

Du Signal Bru T À La Preuve Diagnostique Une Chaîne De Traitement Physiquement Guidée Pour Révéler Les Défauts Naissants Des Machines Tournantes

**Professeur Dr. Jean Claude Mukaz Ilunga¹,
Ingénieur Olivier Mulagizi Bashebereka²**

¹Professeur Dr Ir, Maintenance, Institut Supérieur Des Techniques Appliquées (Ista) Kinshasa

²Etudiant En Master 2, Réseaux Et Cybersécurité/ Ingénierie Biomédicale, Institut Supérieur Des Techniques Appliquées (Ista) Kinshasa

Résumé

Le traitement du signal constitue l'interface décisive entre la mesure industrielle et le diagnostic. Pourtant, il est encore fréquemment appliqué comme une collection d'outils indépendants de la physique du défaut. Cet article propose une chaîne de raisonnement dans laquelle chaque méthode est choisie selon la structure du signal : périodicité pour l'analyse spectrale, modulation pour l'enveloppe, familles de bandes latérales pour le cepstre, non-stationnarité pour les représentations temps-fréquence et cyclostationnarité pour les phénomènes périodiques au second ordre. Un signal simulé de roulement, à paramètres connus, sert de fil conducteur. Les résultats montrent qu'un défaut naissant reste invisible aux indicateurs scalaires et au spectre brut, mais devient identifiable après sélection de bande par kurtogramme et démodulation. La contribution de l'auteur est le cadre MPT Modèle physique, Preuve croisée, Traçabilité qui impose la qualification du régime, la séparation des composantes, l'adéquation méthode-phénomène, la confirmation par représentations indépendantes et la conservation des paramètres de traitement. Cette approche réduit les faux négatifs et transforme le signal traité en preuve diagnostique reproductible.

Mots-clés : traitement du signal ; maintenance prédictive ; vibration ; roulement ; analyse d'enveloppe ; kurtogramme ; cyclostationnarité ; diagnostic.

Abstract

Signal processing is the decisive interface between industrial measurements and diagnosis, yet it is often applied as a toolbox detached from failure physics. This article proposes a reasoning chain in which each method is selected according to signal structure: periodicity for spectral analysis, modulation for envelope analysis, sideband families for the cepstrum, non-stationarity for time-frequency representations, and cyclostationarity for second-order periodic phenomena. A simulated bearing signal with known parameters provides a common test case. Results show that an incipient fault remains invisible to scalar indicators and the raw spectrum, but becomes identifiable after kurtogram-based band selection and demodulation. The author contributes the MPT framework Physical Model, Cross-evidence, Traceability

requiring regime qualification, component separation, method–phenomenon matching, confirmation by independent representations and full processing-parameter retention. The approach reduces false negatives and turns processed signals into reproducible diagnostic evidence.

Keywords: signal processing; predictive maintenance; vibration; bearing; envelope analysis; spectral kurtosis; cyclostationarity; diagnosis.

1. Introduction : pourquoi un signal peut cacher un défaut

Entre l'acquisition et la décision se trouve une succession de transformations qui n'est jamais neutre. Un balourd, un engrenage dégradé, une fissure ou un roulement piqué ne produisent pas la même structure mathématique. Le premier crée principalement une composante synchrone ; le second des familles de raies et de bandes latérales ; le troisième des transitoires ; le quatrième un train d'impulsions quasi périodiques modulant une résonance. Employer la même représentation pour tous revient à imposer un modèle unique à des phénomènes différents.

La question de recherche est la suivante : comment organiser le traitement afin de détecter précocement un défaut, d'éviter les interprétations erronées et de produire un diagnostic reproductible ? L'objectif est de construire une chaîne physiquement guidée et de la tester sur un cas où la vérité terrain est connue. L'hypothèse est qu'une preuve diagnostique robuste ne résulte pas d'un indicateur isolé, mais de la concordance entre modèle physique, représentation adaptée et confirmations indépendantes [1–4].

2. Méthodologie et signal de référence

L'étude combine modélisation, simulation numérique et analyse comparative. Un roulement à neuf éléments roulants, porté par un arbre à 1 500 tr/min (25 Hz), est simulé avec un défaut de bague externe. La fréquence théorique de passage du défaut est de 89,6 Hz. Chaque impact excite une résonance structurelle à 3,5 kHz ; une fluctuation temporelle de 1 % représente le glissement. Des composantes à 25, 50 et 75 Hz ainsi qu'un bruit gaussien masquent les impacts. L'échantillonnage est fixé à 25,6 kHz.

Trois niveaux de sévérité sont comparés. Les méthodes sont évaluées selon leur sensibilité au défaut naissant, leur capacité de localisation fréquentielle, leur robustesse à la variation de régime et leur aptitude à fournir une preuve interprétable. Tous les graphiques proviennent du même modèle, ce qui permet d'observer ce que chaque transformation révèle ou masque.

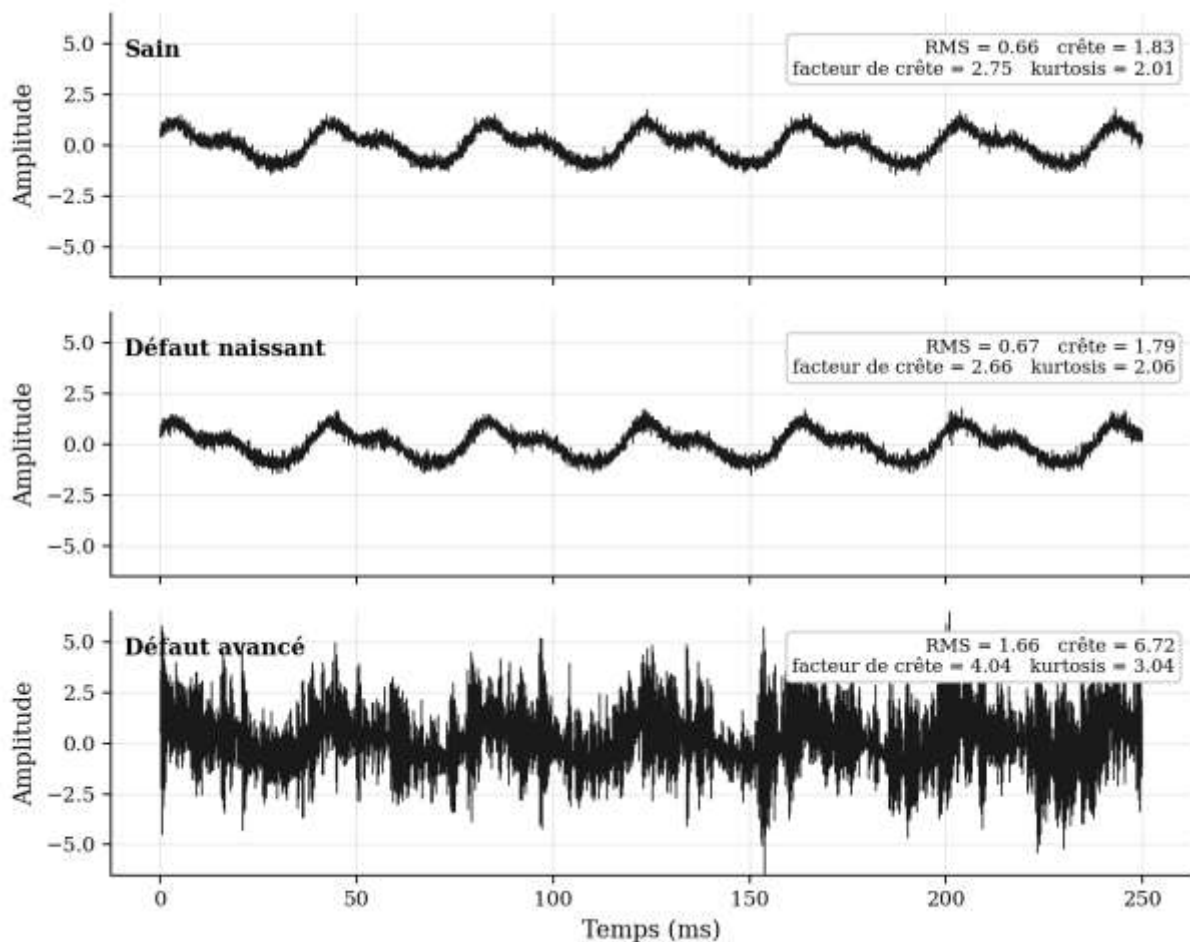


Figure 1 Signal temporel simulé pour un état sain, un défaut naissant et un défaut avancé. Source : simulation de l'auteur.

3. Nature du signal et prétraitement

3.1 Déterministe, aléatoire et cyclostationnaire

Les composantes déterministes sont prévisibles à partir de la cinématique et forment des raies liées à la rotation. Les composantes aléatoires comprennent le bruit et les contacts. Le signal de roulement occupe une classe intermédiaire : les chocs sont périodiques en moyenne, mais leurs instants et amplitudes fluctuent. Le signal n'est donc pas strictement périodique ; ses statistiques le sont. Cette cyclostationnarité explique pourquoi l'énergie de défaut s'étale dans le spectre brut alors que son enveloppe conserve la cadence des impacts [5,6].

3.2 Ordre des opérations

Le retrait de la moyenne, la suppression prudente de tendance, le contrôle de saturation et la qualification du régime précédent toute analyse. Sur une machine lente, un filtre passe-haut mal choisi peut supprimer la fréquence de rotation. Les valeurs extrêmes ne doivent pas être éliminées par amplitude seule : un impact mécanique utile présente une résonance amortie et une répétition, alors qu'une perturbation électrique isolée possède une autre structure.

Règle de sûreté Le signal temporel doit toujours être examiné avant son spectre. Écrêtage, coupure et impulsion électrique produisent des signatures fréquentielles susceptibles d'être confondues avec un défaut.

4. Pourquoi les indicateurs scalaires échouent tôt

La valeur efficace quantifie l'énergie ; le facteur de crête rapporte la valeur maximale à la valeur efficace ; le kurtosis mesure la concentration des valeurs extrêmes. Leur faible coût explique leur usage dans les capteurs connectés. Ils condensent toutefois le signal en un nombre et perdent la cadence, la position fréquentielle et la modulation précisément les informations qui relient la signature au défaut.

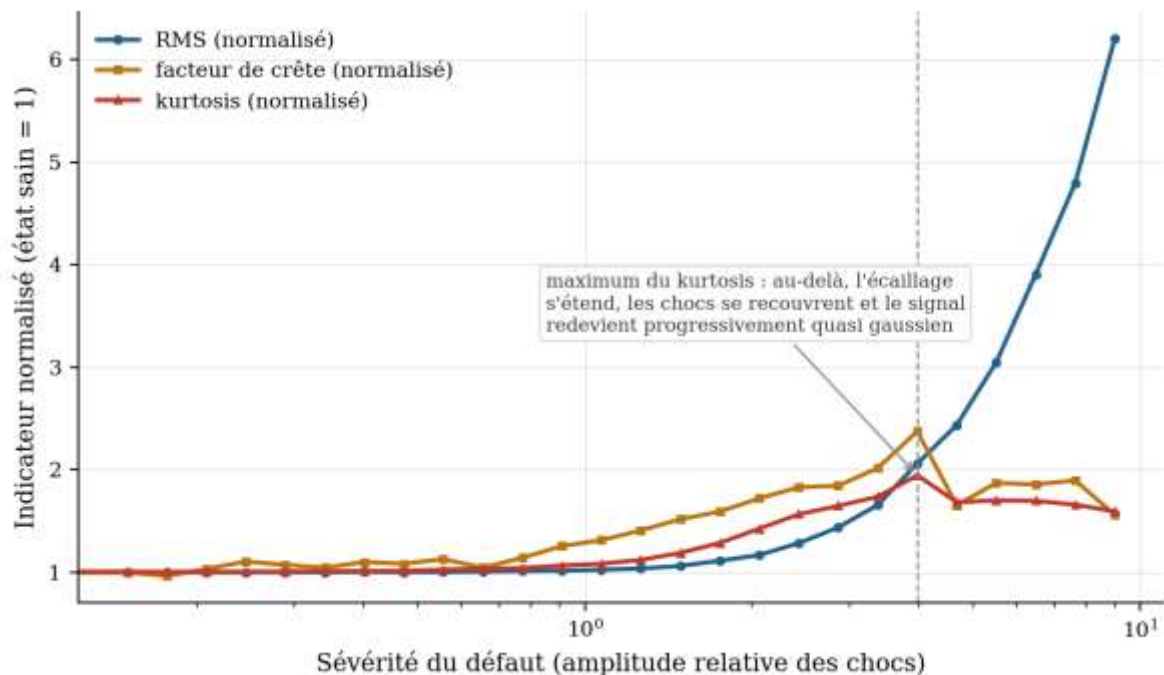


Figure 2 Évolution normalisée des indicateurs avec la sévérité du défaut. Source : simulation de l'auteur.

Au stade naissant, les variations sont proches de l'incertitude de mesure et ne permettent pas de conclure. Le kurtosis et le facteur de crête sont en outre non monotones : ils augmentent lorsque les impacts sont rares, puis diminuent lorsque les chocs se recouvrent et que le signal redevient statistiquement plus régulier. Une valeur apparemment normale peut donc correspondre à un état sain ou à un défaut avancé. La valeur efficace et le kurtosis doivent au minimum être interprétés conjointement, sans prétendre remplacer l'analyse structurale.

5. Analyse spectrale : puissance et conditions de validité

5.1 Résolution, fenêtre et moyennage

La résolution fréquentielle $\Delta f = 1/T$ dépend de la durée T de l'enregistrement, non du seul nombre de points. Le fenêtrage limite la fuite spectrale, mais élargit le lobe principal : une fenêtre est donc un compromis entre séparation de raies proches et détection d'une composante faible près d'une forte. La méthode de Welch réduit la variance par moyennage de segments, au prix d'une résolution et d'une indépendance partielle entre blocs chevauchés [7,8].

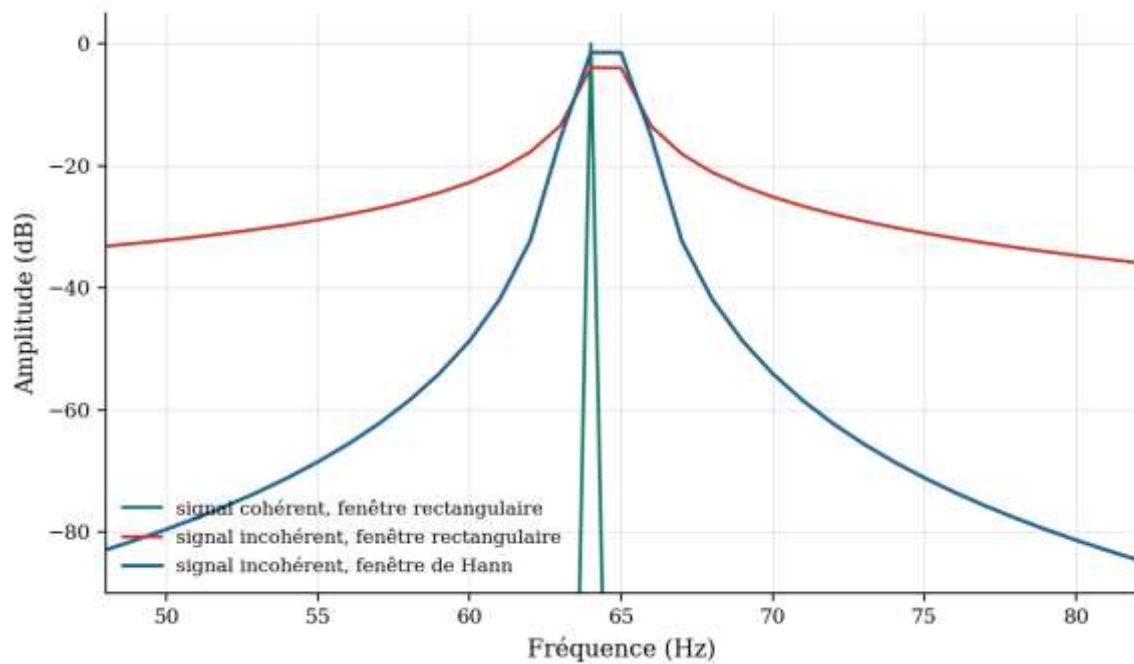


Figure 3 Fuite spectrale d'une composante cohérente et d'une composante non cohérente avec la fenêtre. Source : calculs de l'auteur.

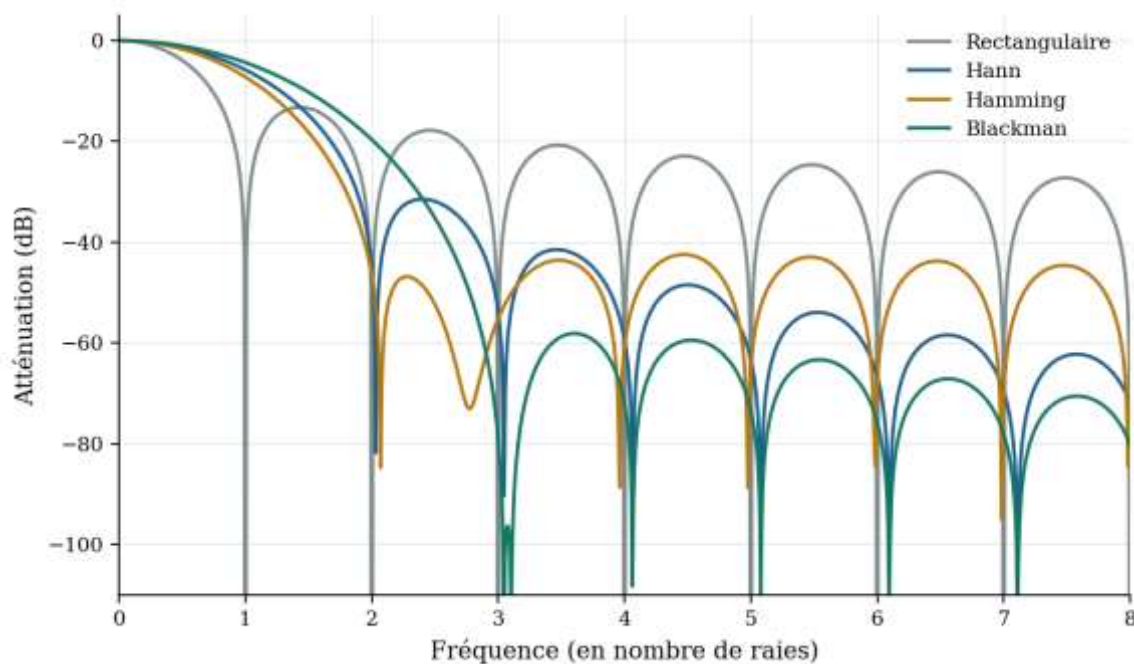


Figure 4 Réponses fréquentielles de fenêtres usuelles et compromis lobe principal/lobes secondaires. Source : calculs de l'auteur.

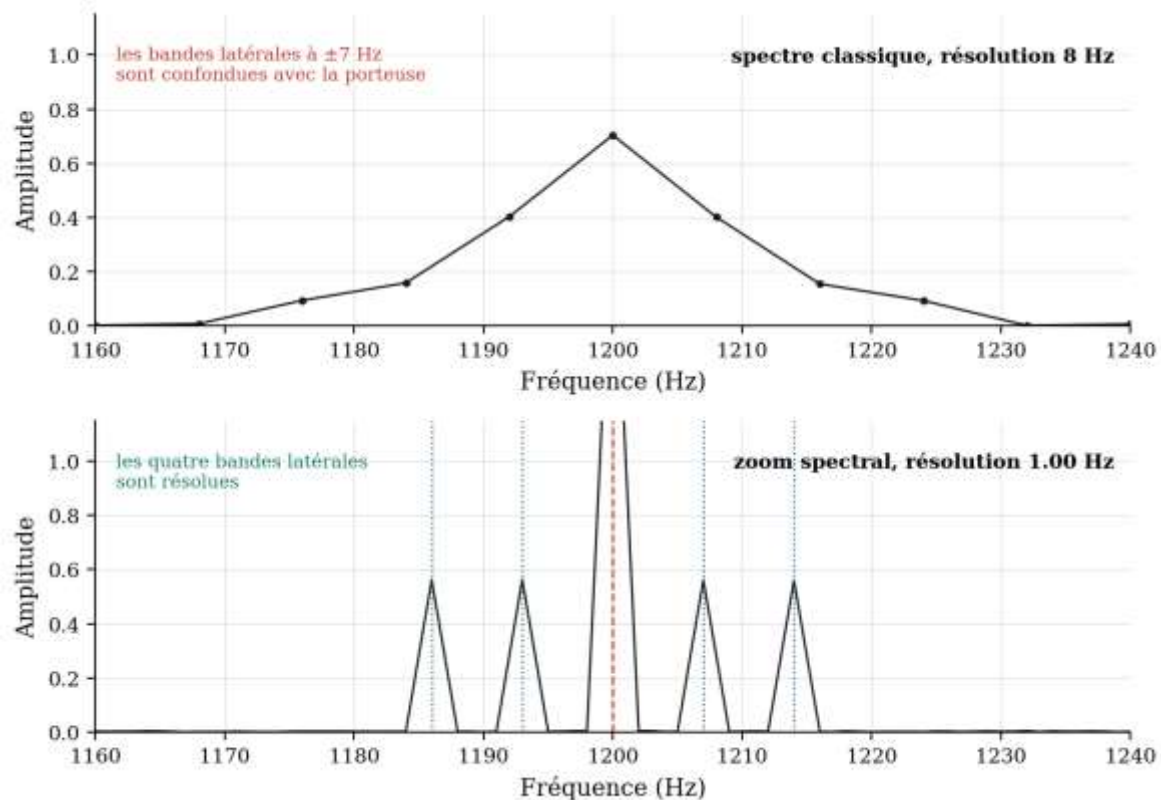


Figure 5 Bandes latérales invisibles à 8 Hz de résolution et restituées à 1 Hz après traitement adapté. Source : simulation de l'auteur.

5.2 Fréquences caractéristiques : transformer des raies en diagnostic

Un spectre n'est diagnostique que lorsqu'il est comparé à des fréquences calculées à partir de la géométrie et de la vitesse. Pour un roulement, les fréquences de cage, de passage sur bague externe, de passage sur bague interne et de rotation des éléments roulants sont généralement non entières en multiples de la rotation. Cette propriété permet de distinguer une fréquence de défaut d'un simple harmonique. Une raie isolée ne suffit cependant pas : la présence d'harmoniques, de bandes latérales et d'une évolution cohérente renforce la preuve.

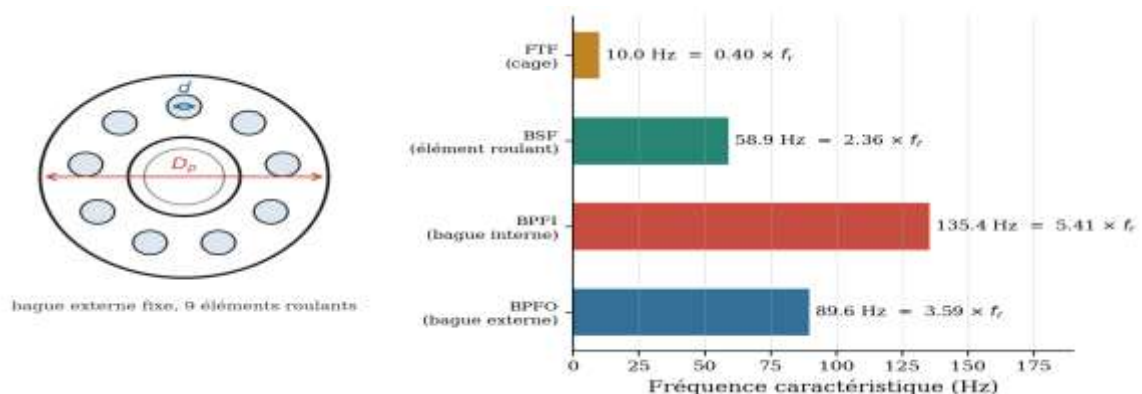


Figure 6 Géométrie du roulement simulé et fréquences caractéristiques associées. Source : calculs de l'auteur.

6. Le résultat négatif du spectre brut

Le spectre du signal défectueux présente les composantes de rotation et une élévation large autour de 3,5 kHz, mais aucune raie nette à 89,6 Hz. Ce résultat n'autorise pas la conclusion « roulement sain ». Les impacts quasi périodiques subissent du glissement, leur énergie se disperse et leur amplitude est masquée par les composantes déterministes. La bosse de résonance constitue au contraire un indice d'excitation impulsive et invite à la démodulation.

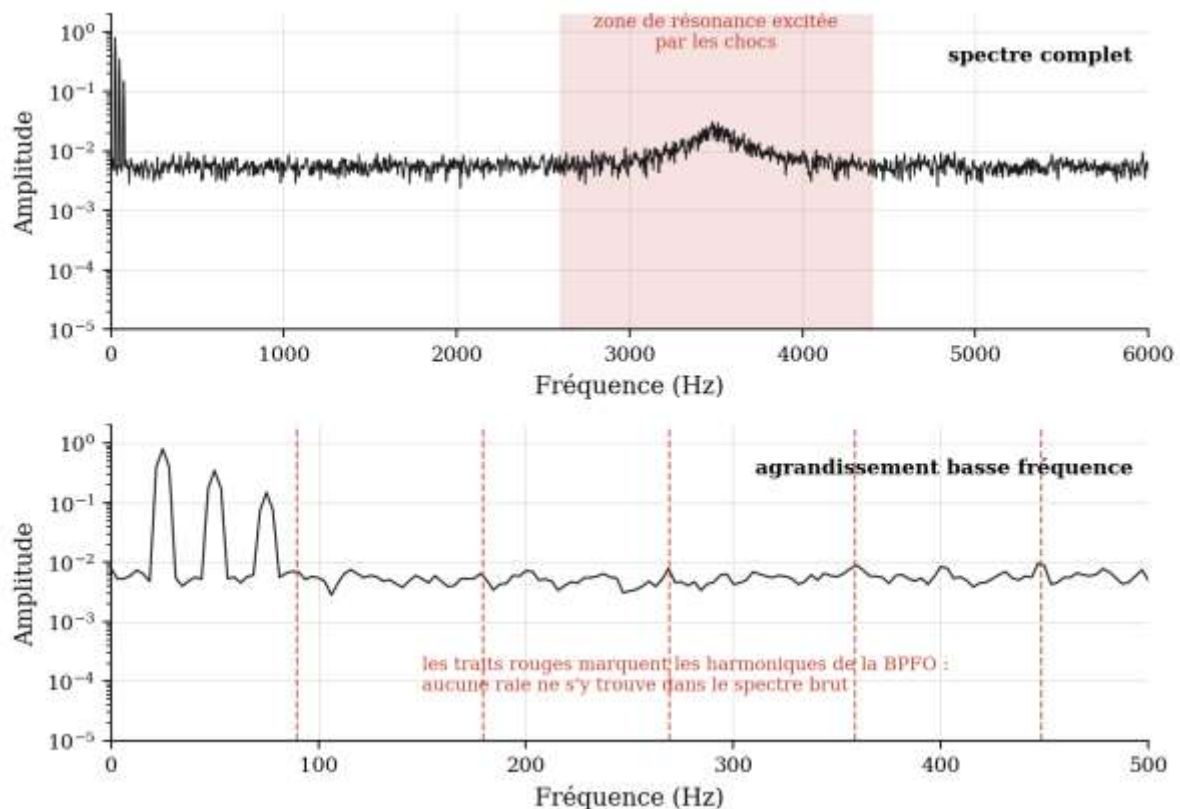


Figure 7 Spectre brut : la résonance est visible, mais les harmoniques de la fréquence de défaut restent masquées. Source : simulation de l'auteur.

7. Analyse d'enveloppe et sélection de bande

7.1 Démoduler la résonance

L'impact excite une porteuse structurelle à haute fréquence dont l'amplitude est modulée par la cadence du défaut. L'analyse d'enveloppe filtre d'abord une bande autour de la résonance, extrait l'amplitude instantanée notamment par transformée de Hilbert puis calcule le spectre de cette enveloppe. Elle ne cherche donc pas directement les chocs dans le spectre brut ; elle cherche la périodicité de l'énergie qu'ils injectent dans la structure [3,4].

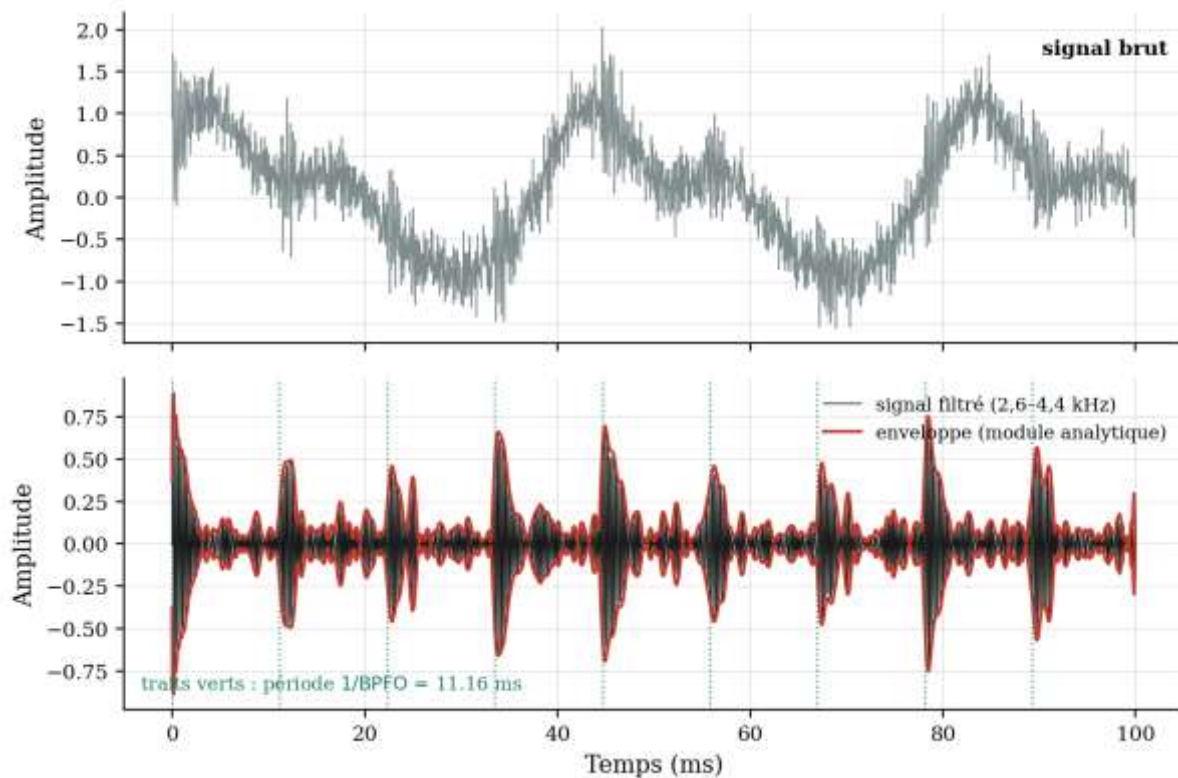


Figure 8 Après filtrage dans la bande de résonance, les impacts périodiques deviennent observables. Source : simulation de l'auteur.

7.2 Choisir la bande par kurtosis spectral

Une bande choisie trop bas reste dominée par la rotation ; choisie trop haut, elle contient surtout du bruit. Le kurtogramme recherche les sous-bandes présentant la plus forte impulsivité. Dans le cas étudié, il sélectionne 3,2–6,4 kHz, intervalle qui contient la résonance à 3,5 kHz sans que celle-ci ait été fournie à l'algorithme. Cette sélection doit néanmoins être validée : un kurtogramme retourne toujours un maximum, même si l'impulsivité provient d'un choc étranger [5].

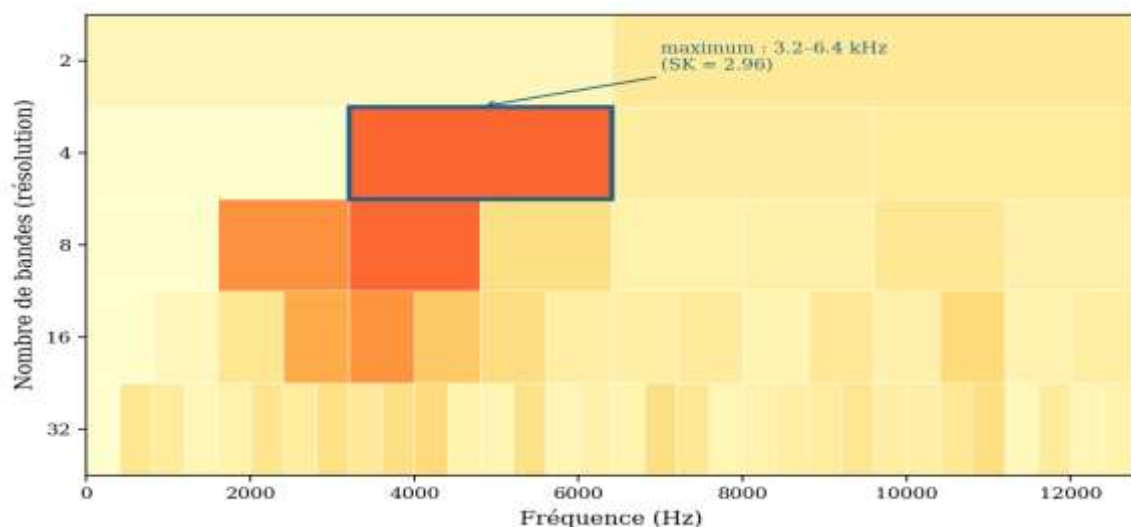


Figure 9 Kurtogramme et bande optimale 3,2–6,4 kHz. Source : simulation de l'auteur.

7.3 Spectre d'enveloppe et identification

Le spectre d'enveloppe révèle une fondamentale à 89,6 Hz, quatre harmoniques décroissantes et des bandes latérales espacées de 25 Hz. La fréquence coïncide avec la fréquence théorique de passage sur bague externe à moins de 1 %, son rapport à la rotation n'est pas entier et sa structure harmonique confirme une excitation impulsive répétée. Le diagnostic devient alors une conclusion positive : défaut localisé sur la bague externe.

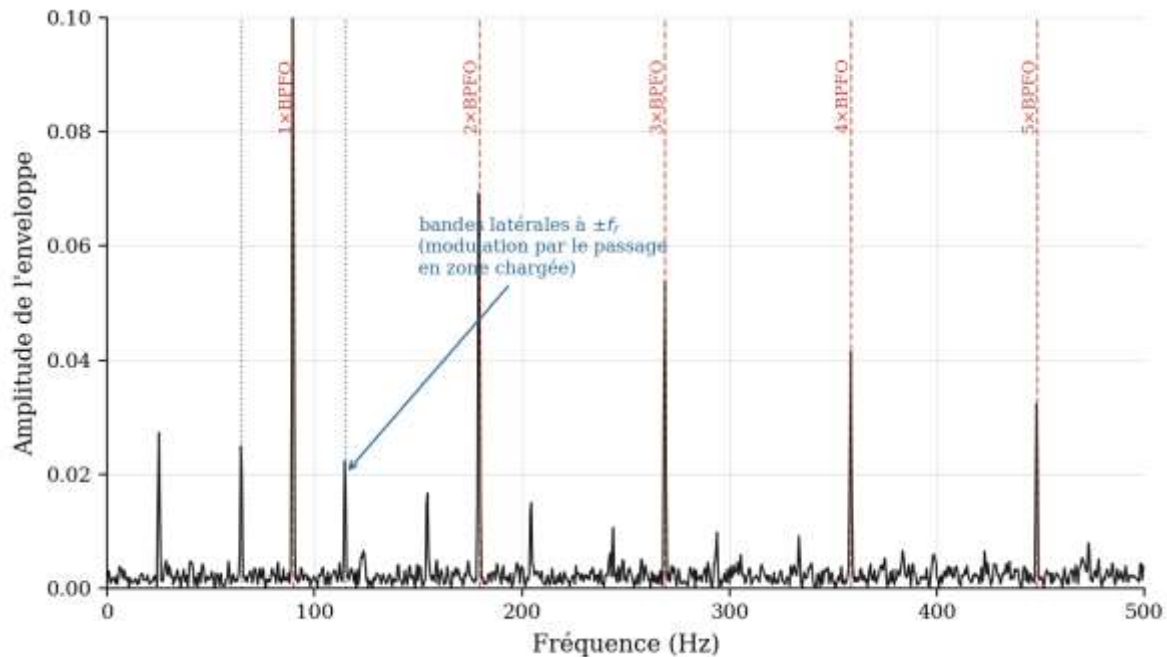


Figure 10 Spectre d'enveloppe : fréquence de bague externe, harmoniques et modulation par la rotation. Source : simulation de l'auteur.

8. Méthodes avancées et régimes variables

Structure recherchée	Méthode adaptée	Information produite	Précaution critique
Raies synchrones	Spectre moyennage synchrone	Ordres de rotation et harmoniques	Régime stable ou angle connu
Bandes latérales	Cepstre	Périodicité des espacements	Interprétation de la fréquence
Impacts modulés	Enveloppe kurtogramme	Cadence de défaut	Bande validée
Transitoires	STFT / ondelettes	Localisation temps-fréquence	Compromis de résolution

Structure recherchée	Méthode adaptée	Information produite	Précaution critique
Vitesse variable	Rééchantillonnage angulaire	Raies en ordres	Tachymètre ou phase fiable
Périodicité statistique	Cyclostationnarité	Fréquence cyclique et porteuse	Coût de calcul et lecture spécialisée

Tableau 1 Correspondance entre structure du signal et famille de traitement. Source : synthèse de l’auteur. Les méthodes temps–fréquence localisent les événements non stationnaires, mais ne possèdent jamais simultanément une résolution temporelle et fréquentielle arbitrairement fine. La STFT utilise une fenêtre fixe ; les ondelettes adaptent le pavage, avec une résolution temporelle plus fine aux hautes fréquences. Lorsque la vitesse varie, le spectre en hertz étale les composantes. Le rééchantillonnage angulaire remplace le temps par l’angle de rotation et restitue les ordres cinématiques.

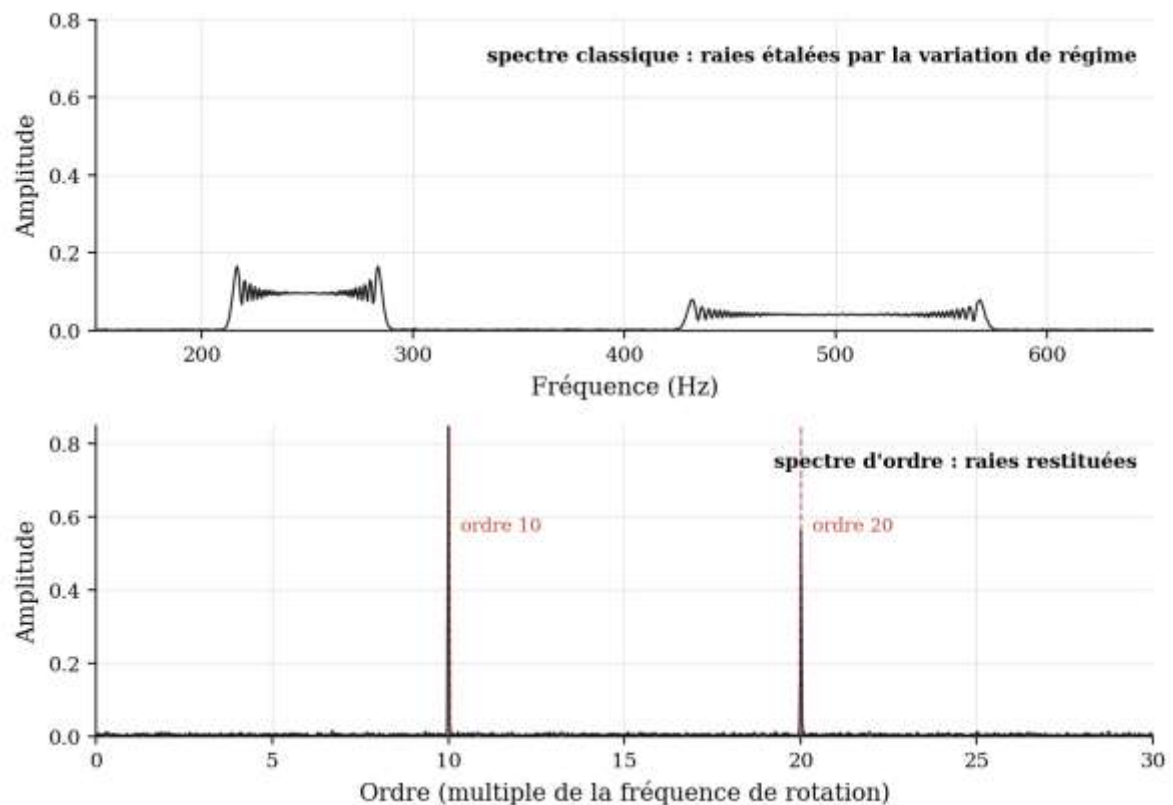


Figure 11 Rééchantillonnage angulaire : les raies étalées en hertz sont restituées en ordres. Source : simulation de l’auteur.

La cyclostationnarité généralise l’analyse d’enveloppe en recherchant la périodicité des statistiques pour chaque bande porteuse. La carte de modulation cyclique localise simultanément la résonance autour de 3,5 kHz et la modulation à 89,6 Hz. Elle fournit ainsi une confirmation indépendante, sans imposer une bande de démodulation unique au départ [6].

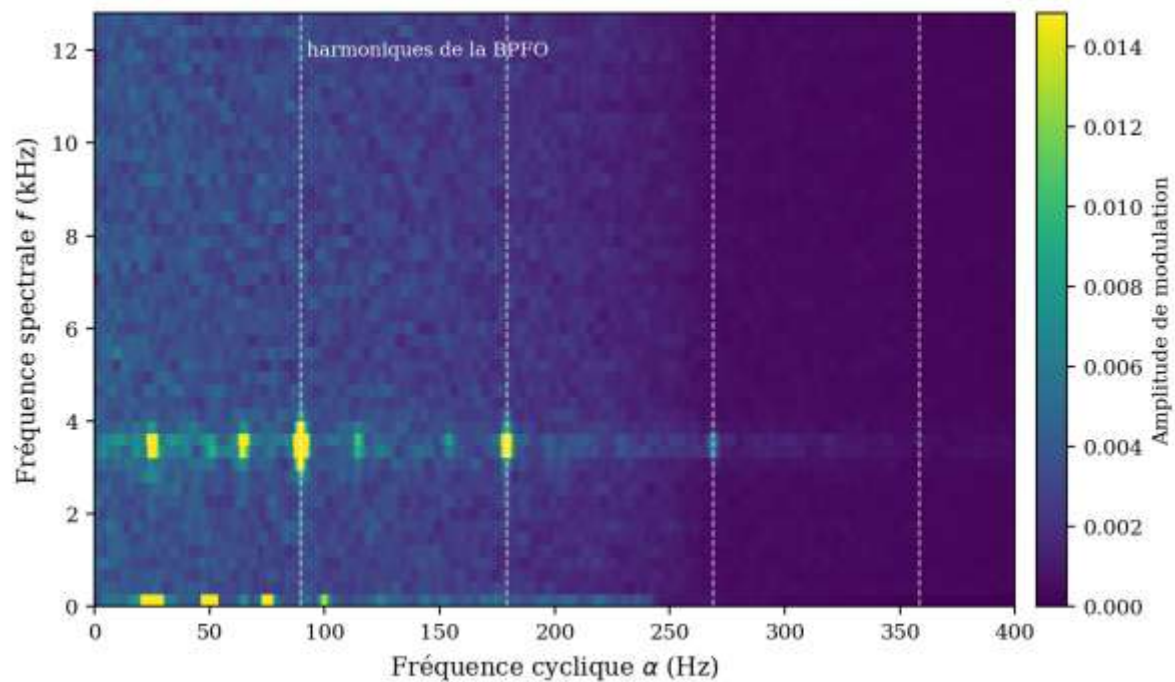


Figure 12 Carte de modulation cyclique : résonance porteuse et fréquence cyclique du défaut.
Source : simulation de l'auteur.

9. Chaîne ordonnée et prévention des erreurs

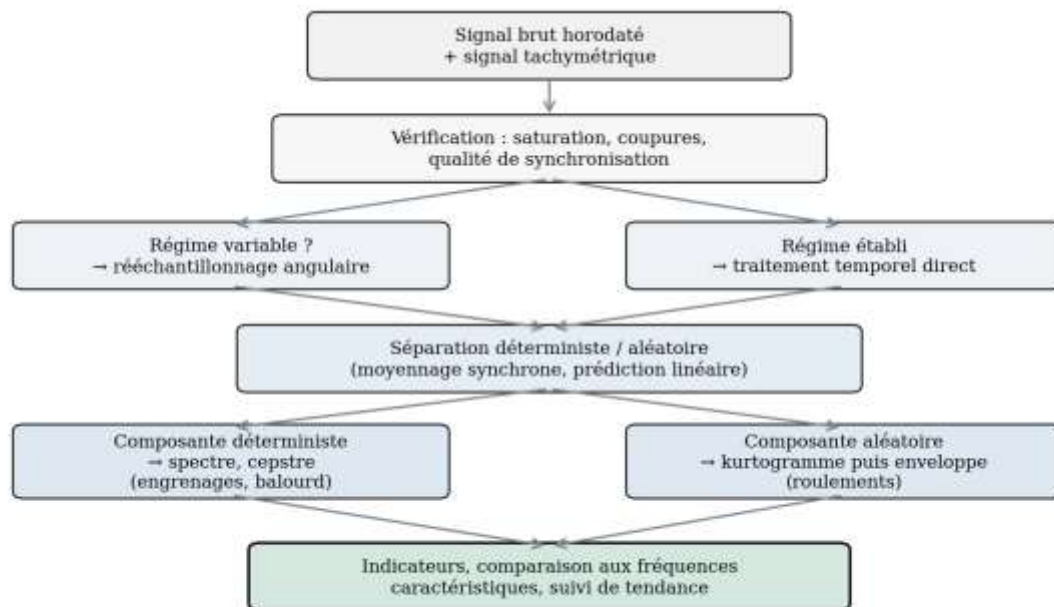


Figure 13 Chaîne de traitement ordonnée proposée pour le diagnostic. Source : conception de l'auteur.

L'ordre des opérations est une dépendance scientifique. La qualité du signal est vérifiée avant toute transformation ; le régime variable est compensé avant l'analyse spectrale ; les composantes déterministes

et aléatoires sont séparées avant les traitements spécialisés ; enfin, toute bande automatique est confirmée par une structure cohérente avec une fréquence calculée.

Erreur récurrente	Risque	Vérification minimale
Conclure depuis le spectre brut	Faux négatif de roulement	Toujours réaliser l'enveloppe
Analyser un régime variable en hertz	Étalement et perte de raies	Contrôler la vitesse ; passer aux ordres
Comparer des traitements différents	Fausse tendance	Figurer bande, fenêtre, moyennes et normalisation
Valider aveuglément un kurtogramme	Source impulsive étrangère	Exiger une famille harmonique cohérente
Ignorer l'écrtage	Harmoniques artificielles	Inspecter le temporel et la pleine échelle
Associer une raie isolée à un défaut	Faux positif	Vérifier rapport non entier, harmoniques et bandes latérales

Tableau 2 Erreurs de diagnostic et contrôles associés. Source : proposition de l'auteur.

10. Discussion et apport scientifique de l'auteur

10.1 Le cadre MPT

Contribution originale cadre MPT Modèle physique : expliciter la structure attendue du défaut. Preuve croisée : exiger la convergence d'au moins deux représentations ou indices indépendants. Traçabilité : conserver tous les paramètres qui conditionnent la comparabilité du résultat.

Le cadre MPT transforme un enchaînement technique en procédure de preuve. Le modèle physique interdit l'usage opportuniste d'un algorithme sans hypothèse. La preuve croisée distingue une coïncidence spectrale d'un diagnostic : dans le cas étudié, la bosse de résonance, le maximum du kurtogramme, la famille harmonique de l'enveloppe et la carte cyclique convergent. La traçabilité rend la tendance interprétable : bande, fenêtre, recouvrement, durée, moyennes, normalisation, vitesse et version de l'algorithme doivent accompagner chaque indicateur.

Cet apport est particulièrement important pour l'intelligence artificielle. Sans standardisation du prétraitement, un modèle peut apprendre la signature d'un capteur, d'une fenêtre ou d'un régime plutôt que celle du défaut. Le cadre MPT agit comme une porte de qualification avant l'apprentissage : seules les variables fondées physiquement, confirmées et traçables entrent dans le jeu de données.

10.2 Résultat central et portée

Le résultat le plus convaincant est la dissociation entre visibilité et existence. Dans le même signal, le défaut est presque absent des indicateurs scalaires, invisible comme raie dans le spectre brut, indirectement

suggéré par une résonance, puis clairement prouvé par démodulation. L'absence de signature dans une représentation n'est donc pas l'absence de défaut ; elle peut être l'échec du modèle de représentation.

10.3 Limites et perspectives

La démonstration repose sur une simulation à paramètres connus et doit être complétée par des bancs expérimentaux puis par des données de terrain. Les défauts multiples, les transmissions complexes, les variations de charge et les résonances mobiles peuvent réduire la séparabilité. Les perspectives concernent l'évaluation quantitative du cadre MPT sur le taux de faux positifs et faux négatifs, la propagation de l'incertitude du traitement et l'intégration d'indicateurs cyclostationnaires dans des modèles explicables.

11. Conclusion

Le diagnostic des machines tournantes ne consiste pas à multiplier les indicateurs, mais à choisir la représentation qui correspond à la physique du défaut. Les indicateurs scalaires décrivent une énergie globale ; le spectre décrit les périodicités stationnaires ; l'enveloppe révèle une modulation impulsive ; le cepstre résume les espacements ; les méthodes temps–fréquence suivent les transitoires ; le rééchantillonnage angulaire restaure la cohérence à vitesse variable ; la cyclostationnarité relie périodicité statistique et bande porteuse.

L'étude démontre qu'un défaut naissant de bague externe, invisible aux méthodes globales, devient une preuve diagnostique lorsque la bande de résonance est identifiée, démodulée et confirmée. Le cadre MPT proposé Modèle physique, Preuve croisée, Traçabilité rend cette démarche explicite et reproductible. Il place l'intelligence algorithmique à sa juste position : non comme substitut à la compréhension du signal, mais comme prolongement d'une chaîne de raisonnement techniquement maîtrisée.

Bibliographie

1. ISO. (2016). ISO 13373-2:2016 Condition monitoring and diagnostics of machines: Vibration condition monitoring, Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data. International Organization for Standardization.
2. Randall, R. B. (2021). Vibration-based condition monitoring: Industrial, automotive and aerospace applications (2nd ed.). Wiley.
3. Randall, R. B., & Antoni, J. (2011). Rolling element bearing diagnostics A tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(2), 485–520. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.07.017>
4. McFadden, P. D., & Smith, J. D. (1984). Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing. *Journal of Sound and Vibration*, 96(1), 69–82. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(84\)90595-9](https://doi.org/10.1016/0022-460X(84)90595-9)
5. Antoni, J. (2006). The spectral kurtosis: A useful tool for characterising non-stationary signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(2), 282–307. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.09.001>
6. Antoni, J. (2009). Cyclostationarity by examples. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(4), 987–1036. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2008.10.010>
7. Harris, F. J. (1978). On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, 66(1), 51–83. <https://doi.org/10.1109/PROC.1978.10837>
8. Welch, P. D. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2), 70–73. <https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901>

9. Bogert, B. P., Healy, M. J. R., & Tukey, J. W. (1963). The quefrency analysis of time series for echoes. In M. Rosenblatt (Ed.), *Proceedings of the Symposium on Time Series Analysis* (pp. 209–243). Wiley.
10. Braun, S. (2011). The synchronous (time domain) average revisited. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(4), 1087–1102. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.07.016>
11. Cohen, L. (1995). *Time-frequency analysis*. Prentice Hall.
12. Mallat, S. (2009). *A wavelet tour of signal processing: The sparse way* (3rd ed.). Academic Press.
13. Ho, D., & Randall, R. B. (2000). Optimisation of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 14(5), 763–788. <https://doi.org/10.1006/mssp.2000.1304>
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. (2018). *ISO 17359:2018 Condition monitoring and diagnostics of machines: General guidelines*. International Organization for Standardization.