

## Simulation électromécanique par la MED : Application au diagnostic des défauts dans les roulements à billes

Charles MACHADO <sup>1</sup>, Khaled BOORBATACHE <sup>2</sup>, Mohamed GUESSASMA <sup>1</sup>,  
Emmanuel BELLENGER <sup>1</sup>, Valéry BOURNY <sup>1</sup>, Jérôme FORTIN <sup>1</sup>

<sup>1</sup> LTI, Université de Picardie Jules Verne, prénom.nom@u-picardie.fr

<sup>2</sup> LGCGM, INSA de Rennes, mohamed-khaled.bourbatache@insa-rennes.fr

**Résumé** — L'originalité de ce travail repose sur la modélisation par les éléments discrets pour simuler le roulement et sur l'utilisation des mesures électriques pour caractériser les défauts. D'un point de vue numérique, nous proposons d'étudier le transfert des informations mécaniques vers les grandeurs électriques, afin de développer une nouvelle méthode de diagnostic de l'état des roulements en exploitant la sensibilité et la richesse de la mesure électrique.

**Mots clés** — défauts de roulement, diagnostic, mesure électrique, éléments discrets

### 1 Introduction

Des études statistiques montrent que les pannes imputables aux roulements sont prépondérantes dans les machines tournantes. Selon différentes sources, elles représentent entre 40 % et 50% des pannes totales en portant atteinte à la disponibilité de la machine et à celle des systèmes environnants. Il est donc nécessaire, d'un point de vue industriel et scientifique de concentrer les efforts de diagnostic des machines tournantes sur les roulements. Les enjeux en terme de productivité et de sécurité sont non négligeables. La surveillance et le diagnostic des défauts sont devenus indispensables et beaucoup de méthodes existent. Généralement, une surveillance par analyse vibratoire est mise en place. L'objectif de cette étude est de proposer un nouvel outil de maintenance prédictive qui exploite la mesure [10] électrique (courant, tension, impédance) qui permet de suivre l'état mécanique d'un roulement. Un faible courant traverse le roulement par les éléments roulants et permet de calculer une résistance électrique en temps réel. Un prototype expérimental ayant permis d'obtenir les premières mesures (Figure 1) démontre la faisabilité de cette méthode. Nous recherchons à analyser ces signatures électriques observées

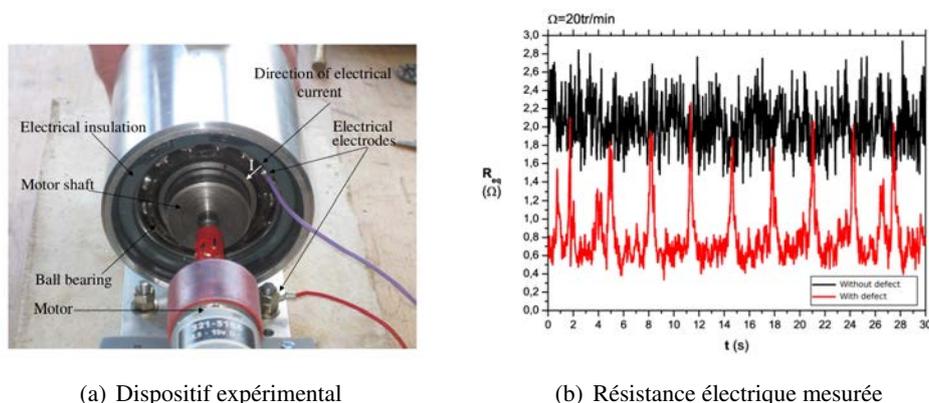


Fig. 1 – Prototype expérimental

sur le graphe rouge, présenté sur la Figure 1(b), pour caractériser le défaut (position et taille). Nous avons développé une approche numérique basée sur les éléments discrets [2][3], pour modéliser les phénomènes de transfert d'information entre l'état mécanique et la mesure électrique [1]. Cette démarche

constitue une première. Le but des simulations présentées ici est de comparer les mesures électriques obtenues en présence de différents défauts aux mesures du roulement sain. Nous nous baserons sur une analyse des données temporelles et fréquentielles [5][9], comme pour les mesures vibratoires [10].

## 2 Modélisation électromécanique du roulement

Il est nécessaire de modéliser correctement le fonctionnement du roulement. Cela implique, d'une part d'avoir une bonne description du comportement mécanique du roulement en fonctionnement, et d'autre part d'avoir à disposition un modèle de transfert électrique cohérent avec le système étudié.

### 2.1 Modélisation électromécanique

La modélisation 2D du roulement par éléments discrets (MED) considère un roulement comme un système multi-contact composé d'un ensemble de particules assujetties à des efforts mécaniques [2][8]. La MED est formulée par l'approche dite Non-Smooth Contact Dynamics (NSCD) [6][7] qui considère des particules non-déformables et non-pénétrables. La NSCD est une branche de la MED qui permet de modéliser correctement les effets dynamiques en gardant une discrétisation en temps grande, en comparaison des codes explicites. La détection des contacts et le calcul des grandeurs au point de contact permet de modéliser correctement la dynamique du système et d'étudier les phénomènes de transfert d'énergie.

Des travaux récents [1] ont permis de modéliser le transfert électrique dans les systèmes multi-contacts. Le roulement est assimilé à un type particulier de ces systèmes, où le nombre de coordination est constant. Ce travail constitue une application du modèle de conductance électrique développé au sein du LTI. Le transfert électrique dépend des grandeurs mécaniques intrinsèques et des propriétés électriques des matériaux. La réponse électrique du système est liée aux surfaces de contact bille/piste. Ces surfaces elliptiques, dans le cas d'un roulement à billes sont calculées par la théorie de Hertz [4]. Le modèle de conductance électrique s'écrit d'une manière générale entre 2 contacts d'une même particule (Figure 2), par l'expression :

$$C_{ij}^k = \frac{1}{R_{ij}^k} = \frac{\gamma S_i S_j}{2V_b} (1 - \cos\theta) \quad (1)$$

où  $R_{ij}^k$  et  $C_{ij}^k$  désignent respectivement la résistance électrique élémentaire et la conductance électrique élémentaire, formées par les contact  $i$  et  $j$ , correspondant à la branche électrique  $k$ .  $\gamma$  est la conductivité du matériau,  $V_b$  désigne le volume de la particule,  $\theta$  est l'angle formé entre les points de contact  $i$ ,  $j$  et le centre de la particule (dans notre cas  $\theta = \pi$ ).  $S_i$  et  $S_j$  sont les surfaces de contact évaluées par la théorie de Hertz. Le contact est supposé parfait ce qui signifie que la couche d'oxyde et l'effet du lubrifiant sont négligés. Le couplage électromécanique intervient dans l'évaluation des surfaces de contact de type bille/piste. Ces surfaces décrivent des ellipses. Le modèle de Greenwood [4] permet d'estimer les demi-axes  $a$  et  $b$  décrivant l'ellipse de contact (Figure 3). On considère  $f_n$ , la composante normale de la force au point de contact, d'après la théorie de Hertz, on a :

$$c = \left( \frac{3f_n r_{eff}}{4E_{eff}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad c^2 = ab \quad (2)$$

Ici,  $E_{eff}$  désigne le module de Young effectif donné par l'expression  $\frac{1}{E_{eff}} = \frac{2(1-\nu^2)}{E}$ , avec  $E$  et  $\nu$  respectivement, le module de Young et le coefficient de Poisson du matériau.  $r_{eff}$  est le rayon effectif caractérisant l'ellipse de contact, déterminé par l'expression :

$$r_{eff} = \left( AB \left( \frac{A+B}{2} \right) \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (3)$$

où  $A$  et  $B$  sont donnés dans le cas du contact bille/piste, par les expressions (4) :

$$A = \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_{ext(int)}} \quad , \quad B = \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_{ext(int)}} \quad (4)$$

où,  $R_{ext}^c$  et  $R_{int}^c$  sont respectivement les rayons de courbure de la piste extérieure et de la piste intérieure, déterminés expérimentalement.  $R_b$ ,  $R_{ext}$  et  $R_{int}$ , les rayons respectifs des éléments roulants, de la piste extérieure et de la piste intérieure. Le Tableau 1, donne les grandeurs utilisées pour modéliser le roulement réel.

Les demi-axes de l'ellipse de contact sont déterminés, selon le modèle de Greenwood [4] en utilisant l'approximation :

$$\frac{a}{b} \simeq \left( \frac{A}{B} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

La surface de contact elliptique est alors donnée par l'expression :  $S = \pi ab$ .

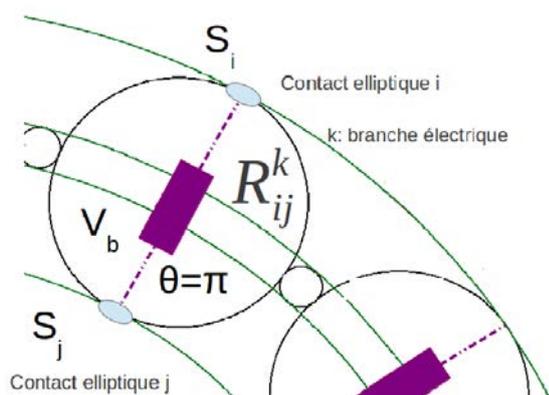


Fig. 2 – Conductance élémentaire

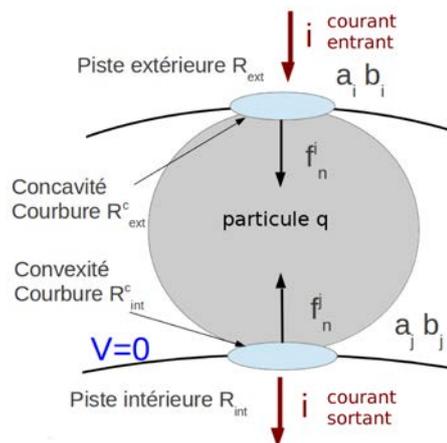


Fig. 3 – Contacts elliptiques

Le couplage électromécanique est implanté dans le code de calcul MULTICOR [3][8], qui permet de déterminer les positions, les vitesses de chaque particule ainsi que les réactions de contact, à chaque instant. La résolution électrique basée sur les lois de Kirchhoff, ainsi que la loi d'Ohm requiert la résolution mécanique pour écrire le modèle de conductance proposé par l'expression (1). L'ensemble des étapes de résolution est résumé ci-dessous (Figure 4)

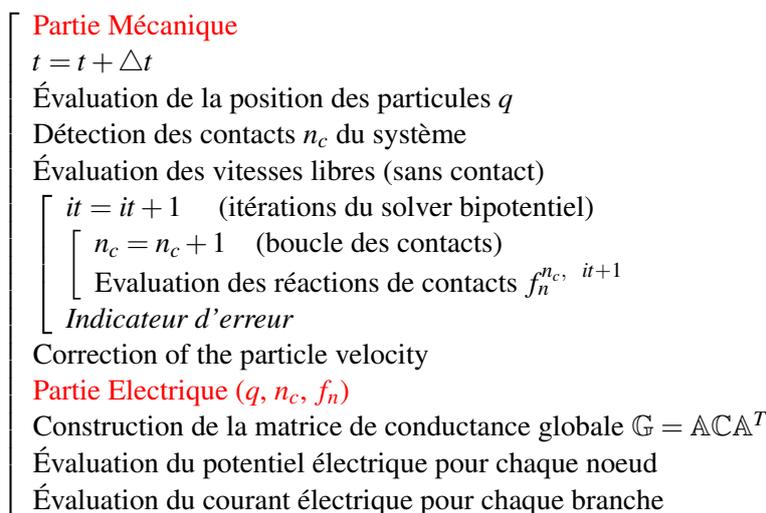


Fig. 4 – Algorithme de résolution électromécanique

## 2.2 Caractéristiques géométriques du roulement

Le roulement réel est composé de 13 éléments roulants régulièrement espacés par une cage en polyamide isolant. L'ensemble est maintenu entre une bague extérieure serrée et une bague intérieure

mobile. L'analogie entre le système réel et la modélisation est présentée par la Figure 5. Les éléments roulants sont des billes d'acier et la cage est représentée par des billes isolantes.

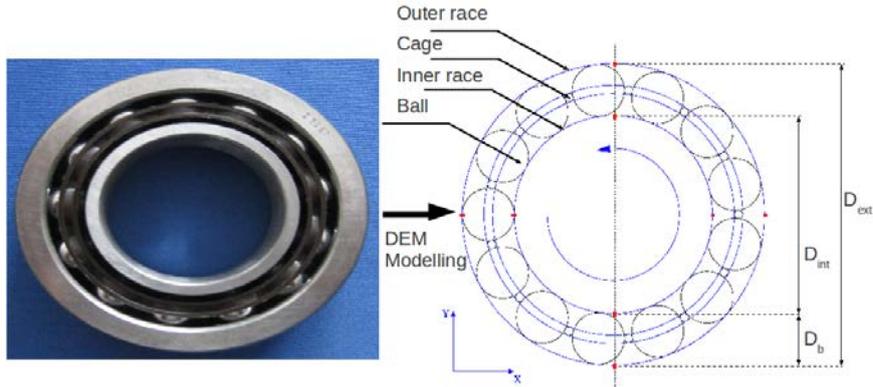


Fig. 5 – Modélisation du roulement à bille par la MED

| $D_{ext}$ | $D_{int}$ | $D_b$   | $N_b$ | $R_{ext}^c$ | $R_{int}^c$ |
|-----------|-----------|---------|-------|-------------|-------------|
| 73.2 mm   | 48 mm     | 12.6 mm | 13    | 6.65 mm     | 6.55 mm     |

Tableau 1 – Caractéristiques géométriques du roulement à bille

Le modèle de conductance donné par l'équation (1) autorise le contact acier/acier, l'effet du lubrifiant n'est pas pris en compte dans notre modèle tout comme l'effet de la couche d'oxyde (contact parfait). Pour décrire la dynamique du roulement, nous introduisons la vitesse angulaire  $\omega$  sur la bague intérieure. La bague extérieure reçoit une force  $F$  isotrope, dirigée vers le centre de la bague qui caractérise le serrage. Le coefficient de frottement acier-acier est aussi considéré. Le système comporte 78 contacts et chacun des 13 éléments roulants est en contact avec 4 voisins.

### 3 Simulation du roulement sain

Les calculs dans le cas du roulement sain serviront d'étalon pour le cas d'un roulement avec défauts. Toutes les simulations sont menées pour les mêmes conditions initiales (Figure 6). La bague extérieure fixe est serrée dans sa direction radiale par la force  $F$ , le courant entrant  $I$  fixé à 0.1 A, ce dernier est distribué sur l'ensemble des contacts bille/bague extérieure, en fonction des réactions normales  $f_n$ . La bague intérieure tourne à  $\omega = 500 \text{ rad/s} \simeq 4500 \text{ tours/min}$ . Les contacts billes/bagues sont au potentiel nul  $V = 0$ , sur la bague intérieure. Le pas de temps de calcul est fixé à  $10^{-6} \text{ s}$ . L'intégralité du courant entrant est récupéré sur la bague intérieure.

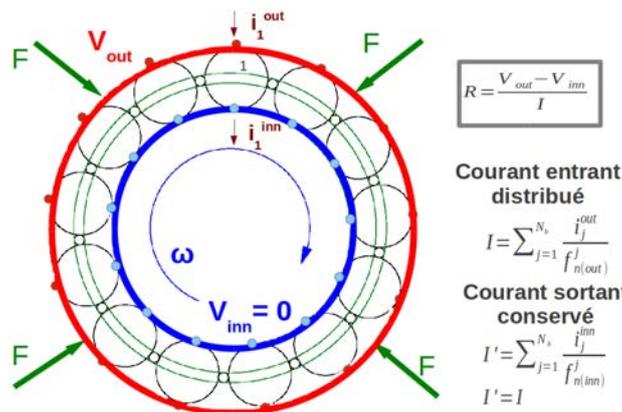


Fig. 6 – Résumé des conditions initiales pour le calcul

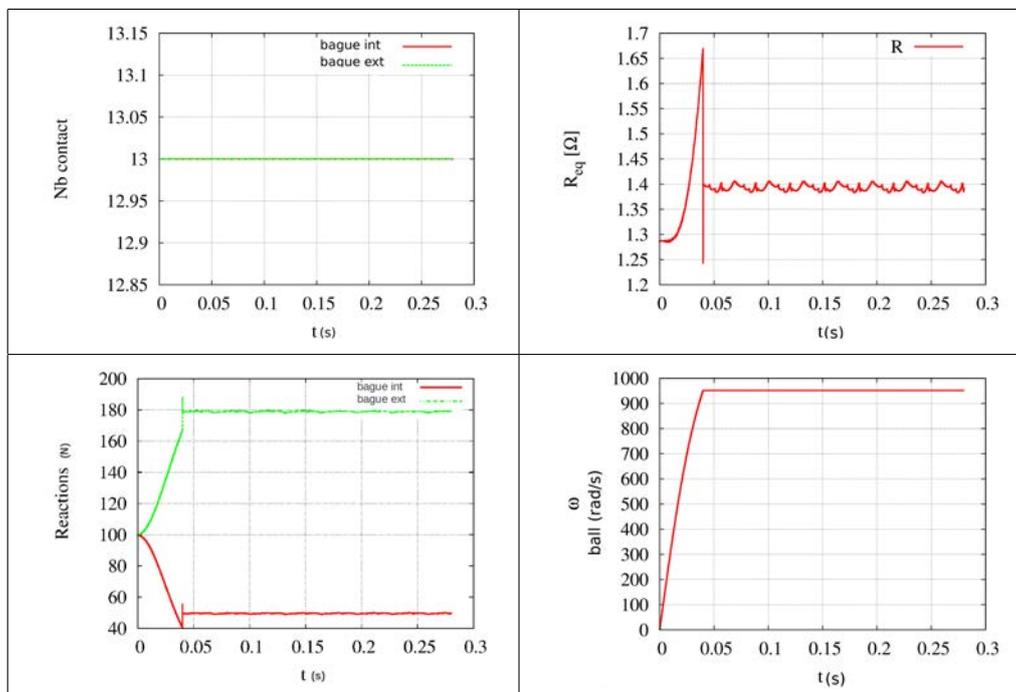


Fig. 7 – Calculs du roulement sain : nombre de contact, résistance électrique, somme des réactions normales par piste, vitesse angulaire des éléments roulants, en fonction du temps

Les résultats des simulations du roulement sain montrent que les contacts électriques ne sont jamais rompus. Sur les graphes Figure 7, il ressort un temps caractéristique qui correspond à un temps de glissement ( $\tau \simeq 0.04$  s). Lorsque le temps  $t > \tau$ , le système atteint son régime stationnaire, les éléments roulants tournent à leur vitesse de fonctionnement. Les réactions normales sur les contacts bille/piste atteignent des valeurs seuils. La somme des réactions normales des contacts bille/piste extérieure comprend à la fois l'effet de la gravité, du serrage et de la force centrifuge ressentie par chaque bille. Le graphe donnant l'évolution de la résistance électrique en fonction du temps montre qu'une fois la phase de glissement dépassée, la résistance est de l'ordre de  $1.39 \Omega$ . On remarque aussi sur la Figure 8 que d'une part, la force centrifuge due à la vitesse des billes est prise en compte dans le calcul des forces, d'autre part que le passage du courant se fait uniquement par les éléments roulants.

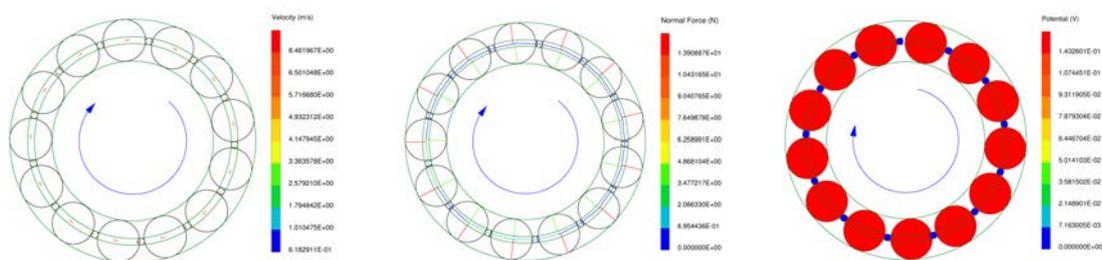


Fig. 8 – Simulation du roulement sain

## 4 Simulation du roulement en présence de différents défauts

Lorsque un roulement en fonctionnement est assujéti à un défaut, il ressent périodiquement l'effet de ce dernier. Par exemple, un défaut sur la bague extérieure générera un signal contenant des chocs espacés de la période de passage entre les billes. Connaissant les caractéristiques géométriques du roulement (d'après le Tableau 1) et sa vitesse de fonctionnement  $\omega$ , il est possible de connaître les fréquences de passage de différents défauts, en fonction de leur localisation [5][10].

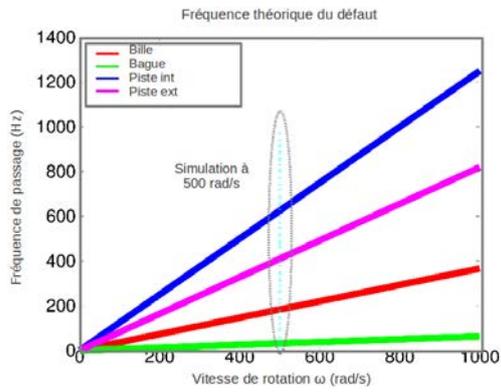


Fig. 9 – Fréquences de passage théoriques

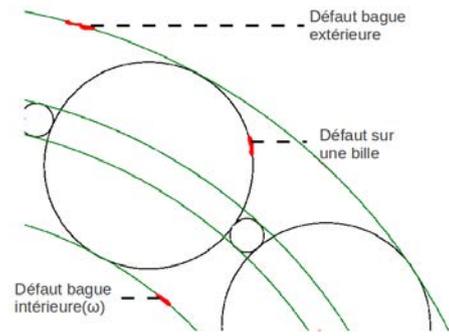


Fig. 10 – Prise en compte des défauts

La Figure 9 détermine les fréquences de passage pour différents défauts, en fonction de leur localisation. Nous utiliserons par la suite la convention donnée par le Tableau 2 pour identifier les défauts présentés sur la Figure 12.

| localisation  | bille               | cage                        | piste intérieure             | piste extérieure             |
|---------------|---------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| convention    | BSF                 | FTF                         | BPFI                         | BPFO                         |
| signification | ball spin frequency | fundamental train frequency | ball passing frequency inner | ball passing frequency outer |

Tableau 2 – Identification du type de défaut

Pour introduire l'effet d'un défaut dans nos simulations, nous considérons qu'un défaut provoque la rupture temporaire d'un contact. Numériquement, le contact sera ignoré lorsqu'il est détecté dans l'intervalle caractérisant la taille du défaut. La schéma proposé par la Figure 10 illustre cette proposition. Les résultats des simulations en présence de différents défauts sont résumés par les résistances électriques calculées en fonction du temps (Figure 11).

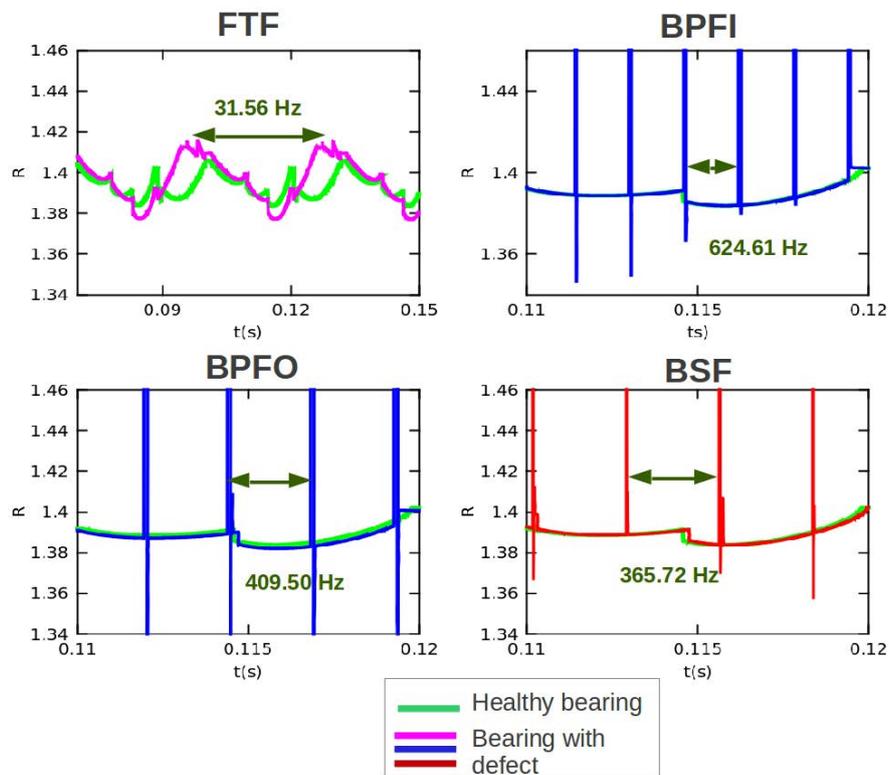


Fig. 11 – Résistance électrique en fonction du temps pour différents défauts à  $\omega = 500$  rad/s

A noter que le défaut de cage est introduit dans la modélisation différemment. En fait, une cage usée provoque un certain jeu. Pour considérer cet effet, une bille isolante modélisant la cage est remplacée par une bille légèrement plus petite.

Pour chaque défaut introduit, nous retrouvons sa fréquence de passage théorique. Soulignons que la fréquence mesurée pour BSF (ball spin frequency) Figure 11 correspond au temps nécessaire pour que le défaut de la bille rencontre successivement les 2 bagues. La fréquence de passage relative à la même bague est donc la moitié, à comparer avec les fréquences théoriques Figure 9. Notre modélisation est donc correcte du point de vue mécanique et d'autre part, nous observons bien un transfert d'information entre l'état mécanique du système et le calcul électrique.



Fig. 12 – Défauts réels associés aux simulations

En regardant de plus près ce qui se passe proche d'une rupture de contact, on tire des informations intéressantes.

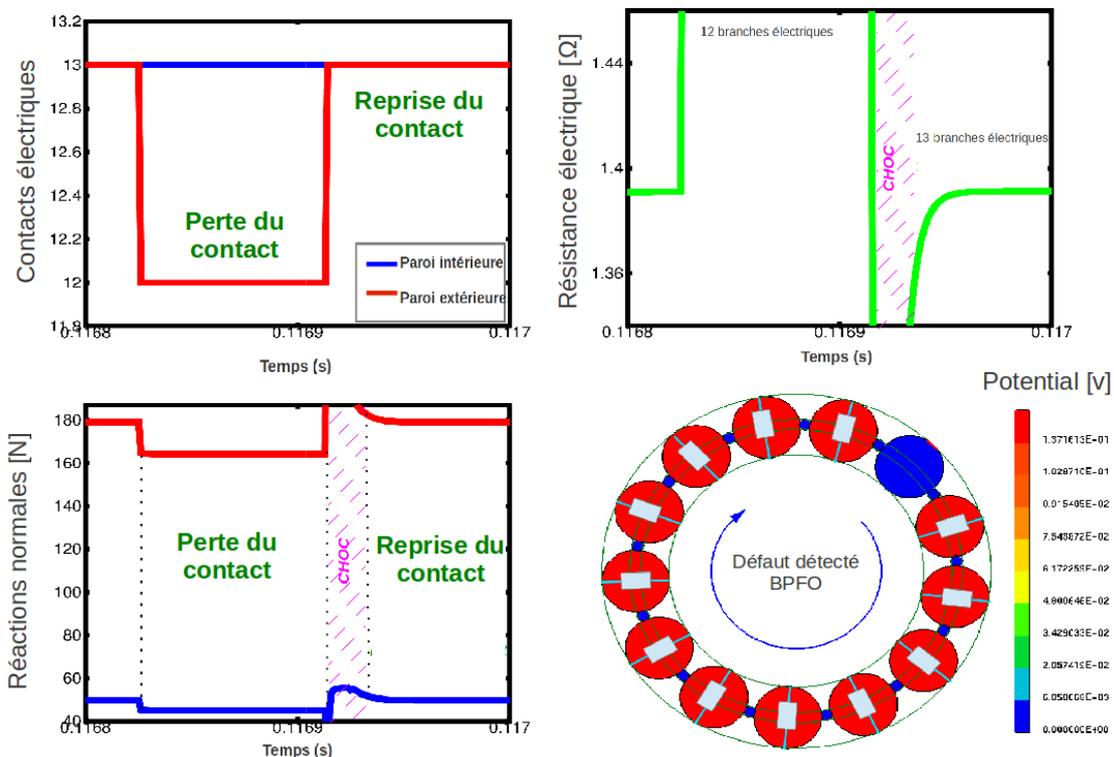


Fig. 13 – BPFO à  $\omega = 500$  rad/s

Ces résultats (Figure 13) sont obtenus lorsque les calculs sont menés dans le cas d'un BPFO mais l'interprétation ci-dessous reste sensiblement la même pour les autres défauts. Les graphes montrent une brusque variation pendant un temps court ( $\Delta t \simeq 10^{-4}$ s). La rupture d'un contact redistribue momentanément l'ensemble des efforts, sur les contacts restants. Le calcul de la résistance électrique équivalente du

système pendant ce temps de rupture augmente puisque un chemin électrique est supprimé (une résistance électrique en moins comme le montre le calcul du potentiel). La reprise du contact s'accompagne d'un choc (impact + relaxation) qui perturbe très brièvement la résistance électrique. Ce phénomène se produit périodiquement, espacé de l'intervalle entre le passage de 2 billes successives sur le même défaut. Entre deux pertes de contact, la résistance électrique se comporte comme le cas sain. Notons qu'après avoir déterminé à la fois, la fréquence de passage du défaut liée à sa localisation, ainsi que le temps de rupture  $\Delta t$ , il est possible de se faire une idée sur la taille du défaut.

## 5 Conclusion

Le modèle a été validé pour les 4 types de défauts, en confrontant les fréquences obtenues par les simulations numériques aux fréquences théoriques. De plus, notre façon de considérer un défaut de structure semble adaptée. Les simulations permettent de retrouver l'effet d'un défaut dans le calcul de la résistance électrique. Chaque fréquence de passage du défaut, en fonction de sa position dans le roulement est retrouvée dans les calculs numériques. Pour l'instant, il est donc possible d'identifier la position du défaut en calculant la fréquence des "pics" dans les données de la résistance en fonction du temps. Retenons que c'est une rupture momentanée d'un contact bille/bague qui redistribue les réactions dans le roulement en fonctionnement et perturbe ainsi le calcul électrique. Nous dirigeons nos travaux vers une étude paramétrique des différents indicateurs statistiques en fonction de la taille du défaut. Nous utiliserons les indicateurs scalaires, dont le plus connu est le kurtosis, utilisés en analyse vibratoire [9]. Parallèlement, un banc expérimental viendra prochainement compléter nos données numériques. Soulignons qu'en raison de la limite des fréquences d'échantillonnage des appareils de mesure, il ne sera pas possible de mettre en évidence des défauts trop petits. La résolution attendue sera meilleure que celle des mesures vibratoires. D'autre part, la mesure électrique, d'un point de vue expérimental, s'affranchit des vibrations environnantes ce qui la rend plus facile à mettre en place. D'autres défauts, comme ceux de type balourd, causés par un mauvais chargement du roulement seront prochainement modélisés. A terme, nous espérons associer chaque signature électrique à son défaut et caractériser sa taille.

## Références

- [1] K. Bourbatache, M. Guessasma, E. Bellenger, V. Bourny, A. Tekaya. *Discrete modelling of electrical transfer in multi-contact systems*, Granular Matter, vol 14(1), 1-10, 2012
- [2] G. De Saxcé, J. Fortin, O. Millet. *About the numerical simulation of the dynamics of granular media and the definition of the mean stress tensor*, Mechanics of Materials, vol 36, 1175-1184, 2004
- [3] J. Fortin, O. Millet, G. De Saxcé. *Numerical simulation of granular materials by an improved discrete element method*, International Journal of Numerical Methods in Engineering, vol 62, 639-663, 2004
- [4] J A. Greenwood. *Analysis of elliptical Hertzian contacts*, Tribology International, vol 30(3), 235-237, 1997
- [5] T. Harris. *Rolling Bearing Analysis*, Wiley and Sons, 2001
- [6] M. Jean. *The non-smooth contact dynamics method*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 177, 235-257, 1999
- [7] J.J. Moreau. *Some numerical methods in multibody dynamics : application to granular materials*, Eur.J. Mech. A/Solids, vol 13, 93-114, 1994
- [8] I. Sanni, E. Bellenger, J. Fortin, P. Coorevits. *A reliable algorithm to solve 3D frictional multi-contact problems : application to granular media*, Journal of computational and applied mathematics, vol 234, 1161-1171, 2010
- [9] S. Sassi, B. Badri, M. Thomas. *Tracking Surface Degradation of Ball Bearings by Means of New Time Domain Scalar Indicators*, International Journal of COMADEM, 36-45, 2008
- [10] N. Tandon, A. Choudhury. *A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings*, Tribology International, **32**(8), 469-480, 1999