

Avant L'algorithme, La Mesure Concevoir Une Instrumentation Métrologiquement Fiable Pour La Maintenance Prédictive Des Machines Industrielles

**Professeur Dr. Jean Claude Mukaz Ilunga¹,
Ingénieur Olivier Master et Mulagizi Bashebeka²**

¹Professeur, Maintenance, ISTA / Kinshasa

²Master, Ingénierie Biomédicale, ISTA/Kinshasa

Résumé

La maintenance prédictive contemporaine investit massivement dans l'intelligence artificielle, alors que la chaîne d'acquisition qui produit les données reste souvent traitée comme une infrastructure neutre. Cet article montre que cette hypothèse est techniquement fragile. À partir d'une analyse structurée des chaînes vibratoires, d'émission acoustique et de thermographie infrarouge, il relie le mode de défaillance, la grandeur observée, le chemin de transmission, la réponse fréquentielle, l'échantillonnage et l'incertitude de mesure. Une démarche de sélection multi-critère et un cas numérique de dimensionnement d'une chaîne accélérométrique sont proposés. Le résultat central est double : d'une part, aucune technologie ne couvre seule l'ensemble des défauts ; d'autre part, le montage et les conditions d'installation dominant souvent l'incertitude globale davantage que la résolution du convertisseur. L'apport de l'auteur consiste à formaliser un cadre de « validité métrologique préalable » : avant tout apprentissage automatique, la chaîne doit démontrer qu'elle observe le bon phénomène, dans la bonne bande, avec une incertitude compatible avec le seuil ou la tendance à interpréter. Ce cadre permet de réduire les fausses alertes, d'éviter le surdimensionnement électronique et de rendre les diagnostics comparables dans le temps.

Mots-clés : maintenance prédictive ; instrumentation ; chaîne de mesure ; vibration ; émission acoustique ; thermographie ; incertitude ; métrologie ; capteurs ; diagnostic.

Abstract

Predictive maintenance increasingly concentrates investment on artificial intelligence while treating the acquisition chain as a neutral infrastructure. This article challenges that assumption. Through a structured analysis of vibration, acoustic-emission and infrared-thermography chains, it connects failure modes with the observed quantity, transmission path, frequency response, sampling and measurement uncertainty. A multi-criteria selection approach and a worked accelerometer-chain design are presented. Two findings stand out: no single technology covers all relevant failure modes, and mounting and installation conditions often dominate overall uncertainty more than converter resolution. The author's contribution is a prior metrological-validity framework: before machine learning is applied, the chain must demonstrate that it

observes the right physical phenomenon, within the right bandwidth, and with uncertainty compatible with the threshold or trend being interpreted. The framework reduces false alarms, prevents electronic overdesign and improves long-term comparability of condition-monitoring data.

Keywords: predictive maintenance; instrumentation; measurement chain; vibration; acoustic emission; thermography; uncertainty; metrology; sensors; condition monitoring.

1. Introduction : le paradoxe des systèmes prédictifs

La promesse de la maintenance prédictive est simple : transformer des signaux physiques en décisions suffisamment précoces pour éviter l'arrêt non planifié. Pourtant, une grande partie des travaux contemporains se concentre sur les classifieurs, les réseaux de neurones et l'estimation de la durée de vie résiduelle, tandis que la qualité de la mesure d'entrée est résumée à quelques paramètres du capteur. Ce déséquilibre crée un paradoxe : on optimise la décision numérique sans démontrer que l'information physique nécessaire a effectivement été acquise.

Une chaîne de mesure n'est jamais transparente. Elle sélectionne une grandeur, une direction, une bande de fréquence et un chemin de transmission ; elle atténue certaines composantes, en amplifie d'autres et ajoute du bruit, de la dérive et de l'incertitude. Un défaut absent du signal à cause d'un mauvais positionnement ne peut être reconstruit par l'IA. De même, une évolution inférieure à l'incertitude de reproductibilité ne devient pas une tendance réelle parce qu'elle est détectée par un modèle sophistiqué. Les lignes directrices de surveillance d'état exigent d'ailleurs que le programme parte des modes de défaillance et des paramètres qui leur sont sensibles [1].

La question de recherche est donc la suivante : comment concevoir et valider une chaîne d'instrumentation afin que les données utilisées par la maintenance prédictive soient physiquement pertinentes, dynamiquement fidèles et métrologiquement interprétables ? L'objectif principal est de proposer un cadre intégré reliant le phénomène de dégradation, la technique de surveillance et la confiance attachée au résultat. Trois objectifs spécifiques en découlent : (i) expliciter les limites physiques des principales techniques ; (ii) établir une règle de sélection orientée par les modes de défaillance ; (iii) quantifier l'incertitude et ses conséquences sur les seuils et les tendances.

2. Méthodologie

L'étude adopte une démarche analytique et de conception. Elle combine : une synthèse critique des normes de surveillance, d'étalonnage et d'évaluation de l'incertitude [1–7] ; une modélisation physique des réponses vibratoires et thermiques ; une comparaison fonctionnelle de techniques usuelles ; enfin, un cas numérique de chaîne accélérométrique. La comparaison est conduite selon six critères communs : phénomène source, précocité de détection, bande utile, sensibilité au montage, interprétabilité et capacité de surveillance continue.

Le périmètre vise principalement les machines tournantes et leurs auxiliaires. Les valeurs numériques illustrent des ordres de grandeur industriels ; elles ne remplacent ni la fiche technique du capteur ni l'étude de criticité de l'actif. L'incertitude est évaluée selon la logique du Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure : conversion des contributions en incertitudes-types, composition quadratique des sources supposées indépendantes, puis élargissement pour un niveau de confiance d'environ 95 % [7].

3. De la défaillance à la donnée : architecture de validité

3.1 Une succession de transductions

La donnée numérique est l'aboutissement d'une suite de conversions : le défaut modifie un état physique ; cette modification se propage dans la structure ; un transducteur la convertit en grandeur électrique ; le conditionnement adapte le signal ; le filtre limite la bande ; le convertisseur l'échantillonne et le quantifie. Chaque maillon possède une fonction de transfert et une incertitude. La performance globale est donc déterminée par l'ensemble installé, non par le capteur isolé.

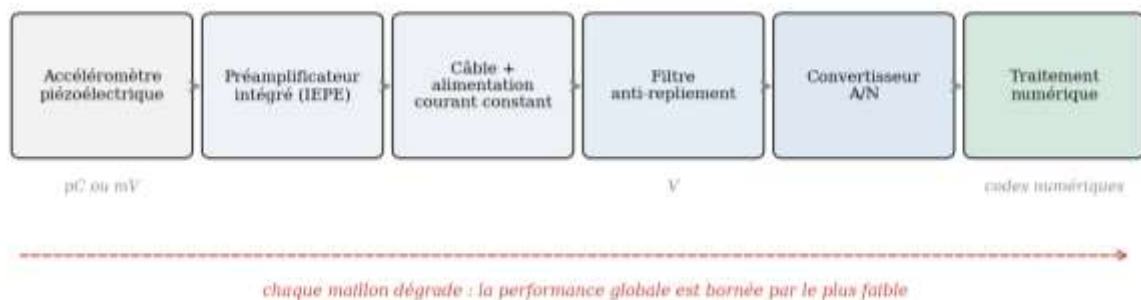


Figure 1. Structure canonique d'une chaîne accélérométrique. Source : conception de l'auteur.

Cette représentation conduit à trois tests préalables. Le test de pertinence vérifie que la grandeur choisie varie réellement avec le mode de défaillance. Le test de transmissibilité vérifie que le signal atteint le point de mesure avec un rapport signal/bruit suffisant. Le test de fidélité vérifie que la bande, la dynamique, le montage et l'incertitude autorisent l'interprétation prévue. Une chaîne qui échoue à l'un de ces tests produit une donnée numériquement exploitable mais scientifiquement faible.

3.2 Déplacement, vitesse et accélération

Pour un mouvement harmonique $x(t) = X \sin(\omega t)$, les amplitudes de vitesse et d'accélération sont $V = \omega X$ et $A = \omega^2 X$. À vitesse constante, le déplacement décroît avec la fréquence alors que l'accélération augmente. Le choix de la grandeur n'est donc pas une convention : il résulte de la bande où le phénomène doit être observé.

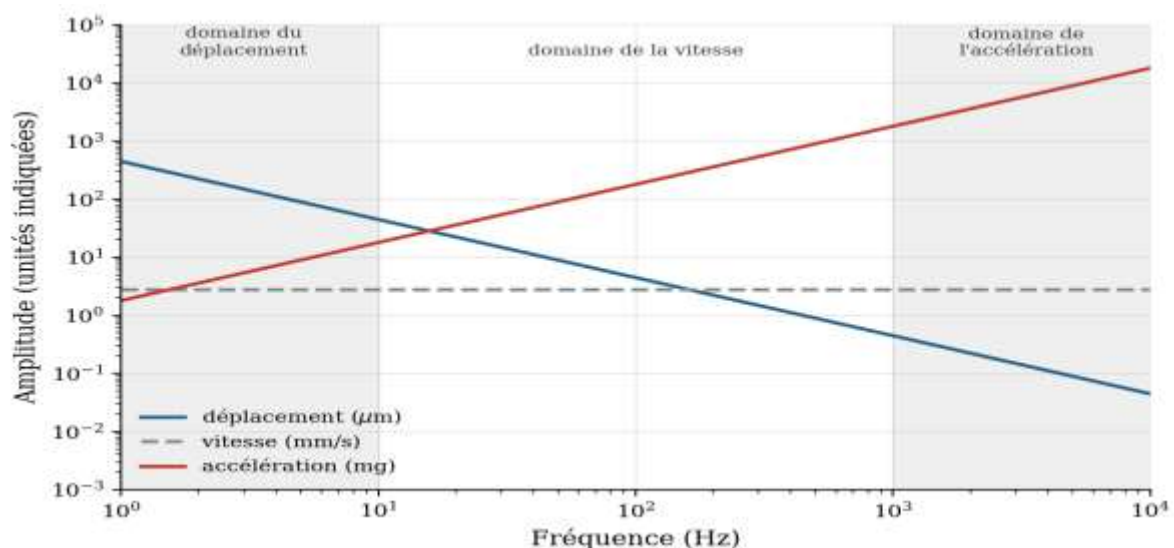


Figure 2 . Domaines d'emploi du déplacement, de la vitesse et de l'accélération pour une vitesse constante de 2,8 mm/s. Source : calculs de l'auteur.

En dessous d'environ 10 Hz, le déplacement relatif de l'arbre est particulièrement pertinent pour les paliers lisses. Dans la bande intermédiaire, la vitesse fournit un indicateur global robuste et cohérent avec l'évaluation de sévérité de la série ISO 20816 [2]. Aux hautes fréquences, l'accélération devient indispensable pour les chocs de roulements et d'engrenages. L'intégration numérique d'une accélération en vitesse exige toutefois un filtrage passe-haut : l'opération amplifie le bruit et la dérive basse fréquence.

4. Techniques principales de surveillance

4.1 Mesure vibratoire : richesse diagnostique et dépendance au montage

L'accéléromètre piézoélectrique reste la référence pour la surveillance des machines. Dans une architecture IEPE, l'électronique intégrée réduit l'impédance de sortie et facilite les longues liaisons, mais impose des limites de température et de courant d'alimentation. Les capteurs à sortie de charge supportent mieux les environnements chauds, au prix d'un conditionnement externe et d'un câblage plus exigeant. Les capteurs MEMS, moins coûteux et facilement connectables, favorisent l'instrumentation massive, mais leur bruit et leur bande utile doivent être comparés à la signature recherchée.

La réponse d'un accéléromètre se rapproche de celle d'un système masse-ressort-amortisseur. La fréquence de résonance ne constitue pas la limite de mesure fidèle. Pour une mesure quantitative à $\pm 5\%$, la bande utile se termine souvent autour d'un cinquième de la résonance montée. Une bande spécifiée à $+3$ dB admet déjà une erreur d'amplitude de 41% ; elle convient à la détection, pas à la quantification.

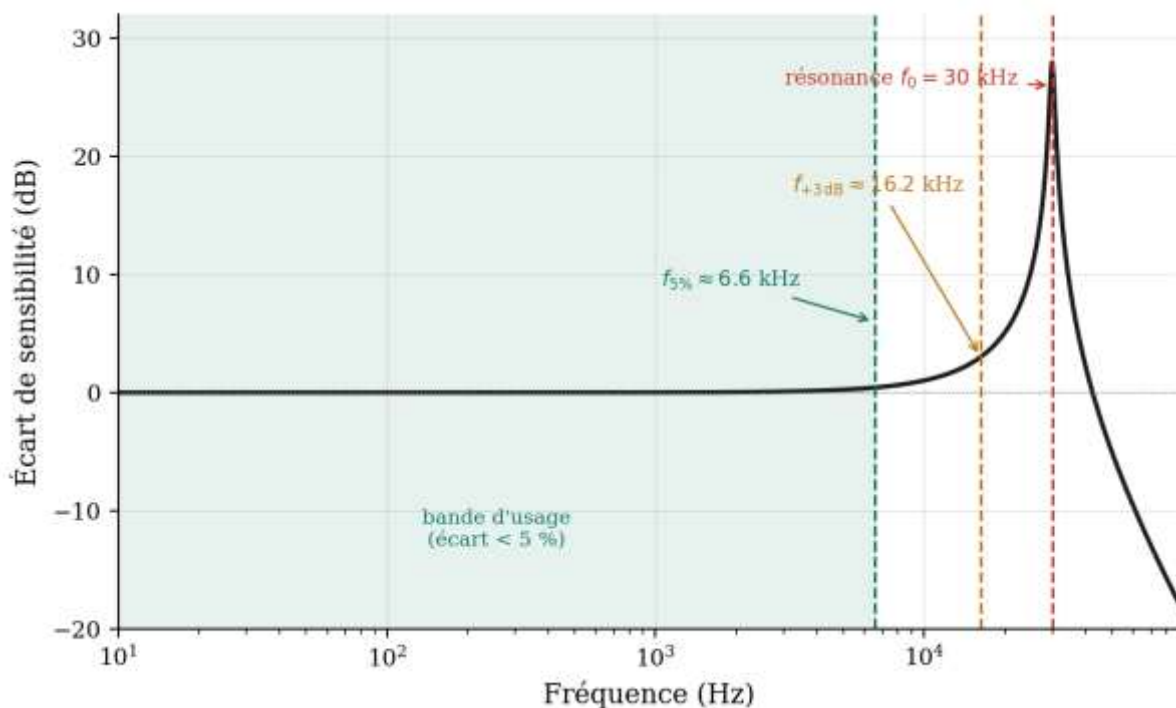


Figure 3 .Réponse fréquentielle modélisée d'un accéléromètre (résonance montée : 30 kHz ; amortissement : 2 %). Source : calculs de l'auteur.

Le montage est un élément fonctionnel de la mesure. Une fixation par goujon sur surface préparée préserve mieux la bande que la cire, l'aimant ou la sonde manuelle. Une orientation incorrecte introduit la sensibilité transverse ; une boucle de masse ou un câble proche d'un moteur peut injecter la fréquence du réseau ;

une longueur excessive peut atténuer les hautes fréquences en IEPE. Ces mécanismes expliquent pourquoi la vérification doit porter sur la chaîne installée.

4.2 Émission acoustique : détection très précoce, interprétation conditionnelle

L'émission acoustique (EA) observe les ondes élastiques transitoires produites par une libération rapide d'énergie : propagation d'une fissure, frottement localisé, rupture de fibres ou décohésion. La terminologie normalisée la classe parmi les méthodes d'examen non destructif [6]. Sa force est la précocité : elle peut détecter un endommagement avant que celui-ci modifie sensiblement la vibration globale. Sa limite est symétrique : une fissure stable qui ne progresse pas peut rester silencieuse.

Les signaux s'étendent typiquement de quelques dizaines de kilohertz à plusieurs centaines de kilohertz. L'acquisition continue de forme d'onde devient coûteuse ; les systèmes déclenchent donc l'enregistrement lorsque le signal dépasse un seuil. Les paramètres de salve amplitude, durée, énergie, temps de montée, nombre de coups dépendent directement de ce réglage. Deux campagnes réalisées avec des seuils, gains ou couplants différents ne sont pas directement comparables.

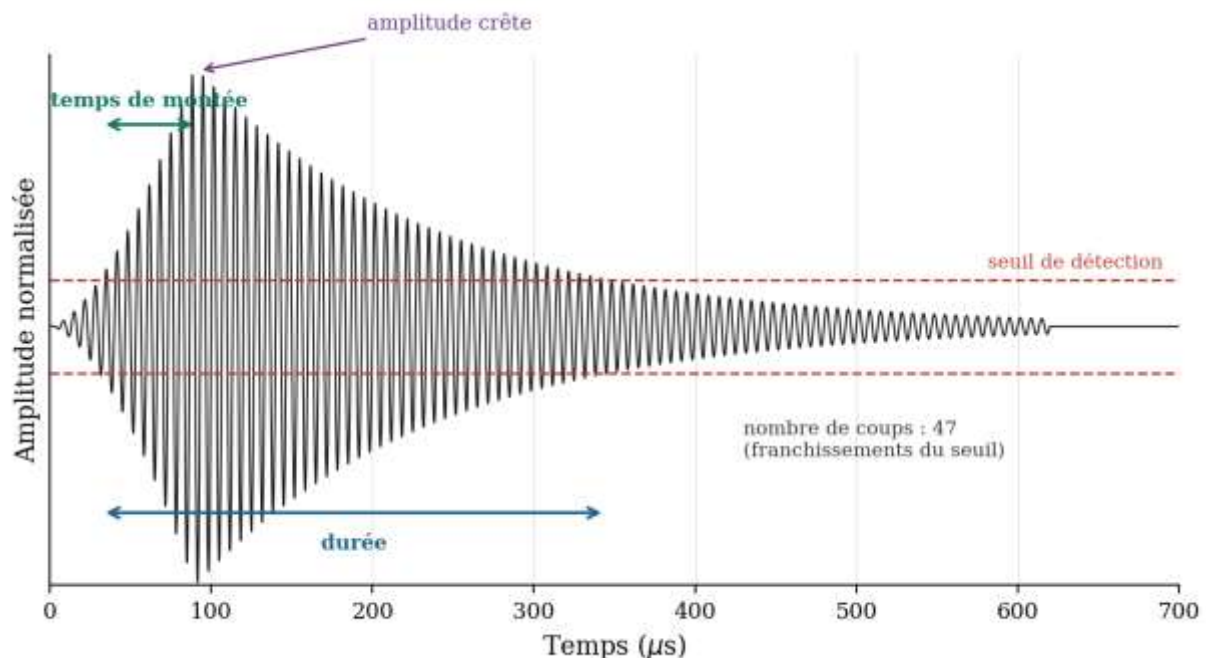


Figure 4. Paramètres caractéristiques d'une salve d'émission acoustique. Source : conception de l'auteur d'après ASTM E1316.

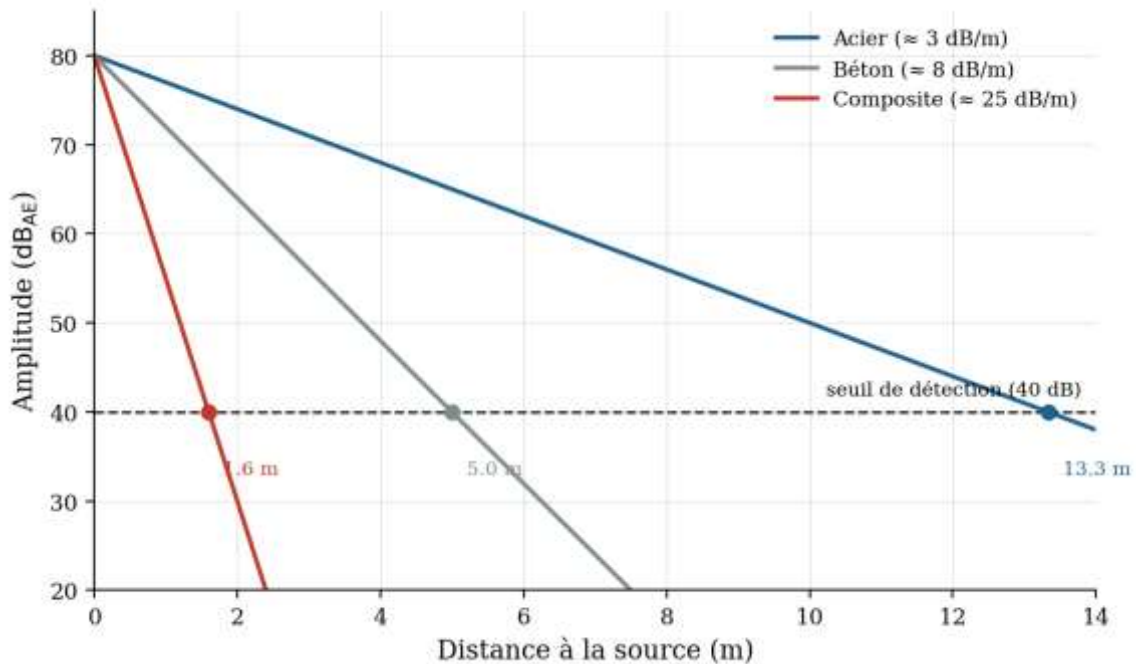


Figure 5. Portée théorique selon l'atténuation du milieu et le seuil de détection. Source : calculs de l'auteur.

4.3 Thermographie infrarouge : rapide, globale, mais sensible à l'émissivité

La thermographie convertit le rayonnement infrarouge reçu en température apparente. Elle permet une inspection à distance, en charge, de connexions électriques, paliers, réfractaires et enveloppes. Son principal piège est l'émissivité : une caméra réglée sur une valeur inadaptée peut confondre rayonnement propre et rayonnement réfléchi. Sur un métal nu à faible émissivité, l'erreur peut dépasser largement la variation recherchée. ISO 18434-1 insiste sur la maîtrise des conditions de mesure et sur la comparaison à conditions équivalentes [3].

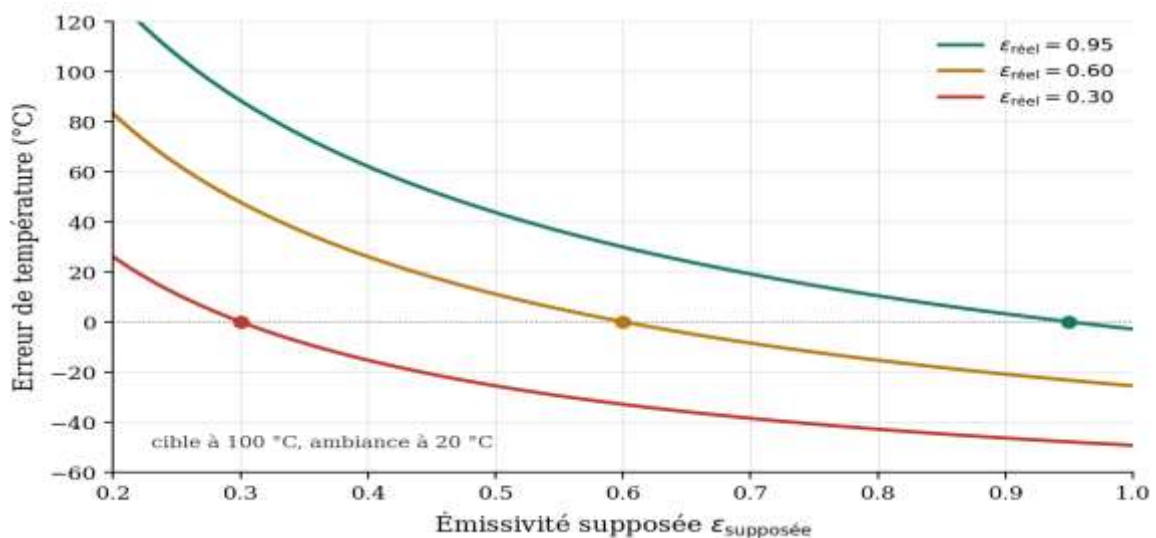


Figure 6. Erreur de température induite par une émissivité supposée incorrecte (cible à 100 °C, ambiance à 20 °C). Source : calculs de l'auteur.

La pratique la plus robuste associe une mesure comparative à charge et environnement similaires, une zone de référence à émissivité connue (ruban ou peinture adaptée), la maîtrise des réflexions et l'archivage des paramètres de caméra. La thermographie détecte efficacement un échauffement ; elle ne prouve pas à elle seule sa cause. L'interprétation doit être croisée avec la charge, le courant, l'état mécanique ou la résistance de contact.

4.4 Techniques complémentaires

Technique	Grandeur observée	Atout principal	Limite dominante
Analyse d'huile	Particules, eau, viscosité, chimie	Détecte usure et dégradation du lubrifiant	Échantillonnage et laboratoire
Analyse du courant moteur	Courant statorique et bandes latérales	Capteur non intrusif ; défauts électriques	Dépend de la charge et de la commande
Ultrasons aériens	Énergie ultrasonore	Fuites, cavitation, décharges	Forte dépendance opérateur/environnement
Contrôles non destructifs	Discontinuités locales	Caractérisation précise	Souvent périodique et localisé
Paramètres de procédé	Pression, débit, puissance, température	Contexte opérationnel indispensable	Faible spécificité diagnostique

Tableau 1 .Positionnement des techniques complémentaires. Source : synthèse de l'auteur.

5. Métrologie : rendre les seuils et les tendances interprétables

5.1 Étalonnage, traçabilité et chaîne complète

L'étalonnage relie l'indication d'un instrument à une grandeur de référence assortie d'une incertitude. Pour les accéléromètres, la série ISO 16063 distingue notamment l'étalonnage primaire par interférométrie laser et l'étalonnage secondaire par comparaison [4,5]. Une erreur fréquente consiste à considérer le certificat du capteur comme celui du système. Le conditionneur, le filtre, le convertisseur, le câblage et le montage contribuent eux aussi au résultat.

La traçabilité est particulièrement importante pour le suivi à long terme. Une dérive progressive de sensibilité peut être interprétée comme une dégradation de l'actif. Un protocole minimal doit donc documenter : l'identification du capteur, sa sensibilité, la date d'étalonnage, le point et l'orientation de montage, la configuration du conditionnement, la fréquence d'échantillonnage, les filtres et les conditions de fonctionnement. Une vérification périodique de la chaîne par excitateur ou signal de référence doit compléter l'étalonnage de laboratoire.

5.2 Budget d'incertitude et décision

Pour des contributions relatives indépendantes u_i exprimées en pourcentage, l'incertitude-type composée est $u_c = \sqrt{\sum u_i^2}$. L'incertitude élargie s'écrit $U = k \cdot u_c$; le facteur $k \approx 2$ est usuellement associé à une

couverture proche de 95 % lorsque les hypothèses statistiques sont appropriées [7]. Cette composition montre que les contributions dominantes déterminent le résultat et doivent concentrer l'effort d'amélioration.

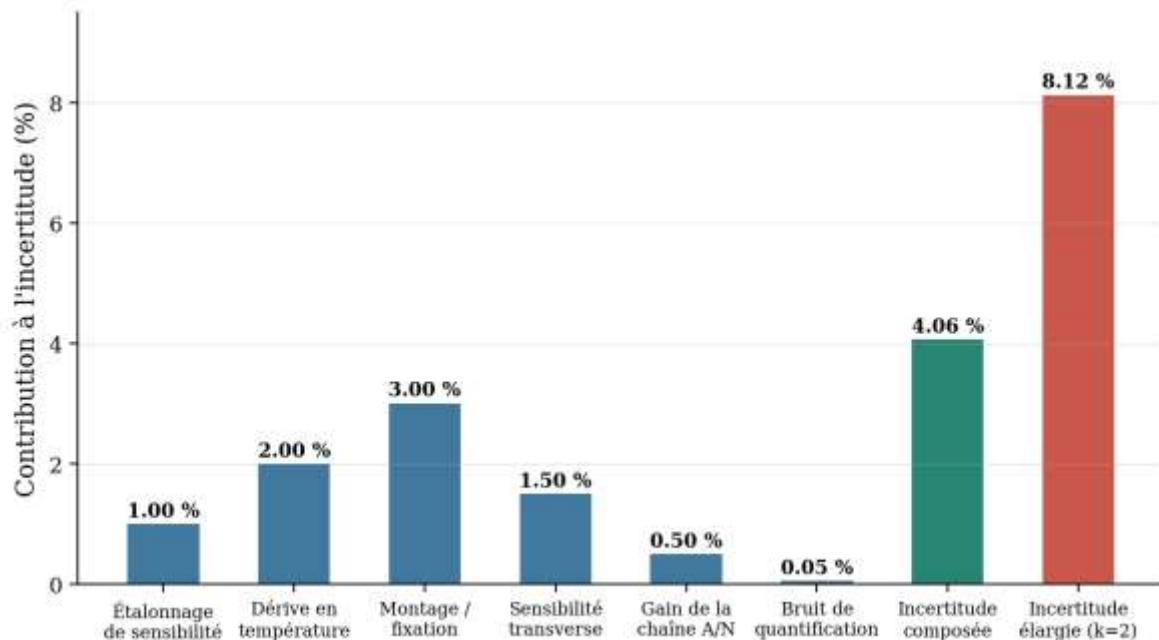


Figure 7 .Budget d'incertitude représentatif d'une chaîne accélérométrique ; $u_c = 4,06$ % et $U(k=2) = 8,12$ %. Source : calculs de l'auteur.

Dans l'exemple, réduire de moitié l'incertitude d'étalonnage modifie peu le résultat, tandis que l'amélioration du montage produit un gain significatif. Une amplitude mesurée ne doit donc pas être comparée naïvement à un seuil ponctuel. Si y est la mesure et U son incertitude élargie, trois zones sont utiles : alarme certaine si $y-U$ dépasse le seuil ; état normal certain si $y+U$ reste sous le seuil ; zone indéterminée si l'intervalle recouvre le seuil. Cette règle simple évite de transformer l'incertitude en fausse précision.

6. Sélection orientée par les modes de défaillance

La sélection doit partir de la fonction et du mode de défaillance, puis identifier la signature physique la plus proche de sa naissance. La matrice suivante montre qu'aucune technique ne couvre tout le spectre. Les recouvrements sont souvent complémentaires : l'EA détecte tôt, la vibration localise mieux les fréquences caractéristiques, la thermographie révèle les pertes, l'analyse d'huile documente l'usure et le courant moteur couvre des défauts électriques invisibles à une instrumentation uniquement vibratoire.

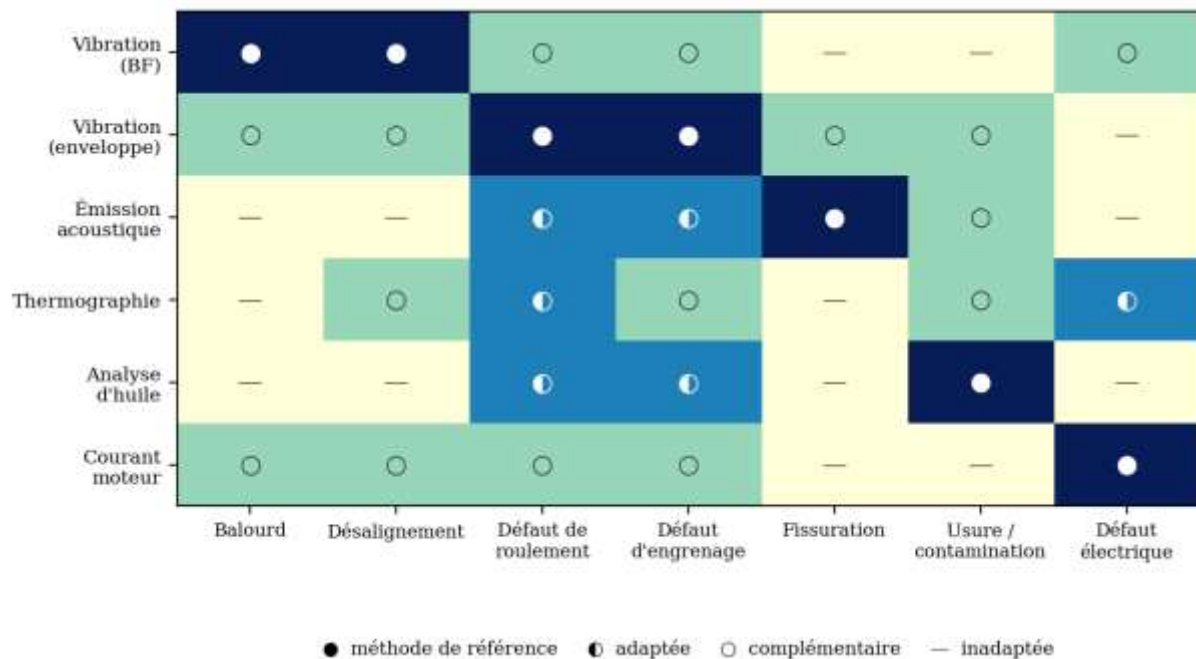


Figure 8. Adéquation indicative des techniques aux modes de défaillance des machines tournantes.
Source : synthèse de l'auteur.

La matrice ne constitue pas un catalogue universel. Elle doit être pondérée par la criticité, l'occurrence sur le parc, l'accessibilité, la vitesse de dégradation, le coût du capteur et la capacité de l'organisation à interpréter les données. Elle permet toutefois d'éviter un biais courant : surveiller ce que l'équipe sait déjà mesurer plutôt que ce qui menace réellement la disponibilité.

7. Cas numérique : dimensionnement d'une chaîne accélérométrique

Considérons une surveillance de roulements par analyse d'enveloppe avec une bande utile de 10 kHz et une fréquence d'échantillonnage de 25,6 kHz. Une fidélité d'amplitude à $\pm 5\%$ conduit à viser une résonance montée sensiblement supérieure à cinq fois la bande utile, soit environ 50 kHz. Le montage par goujon sur surface préparée devient alors une exigence fonctionnelle. Une sensibilité de 100 mV/g offre un compromis industriel courant entre bande, bruit et étendue.

Paramètre	Choix de conception	Justification
Capteur	IEPE, 100 mV/g	Faible impédance, intégration industrielle
Résonance montée	≥ 50 kHz	Bande fidèle visée : 10 kHz
Montage	Goujon, surface usinée	Préservation de la bande et répétabilité
Échantillonnage	25,6 kHz	Marge sur Nyquist et traitement spectral
Filtre	Anti-repliement analogique	Atténuation avant conversion

Paramètre	Choix de conception	Justification
Convertisseur	16 à 24 bits selon plage utile	Le bruit capteur domine la résolution brute
Vérification	Excitateur de référence + contrôle périodique	Détection de dérive de chaîne

Tableau 2 .Spécification synthétique de la chaîne. Source : proposition de l'auteur.

Si la densité de bruit du capteur est de $300 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, son bruit efficace intégré sur 10 kHz est de l'ordre de 30 mg. Pour une étendue de $\pm 50 \text{ g}$, la dynamique utile associée est proche de 64 dB. Un convertisseur 24 bits possède une dynamique théorique très supérieure ; il n'améliore donc pas la détectabilité lorsque le bruit du capteur domine. Une résolution élevée reste utile pour préserver une marge lorsque le signal nominal n'occupe qu'une faible fraction de la pleine échelle, mais elle ne corrige ni le bruit du capteur ni un mauvais montage.

Avec $u_c=4,06 \%$ et $k=2$, l'incertitude élargie vaut 8,12 %. Une vitesse mesurée à 4,0 mm/s correspond ainsi approximativement à un intervalle de 3,68 à 4,32 mm/s. Une variation de quelques pour cent entre deux campagnes ne suffit pas à conclure ; il faut rechercher une évolution dépassant l'incertitude de reproductibilité ou confirmer la tendance par répétition et par une seconde technique.

8. Discussion

8.1 Ce que les résultats changent dans la pratique

Trois implications opérationnelles émergent. Premièrement, le cahier des charges doit être écrit à partir du défaut et non du catalogue du capteur. Deuxièmement, le contrôle de réception doit tester la chaîne installée, notamment sa bande, son bruit, son orientation et sa répétabilité. Troisièmement, les seuils et les modèles d'apprentissage doivent intégrer les métadonnées de mesure : type de capteur, montage, gain, filtre, température, charge et état d'étalonnage.

Cette approche déplace aussi la priorité budgétaire. Une conversion 24 bits ou un modèle complexe peut être inutile si la bande est limitée par la fixation, si le signal est contaminé par la sensibilité transverse ou si les campagnes ne sont pas comparables. À l'inverse, une chaîne modeste, correctement montée et vérifiée, peut produire une tendance robuste. La valeur réside donc moins dans la sophistication isolée d'un maillon que dans la cohérence du système.

8.2 Apport scientifique de l'auteur : le cadre VMP

Contribution originale: cadre VMP L'auteur propose trois niveaux de validation avant toute exploitation algorithmique : Validité physique (le défaut produit bien la grandeur observée) ; Validité métrologique (l'incertitude permet la décision) ; Validité prédictive (le signal possède une évolution temporelle exploitable et transférable).

Le cadre VMP répond à une faiblesse récurrente : la confusion entre une donnée disponible et une donnée valide. Il impose une porte de contrôle entre acquisition et IA. Une variable ne peut entrer dans le modèle que si sa relation au défaut est explicitée, sa chaîne documentée, son domaine de fidélité connu et son incertitude compatible avec l'usage. Pour chaque indicateur, une fiche de validité doit associer : mode

ciblé, mécanisme physique, bande, sensibilité attendue, facteurs de confusion, incertitude, règle d'alarme et conditions de comparabilité.

Ce cadre améliore la conviction scientifique de trois manières. Il rend les échecs réfutables en distinguant absence de défaut, absence de transmission et incapacité instrumentale ; il facilite la reproductibilité entre sites ; enfin, il évite qu'un algorithme apprenne les particularités d'un capteur ou d'un montage plutôt que l'état de la machine. L'IA intervient ainsi sur des données qualifiées, et non comme compensation implicite d'une acquisition mal maîtrisée.

8.3 Limites et perspectives

L'étude repose sur des modèles simplifiés et sur un cas représentatif ; les coefficients d'atténuation, niveaux de bruit et incertitudes varient selon les équipements. Les contributions ne sont pas toujours indépendantes, et une approche de Monte-Carlo peut devenir préférable lorsque le modèle est non linéaire. La matrice doit également être validée par l'historique de pannes de chaque parc.

Les travaux futurs devraient tester le cadre VMP sur plusieurs classes d'actifs, comparer le taux de fausses alertes avant et après qualification métrologique, et intégrer l'incertitude directement dans les modèles de pronostic. Une architecture prometteuse associerait instrumentation MEMS dense pour la tendance, capteurs piézoélectriques sur actifs critiques, techniques complémentaires déclenchées par alerte et jumeau numérique conservant les métadonnées de chaque mesure.

9. Conclusion

Une maintenance prédictive crédible commence avant l'algorithme. Elle commence par la définition du défaut à détecter, le choix de la grandeur qui en porte la signature, la maîtrise du chemin de transmission et la validation de la chaîne installée. L'analyse menée montre que la vibration, l'émission acoustique, la thermographie et les méthodes complémentaires répondent à des fenêtres physiques distinctes ; leur valeur réside dans leur combinaison raisonnée, non dans la recherche d'un capteur universel.

Le résultat le plus important est métrologique : un seuil, une tendance ou une prédiction n'est interprétable que si l'incertitude est connue et suffisamment petite au regard de la décision. Dans de nombreuses chaînes industrielles, le montage domine cette incertitude et la bande réelle, tandis que la résolution du convertisseur est déjà surabondante. Le cadre VMP proposé par l'auteur transforme ce constat en méthode : valider le lien physique, valider la mesure, puis seulement valider la prédiction. Cette séquence rend l'apport de l'intelligence artificielle plus fiable, plus explicable et plus transférable.

Bibliographie

1. ISO. (2018). ISO 17359:2018 Condition monitoring and diagnostics of machines: General guidelines. International Organization for Standardization.
2. ISO. (2016). ISO 20816-1:2016 Mechanical vibration: Measurement and evaluation of machine vibration, Part 1: General guidelines. International Organization for Standardization.
3. ISO. (2008). ISO 18434-1:2008 Condition monitoring and diagnostics of machines: Thermography, Part 1: General procedures. International Organization for Standardization.
4. ISO. (1999). ISO 16063-11:1999 Methods for the calibration of vibration and shock transducers, Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry. International Organization for Standardization.
5. ISO. (2003). ISO 16063-21:2003 Methods for the calibration of vibration and shock transducers, Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer. International Organization for

Standardization.

6. ASTM International. (2022). ASTM E1316-22a Standard terminology for nondestructive examinations. ASTM International.
7. JCGM. (2008). JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). Joint Committee for Guides in Metrology.
8. Randall, R. B. (2011). Vibration-based condition monitoring: Industrial, aerospace and automotive applications. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470977668>
9. Scheffer, C., & Girdhar, P. (2004). Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance. Elsevier/Newnes.
10. Mobley, R. K. (2002). An introduction to predictive maintenance (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
11. Grosse, C. U., & Ohtsu, M. (Eds.). (2008). Acoustic emission testing. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69972-9>
12. Maldague, X. P. V. (2001). Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. John Wiley & Sons.
13. Tavner, P., Ran, L., Penman, J., & Sedding, H. (2008). Condition monitoring of rotating electrical machines. IET. <https://doi.org/10.1049/PBPO056E>
14. 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>
15. ISO. (1997). ISO 2041:1990/Amd 1:1997 Vibration and shock: Vocabulary. International Organization for Standardization.