

Vers un monitoring électrique des garnitures mécaniques d'étanchéité

C. PUILLE^a, O. DURAND-DROUHIN^a, F. LE MARREC^a, V. BOURNY^{b,c},
R. BOUZERAR^a, J. FORTIN^{b,c}, M. ANDASMAS^d

a. Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, UFR des Sciences, Université de Picardie Jules Verne, 33 rue St Leu, 80039 AMIENS

b. Laboratoire des Technologies Innovantes, IUT d'Amiens, Université de Picardie Jules Verne, Avenue des Facultés, Le Bailly 80025 AMIENS

c. ESIEE-Amiens, 14 Quai de la Somme, 80080 AMIENS

d. Cyclam, 75 rue Robert Lecoq, 80000 AMIENS

Résumé :

Cet article s'intéresse à l'évolution en temps réel du contact d'une garniture mécanique d'étanchéité en fonctionnement. Afin de simuler ce contact frottant, un banc spécifique de mesures a été développé, mettant en jeux des bagues identiques au dispositif industriel et présentant des surfaces avec des finitions industrielles. Ce banc permet d'obtenir des informations sur l'état mécanique du contact en le faisant traverser par un courant électrique sonde. Deux paramètres importants ont été explorés : la lubrification et la charge. L'étude présentée montre des signatures électriques spécifiques qui font de la mesure électrique un outil adapté pour suivre en temps réel l'évolution de l'état du contact.

Abstract :

In this paper, we report a study on the mechanical state of the contact of a mechanical face seal. To mimic a sliding contact, a specific bench has been developed. The specifications of the all the wear parts have been taken as close as possible than the industrial ones. We developed an alternative method based on the analysis of an electrical current going through the interfaces. Two parameters have been studied: the effect of lubrication and the effect of the load applied on the contact. The results show typical signatures which demonstrate us that electrical monitoring is an efficient tool for studying the sliding contact in a mechanical face seals during operation. .

Mots clés : garniture mécanique d'étanchéité, diagnostic, mesures électriques, carbone, lubrification

1 Introduction

Les garnitures mécaniques d'étanchéité d'arbres tournants sont devenues des dispositifs omniprésents dans de nombreux secteurs d'activités allant de l'industrie automobile à l'agro-alimentaire [1]. Le principe de base d'une garniture repose sur le frottement de deux surfaces annulaires lubrifiées, une surface fixe, solidaire du carter de pompe (stator), l'autre surface en rotation, solidaire de l'arbre (le rotor). Une illustration schématique des constituants d'une garniture mécanique est présentée sur la figure 1.

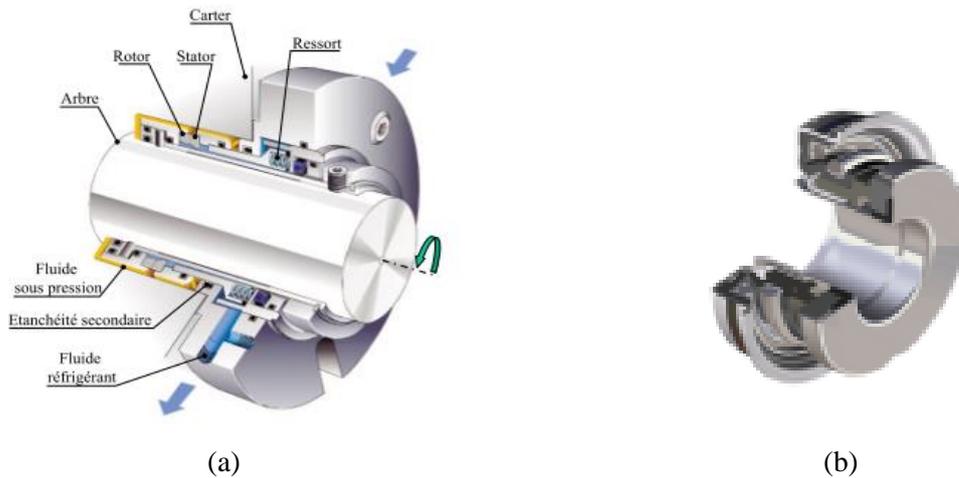


Figure 1 : Garniture mécanique d'étanchéité. Figure 1a. Détails des éléments constituant la garniture d'après [2]. Figure 1b. Exemple de garniture Cyclam en coupe.

A l'heure actuelle, en raison de contraintes environnementales, techniques et économiques, les conditions d'utilisation des garnitures mécaniques d'étanchéité sont de plus en plus drastiques. Ainsi une garniture doit pouvoir être opérationnelle à très hautes vitesses (plus de 10000 tr/min) jusqu'à des pressions de 15 MPa, et résister à des températures pouvant aller de -200°C jusqu'à 400°C . Généralement, une garniture mécanique d'étanchéité fonctionne avec un film liquide à l'interface dont l'épaisseur doit être contrôlée. En effet, cette dernière doit être suffisamment fine pour prévenir une fuite mais également suffisamment épaisse pour limiter la friction, conduisant à une détérioration des faces et à une usure prématurée de la garniture qui aurait pour conséquence un endommagement de la pompe. La friction dans un contact lubrifié est souvent caractérisée par la courbe de Stribeck où le coefficient de friction est représenté en fonction de la vitesse de rotation ou un paramètre de service G qui prend aussi en considération la viscosité dynamique, les dimensions des garnitures et la charge axiale agissant sur la garniture [3, 4]. La figure 2 met en évidence les trois régimes de lubrification : le régime limite de lubrification (BL), le régime mixte de lubrification (ML) et le régime hydrodynamique de lubrification (HL).

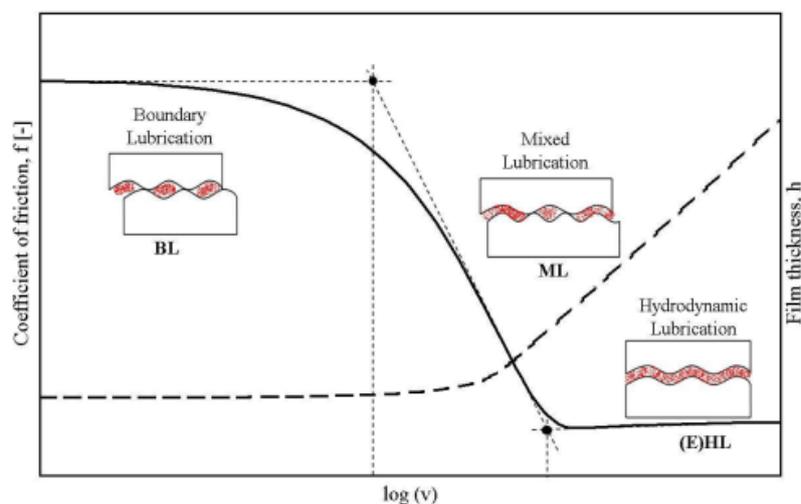


Figure 2 : Courbe de Stribeck mettant en évidence les différents régimes de lubrification. Le coefficient de friction et l'épaisseur de fluide sont schématiquement tracés en fonction du paramètre de lubrification [5].

En conséquence, l'identification des différents régimes de lubrification est essentielle pour un fonctionnement optimal des garnitures mécaniques d'étanchéité (friction minimale). Cette connaissance permet non seulement une optimisation de la durée de vie des garnitures mais également une planification des calendriers de maintenance. Plusieurs techniques sont disponibles pour contrôler l'état d'une garniture mécanique d'étanchéité. Elles sont essentiellement basées sur la détection du contact entre les surfaces ou sur la détection d'une fuite. Pour détecter le contact entre les faces d'une garniture, la mesure de la température s'avère être un bon indicateur de la présence d'un frottement entre les faces. Un des principaux avantages de cette méthode thermique réside en sa facilité de mise en œuvre. Toutefois, cette technique ne peut être utilisée qu'à des fins de diagnostic, c'est-à-dire qu'une fois que l'anomalie (le frottement entre les faces) soit apparue [6, 7]. Une autre méthode pour suivre l'état d'une garniture mécanique est l'émission acoustique (AE). Cette technique est basée sur la génération d'ondes élastiques induites par le mouvement relatif de glissement entre des surfaces en contact [8, 9, 10]. L'émission acoustique est une technique très sensible. Elle est capable de détecter des stades précoces de dégradations mécaniques, ce qui en fait une technique très répandue dans les laboratoires de recherche. Malheureusement, l'émission acoustique ne rencontre pas le même succès dans l'industrie : en cause les bruits de fond environnementaux dans lesquels sont noyés les signaux AE qui ne peuvent donc pas être extraits [11]. Ce problème peut être surmonté en utilisant une technique basée sur la détection des ultra-sons [12, 13, 14, 15]. Cette technique permet non seulement d'identifier le contact entre les garnitures mais également d'évaluer avec exactitude l'épaisseur de film fluide. Cependant, la détection ultrasonique exige des capteurs très sensibles rendant cette technique chère et peu adaptées pour de larges applications. Historiquement une des plus anciennes techniques utilisée pour contrôler l'état mécanique d'un contact est la méthode basée sur la mesure électrique [16, 17, 18, 19]. Cette technique consiste à faire passer un courant électrique sonde à travers le contact. En fonction de la nature du courant appliqué (continu ou alternatif), deux types d'informations complémentaires peuvent être extraites : la résistance électrique qui est corrélée au degré de contact direct entre les deux surfaces [18, 20] et la capacité qui est liée à la séparation entre les deux faces généralement due au film lubrifiant [19, 21, 22]. Un des principaux avantages de cette technique c'est qu'elle est directement utilisable sur des machines réelles, constituées essentiellement d'acier. Étonnamment, ces études qui consistent à suivre en temps réel, l'état d'un contact roulant ou glissant avec la mesure électrique sont très rares [16, 23, 24, 25]. Crook a été le premier à étudier les contacts roulants et glissants en fonction du temps en utilisant deux systèmes différents : un pion sur un disque et deux disques [16]. Il a focalisé son étude sur la phase de rodage et a montré que la mesure de la résistance électrique était pertinente pour détecter la séparation des faces pendant cette phase transitoire. Concernant l'application de cette technique aux garnitures mécaniques d'étanchéité, aucune étude, à notre connaissance, n'a été publiée à ce jour.

L'objectif de cet article est de montrer que la mesure électrique est un outil pertinent, parfaitement adapté à l'étude des garnitures mécaniques d'étanchéité en fonctionnement et qui permet une connaissance en temps réel de l'état du contact glissant qu'il soit sec ou lubrifié. Un brevet sur la « Surveillance de l'état d'un dispositif de garniture mécanique » est en cours de dépôt.

2 Description du dispositif expérimental

Comme le montre la figure 1, la garniture mécanique d'étanchéité est un système industriel complexe constitué de nombreuses pièces. Or les performances d'étanchéité d'une garniture sont conditionnées par l'état du contact entre les deux surfaces frottantes. Ces deux surfaces en contact sont par conséquent le cœur névralgique du dispositif et fait l'objet de l'étude présentée dans cet article.

2.1 Banc dynamique

Dans ce but, un banc d'essai de laboratoire a été développé et réalisé afin de simuler le contact frottant des garnitures mécaniques d'étanchéité et de déterminer l'état du contact par l'intermédiaire d'une mesure électrique transverse. Une solution technologique à trois bagues (une bague tournante et deux bagues fixes) a été privilégiée par rapport à celle, plus proche du contact de la garniture, ne mettant en jeu que deux bagues (une bague fixe et une bague tournante). En effet, un système à deux bagues nécessite de fixer un contact électrique sur une bague mobile, ce qui est problématique en terme de stabilité du contact électrique dans le temps et oblige l'ajout un élément supplémentaire à caractériser, à savoir collecteur tournant. Comme le montre la figure 3, le système se compose d'une bague tournante (repère 2) en frottement intercalée entre deux bagues fixes (repères 1), ce qui permet des collages sur les bagues fixes et nous affranchit des problèmes de solidité du contact électrique. La rotation de la bague tournante est assurée par un moteur électrique dont la vitesse de rotation peut varier de 0 à 37 tr/min. Une charge verticale uniaxiale, dont la valeur peut être choisie dans une gamme allant de 10N à 40N, est appliquée sur le système pour simuler la force de fermeture du ressort de la garniture réelle (figure 3). Ce banc d'essai permet de réaliser aussi bien des frottements secs que des frottements lubrifiés. Enfin, le banc est couplé à un sourcemètre Keithley 2611A qui permet la détermination de l'état du contact mécanique par la mesure électrique.

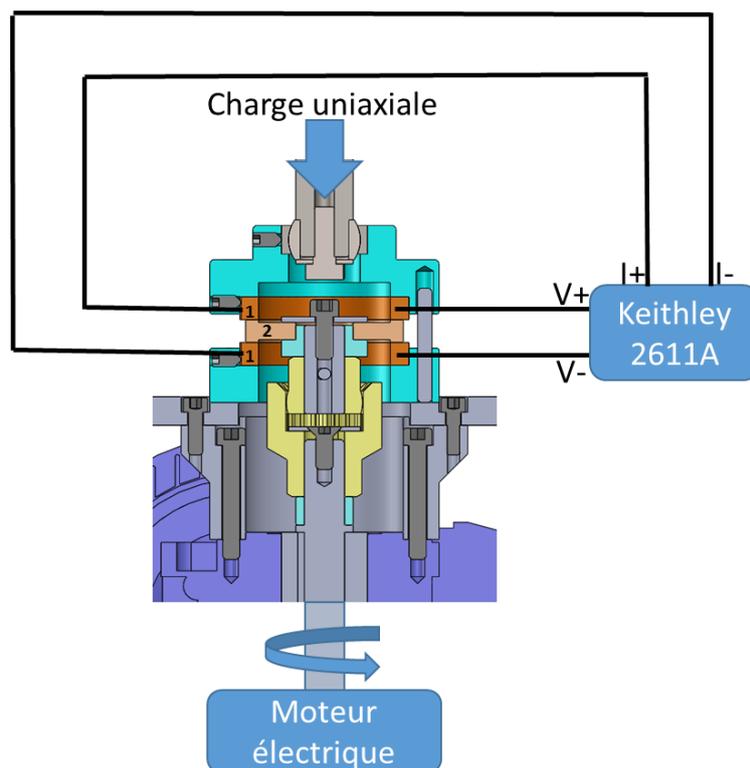


Figure 3 : Représentation schématique du banc d'essai de frottement mécanique constitué de : bagues fixes (1) ; bague tournante (2) et de la méthode de mesure électrique quatre pointes associée.

2.2 Bagues de carbone

Les trois bagues fournies par la société Cyclam sont constituées de poudre de graphite compactée. Elles présentent, chacune, un diamètre intérieur et extérieur respectivement de 46mm et

59mm, pour une épaisseur de 8mm. L'aire apparente des deux interfaces mises en jeu peut donc être évaluée à environ 1000mm² chacune. Les surfaces de ces bagues d'essai ont subi le même polissage industriel que les bagues des garnitures d'étanchéité de la société Cyclam et ont par conséquent la même finition.

La topographie de ces états de surface a été obtenue en utilisant un profilomètre mécanique 3D à stylet Bruker DEKTAK XT. Le stylet a un diamètre de 2µm et la force qui lui est appliquée est de 3mg. Les cartographies 3D des surfaces ont des dimensions de 3x3mm avec une résolution de 0.3µm/point dans le sens de balayage des profils et une juxtaposition des profils tous les 20µm. Il est alors possible, en utilisant le logiciel Bruker Vision 64, de déterminer la rugosité quadratique moyenne (RMS) de ces surfaces. Une image caractéristique de la surface de frottement est présentée sur la figure 4, la RMS de cette surface est de l'ordre de 0.1µm.

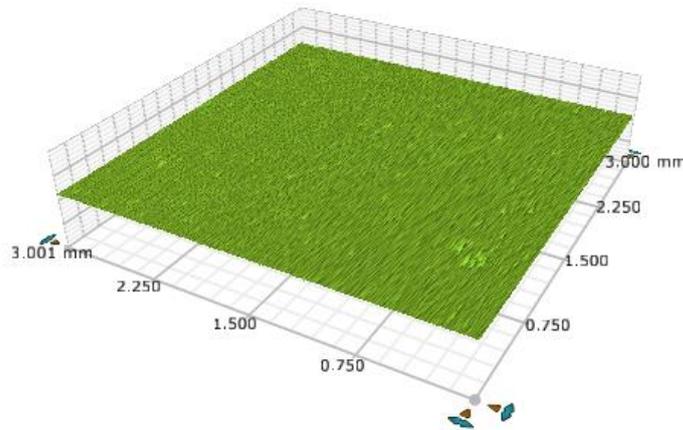


Figure 4 : Image 3D de la topographie d'une surface de carbone finition industrielle 3x3mm par profilométrie. La RMS est de 0.1µm.

Les contacts électriques ont été réalisés sur les bagues fixes en collant des fils électriques de cuivre de diamètre 0.2mm² avec de la laque d'argent, puis stabilisés mécaniquement par de la résine époxy [26]. Les connexions ainsi obtenus induisent des résistances électriques supplémentaires de l'ordre de 15 mOhm.

2.3 Protocole expérimental de mesures

Le faible ordre de grandeur des résistances mises en jeu dans ce système, de quelques dizaines de mOhm à quelques Ohm, a orienté la méthode de mesure vers la méthode 4 pointes. Pour cette mesure, nous avons utilisé un sourcemètre Keithley 2611A. Le courant électrique est injecté dans l'une des bagues fixes, puis est récupéré dans l'autre bague fixe après avoir traversé les trois bagues, ainsi que les deux interfaces. La mesure de la tension s'effectue entre les deux bagues fixes ce qui permet d'extraire la résistance du système. Cette mesure, réalisée en temps réel, sera analysée afin de mettre en évidence l'état et les évolutions des contacts entre les bagues. La valeur du courant électrique qui a été utilisée a été fixée à 100mA (régime linéaire), et la tension électrique a été enregistrée au cours du temps. Une fois le comportement ohmique du système vérifié, la résistance électrique associée aux frottements des 3 bagues peut être déterminée.

Toutes les mesures ont été réalisées à une vitesse de rotation fixée à 22 tr/min, vitesse standard utilisée par l'industriel pour tester ce type de garniture. Pour comparer avec le contact sec, des mesures ont été effectuées en lubrifiant le contact avec une huile PFEIFFER P3.

Deux types d'études ont été entreprises : d'une part, l'effet de la lubrification en ayant fixé la charge à 10N, et en enregistrant la mesure électrique en fonction du temps pour un contact sec et un lubrifié, d'autre part l'effet de la charge, en l'augmentant de 10N à 30N par pas de 5N sur un contact sec et lubrifié.

3 Résultats et discussion

3.1 Etude en fonction de la lubrification

Dans un premier temps, l'influence de la lubrification sur la mesure électrique a été étudiée. Pour cela, nous avons utilisé deux jeux distincts de bagues en carbone, un jeu sec et un jeu que nous avons lubrifié. Puis nous avons comparé la résistance électrique issue du frottement des bagues. Pour ces mesures, la charge appliquée sur les bagues en contact est constante et fixée à 10N. L'évolution en fonction du temps du contact sec et du contact lubrifié est présentée sur la figure 5. Tout d'abord, il est important de souligner que les mesures ont été enregistrées une fois le régime stationnaire atteint. On constate que quel que soit la nature du contact (sec ou lubrifié) la résistance est stable au cours du temps, ce qui souligne le caractère permanent du régime atteint. Le phénomène le plus marquant dans ces mesures est le changement d'ordre de grandeur de résistance moyenne entre le contact sec et le contact lubrifié puisque l'on passe de 0.062 à 29 Ohm.

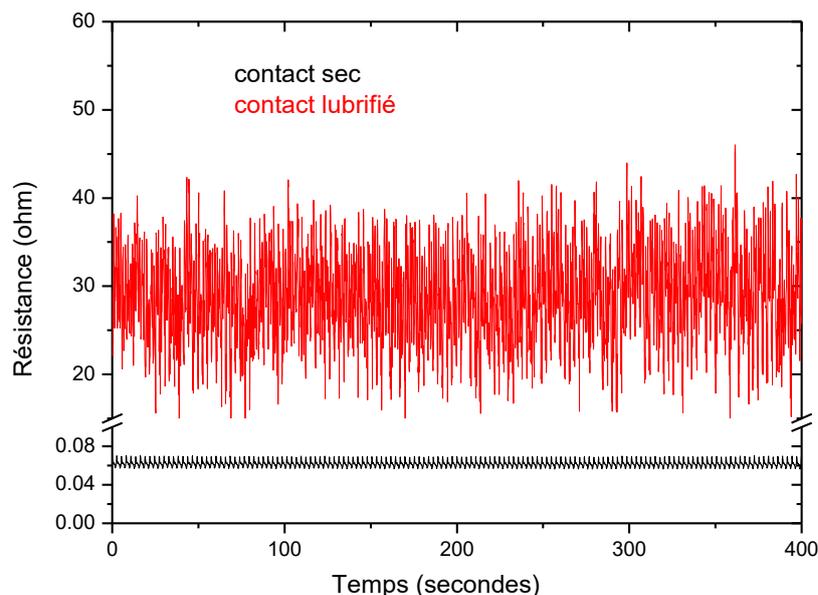


Figure 5 : Comparaison de l'évolution temporelle de la résistance d'un contact sec et d'un contact lubrifié, la force appliquée est de 10 N pour une vitesse de 22 tr/min.

Le contact sec peut s'envisager comme une interface multicontacts dans laquelle le passage du courant électrique est principalement gouverné par le phénomène de constriction au niveau des aspérités en contact (spots) décrit dans le cadre du modèle de Holm [27]. La finition industrielle conduisant à des surfaces très lisses (RMS de l'ordre de 0,1 μ m), l'hypothèse d'un contact présentant de nombreux spots apparaît légitime et sa conséquence est une faible résistance électrique.

L'introduction d'un fluide visqueux dans un contact, contact lubrifié, où les faces sont en rotation l'une par rapport à l'autre va se traduire par l'apparition d'une force verticale vers le haut qui tend à séparer les faces en contact. Elle s'oppose directement au poids associé à la charge axiale. Par conséquent, au niveau de l'interface la charge axiale apparaît atténuée. Le nombre de spots en contact est donc plus faible, et le passage du courant se faisant plus difficilement, la résistance augmente naturellement.

Le tableau 1 résume les données statistiques extraites des mesures électriques.

	Contact sec	Contact lubrifié
Résistance moyenne (Ohm)	0.062	29
Coefficient de variation (CV) %	5	17

Tableau 1 : Synthèse des paramètres statistiques issues des mesures électriques. Le coefficient de variation est l'écart type sur la résistance moyenne.

D'après le tableau, on remarque que le coefficient de variation permet également de différencier un contact sec d'un contact lubrifié. En effet, celui-ci passe de 5% pour un contact sec à 17% pour un contact lubrifié. Cette augmentation du coefficient de variation n'est pas surprenante et peut s'expliquer par une oscillation de l'épaisseur du film fluide liée au non parallélisme des faces en contact [28].

3.2 Etude en fonction de la charge appliquée

L'étude de la réponse électrique du système a été mesurée en fonction de la charge uniaxiale croissante dans la gamme allant de 10N à 30N par pas de 5N. Ces mesures ont été effectuées à la fois sur un contact sec et sur un contact lubrifié. Les valeurs de la résistance électrique en fonction du temps sont représentées sur les figures 6a (contact sec) et 6b (contact lubrifié).

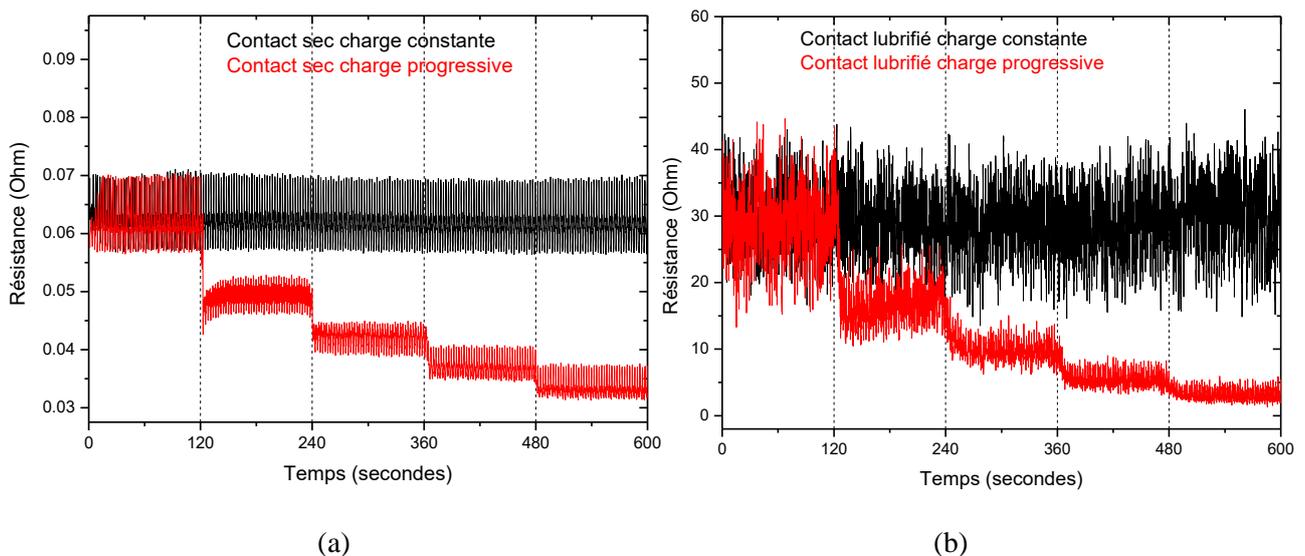


Figure 6 : Représentation de la résistance électrique en fonction du temps pour une charge croissante de 10N à 30N par pas de 5N. A titre de comparaison, la résistance électrique pour une charge constante de 10N a été représentée. Figure 6a. Mesures sur contact sec Figure 6b. Mesures sur contact lubrifié. La vitesse est de 22 tr/min.

A titre de comparaison, le signal correspondant à une charge constante de 10N a également été représenté tant pour le contact sec (figure 6a) que pour le contact lubrifié (figure 6b). Quel que soit la nature du contact, on peut remarquer l'excellente concordance entre les deux mesures réalisées à 10N, attestant de la bonne reproductibilité du protocole de mesures mis en place. Le comportement de la résistance électrique du système en fonction de la charge croissante est le même, que le contact soit sec (figure 6a) ou lubrifié (figure 6b) : la résistance décroît quand la charge augmente. Ce comportement est classiquement observé sur des systèmes en contact statique [29, 30]. Au-delà de la valeur moyenne des résistances qui augmente de plusieurs ordres de grandeur pour une charge de 10N quand le contact passe de sec à lubrifié, et qui a été discuté dans la première partie, l'augmentation de la charge de 10N à 30N se traduit par une décroissance de la résistance beaucoup plus grande lorsque le contact est lubrifié.

Les paramètres statistiques associés à ces deux charges extrêmes sont reportés dans le tableau 2 pour les deux natures de contact.

	Contact sec		Contact lubrifié	
	10N	30N	10N	30N
Résistance moyenne (Ohm)	0.062	0.033	29	3.128
Coefficient de variation (CV) %	5	4.2	17	30

Tableau 2 : Paramètres statistiques des mesures de résistance électrique pour les charges de 10N et 30N pour les contacts sec et lubrifié.

Dans le cas du contact sec (figure 6a), cette décroissance peut être interprétée dans le cadre des interfaces multicontacts [31]. En effet, le passage du courant électrique à travers un contact constitué de deux surfaces rugueuses oblige les électrons à passer à travers un nombre limité de points de contact entre les aspérités, les spots. Ces derniers réalisent un étranglement des lignes de courant, appelés communément zones de constriction. Celles-ci sont parfaitement décrites dans le modèle de Holm [27]. Dans ce cadre, on considère qu'augmenter la charge revient à accroître l'écrasement d'une surface sur l'autre. Deux phénomènes concomitants peuvent alors se produire : d'une part la création de nouveaux spots et d'autre part l'augmentation de la taille des spots existants. Ceci se traduit par davantage de points de passage et donc moins de constriction, ce qui conduit à une décroissance de la résistance électrique. La faible décroissance des résistances mesurées en fonction de la charge peut s'expliquer par la gamme réduite de charge appliquée sur le système et peut être interprétée comme une faible modification de l'interface. Concernant le coefficient de variation, comme le montre le tableau 2, il demeure constant autour de 5% dans toute la gamme de charge étudiée, ce qui corrobore l'hypothèse de très légères modifications de l'interface quand la charge augmente.

Dans le cas du contact lubrifié (figure 6b), l'ordre de grandeur de la valeur de la résistance a été attribué à l'effet de la force de portance du fluide, qui compense en partie la charge axiale. Cette force de portance, ne dépendant que de paramètres fixés par les conditions expérimentales (caractéristiques physiques du fluide, vitesse de rotation du système), elle demeure constante tout au long de l'expérience. Par conséquent la diminution de la résistance électrique quand la charge axiale augmente peut s'interpréter comme le déplacement de cet équilibre mécanique. De plus, contrairement au contact sec, le coefficient de variation pour le contact lubrifié, autrement dit la dispersion des mesures, double entre une charge de 10N et une charge de 30N. Cet accroissement de la dispersion pourrait être la signature d'un défaut de planéité des faces en frottement qui induirait un film lubrifiant d'épaisseur variable au cours de la rotation et par conséquent un nombre de contacts entre les aspérités variables.

4 Conclusion

Cet article a présenté les résultats issus des études menées sur un banc spécifiquement conçu pour déterminer l'évolution de l'état du contact mécanique d'une garniture mécanique d'étanchéité. La méthode originale qui a été choisie repose sur l'analyse d'un courant électrique traversant le contact. Il a été ainsi possible de suivre en temps réel le comportement du contact via l'évolution de la résistance électrique du système. L'effet de la lubrification et de la charge appliquée sur le contact ont été étudiés. Les résultats montrent sans ambiguïté que la mesure électrique, de par sa sensibilité, est un moyen efficace de mise en évidence des effets de ces deux paramètres. L'introduction d'un lubrifiant dans le contact se traduit par une augmentation significative de la résistance. Une augmentation de la charge, quant à elle, se traduit par une diminution de la résistance. L'ensemble de ces comportements peuvent s'interpréter dans le cadre des interfaces multicontacts et du modèle de constriction de Holm. La mesure électrique couplée à ce banc d'essai va permettre la détermination d'une image électrique de la courbe de Stribeck.

Remerciement

Le travail est réalisé dans le cadre du projet collaboratif de recherche e-contact (2016-2019). Le projet est labélisé par le pôle de compétitivité I-Trans. Les auteurs tiennent à remercier la région Hauts-de-France et l'Europe (fonds FEDER) pour le financement du projet e-contact.

Références

- [1] Alan O. Lebeck. *Principles and design of mechanical face seal*. Wiley Interscience Publication, New York, 1991.
- [2] Noël Brunetière. *Etude théorique et expérimentale du comportement thermohydrodynamique des garnitures d'étanchéité*. Thèse, Université de Poitiers, December 2001.
- [3] Harald Lubbinge. *On the lubrication of mechanical face seals*. PhD thesis, University of Twente., 1999.
- [4] Bo Jacobson. The stribeck memorial lecture. *Tribology International*, 36(11):781 – 789, 2003.
- [5] Ioan Cracaoanu. *Effect of macroscopic wear on friction in lubricated concentrated contacts*. PhD thesis, Enschede, December 2010.
- [6] Lokesh A. Gupta, Lionel Young, Berhanu Wondimu, and Dimitrios Peroulis. Wireless temperature sensor for mechanical face seals using permanent magnets. *Sensors and Actuators A: Physical*, 203:369 – 372, 2013.
- [7] Maria Cristina Valigi, Claudio Braccesi, Silvia Logozzo, Lorenzo Conti, and Massimiliano Borasso. A new telemetry system for measuring the rotating ring's temperature in a tribological test rig for mechanical face seals. *Tribology International*, 106:71 – 77, 2017.
- [8] Juha Miettinen and Veli Siekkinen. Acoustic emission in monitoring sliding contact behaviour. *Wear*, 181:897 – 900, 1995.
- [9] D Mba, T Roberts, E Taheri, and A Roddis. Application of acoustic emission technology for detecting the onset and duration of contact in liquid lubricated mechanical seals. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 48(8):486–487, 2006.
- [10] Pan Fu, Ze Pei Huang, Zhi Zhang, Jun Kai Zhang, Kan Chen, and Zhi Bin Lin. Research on the micro scope condition of end face of liquid-lubricated mechanical seals. In *Applied Material Science and Related Technologies*, volume 898 of *Advanced Materials Research*, pages 574–577. Trans Tech Publications, 5 2014.
- [11] Yibo Fan, Fengshou Gu, and Andrew Ball. Acoustic emission monitoring of mechanical seals using music algorithm based on higher order statistics. *Key Engineering Materials*, 413-41:811–816, June 2009.
- [12] D. Anderson, J. Jarzynski, and R. F. Salant. Condition monitoring of mechanical seals: Detection of film collapse using reflected ultrasonic waves. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 214(9):1187–1194, 2000.
- [13] William B. Anderson, Jacek Jarzynski, and Richard F. Salant. A condition monitor for liquid lubricated mechanical seals. *Tribology Transactions*, 44(3):479–483, 2001.
- [14] R. S. Dwyer-Joyce, B. W. Drinkwater, and C. J. Donohoe. The measurement of lubricant film thickness using ultrasound. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 459(2032):957–976, 2003.
- [15] T. Reddyhoff, R.S. Dwyer-Joyce, and P. Harper. A new approach for the measurement of film thickness in liquid face seals. *Tribology Transactions*, 51(2):140–149, 2008.
- [16] A.W. Crook. Some studies of wear and lubrication. *Wear*, 2(5):364 – 393, 1959.
- [17] S. I. El-Sisi and G.S.A. Shawki. Measurement of oil-film thickness between disks by electrical conductivity. *Journal of Basic Engineering*, 82(1):12–16, 1960.
- [18] M. J. Furey. Metallic contact and friction between sliding surfaces. *A S L E Transactions*, 4(1):1–11, 1961.
- [19] D. G. Astridge and M. D. Longfiel. Capacitance measurements and oil film thickness in a large-radius disc and ring machine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*, 182(14):89–96, 1967.
- [20] A.V. Olver G. Guanteng and H.A. Spikes. Contact resistance measurement in mixed lubrication. *The advancing frontier of engineering tribology, STLE/ASME ed.: Q. Wang, J. Nethzel and F. Sadeghi*, pages 64–71, 1999.
- [21] Karolina Jablonka, Romeo Glovnea, and Jeroen Bongaerts. Evaluation of ehd films by electrical capacitance. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(38):385301, 2012.
- [22] Wen Hsi Chua and Gwidon W. Stachowiak. The study of the dynamic thickness of organic boundary films under metallic sliding contact. *Tribology Letters*, 39(2):151–161, 2010.

- [23] P. M. Lugt, R. W. M. Severt, J. Fogelstro, and J. H. Tripp. Influence of surface topography on friction, film breakdown and running-in in the mixed lubrication regime. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 215(6):519–533, 2001.
- [24] J. Lord and R. Larsson. Film-forming capability in rough surface ehl investigated using contact resistance. *Tribology International*, 41(9-10):831–838, 2008.
- [25] S. Schnabel, P. Marklund, I. Minami, and R. Larsson. Monitoring of running-in of an ehl contact using contact impedance. *Tribology Letters*, 63(3):35, 2016.
- [26] Pierre-Yves Duvivier. *Experimental study and modeling of electrical and mechanical quasistatic contact between gold rough surfaces : application to mems microswitches*. Theses, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, November 2010.
- [27] Holm. *Electric Contacts Theory and Application*. Springer, 1967.
- [28] Noël Brunetière. *Mechanical face seals: Theoretical and experimental study*. Accreditation to supervise research, Université de Poitiers, July 2010.
- [29] Nouredine Ben Jemaa, R. El Abdi, and Erwann Carvou. Numerical and experimental study of the contact resistance for high copper alloys in force domain 1-100 N. *European Physical Journal: Applied Physics*, 49(2), 2010.
- [30] Youcef Zeroukhi, Ewa Napieralska-Juszczak, Guillaume Vega, Krzysztof Komez, Fabrice Morganti, and Slawomir Wiak. Dependence of the contact resistance on the design of stranded conductors. *Sensors*, 14(8):13925–13942, 2014.
- [31] P. Dassonville V. Bourny J. Fortin A. Rabdane B. Jonckheere N. Foy, R. Bouzerar. Theory of metal/metal multi-contact interfaces: implications of the coupling between the electrical and thermal transfer processes. In *International Conference on Mesoscopic and Condensed Matter Physics, Boston USA*, 2015.