

Détection précoce de défauts dans les moteurs asynchrones par analyse spectrale de leurs courants statoriques

Lenny Réthoré^{1,2} Pierre Granjon¹
John Jairo Martinez Molina¹ Frédérique Roffet²

¹Grenoble Images Parole Signal Automatique (GIPSA-lab)
²Schneider Electric

3^{ème} Congrès SAGIP | 21 - 23 Mai 2025



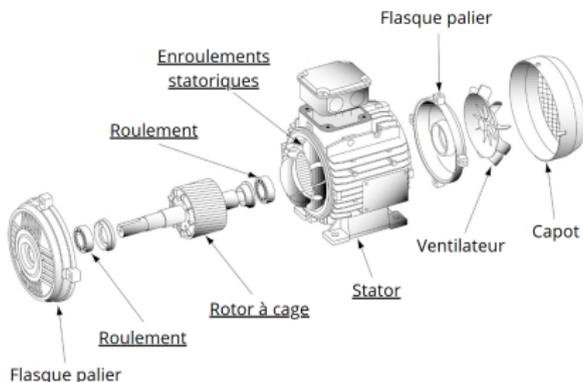
gipsa-lab



- 1 Maintenance prédictive des moteurs
- 2 Analyse des courants statoriques
- 3 Stratégie de détection de défauts
- 4 Conclusion

- 1 Maintenance prédictive des moteurs
- 2 Analyse des courants statoriques
- 3 Stratégie de détection de défauts
- 4 Conclusion

Qu'est-ce que la maintenance prédictive et pourquoi ?



- Surveillance continue des moteurs électriques¹
 - éviter les pannes et les arrêts non anticipés
 - augmenter la durée de vie résiduelle du moteur
 - optimiser l'efficacité énergétique
 - proposer un cadre de travail plus sécurisé
- Deux approches principales
 - analyse vibratoire
 - analyse des courants statoriques du moteur (MCSA)

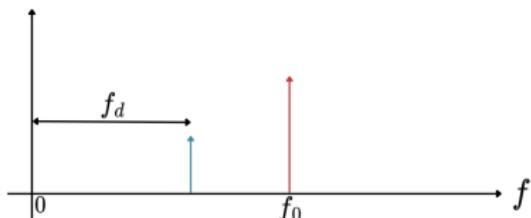
1. Hamid A TOLIJAT et al. *Electric machines : modeling, condition monitoring, and fault diagnosis*. CRC press, 2012

Approche vibratoire contre approche électrique

Défauts moteurs en vibratoire

- propagation d'une onde mécanique
- vibration du système à fréquence f_d

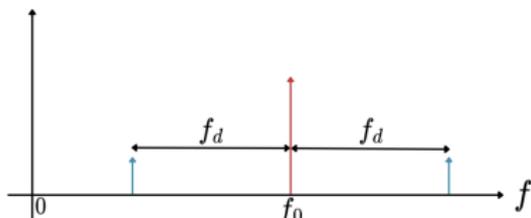
DSP Vibrations



Défauts moteurs en électrique²

- vitesse de rotation du rotor modifiée
- modulation des courants statoriques

DSP Courants



Approche vibratoire

- ✗ intervention sur le moteur
- ✗ coûteux
- ✗ intrusif

Approche électrique (MCSA)

- ✓ acquisition via le panneau électrique
- ✓ très peu coûteux
- ✓ non intrusif

2. M El Hachemi BENBOUZID. « A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection ». In : *IEEE transactions on industrial electronics* 47.5 (2002), p. 984-993

- 1 Maintenance prédictive des moteurs
- 2 Analyse des courants statoriques**
- 3 Stratégie de détection de défauts
- 4 Conclusion

Transformation en Composantes Symétriques Instantanées (ISC)

Fusion de l'information des 3 courants via les Composantes Symétriques Instantanées³

Définition

Soit $i(t)$ un courant triphasé quelconque. Les ISC associées à $i(t)$ sont données par la transformation de Fortescue de $i(t)$, telles que :

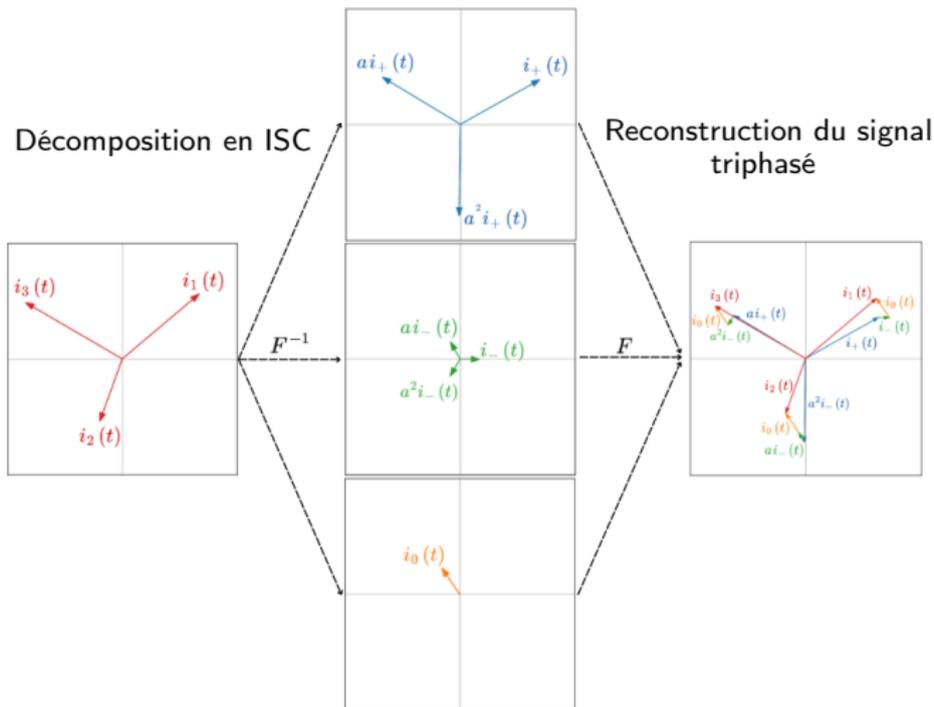
$$\begin{pmatrix} i_+(t) \\ i_-(t) \\ i_0(t) \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}}_{F^{-1}} \underbrace{\begin{pmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ i_3(t) \end{pmatrix}}_{i(t)}, \quad (1)$$

avec F la matrice de Fortescue, $a = e^{\frac{2j\pi}{3}}$ et $j^2 = -1$.

- $i_+(t)$ est l'ISC positive ou directe.
- $i_-(t)$ est l'ISC négative ou indirecte.
- $i_0(t)$ est l'ISC homopolaire.

Interprétation des ISC

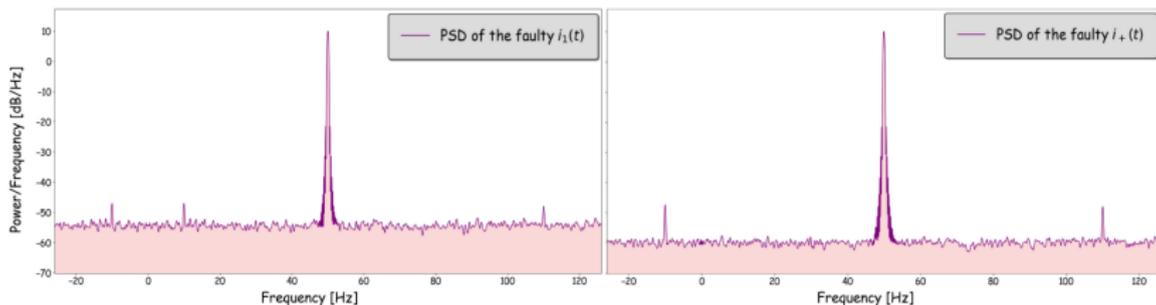
- $i_+(t)$ capture les phénomènes équilibrés du système, dont les défauts d'intérêt.
- $i_-(t)$ et $i_0(t)$ capturent les phénomènes déséquilibrés du système triphasé.



Apports des ISC

Propriétés⁴

- Concentration des informations utiles dans $i_+(t)$, plus particulièrement dans la partie de ses fréquences positives
- Suppression des composantes déséquilibrées dans le spectre de $i_+(t)$
- Amélioration d'un facteur 3 du Rapport Signal sur Bruit (RSB)

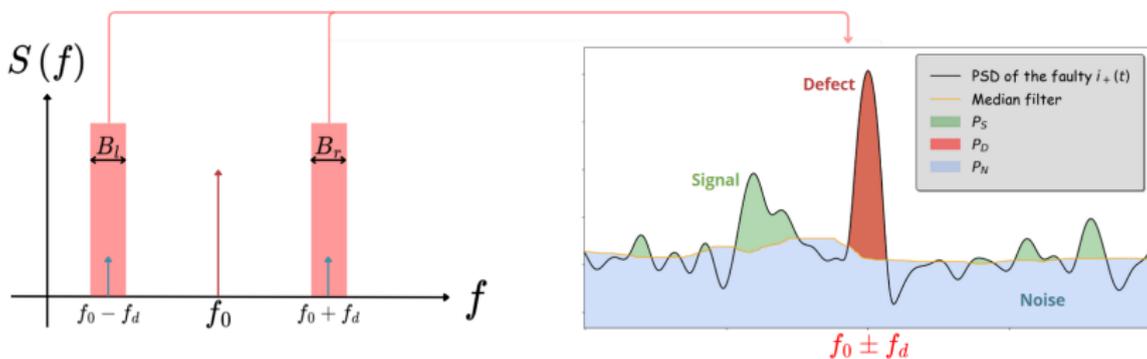


4. Georgia CABLEA, Pierre GRANJON et Christophe BÉRENGUER. « Three-phase electrical signals analysis for mechanical faults monitoring in rotating machine systems ». In : *Mechanical Systems and Signal Processing* 92 (2017), p. 278-292

Indicateur de santé basé sur la DSP de $i_+(t)$

Construction d'un indicateur de santé à partir de $i_+(t)$.

- définition de deux bandes spectrales d'intérêt B_l et B_r autour de $f_0 \pm f_d$
- estimation $\widehat{S}_N(f)$ du niveau de bruit $S_N(f)$ via un filtre médian



On pose : $P_N = \int_{B_l \cup B_r} \widehat{S}_N(f) df$ et $P_D + P_S = \int_{B_l \cup B_r} \max(0, S(f) - \widehat{S}_N(f)) df$.

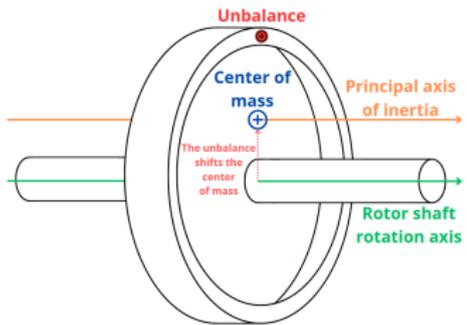
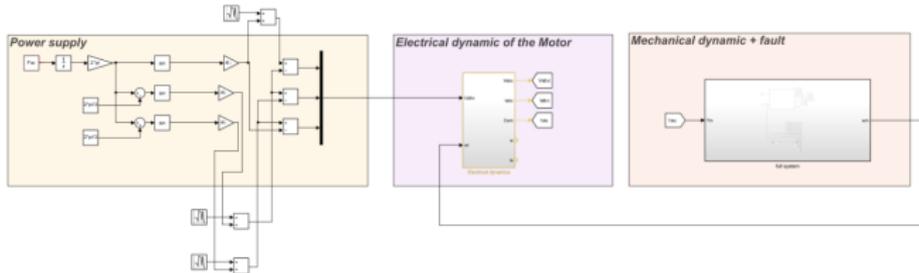
- Définition d'un indicateur de santé m sous la forme d'un RSB :

$$m = \frac{P_D + P_S}{P_N} \quad (2)$$

Exemple sur des données issues d'un modèle physique de moteur

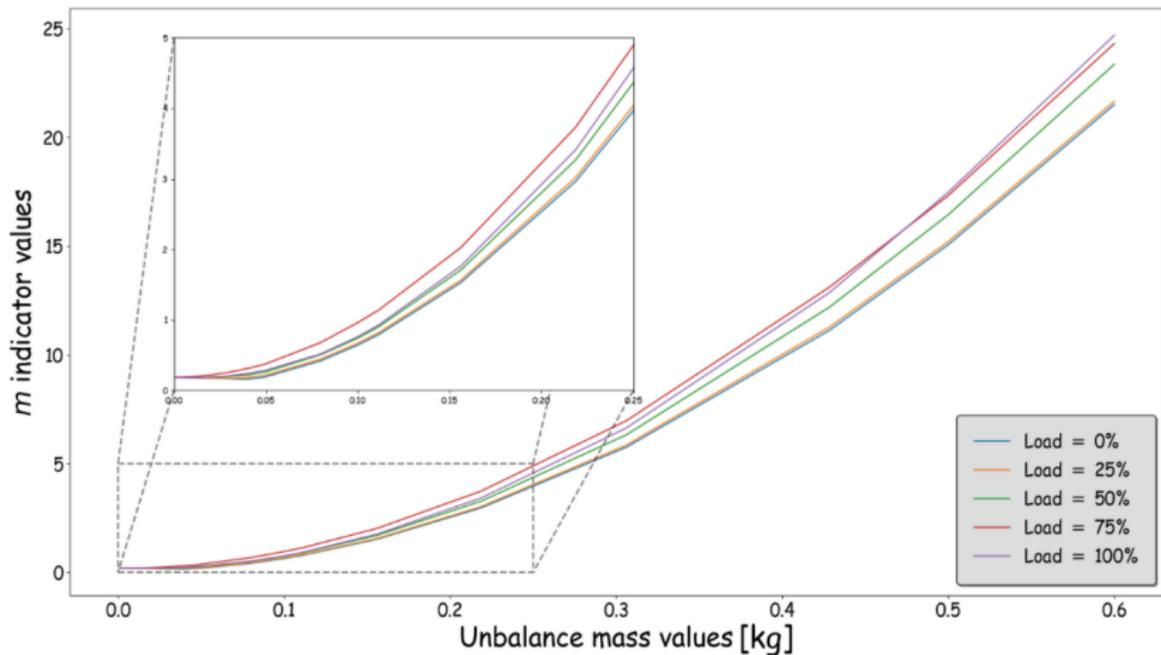
Modélisation de balourd pour moteur 7.5kW via modèle Simulink Schneider Electric

- distribution radiale non-uniforme de la masse du rotor
- défaut d'excentricité rotorique



- ❑ Balourd compris entre 0kg et 0.6kg
- ❑ Pics engendrés aux fréquences $f_0 \pm f_d = 50 \pm 24.46\text{Hz}$
- ❑ Calcul de m pour des charges allant de 0% à 100% de la charge maximale du moteur

Exemple sur des données issues d'un modèle physique de moteur

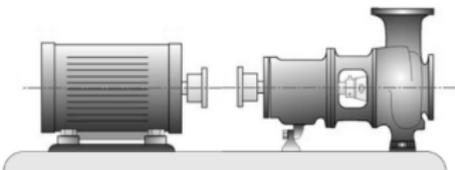


➡ L'indicateur est sensible aux défauts naissants \implies détection précoce possible

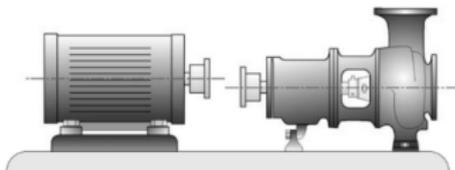
Validation sur des données expérimentales

Banc moteur 4kW | Désalignement parallèle rotorique

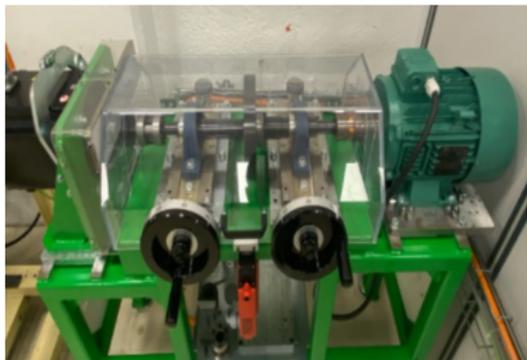
- mauvais alignement entre arbre du rotor et point de charge
- défauts d'excentricité rotorique



(a) Healthy

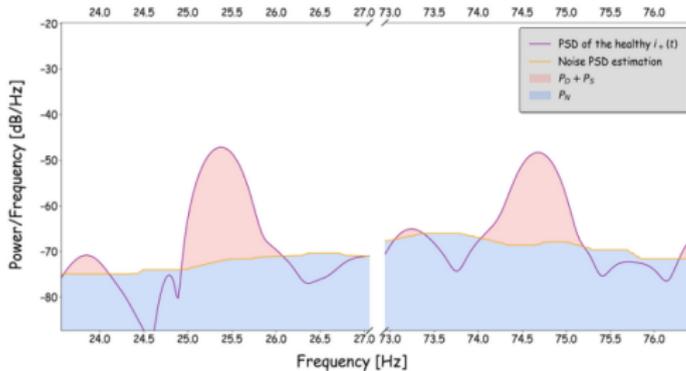


(b) Parallel misalignment

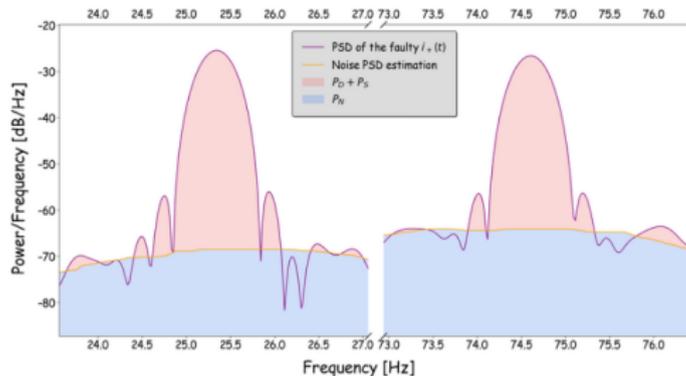


- ❑ Désalignement rotorique de 0mm, 0.1mm, 0.3mm et 0.5mm
- ❑ Pics engendrés aux fréquences $f_0 \pm f_d = 50 \pm 24.69\text{Hz}$
- ❑ Calcul de m pour 50% de la charge maximale du moteur

Observations préliminaires

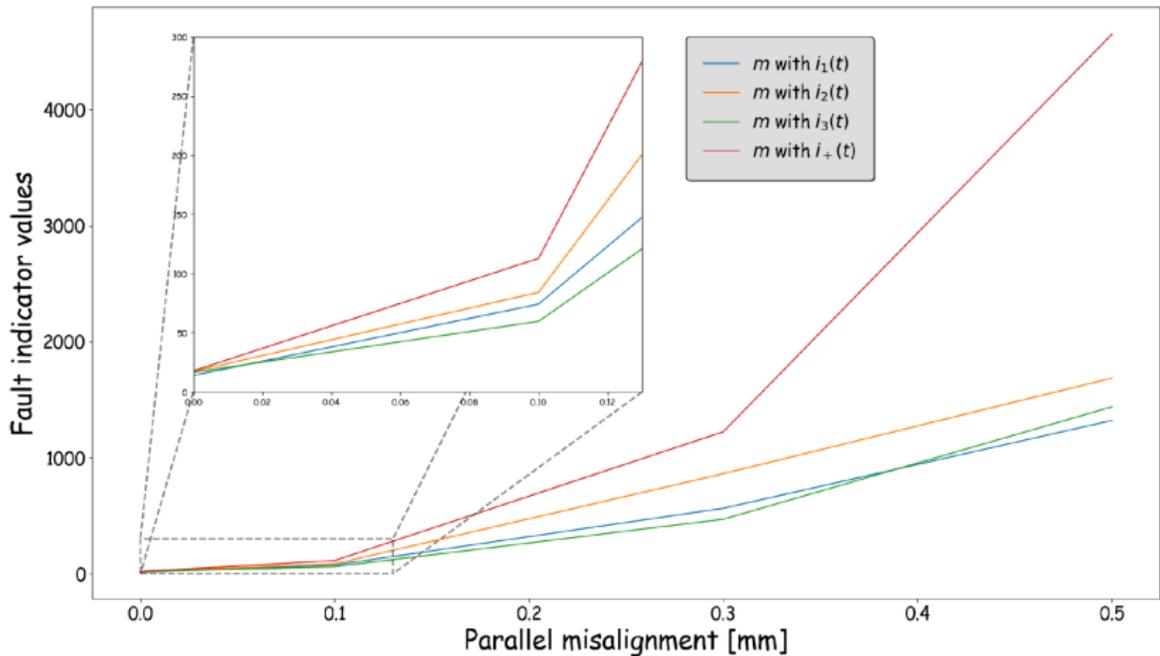


↪ Désalignement = 0mm



↪ Désalignement = 0.3mm

Résultats expérimentaux



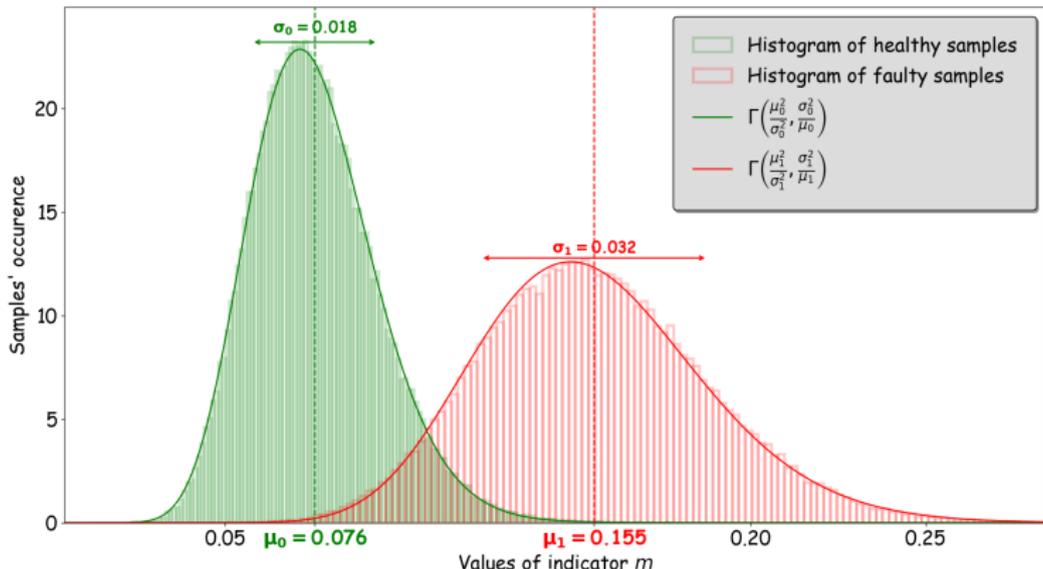
- ✓ L'utilisation de $i_+(t)$ permet une meilleure sensibilité de m aux défauts
- ✓ L'indicateur m est sensible aux défauts, même naissants \implies détection précoce des défauts envisageable avec m basé sur $i_+(t)$

- 1 Maintenance prédictive des moteurs
- 2 Analyse des courants statoriques
- 3 Stratégie de détection de défauts**
- 4 Conclusion

Comportement statistique de l'indicateur m

Développement d'un indicateur de santé m sensible aux défauts

➤ étude de son comportement statistique en présence ou non d'un défaut

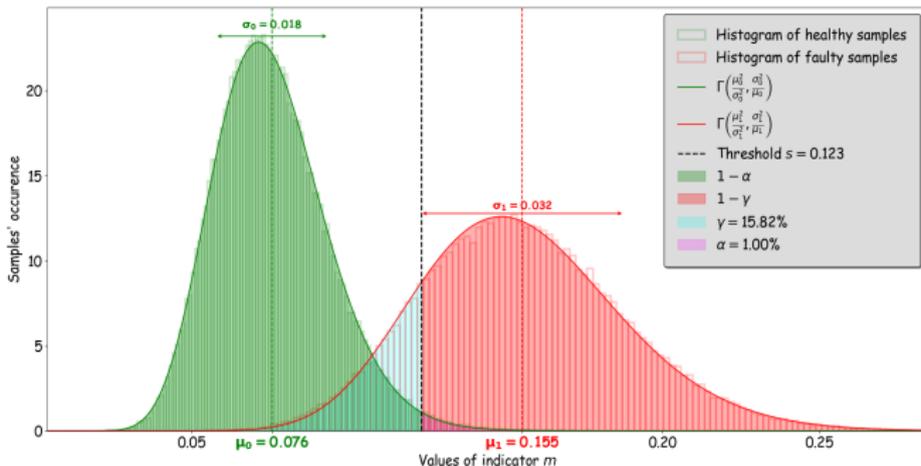


- Test statistique d'adéquation sur 100000 réalisations saines et avec défauts (données simulées) $\Rightarrow m \sim \Gamma$
- Validation de la loi de m sur 10592 signaux issus d'un moteur client en conditions réelles (mélangeur industriel)

Lemme de Neyman-Pearson⁵ pour la loi Γ

Algorithme de détection basique \Rightarrow test d'hypothèses binaire adapté à la loi Γ

- ✓ détermination d'un seuil à partir d'un taux de fausses alarmes α
- ✓ déduction du taux de bonnes détections $1 - \gamma$



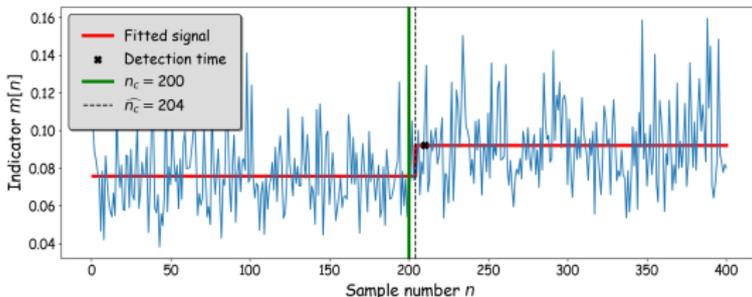
- ✗ défaut naissant $\Rightarrow 1 - \gamma$ trop petit \Rightarrow Mauvaises performances
- ✗ ne prend en compte que la valeur courante de m , pas les précédentes

5. Jerzy NEYMAN et Egon Sharpe PEARSON. « IX. On the problem of the most efficient tests of statistical hypotheses ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A* 231.694-706 (1933), p. 289-337

Algorithme CuSum | Détection de ruptures

Une des solutions = Algorithme CuSum (Cumulative Sum)⁶

- algorithme de détection de ruptures
- prend en compte l'historique temporel des valeurs de $m \sim \Gamma$
- Exemple sur $N = 400$ réalisations de m (issues d'un modèle) avec introduction d'un défaut naissant au 200^{ème} échantillon



- ✓ détection avec estimation $\hat{n}_c = 204$ de l'échantillon de rupture $n_c = 200$
- ✓ faible retard à la détection de 8 échantillons
- ✓ respecte un taux α de fausses alarmes

6. Harold Manuel MADRID-ALVAREZ, Juan Carlos GARCIA-DIAZ et Víctor G TERCERO-GOMEZ. « A CUSUM control chart for gamma distribution with guaranteed performance ». In : *Quality and Reliability Engineering International* 40.3 (2024), p. 1279-1301

- 1 Maintenance prédictive des moteurs
- 2 Analyse des courants statoriques
- 3 Stratégie de détection de défauts
- 4 Conclusion**

Conclusions et perspectives

Points forts de l'approche

- ✓ méthode reposant sur le calcul de $i_+(t)$ du signal triphasé, améliorant le RSB
- ✓ construction d'un indicateur de santé $m \sim \Gamma$ robuste et sensible aux défauts
- ✓ mise en place d'algorithmes permettant la détection précoce de défauts moteurs

Limitations

- ✗ indicateur m sensible aux autres composantes du spectre (P_S)
- ✗ algorithme CuSum considérant l'état initial comme une référence saine

Perspectives

- suppression d'une partie des autres composantes du spectre par utilisation du signal de tension \implies ESA (Electrical Signature Analysis)
- utilisation du Machine Learning \implies pronostic et estimation de la durée de vie résiduelle du moteur

*Merci pour votre attention !
Des questions ?*