

Sujet de thèse

Contexte général

Les phénomènes tribologiques (frottement, usure, adhésion) jouent un rôle considérable aussi bien dans les phénomènes naturels (physique des milieux granulaires, glissements de terrain, tremblements de terre...) que dans l'industrie (transports, industrie mécanique, etc...). Bien qu'ils génèrent des pertes économiques considérables¹ avec leurs conséquences environnementales (Rejet de CO₂, utilisation de lubrifiant...), les mécanismes élémentaires responsables du frottement restent relativement mal compris. Ceci est dû à la complexité des phénomènes impliqués (mécanique, morphologique, physicochimique, tribochimique, thermique...), à la variété des tribosystèmes possibles (couple de matériaux, géométrie, état de surface, milieu...) et aux difficultés de caractérisation dans l'interface de contact). Depuis de nombreuses années, les recherches en tribologie contribuent à améliorer l'efficacité énergétique des systèmes mécaniques, essentiellement par une approche empirique. Les prochaines améliorations dans ce domaine passent désormais par une approche plus fondamentale et notamment par une meilleure compréhension des phénomènes impliqués dans le frottement.

La tribologie en mode circulaire

Depuis une vingtaine d'années, les microscopes à force atomique (AFM) sont utilisés dans le domaine de la tribologie pour générer des contacts modèles entre la pointe d'un AFM et un échantillon. Ces contacts sont particulièrement intéressants puisqu'ils sont très bien définis géométriquement (contact mono-aspérité sphère-plan) contrairement aux contacts macroscopiques où les contacts se font entre les aspérités des surfaces antagonistes (contact poly-aspérités). Ce type d'approche a permis quelques avancées dans le domaine de la nano-tribologie², mais les progrès restent limités essentiellement parce les AFM ont été conçues et réalisés pour faire de l'imagerie et sont donc mal adaptés aux mesures tribologiques (mesures longues nécessitant des expériences et des traitements de données longs). Récemment, dans le cadre du projet ANR Pénélope par Médée et d'une collaboration entre O. Noël (IMMM univ. Du Mans) et P.E. Mazeran (Roberval, UTC), le microscope à force atomique a été complètement repensé pour le transformer en un nanotribomètre rapide et fonctionnel, grâce à un développement expérimental appelée mode circulaire. Son principe consiste à générer un déplacement circulaire relatif de la pointe AFM à hautes fréquences (10-500Hz), le tout peut être couplé à un déplacement vertical basse fréquence permettant de modifier la force appliquée. Le mouvement de la pointe génère une force de frottement opposée au déplacement qui génère une torsion alternative du microlevier qui est mesurée via le signal Friction Force Microscope. L'intérêt de l'invention (H.Nasrallah, P-E Mazeran, O.Noël, *Rev. of Sci. Instrum.* 82, 113703 (2011), *Brevet International* « Le mode circulaire AFM » PCT\FR2011\051024 (2010), déposé par le CNRS et l'Université du Maine. Extension PCT, Japon (N° 2013-508547) et USA (US Patent, 997 261 (2015)) est multiple par rapport aux techniques actuelles: Tout d'abord, le mouvement circulaire haute fréquence génère une vitesse de glissement constante et continue et permet d'avoir un frottement

¹ D'une manière générale, on estime que le coût des pertes liées aux phénomènes tribologiques avoisine les 3% du PIB (P. Jost, *Economic impact of tribology*, Proc. Mechanical Failures Prevention Group, Special Pub. 423, NBS, Gaithersburg, Maryland (1976)), à titre d'illustration, les pertes par frottement solide dans un véhicule automobile (moteur, transmission, roulement) représentent plus de 20% de sa consommation (K., Holmberg et al., *Global energy consumption due to friction in passenger cars*, Trib. Int. 47 (2012) 221-234).

² I. Szlufarska, M.Chandross, R. W. Carpick, J. of Physics D, 41 (2008).

en régime stationnaire. Ceci à une vitesse de glissement qui peut atteindre le mm/s. Deuxièmement, le signal de frottement étant harmonique, il est traité par une détection synchrone ce qui améliore considérablement la qualité de la mesure et évite les lourds traitements ultérieurs de données. Par ailleurs, le signal de frottement peut être décomposé en sa partie réelle et imaginaire, et ce pour les différentes harmoniques du signal. Des premiers essais ont montré que les parties réelles et imaginaires du signal correspondaient à deux composantes différentes du frottement. Enfin, la méthodologie employée permet d'avoir une mesure extrêmement rapide puisqu'il ne faut que 10 s environ pour mesurer le coefficient de frottement à une vitesse de glissement donnée (contre plusieurs heures avec les systèmes actuels).

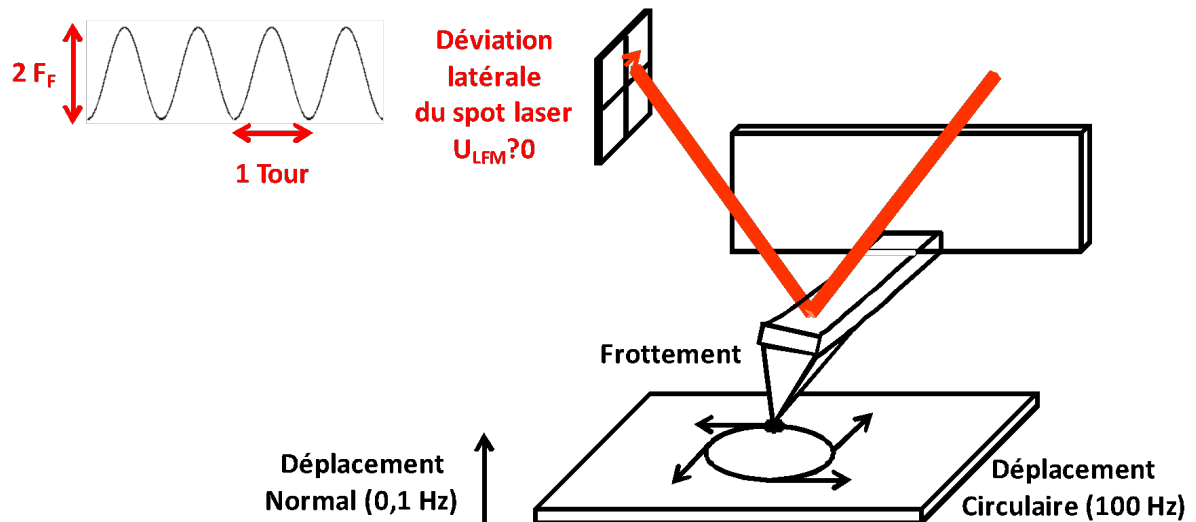


Fig. 1 : Principe du mode circulaire.

Le principe révolutionnaire de l'invention a d'ors et déjà permis d'obtenir des résultats extrêmement novateurs sur le plan fondamental: 1) Le mode circulaire a permis de montrer que les forces d'adhésion (adhésion capillaire, adhésion solide-solide) présentaient plusieurs régimes en fonction de la vitesse de glissement, les mécanismes de ces changements de régime ont pu être établis (O.Noel et al. PRL (2012) et futur PRL). 2) Le coefficient de frottement dépend du régime d'adhésion. 3) L'analyse du frottement par une approche complexe permet de déterminer ses différentes composantes. Actuellement La technique est exploitée pour déterminer les caractéristiques du frottement visqueux des membranes biomimétiques (Projet Frixorg UTC- Univ. du Mans).

Programme de la thèse

L'objectif principal de la thèse est de continuer à développer et à exploiter la technique en se concentrant plus particulièrement sur les points originaux suivants : 1) Analyse et compréhension des composantes du frottement telles que révélées par l'approche complexe, 2) applications à la description du comportement tribologique en fonction de la nature des matériaux, des conditions expérimentales (humidité), et de la géométrie de la pointe, 3) développement de la technique pour les essais d'usure. Les potentialités de valorisation de l'invention seront au coeur des préoccupations.

Moyens matériels et humains

Microscope à Force Atomique en mode circulaire (Bruker, Nanoscope V). Les frais de fonctionnement seront assurés par des ressources internes. La thèse se fera en co-direction avec le laboratoire Roberval (UTC). Le Directeur de thèse sera Olivier Noel (Université du Mans).

Indicateurs Critères :

1. HDR obtenue le 27 novembre 2015.

2. Originalité et Prise de risque : L'approche est originale tant sur le plan technique (mise en œuvre d'une invention, le mode circulaire AFM, développée à l'Université du Maine (brevet international UM), remarquée dans le dernier rapport et lors de la visite HCERES) que sur le plan expérimental. Sur ce dernier point et pour la compréhension des mécanismes du frottement, la difficulté réside à contrôler parfaitement la nature du contact et à faire varier les paramètres explorés indépendamment l'un de l'autre. Ainsi, à l'échelle macroscopique, la rugosité du contact est très mal définie, ce qui a des conséquences sur les mécanismes du frottement et rend donc compliqué son étude. A l'échelle du nanomètre, un contact dit mono-aspérité est facilement réalisée. Cependant à ces échelles, les géométries du contact accessibles avec les systèmes commerciaux actuelles sont de type sphère-plan et ils ne permettent pas de faire varier indépendamment des paramètres tels que la pression de contact et l'aire de contact. Par conséquent, l'étude des mécanismes du frottement passe par la mise en œuvre de protocoles originaux permettant de surmonter ces difficultés. C'est tout le challenge de ce projet.

3. Recherche d'autres financements : Ce projet ne fait pas l'objet de recherche de financement. Cependant, les dossiers Régions et ANR régulièrement soumis pourront, si ils sont acceptés, compenser une partie des dépenses.

4. Bilan, historique sur les thèses précédemment encadrés (taux d'encadrement, nombre de publi et thèses soutenues dans les temps) :

- O.Noel a encadré 3 thèses dont 2 thèses en qualité de directeur de thèse (suite à une dérogation) avec un taux d'encadrement de 100% (thèses de H. Nasrallah et JL. Buraud). La 3ème a fait l'objet d'un taux d'encadrement à hauteur de 60%.

- 2 thèses ont été soutenues dans les temps (3 ans exactement). La dernière thèse a nécessité 1 année supplémentaire : la principale raison est que l'étudiant de thèse (JL Buraud) avait un service de PRAG à effectuer en parallèle, puis un demi service sur 2 ans (suite à une dérogation). O. NOEL n'a jamais bénéficié d'une bourse ministère en tant que directeur de thèse. Il a co-encadré (Directeur de thèse, D Ausserré) à hauteur de 60% la thèse de S. Mohamad qui a bénéficié d'une bourse ministère.

- 6 articles publiés (dont 2 PRL et un article dans Rev. of Sci. Instr. distingué comme étant l'article le plus lu de la revue durant 2 mois consécutifs) rapportent les travaux développés lors des 3 thèses. D'autres publications issues de ces travaux sont en cours de rédaction.

5. Consortium

Les coordinateurs du consortium sont O. Noel (IMMM) et PE Mazeran (UTC). Le consortium pourra également s'appuyer sur des collaborations internationales via un programme européen COST (MP1303) dont O. Noel est membre du comité de Direction représentant la France et responsable scientifique des STSM (Short Term Scientific Missions). Ce dernier levier permet entre autres de bénéficier de financements pour faire des cours séjours dans des laboratoires partenaires.

6. Projet inter-thématique

Ce projet pourra éventuellement bénéficier avantageusement de l'expertise des membres de la thématique Polymère pour ce qui concerne l'usure de ces matériaux et la compréhension des mécanismes.

7. Moyens, environnement

Ce projet pourra s'appuyer sur les ressources internes de l'équipe ainsi que sur les ressources amenées par le projet Frixorg (Collaboration UTC – UM). Il ne nécessite que du petit fonctionnement (pointes AFM, matériaux...) à faible coût (environ 1000€/an, pannes non incluses). L'invention mode circulaire AFM est opérationnelle à l'IMMM.