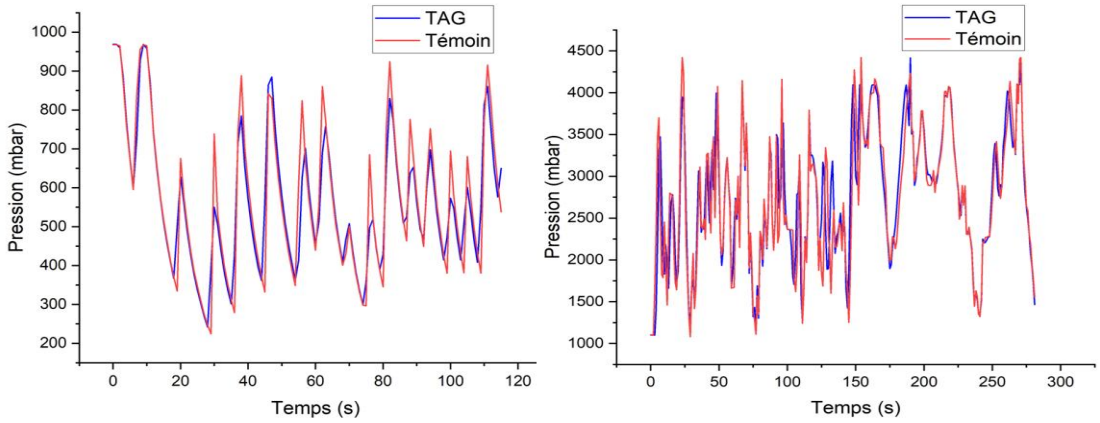


Figure 29 : Réponse de l'instrument TAG à des séquences de pression aléatoire

Le coefficient de détermination R^2 calculé pour chaque essai est systématiquement supérieur à 0,8, ce qui montre une forte corrélation entre les deux séries de mesures. Cette observation est également soutenue par les statistiques calculées pour chaque essai, qui montrent des valeurs cohérentes et confirment la fiabilité des données recueillies par l'instrument TAG. Enfin, les résultats sont validés par le test de Wilcoxon-Mann-Whitney (test U), avec un seuil de signification de 0,05, ce qui confirme qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les distributions des deux séries de mesures.

En résumé, ces résultats montrent que l'instrument TAG présente une précision élevée et une bonne capacité de répétabilité pour la mesure de la pression dans différentes conditions d'essai.

4.3 Validation des mesures de température

Les essais de température ont été réalisés en faisant varier la température entre −5 °C et 85 °C, selon des séquences d'augmentation et de diminution progressives. Bien que l'instrument TAG soit spécifié pour des températures allant jusqu'à 125 °C, la limite supérieure a été fixée à 85 °C en raison des contraintes liées à la tenue thermique des fils de connexion et de la batterie embarquée.

Dans la plage des températures positives, le comportement de l'instrument TAG est illustré sur la Figure 30 a et b, qui présente respectivement les séquences croissantes et décroissantes de température. Les résultats montrent une très bonne concordance entre les mesures de l'instrument TAG et celles des capteurs témoins. Les coefficients de corrélation R^2 ont été déterminés pour chaque capteur témoin ainsi que pour les phases de température croissante et décroissante. Pour le capteur témoin DHT22, les valeurs obtenues sont de $R^2 = 0.99$ lors de la phase de montée en température et de $R^2 = 0.95$ lors de la phase de refroidissement. Concernant le capteur témoin MAX6675, les coefficients calculés sont de $R^2 = 0.98$ pour la température croissante et $R^2 = 0.88$ pour la température décroissante. Ces résultats montrent une forte corrélation entre les mesures de l'instrument TAG et celles des capteurs de référence, confirmant la capacité du système à suivre correctement les variations thermiques dans la plage étudiée.

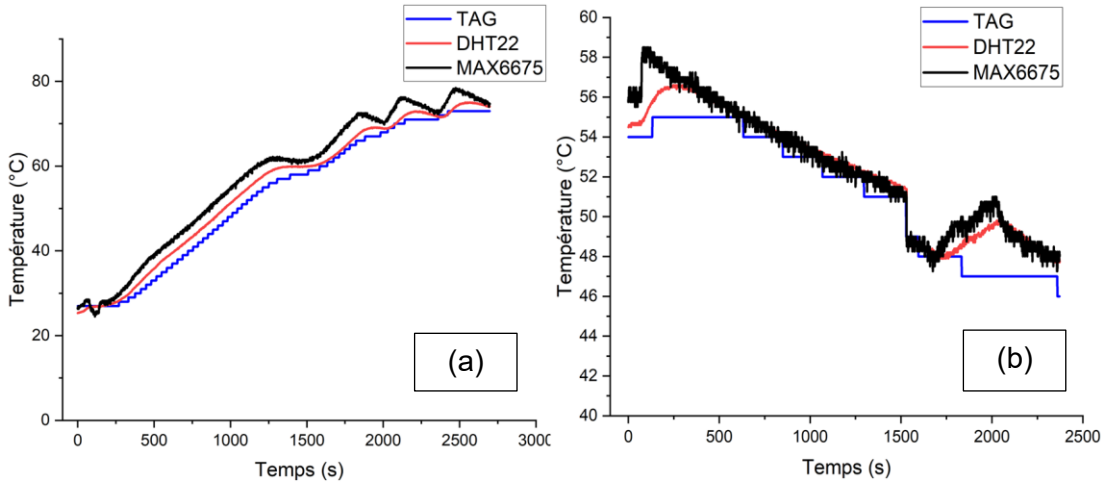


Figure 30 : Variations de la température en plage positive : (a) Température croissante; (b) Température décroissante

En revanche, le comportement de l'instrument TAG dans la plage des températures négatives est présenté sur la Figure 31. Dans cette zone, une dégradation des performances est observée, avec une erreur relative de 12,33 % et un coefficient de corrélation réduit ($R^2 = 0,64$). Cette diminution de précision observée dans la plage de température négative peut s'expliquer par les caractéristiques intrinsèques de

l'instrument TAG, dont la précision est estimée à ±2 °C, comparativement au capteur témoin utilisé pour la validation, le DHT22, qui présente une précision d'environ ±0,5 °C. Cette différence de performance métrologique peut ainsi contribuer aux écarts observés entre les mesures dans ces conditions.

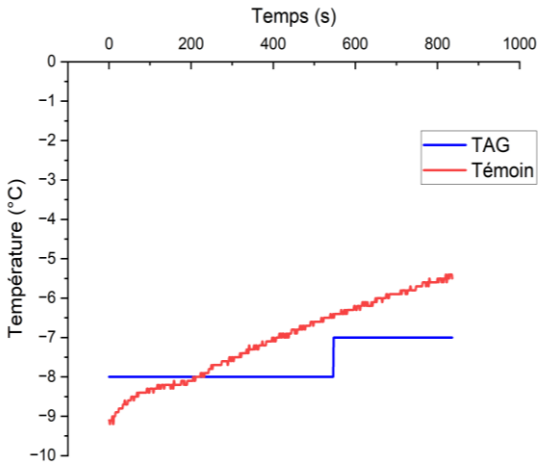


Figure 31 : Réponse de l'instrument TAG en plage de températures négatives

L'analyse statistique des résultats a été réalisée à l'aide du test U de Mann-Whitney, avec un seuil de signification fixé à $\alpha = 0,05$. À titre d'exemple, l'essai correspondant à la température positive croissante, présenté à la Figure 30-a, a été analysé en comparant les mesures du TAG à celles du capteur témoin DHT22. La valeur de p obtenue ($p = 0,064$) étant supérieure au seuil de signification, l'hypothèse nulle est acceptée, indiquant l'absence de différence statistiquement significative entre les distributions des mesures comme représenté à la Figure 32. Des résultats similaires ont été observés pour les autres essais, confirmant la capacité de l'instrument TAG à suivre globalement les mesures de référence. Ces résultats confirment que l'instrument TAG suit globalement correctement les mesures de référence, malgré une précision réduite dans la plage des températures négatives.

Différence supposée (D) : 0	
Niveau de signification (%) : 5	
Test de Mann-Whitney / Test bilatéral :	
U	3383934
U (normalisé)	-4,514
Espérance	3642300,500
Variance (U)	3276047165,179
p-value (bilatérale)	0,064
alpha	0,05
Interprétation du test :	
H0 : La différence de position des échantillons est égale à 0.	
Ha : La différence de position des échantillons est différente de 0.	
Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de	
signification seuil alpha=0,05, on ne peut pas rejeter l'hypothèse	

Figure 32 : Résultats du test de Mann-Whitney pour l'essai de la variation croissante de la température

4.4 Validation des mesures d'humidité

Les essais d'humidité ont été réalisés afin d'évaluer la capacité de l'instrument TAG à mesurer et suivre les variations de l'humidité relative dans des conditions contrôlées. La variation de l'humidité a été obtenue de manière progressive, permettant de couvrir une large plage de valeurs représentatives des environnements de fonctionnement des systèmes de pompage.

Un exemple représentatif des résultats obtenus est présenté sur la Figure 33, où l'évolution de l'humidité relative mesurée par l'instrument TAG est comparée à celle du capteur témoin. Les résultats montrent une très bonne concordance entre les deux séries de mesures (Figure 33 a; b), l'instrument TAG suivant fidèlement les variations imposées sans instabilité notable.

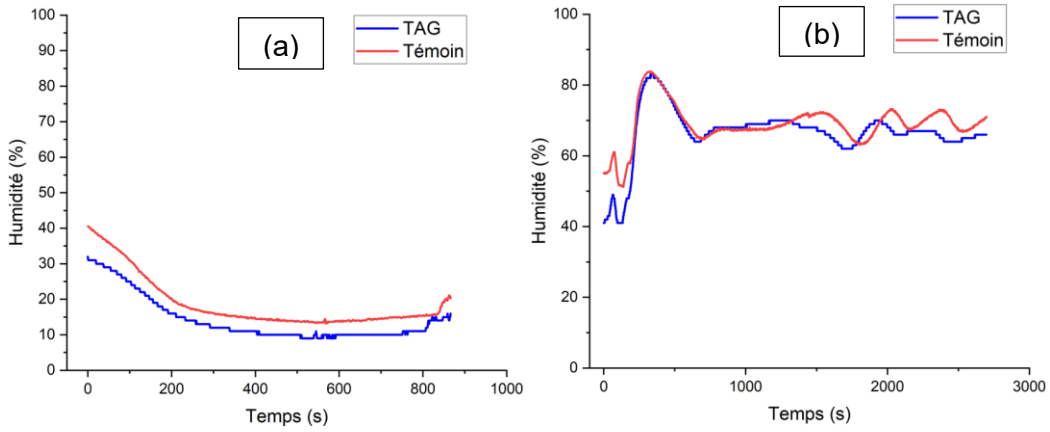


Figure 33 : Variation de l'humidité relative : comparaison entre l'instrument TAG et le capteur témoin; (a) Première série de mesures, (b) Deuxième série de mesures

L'analyse quantitative met en évidence une forte corrélation entre les mesures de l'instrument TAG et celles du capteur témoin, avec un coefficient de corrélation R^2 supérieur à 0,9 pour les deux séries de mesures. Les écarts observés restent faibles sur l'ensemble de la plage de mesure, traduisant une bonne précision et une stabilité satisfaisante de l'instrument TAG pour la mesure de l'humidité relative.

L'analyse statistique des résultats a été réalisée à l'aide du test U de Mann-Whitney, avec un seuil de signification fixé à $\alpha = 0,05$. À titre d'exemple, l'essai correspondant à l'humidité, présenté à la Figure 33-b a été analysé en comparant les mesures de l'instrument TAG à celles du capteur témoin. La valeur de p obtenue ($p = 0,083$) étant supérieure au seuil de signification, l'hypothèse nulle est acceptée, indiquant l'absence de différence statistiquement significative entre les distributions des mesures, comme représenté dans la Figure 34. Des résultats similaires ont été observés pour les autres essais, confirmant la capacité du TAG à suivre correctement les variations d'humidité mesurées par le capteur de référence.

Différence supposée (D) : 0	
Niveau de signification (%) : 5	
Test de Mann-Whitney / Test bilatéral :	
U	2643365
U (normalisé)	-17,463
Espérance	3642300,500
Variance (U)	3272260623,333
p-value (bilatérale)	0,083
alpha	0,05
Interprétation du test :	
H0 : La différence de position des échantillons est égale à 0.	
Ha : La différence de position des échantillons est différente de 0.	
Etant donné que la p-value calculée est supérieure au	
niveau de signification seuil alpha=0,05, on ne peut pas	

Figure 34 : Résultats du test de Mann-Whitney pour l'essai de la variation croissante de l'humidité

Ces résultats montrent que le capteur est capable de mesurer l'humidité relative de manière fiable et cohérente dans les conditions expérimentales étudiées.

4.5 Validation des mesures de vibrations en laboratoire

4.5.1 Principe de calcul vibratoire embarqué dans l'instrument TAG

Les essais de vibrations constituent une composante centrale de la validation de l'instrument TAG, les signaux vibratoires étant largement reconnus comme des indicateurs pertinents de l'état de fonctionnement des systèmes de pompage. Temporelle étude, les signaux d'accélération ont été acquis par l'instrument TAG à une fréquence d'échantillonnage de 1600 Hz, permettant de capter avec une résolution temporelle suffisante les phénomènes vibratoires associés aux machines tournantes. Ce choix de fréquence assure une représentation adéquate des variations dynamiques du signal tout en respectant les contraintes matérielles et énergétiques du capteur.

Afin de caractériser l'évolution temporelle de la variabilité vibratoire, le traitement des données repose sur le calcul de l'écart type mobile de l'accélération. Cet indicateur est calculé sur des fenêtres glissantes de taille N=10, à partir du signal d'accélération

brut acquis à 1600 Hz. Pour une série temporelle x_i, l'écart type mobile est défini par (Douglas C. Montgomery & George C. Runger, 2018):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2} \quad (14)$$

Où :

- $\bar{x}$: représente la moyenne des valeurs contenues dans la fenêtre considérée.
- N : taille de la fenêtre mobile
- x_i : valeur du signal au point i

Cette approche permet de transformer le signal vibratoire brut en un indicateur synthétique reflétant l'intensité des fluctuations vibratoires, facilitant ainsi la comparaison entre différents régimes de fonctionnement et l'analyse de la stabilité du système.

Dans le cas de l'instrument TAG, le calcul est directement implémenté dans l'algorithme embarqué, ce qui implique la suppression préalable de la moyenne du signal sur une fenêtre mobile. Le résultat obtenu correspond ainsi à un RMS centré, équivalent à l'écart type calculé sur une fenêtre glissante, puisqu'il représente la dispersion des valeurs du signal autour de la moyenne locale. Cette approche permet de quantifier les variations dynamiques du signal en éliminant l'influence de la composante continue.

À titre de comparaison, le RMS (non centré) est calculé directement à partir des valeurs du signal, sans suppression de la moyenne, selon l'expression suivante (Montgomery & Runger, 2011):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} {x_i}^2} \quad (15)$$

La première étape de l'analyse vibratoire a donc consisté à vérifier la conformité de cette méthode de calcul avec les normes et les recommandations industrielles en vigueur, avant d'exploiter cet indicateur pour l'analyse expérimentale des performances du capteur (paragraphe 4.5.2 ci-dessous).

4.5.2 Conformité de l'algorithme vibratoire du TAG avec l'état de l'art

Dans le domaine de la surveillance vibratoire des machines tournantes, la valeur RMS (Root Mean Square) constitue l'un des indicateurs les plus couramment utilisés pour évaluer l'intensité globale des vibrations et l'état de fonctionnement des équipements. Selon la norme ISO 13373-2:2016 (*ISO 13373-2*, s. d.) , le RMS est reconnu comme une grandeur fiable et représentative pour caractériser un signal vibratoire sur une période donnée, y compris dans le cas de signaux complexes comportant plusieurs composantes fréquentielles ou des phénomènes de modulation. Il s'agit ainsi d'un indicateur de référence largement adopté dans les applications de diagnostic vibratoire.

D'un point de vue normatif, le calcul du RMS est également formalisé dans la norme ISO 20816-1:2016 (*ISO 20816-1*, s. d.), qui définit le cadre d'évaluation des niveaux vibratoires des machines industrielles. Cette norme établit que le RMS permet de quantifier l'énergie globale contenue dans un signal vibratoire et constitue un critère pertinent pour la comparaison entre différents états de fonctionnement.

Dans le contexte des accéléromètres MEMS et des systèmes de surveillance embarqués, le calcul du RMS peut toutefois être réalisé selon deux approches distinctes : soit directement à partir du signal brut, soit après suppression de la valeur moyenne du signal. Cette seconde approche revient à calculer l'écart type du signal et permet d'éliminer les composantes continues, telles que l'accélération

gravitationnelle ou les décalages statiques, qui ne sont pas représentatives des phénomènes vibratoires dynamiques. Cette méthode est largement recommandée dans les applications industrielles utilisant des capteurs MEMS.

À titre d'exemple, les recommandations des fabricants de capteurs, notamment celles formulées dans la note d'application AN4508 de STMicroelectronics (STMicroelectronics, 2014), préconisent explicitement le retrait de la moyenne avant le calcul du RMS afin d'obtenir une estimation plus fidèle de l'intensité réelle des vibrations. Un RMS centré est alors mathématiquement équivalent à un écart type et reflète uniquement les composantes dynamiques du signal.

Dans le cas de l'instrument TAG, l'algorithme embarqué applique directement cette approche : la moyenne du signal d'accélération est supprimée avant le calcul, conduisant à une valeur équivalente à l'écart type du signal vibratoire. La première étape de ce travail a donc consisté à vérifier que cette méthode de calcul est conforme aux normes et aux recommandations industrielles en vigueur. L'analyse montre que l'algorithme vibratoire du TAG est pleinement cohérent avec l'état de l'art en matière de surveillance vibratoire, tant du point de vue normatif que des bonnes pratiques industrielles.

Cette conformité constitue une base méthodologique solide pour l'exploitation des indicateurs vibratoires fournis par de l'instrument TAG.

4.5.3 Analyse comparative des signaux RMS (σ) en laboratoire

Le signal RMS (σ) correspond au RMS centré, équivalent à un écart type calculé sur une fenêtre mobile, et constitue un indicateur de la variabilité locale du signal vibratoire. L'analyse des vibrations a été initiée par une série d'essais réalisés en laboratoire, conformément à une démarche progressive de validation. Cette première étape a porté sur l'exploitation directe des signaux RMS (σ) fournis par de l'instrument TAG, avant toute analyse détaillée des signaux bruts. L'objectif était d'évaluer la cohérence des indicateurs vibratoires calculés par le TAG par rapport à ceux obtenus à partir d'un capteur témoin, dans des conditions expérimentales contrôlées.

Afin d'assurer une comparaison équitable, un algorithme de traitement strictement identique à celui embarqué dans l'instrument TAG a été appliqué aux données du capteur témoin. Les signaux d'accélération ont ainsi été acquis à la même fréquence d'échantillonnage, puis traités par le calcul de l'écart type mobile (σ) sur des fenêtres glissantes, de manière à reproduire fidèlement le calcul RMS centré implémenté dans le TAG.

Plusieurs essais ont été réalisés pour les trois axes de mesure. À titre d'exemple représentatif, la Figure 35 présente l'évolution temporelle des signaux de σ obtenus sur les axes X, Y et Z, pour une excitation vibratoire appliquée principalement selon la direction Z. Cette représentation permet d'analyser simultanément la réponse vibratoire sur les trois directions et de comparer directement les indicateurs calculés par l'instrument TAG et par le capteur témoin.

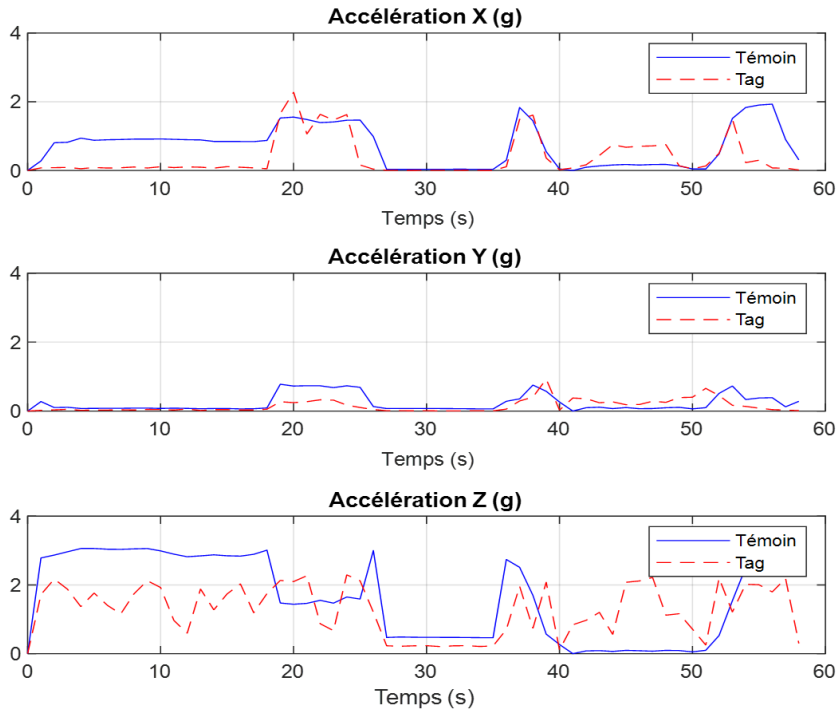


Figure 35 : Évolution temporelle de l'écart type des vibrations mesurées selon la direction Z (N=10)

L’analyse des résultats met en évidence une différence notable entre les signaux RMS (σ) issus de l’instrument TAG et ceux calculés à partir du capteur témoin, malgré l’utilisation d’une méthode de calcul identique et des conditions d’acquisition synchronisées. Cette divergence suggère que l’écart observé ne peut pas être attribué uniquement à la procédure de traitement, mais pourrait également être lié aux caractéristiques des signaux mesurés ou au comportement du capteur lui-même.

Ces observations ont conduit à approfondir l’analyse en revenant aux signaux vibratoires bruts (RAW), afin de déterminer si l’origine de la différence réside dans les données d’accélération elles-mêmes ou dans le processus de calcul des indicateurs vibratoires. Cette analyse est présentée dans la section suivante.

4.5.4 Analyse des signaux vibratoires bruts (RAW)

À la suite des résultats obtenus lors de l’analyse des indicateurs RMS (σ), une analyse des signaux vibratoires bruts (RAW) a été réalisée afin d’examiner directement les données d’accélération mesurées par les deux capteurs. Cette étape vise à dissocier l’influence des caractéristiques intrinsèques des signaux de celle des méthodes de calcul utilisées.

Les signaux d’accélération ont été acquis simultanément par l’instrument TAG et le capteur témoin, avec une acquisition synchronisée à 1600 Hz, garantissant une correspondance temporelle point à point entre les deux séries de données. L’analyse a été réalisée selon les trois axes de mesure X, Y et Z. Toutefois, afin de simplifier l’analyse et de se concentrer sur un cas représentatif, les résultats présentés dans cette section concernent uniquement l’axe Z, correspondant à la direction principale de l’excitation vibratoire appliquée lors des essais.

La Figure 36 présente un exemple représentatif des signaux d’accélération bruts mesurés en régime permanent, pour une excitation vibratoire sinusoïdale appliquée à une fréquence de 30 Hz. Dans ce régime, les deux capteurs présentent un signal régulier et symétrique, caractérisé par une amplitude stable d’environ ±3 g. Aucune saturation ni bruit excessif n’est observé, ce qui confirme un régime vibratoire bien

contrôlé. La forte similarité entre les signaux issus de l'instrument TAG et du capteur témoin met en évidence une très bonne cohérence entre les deux dispositifs en régime permanent.

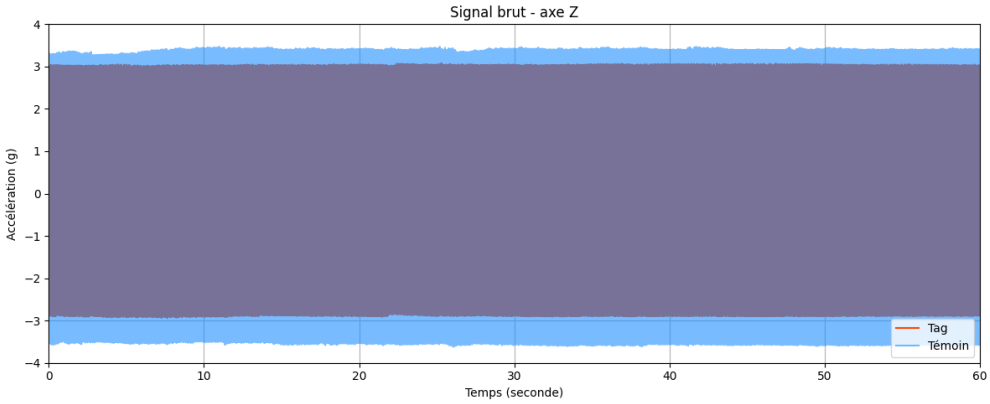


Figure 36 : Signaux vibratoires bruts (RAW) en régime permanent à 30 Hz

La Figure 37 illustre les signaux d'accélération bruts mesurés en régime transitoire, correspondant à une phase de variation des conditions vibratoires. Dans ce cas, les signaux présentent des fluctuations d'amplitude plus marquées, traduisant l'évolution dynamique du système. Malgré ces variations, les tendances temporelles restent globalement similaires entre l'instrument TAG et le capteur témoin, indiquant que les deux capteurs captent de manière cohérente les phénomènes vibratoires transitoires.

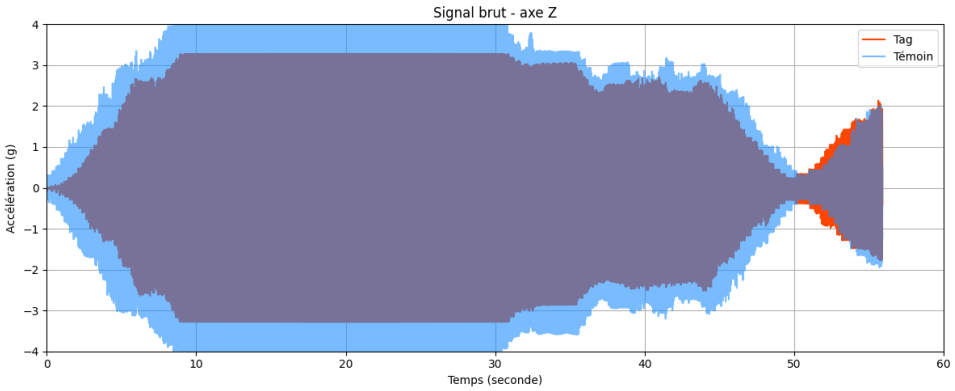


Figure 37 : Signaux vibratoires bruts (RAW) en régime transitoire

L'analyse des signaux RAW montre ainsi que, tant en régime permanent qu'en régime transitoire, l'instrument TAG fournit des mesures d'accélération cohérentes avec celles du capteur témoin. Ces résultats suggèrent que les écarts observés précédemment au niveau des indicateurs RMS (σ) ne sont pas dus à une dégradation significative des données brutes.

4.5.5 Influence de la taille de la fenêtre de calcul N

Une analyse plus approfondie des normes applicables au calcul RMS (σ) met en évidence que la durée d'intégration, et donc la taille de la fenêtre de calcul, constitue un paramètre déterminant pour la validité et la stabilité des indicateurs vibratoires. Bien que les normes ISO ne fixent pas explicitement une valeur unique pour cette durée, elles indiquent que la fenêtre doit être suffisamment longue pour représenter fidèlement les caractéristiques vibratoires du système surveillé et garantir la reproductibilité des résultats.

Dans la pratique industrielle conforme à l'état de l'art, des fenêtres de calcul comprises entre 100 ms et 500 ms sont couramment utilisées pour le calcul des indicateurs vibratoires de type RMS. À titre d'exemple, l'environnement industriel Beckhoff TwinCAT recommande une durée d'intégration de 400 ms, correspondant à 4000 échantillons pour une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz (*Beckhoff Information System - English*, s. d.). De manière cohérente, des fabricants de capteurs tels qu'Analog Devices (*Vibration Sensing Solutions | Analog Devices*, s. d.) et STMicroelectronics (STMicroelectronics, 2014) préconisent également une durée minimale de 100 ms, afin de garantir la stabilité statistique des résultats et la reproductibilité des mesures vibratoires.

Ces éléments normatifs et industriels suggèrent que l'utilisation d'une fenêtre de calcul trop courte peut conduire à des indicateurs sensibles aux fluctuations instantanées du signal et moins représentatifs de l'état vibratoire global de la machine. Dans ce contexte, la suite de l'analyse s'est attachée à confirmer expérimentalement l'influence de la taille de la fenêtre de calcul sur les indicateurs vibratoires obtenus, et à déterminer une valeur de N adaptée aux exigences normatives et industrielles. Cette

démarche est rendue possible par les capacités de l'instrument TAG, dont l'algorithme embarqué permet de faire varier la taille de la fenêtre jusqu'à N=800. Les sections suivantes présentent ainsi une analyse comparative des résultats obtenus pour différentes valeurs de N, dans le but d'identifier un compromis optimal entre stabilité du signal, représentativité physique et contraintes d'implémentation embarquée.

4.5.6 Analyse de l'influence de la taille de la fenêtre de calcul N

L'influence de la taille de la fenêtre de calcul N sur les indicateurs vibratoires a été analysée en considérant trois situations représentatives : le régime permanent, le régime transitoire et les phases de marche et d'arrêt. Pour cette étude, plusieurs valeurs de N ont été testées (N=10, 15, 20, 50, 100) afin d'évaluer l'impact de ce paramètre sur la stabilité et la dynamique de l'écart type (σ) calculé à partir des signaux d'accélération. Les résultats sont présentés séparément pour chacun de ces cas.

- Influence de N en régime permanent

Les résultats obtenus ont été interprétés en lien avec l'analyse des signaux d'accélération bruts présentée à la Figure 36 pour le même essai en régime permanent à 30 Hz. Le signal brut montre une excitation sinusoïdale stable, sans saturation ni bruit excessif, confirmant un régime de fonctionnement maîtrisé.

La Figure 38 présente l'évolution de l'écart type mobile calculé par l'instrument TAG et le capteur témoin pour différentes valeurs de la fenêtre N. Pour les faibles valeurs de N (N=10, 15, 20), l'indicateur RMS (σ) présente des fluctuations importantes, malgré la stabilité du signal d'origine. Ce comportement s'explique par le fait que la fenêtre de calcul est plus courte qu'un cycle vibratoire complet, rendant l'écart type fortement dépendant de la phase instantanée du signal sinusoïdal.

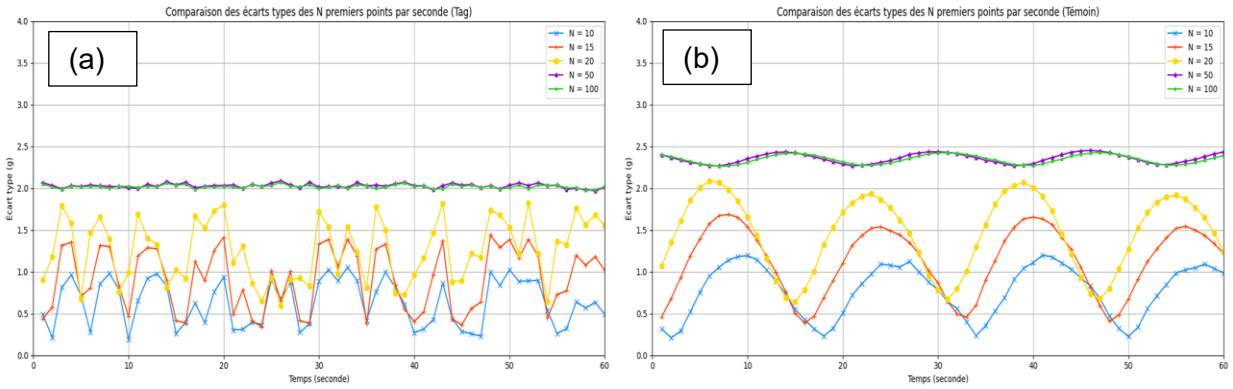


Figure 38 : Comparaison de l'écart type mobile en régime permanent à 30 Hz pour différentes valeurs de N ; (a) Instrument TAG, (b) Capteur témoin

À partir de N=50, l'écart type devient nettement plus stable et converge vers une valeur quasi constante, reflétant de manière plus fidèle l'intensité réelle des vibrations. L'augmentation de N à 100 conduit à un lissage supplémentaire, sans amélioration significative de la stabilité par rapport à N=50.

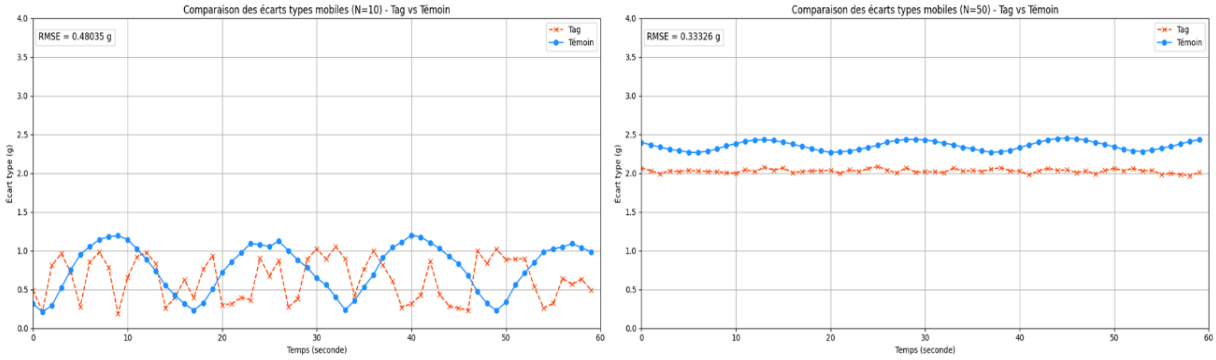


Figure 39 : Comparaison de l'écart type mobile entre l'instrument TAG et le capteur témoin pour deux tailles de fenêtre représentatives (N = 10 et N = 50)

La comparaison entre les écarts types calculés par l'instrument TAG et le capteur témoin pour différentes valeurs de N est illustrée à la Figure 39. Pour N=10, des écarts notables subsistent entre les deux capteurs, traduisant une faible robustesse de l'indicateur RMS (σ). En revanche, pour N=50, les deux courbes présentent une très bonne concordance temporelle, confirmant l'amélioration de la cohérence inter-capteurs lorsque la taille de la fenêtre augmente.

Le Tableau 9 présente les valeurs du RMSE ainsi que le comportement observé pour différentes tailles de fenêtre N. Les résultats montrent que les fenêtres courtes (N=10, 15) conduisent à un indicateur RMS (σ) instable et fortement dépendant de la phase du signal. Lorsque N augmente, le RMSE diminue progressivement et l'indicateur se stabilise. À partir de N=50, le RMSE atteint une valeur minimale d'environ 0,33 g et reste inchangé pour N=100, indiquant qu'une augmentation supplémentaire de la taille de la fenêtre n'apporte pas d'amélioration significative de la concordance entre l'instrument TAG et le capteur témoin.

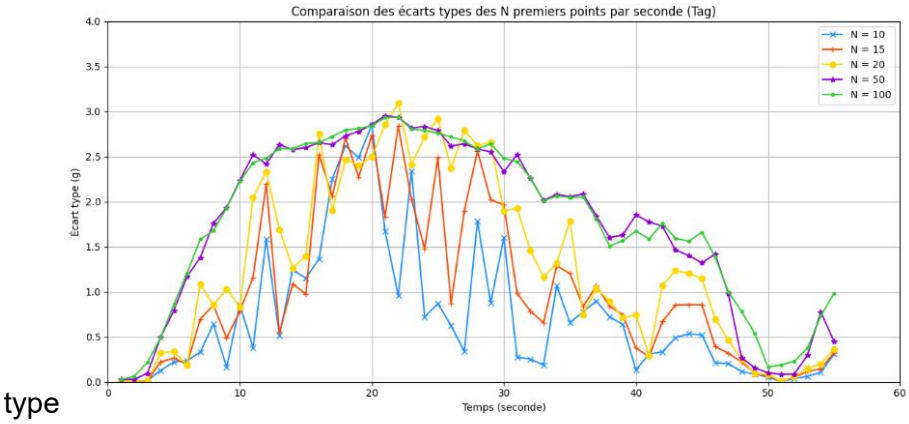
Tableau 9 : Influence de la taille de la fenêtre N sur le RMSE en régime permanent

N	RMSE (g)	Comportement observé
10	0,48	Forte instabilité, forte dépendance à la phase du signal
15	0,62	Variabilité encore marquée de l'indicateur RMS (σ)
20	0,53	Début de lissage, stabilité partielle
50	0,33	Signal stable et représentatif de l'intensité vibratoire
100	0,33	Pas de changement

Ces résultats confirment qu'en régime permanent, une taille de fenêtre N=50 constitue un compromis optimal entre stabilité de l'indicateur RMS (σ) et réactivité de la mesure vibratoire.

- Influence de N en régime transitoire

L'influence de la taille de la fenêtre N a été analysée en régime transitoire en se référant aux signaux d'accélération bruts présentés à la Figure 37. La Figure 40 présente l'évolution de l'écart type mobile calculé par l'instrument TAG pour différentes valeurs de N.



type

Figure 40 : Influence de la taille de la fenêtre N sur l'écart type mobile de l'instrument TAG en régime transitoire

Les résultats montrent que, pour les faibles valeurs de N, l'indicateur RMS (σ) présente des fluctuations importantes, tandis que l'augmentation de N conduit à un signal progressivement plus lisse et plus stable. Les fluctuations s'atténuent considérablement à partir de N = 50.

La comparaison entre l'instrument TAG et le capteur témoin pour une valeur représentative de la fenêtre est illustrée à la Figure 41, correspondant à N=50. Pour cette valeur, l'indicateur RMS (σ) permet de distinguer clairement la forme temporelle du signal brut, tout en conservant une bonne réactivité vis-à-vis des variations transitoires.

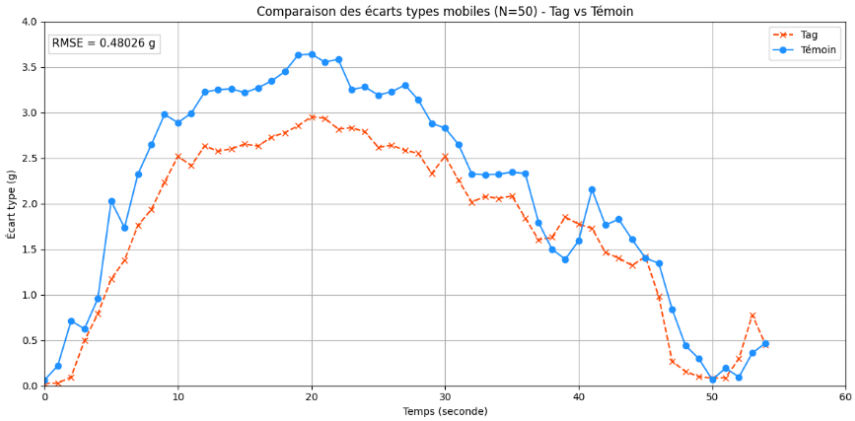


Figure 41 : Comparaison des signaux RMS (σ) de l'instrument TAG et du capteur témoin en régime transitoire pour N = 50

Enfin, l'évolution du RMSE en fonction de la taille de la fenêtre N est présentée à la Figure 42. Les résultats mettent en évidence une diminution du RMSE lorsque N augmente, avec une stabilisation observée à partir de N=50, confirmant la pertinence de cette valeur pour l'analyse vibratoire en régime transitoire.

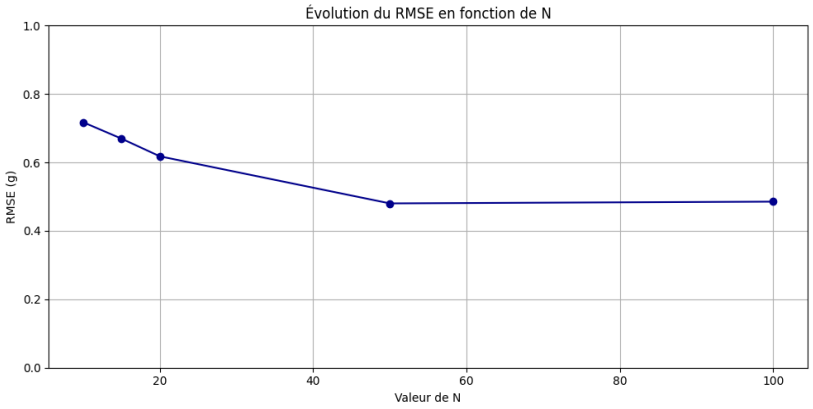


Figure 42 : Évolution du RMSE en fonction de la taille de la fenêtre N

- Influence de N en phase de marche et d'arrêt

Les phases de marche et d'arrêt ont été analysées afin d'évaluer l'impact de la taille de la fenêtre N sur la capacité de l'indicateur RMS (σ) à représenter correctement les transitions rapides du fonctionnement de la machine. Le signal d'accélération brut

correspondant à cette phase est présenté à la Figure 43, et met en évidence une variation nette de l'amplitude vibratoire entre les états d'arrêt et de fonctionnement.

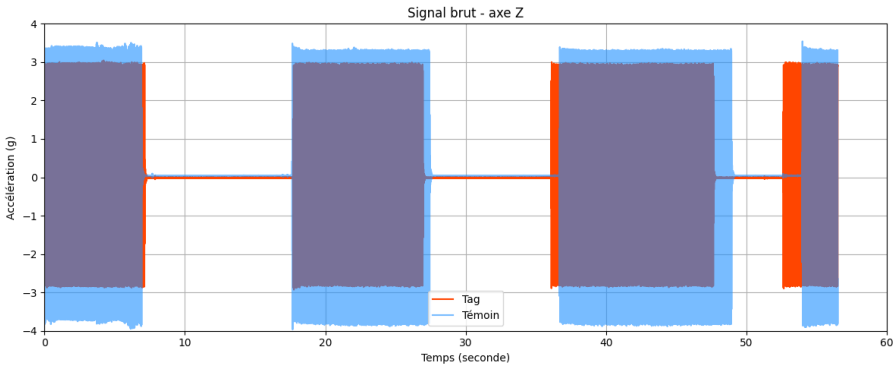


Figure 43 : Signal d'accélération brut (RAW) mesuré au cours de phases alternées de marche et d'arrêt

L'évolution de l'écart type mobile calculé par l'instrument TAG pour différentes valeurs de N est illustrée à la Figure 44. Les résultats montrent que, pour les faibles valeurs de N, l'indicateur RMS (σ) présente des fluctuations importantes lors des transitions, rendant la détection du changement d'état moins lisible. En revanche, à partir de N=50, l'indicateur RMS (σ) fait apparaître un plateau bien défini, décrivant clairement les phases de marche et d'arrêt de la machine. L'augmentation supplémentaire de N n'apporte pas d'amélioration significative de cette représentation.

Ces résultats confirment que, pour les phases de marche/arrêt, une taille de fenêtre N=50 permet d'identifier de manière fiable les changements d'état tout en conservant une bonne lisibilité temporelle.

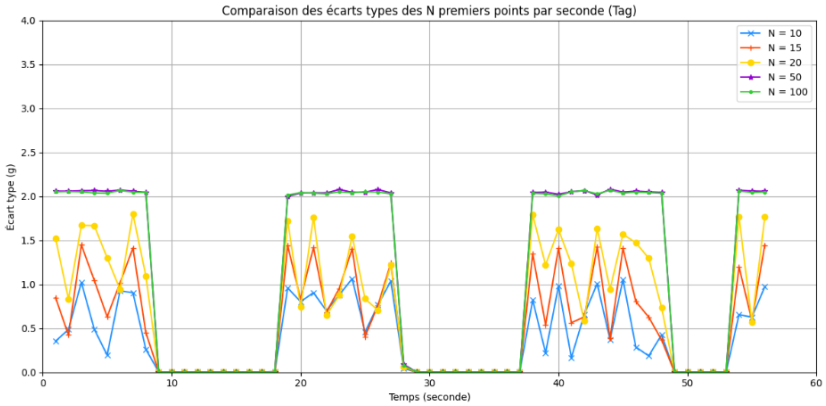


Figure 44 : Influence de la taille de la fenêtre N sur l'écart type mobile de l'instrument TAG lors d'une phase de marche et d'arrêt

L'analyse menée en régime permanent, transitoire et lors des phases de marche et d'arrêt montre que la taille de la fenêtre N influence directement la stabilité et la lisibilité de l'indicateur RMS (σ). Les résultats indiquent qu'à partir de N=50, l'indicateur devient stable, représentatif du signal vibratoire et suffisamment réactif aux changements de régime.

Les essais vibratoires ont ensuite été réalisés sur une pompe réelle installée sur le banc d'essai de Technosub, afin d'évaluer les performances de l'instrument TAG dans des conditions de fonctionnement représentatives d'un environnement industriel et de vérifier en conditions réelles la pertinence de la valeur N=50 retenue à partir des essais en laboratoire.

4.6 Validation des mesures de vibrations sur pompe réelle

Cette section présente les résultats des essais vibratoires réalisés sur une pompe réelle, dans le but de valider le comportement de l'instrument TAG en conditions de fonctionnement représentatives d'un environnement industriel. Les essais ont été menés sur une pompe centrifuge Tsurumi LH311W, installée sur le banc d'essai de Technosub. Cette étape permet d'évaluer la pertinence des analyses développées en laboratoire, notamment le choix de la taille de fenêtre N, lorsqu'elles sont appliquées à un système réel.

4.6.1 Conditions des essais sur pompe réelle

Les essais vibratoires sur pompe réelle ont été réalisés dans des conditions contrôlées afin d'évaluer le comportement de l'instrument TAG en situation industrielle. Les paramètres d'acquisition ont été définis de manière à assurer une comparaison fiable et reproductible des mesures. Les conditions retenues sont les suivantes :

- Axes retenus : X et Z
- Type de signal : accélération brute (g)
- Fréquence d'échantillonnage : 1600 Hz
- Durée d'acquisition : 1 minute par essai
- Répétition : chaque essai a été réalisé deux fois afin de vérifier la reproductibilité des mesures

4.6.2 Points de fonctionnement de la pompe

Les essais ont été réalisés sur une pompe centrifuge Tsurumi LH311W, en se basant sur sa courbe de performance afin de sélectionner des points de fonctionnement représentatifs. Trois points distincts ont été retenus, comme illustré à la Figure 45 :

- P1 : point de meilleur rendement (Best Efficiency Point – BEP) de la pompe ;
- P2 : point situé à gauche de P1, correspondant à un débit plus faible et à une hauteur manométrique plus élevée ;
- P3 : point situé à droite de P1, représentant un débit plus important et une hauteur manométrique plus basse.

Ce choix permet d'analyser le comportement vibratoire de la pompe dans différentes conditions hydrauliques, incluant des régimes proches et éloignés du point optimal.

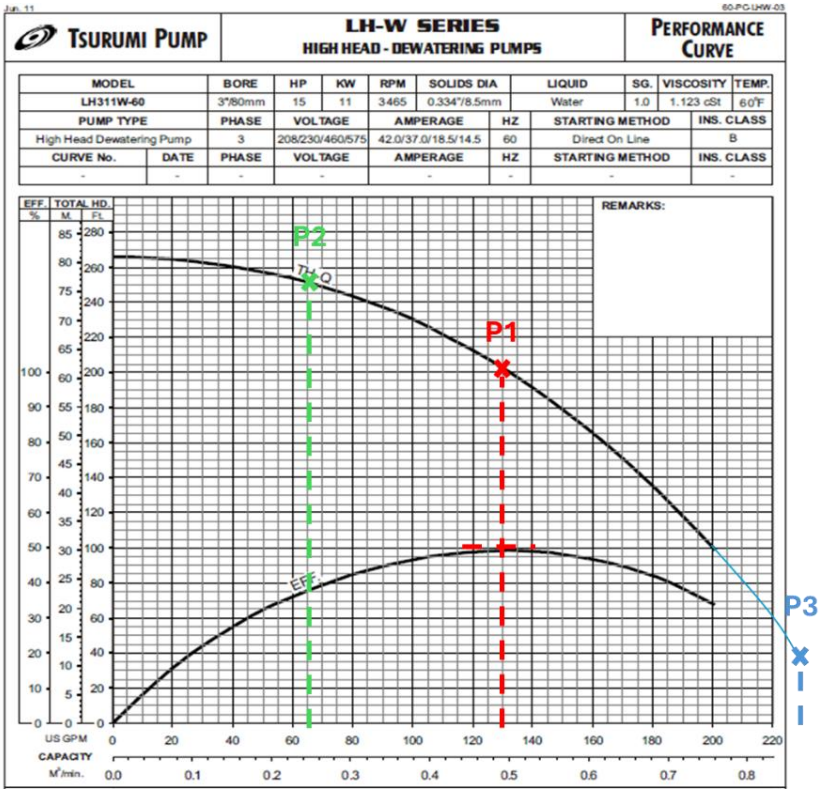


Figure 45 : Courbe de performance de la pompe centrifuge Tsurumi LH311W et points de fonctionnement sélectionnés

4.6.3 Scénarios d'essais réalisés

Pour chacun des points de fonctionnement sélectionnés, plusieurs scénarios d'essais ont été menés afin de couvrir un large éventail de situations opérationnelles :

- Essai en régime permanent.
- Essais durant les phases transitoires, incluant le démarrage et l'arrêt de la pompe.
- Essais pour différents réglages d'ouverture de la valve, compris entre 0 % et 30 %, permettant de moduler le débit.
- Essais réalisés en sens de rotation inverse de la pompe.

Ces configurations permettent d'évaluer la sensibilité de l'instrument TAG à des conditions de fonctionnement variées et potentiellement critiques.

4.6.4 Traitement des données

Le traitement des données issues de l'instrument TAG et du capteur témoin a été réalisé à l'aide d'outils développés sous Python. Le processus global de traitement, depuis l'acquisition des signaux bruts jusqu'au calcul des indicateurs vibratoires, est synthétisé dans le schéma présenté à la Figure 46. Ce schéma illustre les principales étapes communes appliquées aux données des deux capteurs, garantissant une analyse comparative cohérente.

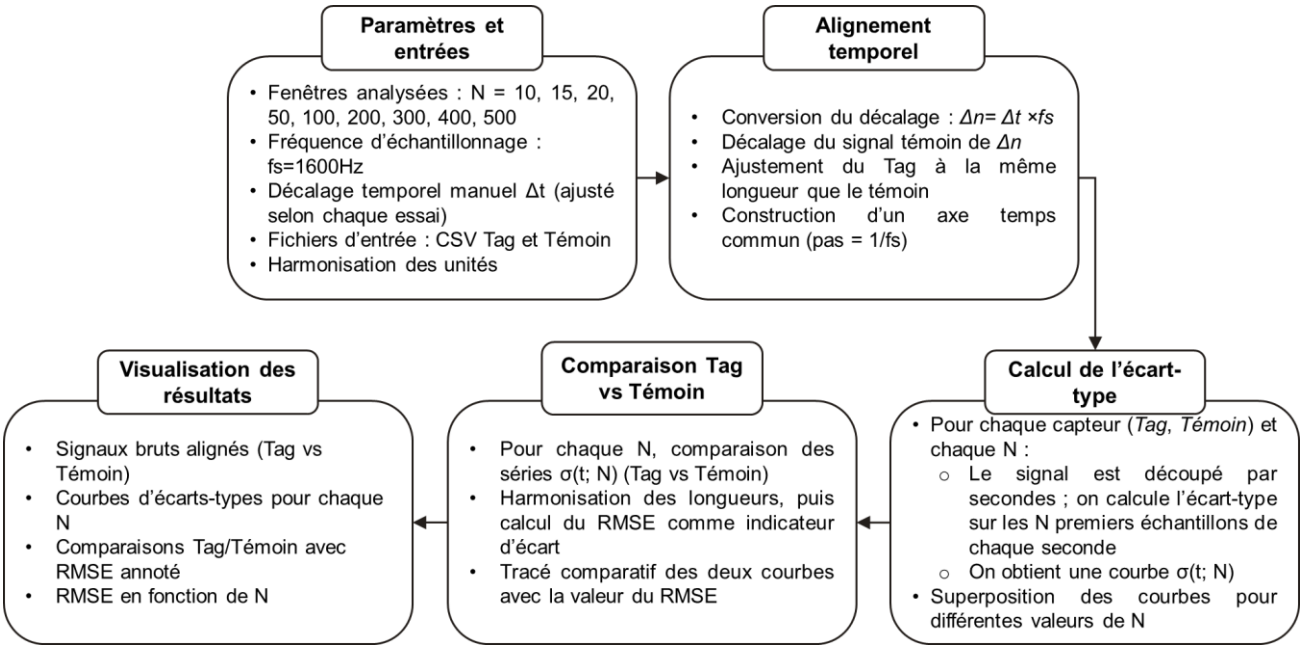


Figure 46 : Schéma du processus de traitement des données vibratoires

4.6.5 Analyse vibratoire en régime permanent

Les essais vibratoires en régime permanent ont été réalisés sur la pompe centrifuge Tsurumi LH311W pour différents points de fonctionnement et plusieurs configurations de test. Afin d'illustrer les résultats obtenus, cette section présente un essai représentatif, réalisé au point de fonctionnement P3, correspondant à un débit élevé et une hauteur manométrique plus faible, et analysé sur l'axe X, qui correspond à la direction principale des sollicitations vibratoires. Pour chaque essai, les mesures de l'instrument TAG ont été comparées à celles du capteur témoin, les deux systèmes étant acquis simultanément.

La Figure 47 présente les signaux d'accélération bruts mesurés sur l'axe X par l'instrument TAG et le capteur témoin. Les deux signaux montrent un comportement régulier, avec des amplitudes comparables et sans saturation, traduisant un fonctionnement mécanique stable de la pompe en régime permanent, même en dehors du point de meilleur rendement.

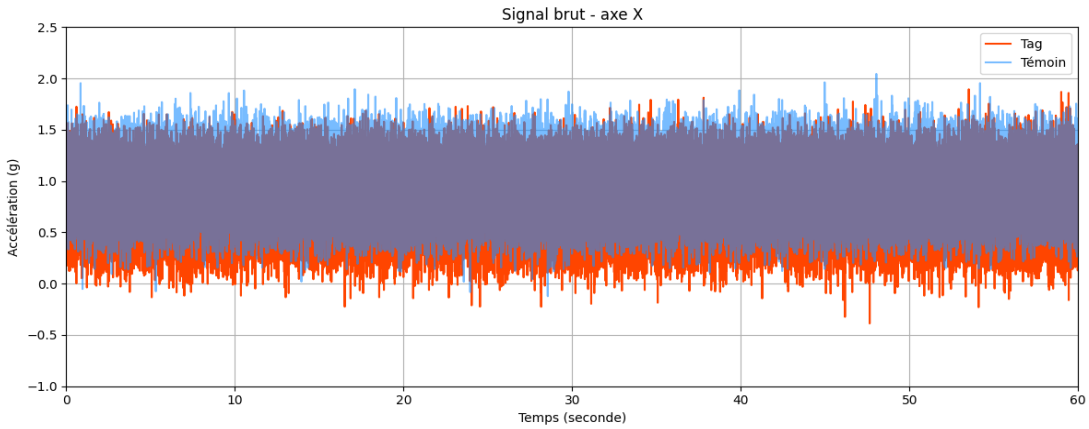


Figure 47 : Signaux d'accélération bruts mesurés sur l'axe X au point de fonctionnement P3

La Figure 48 illustre la comparaison des indicateurs RMS (σ) calculés avec deux tailles de fenêtre distinctes, N=10 et N=100, pour l'instrument TAG et le capteur témoin. Pour N=10, l'indicateur RMS (σ) présente des fluctuations importantes, rendant la lecture du régime permanent moins lisible. En revanche, pour N=100, l'indicateur RMS (σ) met en évidence un plateau stable et bien défini, caractéristique d'un régime permanent, avec moins de fluctuations et une meilleure cohérence entre les deux capteurs.

Ces résultats montrent que l'augmentation de la taille de la fenêtre améliore significativement la stabilité de l'indicateur RMS (σ) en conditions réelles. En particulier, la valeur N=100 permet une représentation plus robuste du régime permanent au point de fonctionnement P3, confirmant la pertinence d'utiliser des fenêtres de calcul plus larges pour l'analyse vibratoire sur pompe réelle.

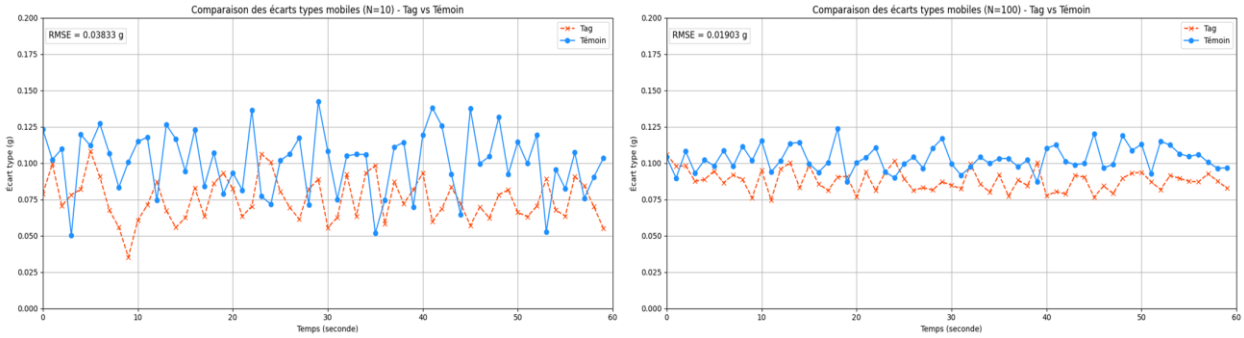


Figure 48 : Comparaison des indicateurs RMS (σ) pour N=10 et N=100

4.6.6 Analyse vibratoire en phase de marche et d'arrêt

Un essai de marche et d'arrêt a été réalisé sur l'axe Z afin d'évaluer la capacité de l'instrument TAG à suivre la dynamique vibratoire lors des transitions de fonctionnement de la pompe. Le signal d'accélération brut correspondant est présenté à la Figure 49.

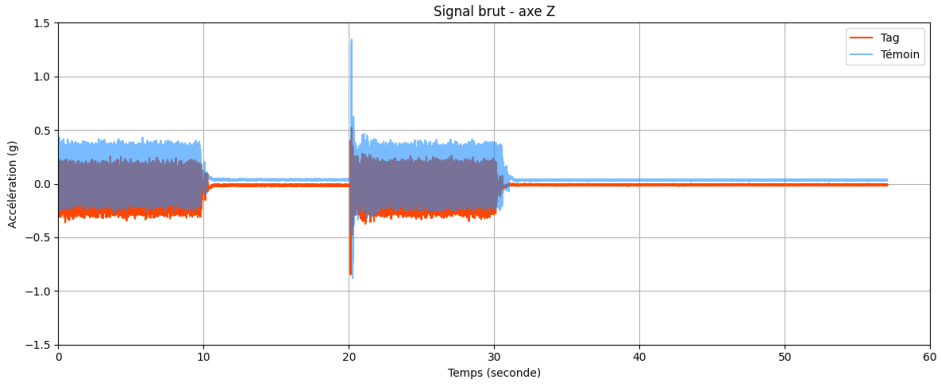


Figure 49 : Signal d'accélération brut en phase de marche/arrêt

L'évolution des indicateurs RMS (σ) pour deux tailles de fenêtre représentatives, N=10 et N=400, est illustrée à la Figure 50. Les résultats montrent que l'instrument TAG suit correctement la dynamique du capteur témoin en phase de marche et d'arrêt, avec un faible écart et une bonne stabilité des mesures. À partir de $N \geq 400$, les signaux RMS (σ) issus des deux capteurs présentent des plateaux parfaitement alignés, traduisant une stabilisation du calcul de l'écart type.

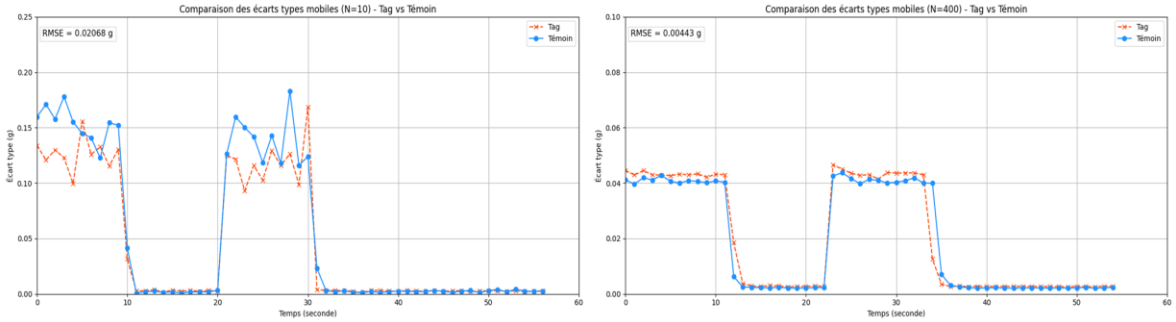


Figure 50 : Indicateurs RMS (σ) en phase de marche/arrêt pour N=10 et N=400

4.6.7 Analyse vibratoire en sens de rotation inverse

Un dernier essai a été réalisé en sens de rotation inverse de la pompe, avec une ouverture de la valve de 0% à 30%, afin d'évaluer le comportement de l'instrument TAG dans des conditions de fonctionnement non nominales. L'analyse a été menée sur l'axe Z.

La Figure 51 présente le signal d'accélération brut mesuré sur l'axe Z pour cette configuration. Le signal met en évidence une évolution progressive du niveau vibratoire, cohérente avec l'augmentation du débit induite par l'ouverture de la valve, malgré le fonctionnement en sens de rotation inverse.

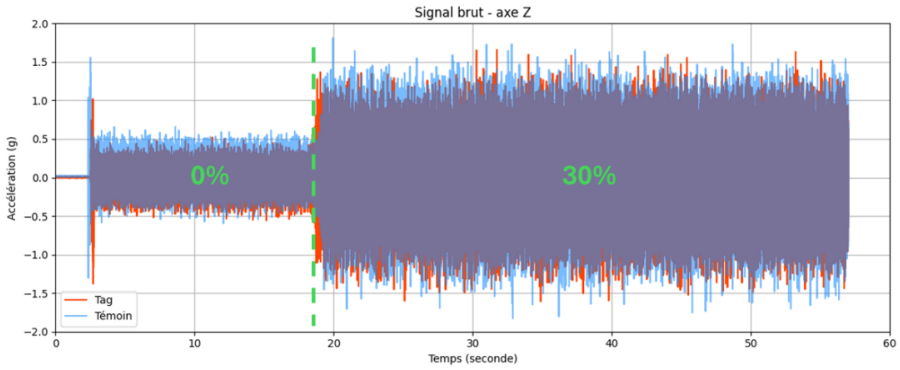


Figure 51 : Signal d'accélération brut en sens de rotation inverse avec ouverture progressive de la valve

Le bruit observé en début d'acquisition correspond au régime transitoire associé au démarrage de la pompe.

L'évolution des indicateurs RMS (σ) pour deux tailles de fenêtre représentatives, N=10 et N=400, est illustrée à la Figure 52. Les résultats montrent que, pour N=10, l'indicateur RMS (σ) présente des fluctuations importantes, rendant l'interprétation du comportement vibratoire moins lisible. En revanche, pour N ≥ 400, les signaux RMS (σ) issus de l'instrument TAG et du capteur témoin présentent des plateaux stables et bien alignés, traduisant une stabilisation du calcul de l'écart type.

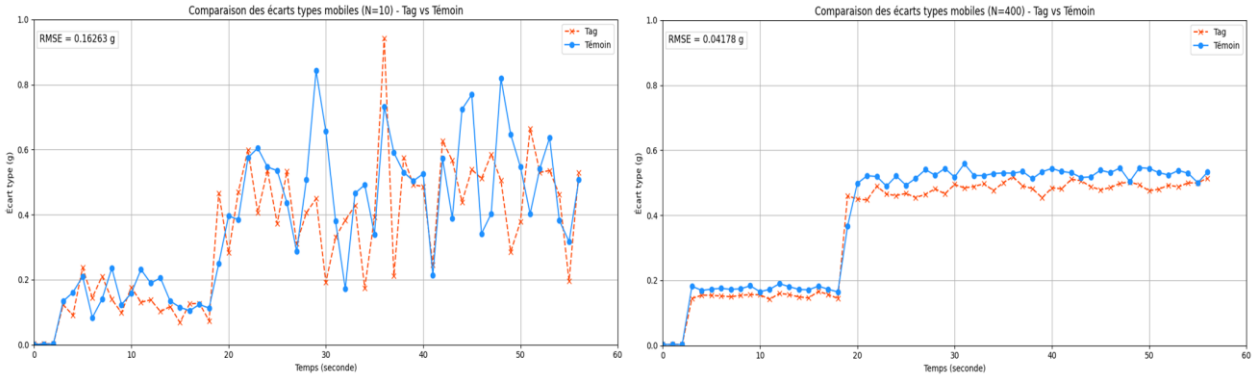


Figure 52 : Comparaison des indicateurs RMS (σ) pour N=10 et N=400

Ces résultats confirment que, même dans des conditions de fonctionnement atypiques telles que le sens de rotation inverse et la modulation progressive du débit, une taille de fenêtre N ≥ 400 permet d'obtenir un indicateur vibratoire stable et représentatif, assurant une bonne concordance entre l'instrument TAG et le capteur témoin.

Pour l'analyse vibratoire, une taille de fenêtre N=50 s'est avérée suffisante lors des essais en laboratoire, offrant un compromis satisfaisant entre la réactivité de l'indicateur RMS (σ) et sa stabilité. En revanche, les essais réalisés sur le banc d'essai de Technosub, caractérisés par des conditions de fonctionnement plus dynamiques, ont montré la nécessité d'utiliser des valeurs de N ≥ 400 afin d'assurer une convergence stable et fiable du calcul de l'écart type.

4.7 Résultats des essais combinés

Des essais combinés ont été réalisés afin d'évaluer le comportement de l'instrument TAG lorsque plusieurs paramètres environnementaux varient simultanément. Ces essais ont porté sur la pression, la température et l'humidité, dont les résultats, comparés à ceux des capteurs témoins, sont présentés à la Figure 53. Les vibrations étaient également présentes durant ces essais ; toutefois, les données vibratoires n'ont pas pu être exploitées en raison d'un problème technique affectant l'acquisition du signal de vibration au moment de la réalisation des tests.

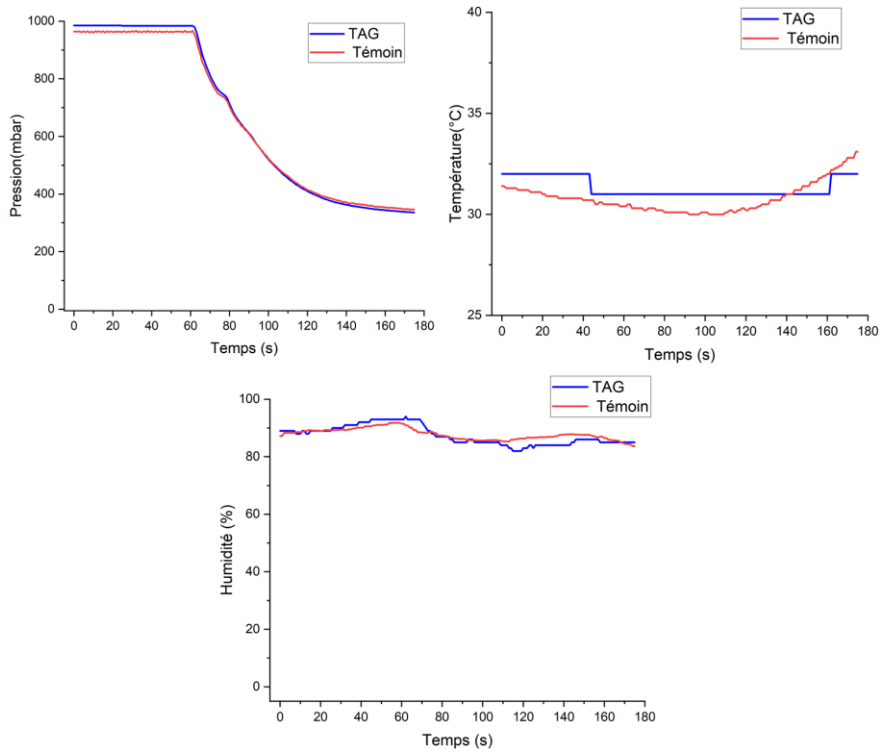


Figure 53 : Comparaison des mesures de pression, température et humidité de l'instrument TAG et des capteurs témoins lors des essais combinés

Les résultats montrent que l'instrument TAG a maintenu une performance cohérente et précise dans cet environnement de test complexe, répondant efficacement aux variations des quatre paramètres. Cette précision, observée pour chaque paramètre, confirme la capacité de l'instrument TAG à fournir des mesures fiables même en conditions de stress multiparamétriques, attestant de son adaptabilité et de sa

robustesse pour des applications exigeant une surveillance simultanée de plusieurs paramètres environnementaux.

4.8 Problèmes rencontrés lors de la validation de l'instrument TAG

Au cours des différentes phases de validation de l'instrument TAG, plusieurs difficultés techniques ont été identifiées. Bien que ces limitations n'aient pas remis en cause les résultats exploitables présentés précédemment, elles constituent des éléments importants à considérer dans le cadre du développement et de l'industrialisation du dispositif. Il est toutefois important de souligner que ces problèmes ont été progressivement corrigés au fur et à mesure des mises à jour matérielles et logicielles du capteur.

Un premier problème concernait des défauts de connexion, observés principalement lors de l'utilisation du capteur en mode Bluetooth. Ces difficultés, qui affectaient l'acquisition de l'ensemble des paramètres mesurés, pouvaient entraîner des pertes de connexion fréquentes ainsi que la fermeture inattendue de l'application TAG, sans sauvegarde automatique des données ni conservation d'un historique des mesures. Ces limitations ont été partiellement puis totalement corrigées grâce à des améliorations successives du firmware et de la gestion de la communication.

Un second point critique portait sur le manque partiel de données lors des enregistrements. Des lacunes ont été observées aussi bien lors d'essais de courte durée que lors d'enregistrements prolongés pour tous les paramètres enregistrés, pouvant conduire à des durées effectives d'acquisition inférieures à celles programmées. À titre d'exemple, lors d'un test d'une durée d'acquisition de 5 minutes, avec une fréquence d'enregistrement d'une donnée par seconde, 300 échantillons étaient attendus. Toutefois, 14 données ont été perdues au cours de l'enregistrement. L'analyse de ces pertes, illustrée à la Figure 54, montre que les données manquantes apparaissent à des intervalles irréguliers, compris entre 21 et 22 secondes, mettant en évidence un problème récurrent de fiabilité de l'enregistrement, particulièrement visible sur des durées de mesure plus longues. Ce comportement suggère que le processus d'acquisition ou de sauvegarde des données est momentanément

interrompu à intervalles réguliers, entraînant l'absence de certains échantillons, plutôt qu'une perte de données due à un événement isolé ou aléatoire.

2025-01-15 10:08:47	32	21
2025-01-15 10:08:48	31	23
2025-01-15 10:08:50	17	25
2025-01-15 10:08:51	28	25
2025-01-15 10:12:01	26	21
2025-01-15 10:12:02	29	25
2025-01-15 10:12:04	23	21
2025-01-15 10:12:05	31	30

```
INFO: Period / Duration: 1 (s) / 5.0 (min)
INFO: Data to sample: 300.0
Running...  95% (286 of 300.0) |############
NFO: Measurement test is finished
INFO: Creating data file...
INFO: CSV successfuly generated.

INFO: Creating troubleshoot file...
INFO: Troubleshoot CSV successfuly generated
```

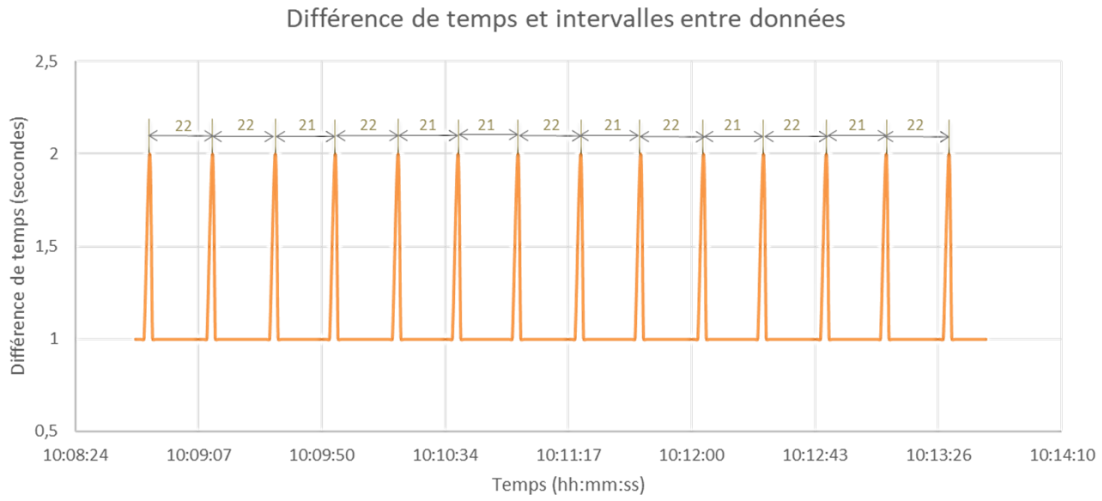


Figure 54 : Exemple de lacunes dans les données enregistrées par l'instrument TAG

Enfin, lors de certains essais réalisés sur la pompe réelle, des cas peu fréquents ont été identifiés où l'instrument TAG n'a enregistré aucun signal, les données restant nulles sur toute la durée de l'essai. Ce phénomène était probablement lié à un problème de configuration logicielle ou de réglage du gain, empêchant l'acquisition effective du signal vibratoire.

À titre d'exemple, un essai réalisé au point d'efficacité maximale de la pompe (P1) et analysé sur l'axe Z a mis en évidence ce dysfonctionnement. La Figure 55 présente le signal d'accélération brut mesuré par le capteur témoin, comparé au signal enregistré par l'instrument TAG, qui apparaît nul sur l'ensemble de la durée de l'essai.

Cette comparaison confirme l'absence d'enregistrement du signal par l'instrument TAG dans cette configuration spécifique.

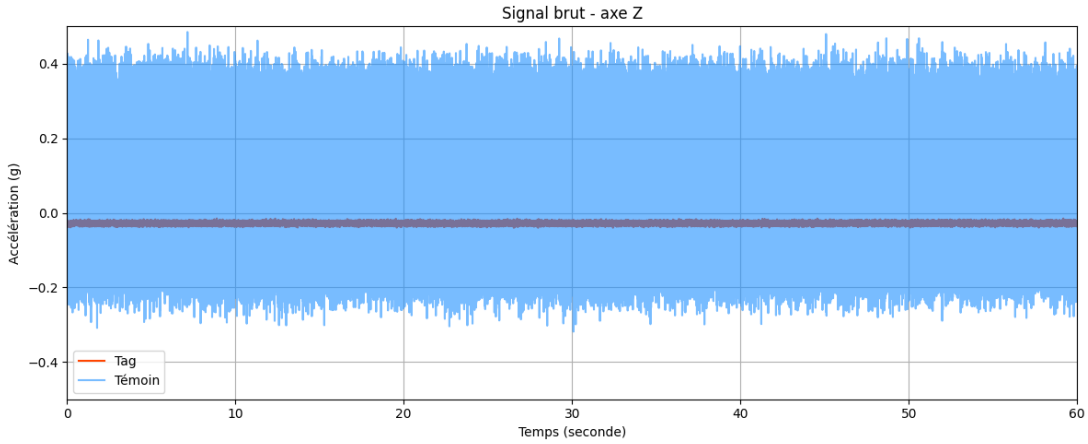


Figure 55 : Comparaison des signaux d'accélération bruts au point de fonctionnement P1

4.9 Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre ont permis de valider les performances de l'instrument TAG pour la mesure de la pression, de la température, de l'humidité et des vibrations, à la fois en conditions contrôlées de laboratoire et lors d'essais sur une pompe réelle. Pour la pression, les essais réalisés ont montré une très forte concordance entre l'instrument TAG et les capteurs témoins, confirmée par des coefficients de corrélation élevés et par les tests statistiques, indiquant l'absence de différence significative entre les mesures. Concernant la température, l'instrument TAG a démontré une bonne capacité de suivi des variations thermiques, malgré une précision réduite observée dans la plage des températures négatives, principalement liée aux limites intrinsèques du capteur. Pour l'humidité, les résultats obtenus ont également confirmé la cohérence des mesures par rapport au capteur de référence, avec des tests statistiques validant la similarité des distributions mesurées.

L'analyse des vibrations, réalisée à partir des signaux RMS (σ) et des signaux bruts, a mis en évidence l'influence importante de la taille de la fenêtre de calcul sur la stabilité des indicateurs vibratoires. Les essais ont montré que des tailles de fenêtre

plus faibles (N=50) étaient suffisantes en laboratoire, tandis que des valeurs plus élevées (N ≥ 400) étaient nécessaires en conditions dynamiques afin de réduire les fluctuations et d'obtenir une représentation stable du régime permanent. Enfin, malgré certaines difficultés techniques rencontrées durant la phase de validation, les améliorations apportées au système ont permis de corriger progressivement ces limitations. L'ensemble des résultats confirme ainsi le potentiel de l'instrument TAG pour la surveillance multiparamètres et le suivi de l'état des équipements de pompage.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Ce travail a permis de réaliser une validation expérimentale approfondie du capteur multimesures TAG pour la surveillance des systèmes de pompage. Les essais menés en laboratoire ont montré une bonne concordance entre les mesures de l'instrument TAG et celles des capteurs témoins pour les paramètres de pression, de température et d'humidité, confirmant la fiabilité du capteur dans des conditions contrôlées. Les essais combinés ont également démontré la capacité du capteur à maintenir des performances cohérentes lorsque plusieurs paramètres environnementaux varient simultanément. Les analyses réalisées à partir des indicateurs de performance, notamment les coefficients de corrélation élevés, les erreurs relatives faibles ainsi que les tests statistiques validés, ont permis de confirmer quantitativement la précision et la stabilité des mesures pour ces trois paramètres.

L'analyse vibratoire a constitué un axe central de ce mémoire. Les résultats ont mis en évidence l'importance du choix des paramètres de traitement, en particulier de la taille de la fenêtre utilisée pour le calcul des indicateurs RMS (σ). Une valeur de N=50 s'est révélée suffisante pour les essais en laboratoire, offrant un compromis satisfaisant entre réactivité et stabilité, tandis que des conditions plus dynamiques rencontrées sur le banc d'essai industriel ont nécessité des valeurs de $N \geq 400$ pour garantir une convergence stable des indicateurs. Les essais réalisés sur une pompe réelle ont confirmé la capacité de l'instrument TAG à suivre fidèlement le comportement vibratoire mesuré par le capteur témoin dans différentes conditions de fonctionnement. Par ailleurs, l'analyse des signaux bruts s'est révélée essentielle pour compléter l'interprétation des indicateurs RMS (σ), notamment pour l'identification des comportements en régime transitoire et en régime permanent. Elle a permis de mieux caractériser les phases de démarrage et d'arrêt de la pompe, ainsi que la transition vers un fonctionnement stabilisé, apportant des informations complémentaires sur la dynamique réelle du système.

Certaines difficultés techniques, telles que des pertes de données, des problèmes de connexion ou des défauts ponctuels d'acquisition, ont été identifiées au cours de la

validation. Ces limitations ont toutefois été progressivement corrigées grâce à des mises à jour successives du capteur, contribuant à l'amélioration de sa robustesse globale.

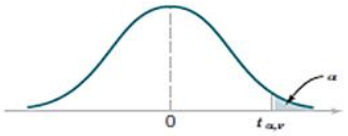
Les résultats obtenus démontrent le potentiel de l'instrument TAG pour la surveillance multiparamètres des systèmes de pompage. Toutefois, plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées afin d'accroître ses performances et d'élargir son domaine d'application. Une première perspective concerne l'amélioration de la robustesse du système de communication et de l'acquisition des données afin de garantir une fiabilité accrue lors des campagnes de mesure de longue durée. L'optimisation de la gestion de la mémoire embarquée et des mécanismes de synchronisation temporelle constitue également un axe de développement important pour faciliter l'exploitation des données et les comparaisons avec des systèmes de référence.

Par ailleurs, des travaux complémentaires pourraient être réalisés afin d'étendre la validation du système à un plus grand nombre d'équipements et de conditions d'exploitation, notamment dans des environnements industriels plus variés et soumis à des contraintes opérationnelles plus sévères. Une telle démarche permettrait d'évaluer la robustesse du dispositif face à différentes configurations de fonctionnement et à divers types de sollicitations mécaniques et environnementales.

L'exploitation avancée des données constitue également une perspective prometteuse. L'intégration d'algorithmes de diagnostic et de pronostic basés sur l'analyse des données acquises pourrait permettre la détection précoce des anomalies et l'estimation de l'état de santé des équipements. Dans cette optique, l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique pourrait contribuer à améliorer les capacités de surveillance et à soutenir la mise en œuvre de stratégies de maintenance prédictive.

Enfin, l'intégration du système dans une architecture industrielle connectée, permettant la transmission, le stockage et l'analyse centralisée des données en temps réel, représenterait une étape importante vers le déploiement à grande échelle de solutions de surveillance intelligentes pour les systèmes de pompage.

ANNEXE A – TABLE DE LA LOI DE STUDENT



Percentage Points $t_{\alpha,\nu}$ of the t Distribution

ν \ α	.40	.25	.10	.05	.025	.01	.005	.0025	.001	.0005
1	.325	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	127.32	318.31	636.62
2	.289	.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.089	23.326	31.598
3	.277	.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.213	12.924
4	.271	.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	.267	.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	.265	.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	.263	.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	.262	.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	.261	.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	.260	.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	.260	.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	.259	.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	.259	.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	.258	.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	.258	.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	.258	.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	.257	.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	.257	.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.610	3.922
19	.257	.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	.257	.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	.257	.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	.256	.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	.256	.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.104	3.485	3.767
24	.256	.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	.256	.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	.256	.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	.256	.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	.256	.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	.256	.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	.256	.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
40	.255	.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
60	.254	.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460
120	.254	.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	2.860	3.160	3.373
∞	.253	.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	2.807	3.090	3.291

ν = degrees of freedom.

Source : (Douglas C. Montgomery & George C. Runger, 2018)

ANNEXE B – TABLE DU TEST U DE MANN-WHITNEY

n_2	α	n_1																	
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3	.05	--	0	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8
	.01	--	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	2	2	2	3	3
4	.05	--	0	1	2	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	11	12	13	14
	.01	--	--	0	0	0	1	1	2	2	3	3	4	5	5	6	6	7	8
5	.05	0	1	2	3	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	17	18	19	20
	.01	--	--	0	1	1	2	3	4	5	6	7	7	8	9	10	11	12	13
6	.05	1	2	3	5	6	8	10	11	13	14	16	17	19	21	22	24	25	27
	.01	--	0	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	15	16	17	18
7	.05	1	3	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
	.01	--	0	1	3	4	6	7	9	10	12	13	15	16	18	19	21	22	24
8	.05	2	4	6	8	10	13	15	17	19	22	24	26	29	31	34	36	38	41
	.01	--	1	2	4	6	7	9	11	13	15	17	18	20	22	24	26	28	30
9	.05	2	4	7	10	12	15	17	20	23	26	28	31	34	37	39	42	45	48
	.01	0	1	3	5	7	9	11	13	16	18	20	22	24	27	29	31	33	36
10	.05	3	5	8	11	14	17	20	23	26	29	33	36	39	42	45	48	52	55
	.01	0	2	4	6	9	11	13	16	18	21	24	26	29	31	34	37	39	42
11	.05	3	6	9	13	16	19	23	26	30	33	37	40	44	47	51	55	58	62
	.01	0	2	5	7	10	13	16	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
12	.05	4	7	11	14	18	22	26	29	33	37	41	45	49	53	57	61	65	69
	.01	1	3	6	9	12	15	18	21	24	27	31	34	37	41	44	47	51	54
13	.05	4	8	12	16	20	24	28	33	37	41	45	50	54	59	63	67	72	76
	.01	1	3	7	10	13	17	20	24	27	31	34	38	42	45	49	53	56	60
14	.05	5	9	13	17	22	26	31	36	40	45	50	55	59	64	67	74	78	83
	.01	1	4	7	11	15	18	22	26	30	34	38	42	46	50	54	58	63	67
15	.05	5	10	14	19	24	29	34	39	44	49	54	59	64	70	75	80	85	90
	.01	2	5	8	12	16	20	24	29	33	37	42	46	51	55	60	64	69	73
16	.05	6	11	15	21	26	31	37	42	47	53	59	64	70	75	81	86	92	98
	.01	2	5	9	13	18	22	27	31	36	41	45	50	55	60	65	70	74	79
17	.05	6	11	17	22	28	34	39	45	51	57	63	67	75	81	87	93	99	105
	.01	2	6	10	15	19	24	29	34	39	44	49	54	60	65	70	75	81	86
18	.05	7	12	18	24	30	36	42	48	55	61	67	74	80	86	93	99	106	112
	.01	2	6	11	16	21	26	31	37	42	47	53	58	64	70	75	81	87	92
19	.05	7	13	19	25	32	38	45	52	58	65	72	78	85	92	99	106	113	119
	.01	3	7	12	17	22	28	33	39	45	51	56	63	69	74	81	87	93	99
20	.05	8	14	20	27	34	41	48	55	62	69	76	83	90	98	105	112	119	127
	.01	3	8	13	18	24	30	36	42	48	54	60	67	73	79	86	92	99	105

Source : (Lee, s. d.)

BIBLIOGRAPHIE

A. Bsata,. (1994). *Instrumentation et automation dans le contrôle des procédés*. Sainte-Foy, Québec : Éditions Le Griffon d'argile, 1994.

Acquérir l'information—La mesure par un capteur. (s. d.). myMaxicours. Consulté 10 février 2026, à l'adresse https://www.maxicours.com/se/cours/acquerir-l-information---la-mesure-par-un-capteur/

Alignment of Pumps. (s. d.). Consulté 9 juin 2024, à l'adresse https://www.ksb.com/en-ca/software-and-know-how/know-how/technical-articles/alignment-of-pumps

Al-Obaidi, A. (2020). Experimental Comparative Investigations to Evaluate Cavitation Conditions within a Centrifugal Pump Based on Vibration and Acoustic Analyses Techniques. *Archives of Acoustics*, *45*, 541-556. https://doi.org/10.24425/aoa.2020.134070

Al-Obaidi, A. R., & Towsyfyan, H. (2019). An Experimental Study on Vibration Signatures for Detecting Incipient Cavitation in Centrifugal Pumps Based on Envelope Spectrum Analysis. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, *12*(6), 2057-2067. https://doi.org/10.29252/jafm.12.06.29901

B. Myhre, S. Petersen, & R. Ugarelli. (s. d.). Using Wireless Vibration Monitoring to Enable Condition-Based Maintenance of Rotating Machinery in the Water and Wastewater Industries. *16th Conference on Water Distribution System Analysis, WDSA 2014*.

Beckhoff Information System—English. (s. d.). Consulté 18 janvier 2026, à l'adresse https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=./content/1033/tf3600_tc3_condition_monitoring/3394471307.html&id=

Buono, D., Siano, D., Frosina, E., & Senatore, A. (2017). Gerotor pump cavitation monitoring and fault diagnosis using vibration analysis through the employment of auto-regressive-moving-average technique. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *71*, 61-82. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.11.005

Chen, L., Wei, L., Wang, Y., Wang, J., & Li, W. (2022). Monitoring and Predictive Maintenance of Centrifugal Pumps Based on Smart Sensors. *Sensors*, *22*(6), Article 6. https://doi.org/10.3390/s22062106

Douglas C. Montgomery & George C. Runger. (2018). *Applied statistics and probability for engineers* (7e éd.). Wiley.

G. Asch and B. Poussery. (2017). *Les capteurs en instrumentation industrielle* (8e éd.). https://www.dunod.com/sciences-techniques/capteurs-en-instrumentation-industrielle-1

Gul, A. (2022, octobre 10). Non-Parametric Tests | Python. *Medium*. https://akibmir.medium.com/non-parametric-tests-python-7bbc06377ac9

He, G. (2017). *Cavitation state recognition of centrifugal pump based features of modified octave bands*.

Hu, Y., Chit Tan, A., Liang, C., & Li, Y. (2021). Failure analysis of fractured motor bolts in high-speed train due to cardan shaft misalignment. *Engineering Failure Analysis*, *122*, 105246. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105246

Organisation internationale de normalisation. (2016). ISO 13373-2:2016- Surveillance et diagnostic d'état des machines - Surveillance des vibrations- Partie 2 : Traitement, analyse et présentation des données vibratoires. https://www.iso.org/standard/68128.html

Organisation internationale de normalisation. (2016). ISO 20816-1:2016 - Vibrations mécaniques - Mesurage et évaluation des vibrations des machines - Partie 1 : Lignes directrices générales. https://www.iso.org/standard/63180.html

Organisation internationale de normalisation. (2022). ISO 20816-3:2022 - Vibrations mécaniques - Mesurage et évaluation des vibrations des machines - Partie 3 : Machines industrielles d'une puissance nominale supérieure à 15 kW et fonctionnant à des vitesses comprises entre 120 r/min et 30 000 r/min. https://www.iso.org/standard/78311.html

Jamadar, I., Bellary, S. A. I., Kanai, R., & Alrobaian, A. (2019). Model-Based Condition Monitoring for the Detection of Failure of a Ball Bearing in a Centrifugal Pump. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, *19*, 1-13. https://doi.org/10.1007/s11668-019-00792-x

Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical*

Systems and Signal Processing, *20*(7), 1483-1510. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012

Jesús Hamilton Ortiz. (2020). *Industry 4.0 Current Status and Future Trends* (2020e éd.). http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.86000

Jones, K., Staveley, C., & Vialla, J.-F. (2014). Condition monitoring of a subsea pump using fibre optic sensing. *23rd International Conference on Optical Fibre Sensors*, *9157*, 1390-1393. https://doi.org/10.1117/12.2059837

Kaempf, D. (2022, octobre 18). Pump Cavitation | Cavitation Definition | How to Avoid Cavitation. *Diener Precision Pumps*. https://dienerprecisionpumps.com/pump-cavitation-and-how-to-avoid-it/

Kan, E., Muratov, A., Yusupov, M., & Ikramov, N. (2021). Calculation of water hammer on the pressure pipeline of modernized irrigation pumping station. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1030*(1), 012127. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012127

Lakal, N., Shehri, A. H., Brashler, K. W., Wankhede, S. P., Morse, J., & Du, X. (2022). Sensing technologies for condition monitoring of oil pump in harsh environment. *Sensors and Actuators A: Physical*, *346*, 113864. https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113864

Laurila, H. (s. d.). *Le phénomène d'hystérésis lors de l'étalonnage en pression : Ce qu'il faut savoir*. https://blog.beamex.com/fr/hysteresis-etalonnage-en-pression

Lee, C. B. et B. (s. d.). *Tableau A1.8 Tableau des valeurs critiques du test U de Mann-Whitney*.

https://ecampusontario.pressbooks.pub/introductionauxmethodesstatistiquesen ingenierie/back-matter/tableau-a1-8-tableau-des-valeurs-critiques-du-test-u-de-mann-whitney/

Li, L., Hua, C., & Xu, X. (2018). Condition monitoring and fault diagnosis of electric submersible pump based on wellhead electrical parameters and production parameters. *Systems Science & Control Engineering*, *6*(3), 253-261. https://doi.org/10.1080/21642583.2018.1548983

Lin, Y., Liang, W., Qiu, Z., Zhang, M., & Lu, W. (2017). A new state evaluation method of oil pump unit based on AHP and FCE. *Journal of Physics: Conference Series*, *842*(1), 012060. https://doi.org/10.1088/1742-6596/842/1/012060

Lomakin, V., & Bibik, O. (2019). Numerical prediction of the gas content effect on the cavitation characteristics of the pump using the simplified Rayleigh-Plesset equation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *492*, 012037. https://doi.org/10.1088/1757-899X/492/1/012037

Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2011). *Applied statistics and probability for engineers* (5th ed). Wiley.

Mouapi, A., Mrad, H., & Parsad, A. (2020). Implementation of a reliability test protocol for a multimeasurement sensor dedicated to industrial applications of the Internet of things. *Measurement*, *152*, 107312. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107312

Mousmoulis, G., Yiakopoulos, C., Aggidis, G., Antoniadis, I., & Anagnostopoulos, I. (2021). Application of Spectral Kurtosis on vibration signals for the detection

of cavitation in centrifugal pumps. *Applied Acoustics*, *182*, 108289. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108289

Myles Hollander, Douglas A. Wolfe, & Eric Chicken. (2013). *Nonparametric Statistical Methods* (3e édition). Wiley. https://www.wiley.com/en-us/Nonparametric+Statistical+Methods%2C+Third+Edition-p-9780470387375

Ponnimbaduge Perera, T. D., Jayakody, D. N. K., Sharma, S. K., Chatzinotas, S., & Li, J. (2018). Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT) : Recent Advances and Future Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *20*(1), 264-302. IEEE Communications Surveys & Tutorials. https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2783901

Popaleny, P., & Peton, N. (2019). *PT09—Submersible pump condition monitoring using motor current signature analyses and vibration analyses comparison*. https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/188557

Puccinelli, D., & Haenggi, M. (2005). Wireless sensor networks : Applications and challenges of ubiquitous sensing. *Circuits and Systems Magazine, IEEE*, *5*, 19-31. https://doi.org/10.1109/MCAS.2005.1507522

Purohit, R., Harshlata, V., & Rajput, P. (2017). Vibration Analysis & Condition Monitoring for Rotating Machines : A Review. *Materials Today: Proceedings, 5th International Conference of Materials Processing and Characterization (ICMPC 2016)*, *4*(2, Part A), 2659-2664. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.140

Ranjbar, A., Abolzafl Suratgar, A., Shiry Ghidary, S., & Milimonfared, J. (2020). Condition Monitoring of an Industrial Oil Pump Using a Learning BasedTechnique. *Sound&Vibration*, *54*(4), 257-267. https://doi.org/10.32604/sv.2020.05055

Rapur, J. S., & Tiwari, R. (2019). Experimental fault diagnosis for known and unseen operating conditions of centrifugal pumps using MSVM and WPT based analyses. *Measurement*, *147*, 106809. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.07.037

Reges, G., Fontana, M., Ribeiro, M., Silva, T., Abreu, O., Reis, R., & Schnitman, L. (2021). Electric submersible pump vibration analysis under several operational conditions for vibration fault differential diagnosis. *Ocean Engineering*, *219*, 108249. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108249

Ruirong, D., & Gan, L. (2021). Design of real-time monitoring system for electric submersible pump based on stm32. *2021 3rd International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing and Intelligent Oil Field (ICMSP)*, 326-329. https://doi.org/10.1109/ICMSP53480.2021.9513371

Secteur—Technosub. (s. d.). https://www.technosub.net/expertise/secteur/

Stan, M., Pana, I., Minescu, M., Ichim, A., & Teodoriu, C. (2018). Centrifugal Pump Monitoring and Determination of Pump Characteristic Curves Using Experimental and Analytical Solutions. *Processes*, *6*(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/pr6020018

STMicroelectronics. (2014). *AN4508 : Parameters and calibration of a low-g 3-axis accelerometer*. https://www.st.com/resource/en/application_note/an4508-parameters-and-calibration-of-a-lowg-3axis-accelerometer-stmicroelectronics.pdf

Tandon, N., & Choudhury, A. (1999). A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International*, *32*(8), 469-480. https://doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00077-8

Tiboni, M., Remino, C., Bussola, R., & Amici, C. (2022). A Review on Vibration-Based Condition Monitoring of Rotating Machinery. *Applied Sciences*, *12*(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/app12030972

Vibration Sensing Solutions | Analog Devices. (s. d.). Consulté 18 janvier 2026, à l'adresse https://www.analog.com/en/solutions/sensor-interfaces/vibration-sensing.html?utm_source=chatgpt.com

Wang, Z., He, W., Du, S., & Yuan, Z. (2021). Study on the Unbalanced Fault Dynamic Characteristics of Eccentric Motorized Spindle considering the Effect of Magnetic Pull. *Shock and Vibration*, *2021*(1), 5536853. https://doi.org/10.1155/2021/5536853

Xu, L. D. (2020). The contribution of systems science to Industry 4.0. *Systems Research and Behavioral Science*, *37*(4), 618-631. https://doi.org/10.1002/sres.2705

Yacouba Sanogo. (2012). *Conception et fabrication de capteurs et de leur technique d'interrogation pour des applications dans les domaines de la santé et de l'environnement* [École normale supérieure de Cachan]. https://theses.hal.science/tel-00825038v1