

Séminaire LaMCoS 2005

Jeudi 6 janvier 2005
8h30 – 18h

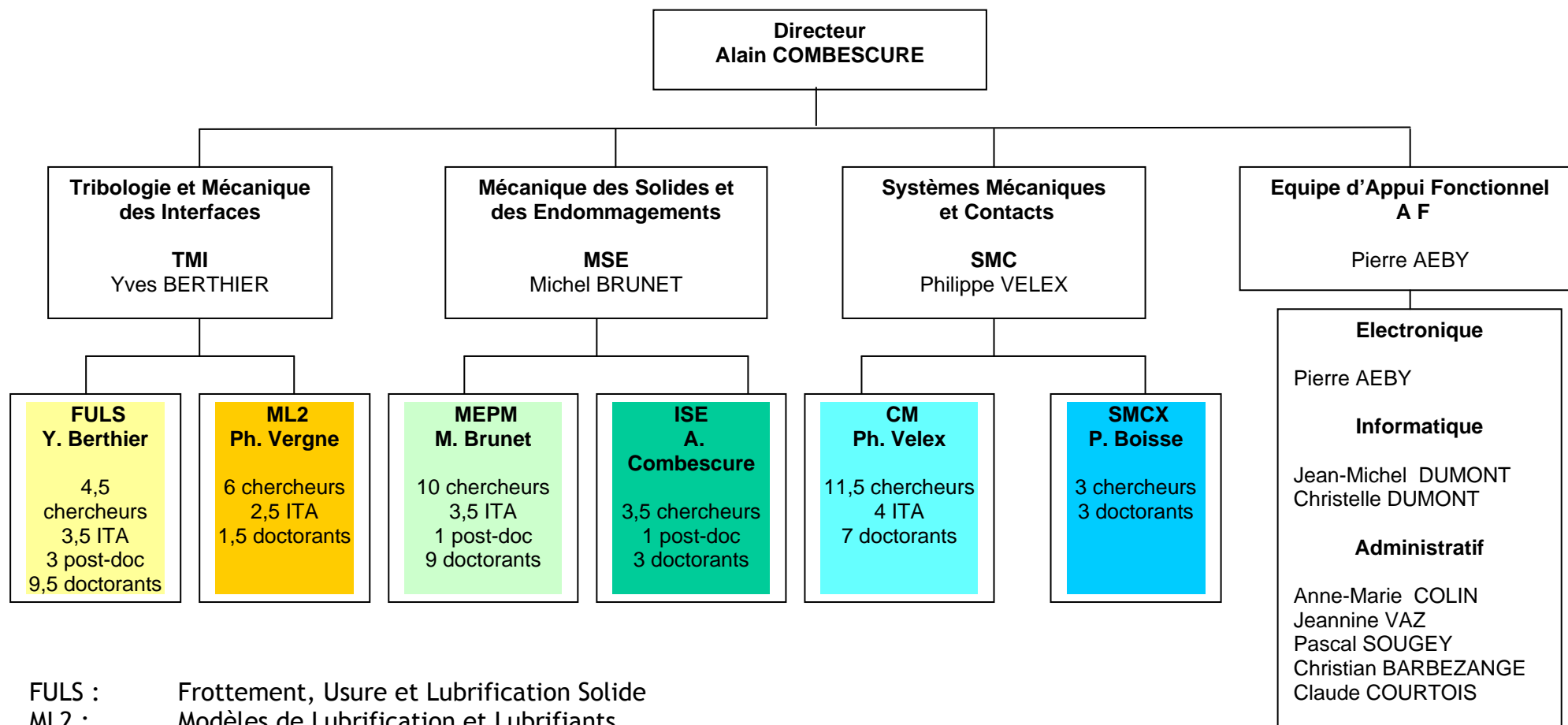
Château de Saint-Priest
2, rue de l'égalité 69800 St Priest
T. 04 72 28 79 55



Château de St Priest



Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Solides (LaMCoS) - UMR CNRS 5514



- FULS : Frottement, Usure et Lubrification Solide
- ML2 : Modèles de Lubrification et Lubrifiants
- MEPM : Maîtrise et l'Elaboration des Pièces Mécaniques
- ISE : Intégrité sous Sollicitations Extrêmes
- CM : Contacts et Mécanismes
- SMCX : Systèmes Mécaniques Complexes

| | | | |
|----------------------|----------------|----------------|--|
| <i>8h30-9h</i> | <i>Accueil</i> | | |
| Présentations | 9h – 9h30 | A. Saulot | Approche tribologique de l'usure ondulatoire. |
| | 9h30 – 10h | R. Ribeaucourt | Un modèle numérique de propagation de fissures en fatigue de roulement. |
| | 10h – 10h30 | T. Elguedj | Fonctions de forme étendues pour la mécanique élastoplastique de la rupture par méthode X-FEM |
| <i>10h30 – 10h45</i> | <i>Pause</i> | | |
| Présentations | 10h45 – 11h15 | C. Portaz | Conception d'un superviseur de contrôle global châssis. |
| | 11h15 – 11h45 | A. Chapkov | Réduction d'Amplitude dans un Contact EHD Lubrifié avec un fluide de Ree-Eyring |
| | 11h45-12h15 | C. Changenet | Influence des phénomènes thermiques sur l'estimation du rendement d'une boîte de vitesses manuelle à 6 rapports. |
| <i>12h15 – 13h45</i> | <i>Repas</i> | | |
| Présentations | 13h45 – 14h15 | P. Cavin | Méthode éléments finis multi-échelle espace temps à précision contrôlée pour la dynamique rapide |
| | 14h15 – 14h45 | A.-M. Sfarghiu | Etude du fonctionnement tribologique d'une articulation saine |
| | 14h45 – 15h15 | E. Antaluca | Résolution d'un contact élasto-plastique sous chargement normal et tangentiel |
| <i>15h15 – 15h30</i> | <i>Pause</i> | | |
| Présentations | 15h30- 16h | T. Mabrouki | Elaboration d'un outil prédictif de simulation de l'usinage des matériaux durs par outil coupant. |
| | 16h-16h30 | H. Maigre | Identification de failles sismiques à l'aide de mesure d'accélération en surface |
| | 16h30-17h | S. Baguet | Interactions contact – système mécanique. Application à la modélisation du comportement dynamique des réducteurs à engrenages. |
| | 17h-17h30 | G. Morales | On Sliding Friction in Full-Film Heavily Loaded Lubricated Contacts |

RESUMES

APPROCHE TRIBOLOGIQUE DE L'USURE ONDULATOIRE.

Aurélien SAULOT
Equipe TMI – Groupe FULS

Depuis l'avènement du train au XIX^{ème} siècle, les endommagements des rails, tels que le head-checking, les squats ou encore l'usure ondulatoire, sont restés des problèmes d'actualité pour les réseaux ferroviaires. Ainsi, observée dès 1895 sur le tramway de Cincinnati, l'usure périodique de la bande de roulement des rails appelée couramment « usure ondulatoire » (« corrugation » en anglais) engendre nombre de désagréments pour les réseaux de transports urbains tel que la RATP. Provoquant d'importantes et gênantes vibrations pour les riverains ainsi que des détériorations des infrastructures fixes de la voie et des matériels roulants, l'usure ondulatoire une fois présente ne peut être traitée que par le meulage des rails. Cette abrasion mécanique permet au rail de retrouver son profil initial. L'inconvénient majeur de cette technique de maintenance est qu'elle n'empêche pas la réapparition de l'usure ondulatoire. En outre, son coût est très élevé. (30 Millions d'euros par an pour les réseaux européens).

Très largement étudiée depuis plus d'un siècle, l'usure ondulatoire des rails reste encore assez mal comprise. Considérée dans un premier temps comme la conséquence d'une excitation verticale du couple roue-rail puis comme celle d'un glissement longitudinal périodique, l'usure ondulatoire a toujours été abordée d'un point de vue fréquentiel et non temporelle. La classification de ses différentes manifestations, effectuée en 1993 par Grassie et Kalousek, en est la preuve la plus évidente. Les usures ondulatoires sont ainsi différenciées selon un mécanisme de fixation de la longueur d'onde défini principalement par des modes libres puis un mécanisme d'endommagement (déformation plastique, « usure », ...). Le rapprochement systématique de la fréquence de l'usure ondulatoire avec l'une ou plusieurs des fréquences propres libres d'éléments du bogie et/ou de la voie a enlisé la progression de la compréhension du phénomène : les conséquences possibles de l'usure ondulatoire étaient envisagée comme des causes ! Grassie lui-même a expliqué en 2003 que sa classification a été très souvent mal interprétée et qu'il serait dorénavant plus opportun de considérer dans un premier temps un mécanisme d'endommagement du rail puis de définir un ou plusieurs « mécanismes de fixation » de la longueur d'onde pouvant s'y rattacher.

Basée sur cette nouvelle approche, l'étude présentée ici mettra en évidence les mécanismes d'endommagement de l'usure ondulatoire présente sur les files basses de voies à faibles rayons de courbure puis de celle présente en ligne droite en zone d'accélération ou de décélération.

La première étudiée ici sera abordée expérimentalement par des analyses métallographiques et tribologiques couplées à des mesures sur site (collaboration RATP - Railtech International – INSA) et une expérience visant à reproduire de l'usure ondulatoire sur un banc d'essai (collaboration Lucchini Sidermeccanica – Politecnico di Milano – INSA). Cette première étude a permis d'établir l'influence des glissements latéraux sur l'initialisation de l'usure ondulatoire.

La seconde sera étudiée numériquement. Sous sollicitations de glissements longitudinaux quasi-constants, des instabilités périodiques au sein du contact roue-rail seront mises en évidence.

L'ensemble de ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet financé par la Communauté Européenne nommé « Wheel-rail corrugation in urban transport ». Celui-ci a pour but de comprendre l'usure ondulatoire ainsi que de diminuer sa vitesse de réapparition après meulage. Ce projet de 4 ans a débuté en juin 2002 et regroupe 14 partenaires industriels et universitaires.

UN MODELE NUMERIQUE DE PROPAGATION DE FISSURES EN FATIGUE DE ROULEMENT

Rachelle RIBEAUCOURT
Equipes TMI et MSE – Groupes FULS et ISE

Lors d'essais sur machine à galets [1], le suivi de l'apparition et de la formation d'un réseau de fissures a montré que ces fissures avaient une géométrie tridimensionnelle et que leur propagation 3D s'effectuait en 2 étapes. La première étape montre que le comportement et la propagation de fissure sont principalement 2D ; la direction de propagation est perpendiculaire à la surface de contact jusqu'à ce qu'une profondeur d'environ 900microns soit atteinte, correspondant à l'auto arrêt de la fissure. La seconde étape montre que la progression de la fissure continue, mais le long de la direction radiale, par conséquent la forme de fissure caractérisée par le rapport profondeur/largeur évolue vers un comportement 3D.

Le chargement de contact de roulement est un élément clé pour la compréhension de cette propagation. En effet, générant un champ de contrainte localisé sous le contact, à fort gradient, multiaxial et non proportionnel, les fissures localisées dans la zone d'influence de ce chargement sont sollicitées en mode mixte, et subissent des cycles complexes de contact et de frottement le long de leur interface, influençant la propagation.

Afin d'améliorer la prévision et la durée de vie en fatigue de roulement, le modèle de fissure de fatigue doit prendre en compte le faciès et le développement tridimensionnel de ces fissures, et des spécificités telles que les conditions de contact interfacial et le chargement local.

Notre objectif est de développer un modèle de comportement 3D de fissures de fatigue soumises à un chargement quasi-statique multiaxial non proportionnel, avec une gestion du contact frottant à l'interface. Des travaux précédents ont traité le problème de contact le long des fissures, soumises à des chargements statiques ou quasi-statique monotones, lors de l'étude de la propagation de fissures 2D dans un domaine compressif [2]. Le contact de roulement induisant le long des fissures des sollicitations mécaniques non monotones, la formulation existante n'est plus valable. Par conséquent l'élaboration d'un nouveau modèle de propagation de fissures, plus général, a été mis en place. Il s'appuie sur la combinaison des points suivants :

- (i) discrétisation par la méthode des éléments finis étendus, traitant des problèmes non linéaires de contact, sans maillage explicite de la fissure, et sans aucun remaillage nécessaire pour simuler la propagation de la fissure,
- (ii) résolution itérative du problème non linéaire (dû au contact frottant le long des faces) par la méthode à grand incrément de temps [3, 4] (LATIN method : LArge Time INcrement method),
- (iii) formulation quasi-statique décrivant le chargement évolutif au cours des cycles,
- (iv) loi incrémentale de type Coulomb pour les problèmes quasi-statiques non monotones,
- (v) critères de recherche de direction de propagation et lois de propagation, sous un chargement multiaxial non proportionnel.

La validation du modèle est effectuée en 2D pour un problème de contact de roulement. La modélisation utilise deux échelles de temps : (i) La première est liée au processus de fatigue, (ii) la seconde au déplacement de la charge au cours d'un cycle de fatigue. Le calcul des facteurs d'intensité de contrainte en pointe de fissure est comparé avec celui obtenu avec un modèle de fissures de fatigue développé par M.-C. Baietto-Dubourg [5]. Les premiers résultats ont montré l'aptitude du modèle à capter des comportements de fissure différents pour un cycle de charge [6, 7].

Nous présentons quelques résultats en propagation.

-
- [1] DANG T. T., **Etude de la fatigue de contact de roulement**, juillet 2003, DEA de Mécanique
 - [2] DOLBOW, MOES, BELYTSCHKO, **An extended finite element method for modelling crack growth with frictional contact**, COMPUTER METHODS IN APPLIED MECHANICS AND ENGINEERING, Vol.190, pp.6825-6846, 2000.
 - [3] LADEVEZE, **La méthode à grand incrément de temps pour l'analyse de structures à comportement non linéaire décrit par variables internes**, Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris, 1989, t. 309, série II, p 1095-1099
 - [4] LADEVEZE, **Mécanique non linéaire des structures**, Editions Hermès, Paris, 1996, 280 p.
 - [5] M.C. DUBOURG, V. LAMACK, **A predictive rolling contact fatigue crack growth model: onset of branching, direction, and growth- role of dry and lubricated conditions on crack patterns**, TRANSACTIONS OF THE ASME, JOURNAL OF TRIBOLOGY, Transactions of the ASME, Vol.124, n°4, pp.680-688, 2002.
 - [6] R. RIBEAUCOURT, M.-C. BAÏETTO-DUBOURG, A. GRAVOUIL, **Mise en œuvre d'un modèle numérique de fissures en mode mixte sous sollicitations tribologiques à partir de la méthode X-FEM**, Actes des journées Francophones de Tribologie 2004 (A paraître).
 - [7] R. RIBEAUCOURT, M.-C. BAIETTO-DUBOURG, A. GRAVOUIL, Y. BERTHIER, **A mixed mode fatigue crack model with the coupled X-FEM/LATIN method: Application to RCF**, 31st Leeds-Lyon Symposium on Tribology 2004 (A paraître).

FONCTIONS DE FORME ETENDUES POUR LA MECANIQUE ELASTOPLASTIQUE DE LA RUPTURE PAR METHODE X-FEM

Thomas ELGUEDJ
Équipe MSE – Groupe ISE

La méthode des éléments finis étendus a été utilisée avec succès dans le passé dans le cadre de la mécanique élastique linéaire de la rupture. Nous nous proposons de l'étendre à la propagation de fissure en fatigue bidimensionnelle dans le cadre de la plasticité confinée. Il est nécessaire pour cela d'une part de définir une nouvelle base d'enrichissement prenant en compte la plasticité, et d'autre part d'adapter le calcul des grandeurs de «mécanique de la rupture» tels que l'intégrale J et les facteurs d'intensité des contraintes à l'élastoplasticité.

Dans le cas des matériaux élastoplastique, avec une loi de comportement en puissance de type Ramberg-Osgood, les champs asymptotiques des déplacements en pointe de fissure appelés champs HRR peuvent être calculés. Une analyse de Fourier de ceux-ci nous a permis de définir une base de huit fonctions capable de capturer les singularités HRR. Une technique d'intégration numérique adaptée a été mise en place pour pouvoir exploiter correctement cette base d'une part, et pour pouvoir en déduire une base d'enrichissement efficace. Le calcul de l'intégrale J a été étendu au cas de la plasticité confinée ainsi que le calcul des facteurs d'intensité des contraintes à l'aide d'intégrale d'interaction.

Différentes comparaisons en mode I pur et en mode mixte ont été faites avec un code élément fini standard pour des grandeurs telles que l'intégrale J, les facteurs d'intensité des contraintes et l'ouverture de fissure. Ces comparaisons ont été effectuées pour deux types de matériau, l'un à écrouissage faible et l'autre à écrouissage élevé. Dans les deux cas les différentes grandeurs sont en bon accord avec les résultats élément fini.

CONCEPTION D'UN SUPERVISEUR DE CONTROLE GLOBAL CHASSIS

Christophe PORTAZ
Equipe SMC – Groupe SMCX

Depuis quelques années, les actionneurs pilotant les fonctions du châssis se multiplient dans l'industrie automobile. Les premiers sont apparus sur le système de freinage (anti blocage des roues ABS, contrôle de trajectoire), les systèmes de suspension (hydraulique, pneumatique, amortissement variable, barres anti-roulis...), les systèmes de gestion du couple moteur (anti-patinage via l'ABS, différentiels pilotés...) et les directions actives (train avant à braquage et démultiplication pilotés AFS, roues arrières directrices).

L'introduction de ces nombreux systèmes pilotés pose le problème de leur compatibilité, et surtout de la compatibilité de leurs effets sur la dynamique d'un véhicule.

Une étape nécessaire au développement automobile est de créer un contrôleur dédié au châssis, qui communique avec les systèmes intégrés (comme la gestion du moteur sait le faire avec ses organes).

Le contrôleur global châssis doit être capable de gérer et de lever les compromis entre les capacités de freinage, le comportement et la tenue de route, le confort et le plaisir de conduite. A titre d'exemple de compromis, le confort requiert des suspensions plutôt molles et peu amorties, alors que la tenue de route requiert des suspensions très rigides et amorties.

L'objectif de la thèse est de définir l'intersystème le plus judicieux intégrant les fonctions châssis choisies parmi la liste suivante :

- gestion du couple à la roue
- gestion des efforts verticaux
- gestion du plan de roue

Ceci nécessite au préalable une étude de l'influence individuelle des fonctions sur une liste de prestations définies (situations accidentelles ou reconnues comme caractéristiques du comportement d'un véhicule), pour évaluer a priori les intersystèmes les plus efficaces. L'étude se fait par simulation numérique, en cherchant pour chaque fonction (et pour chaque couple de fonctions) les réglages optimaux pour chacune des prestations étudiées, selon des critères objectifs.

Le contrôleur global doit ensuite reconnaître la situation, et envoyer la consigne appropriée aux actionneurs.

Le travail à effectuer englobe le développement d'un modèle de dynamique du véhicule, et de stratégies pour la mise au point lois de commandes.

REDUCTION D'AMPLITUDE DANS UN CONTACT EHD LUBRIFIE AVEC UN FLUIDE DE REE-EYRING

Atanas. CHAPKOV
Equipe SMC – Groupe CM

Pour qu'un roulement fonctionne correctement et durablement, il faut le lubrifier. Le film de lubrifiant assure la transmission de la charge et l'accommodation des vitesses entre les corps en contact. Lorsque l'épaisseur du film lubrifiant est faible comparée à la déformation élastique des surfaces et que les effets piezo-visqueux sont importants, le contact fonctionne en régime ElastoHydroDynamique (EHD). Actuellement, les contraintes économiques et environnementales obligent les constructeurs à développer des mécanismes de plus en plus performants, malgré des conditions de fonctionnement de plus en plus sévères. L'augmentation des températures de fonctionnement, des niveaux de chargement et l'utilisation des huiles de faible viscosité conduisent à une diminution de l'épaisseur du film lubrifiant. De nos jours, l'épaisseur de film est si faible qu'elle se mesure plutôt en dizaines de nanomètres qu'en micromètres.

Les formules classiques pour calculer l'épaisseur de film se basent sur l'hypothèse de surfaces de contact lisses. Or, les surfaces réelles ne sont pratiquement jamais lisses. Les rugosités influencent le comportement du contact de différentes manières. Tout d'abord, elles peuvent causer une diminution de l'épaisseur de film qui se traduit par une augmentation de l'usure. Ce phénomène peut être accompagné d'une augmentation de la température et de variations de la pression qui affectent directement la durée de vie du mécanisme.

Plusieurs études ont été menées sur ce sujet. Tout d'abord en utilisant des descriptions statistiques des surfaces (les années 80) mais c'est une vue assez simplifiée des phénomènes mis en jeu. Ensuite, une description point par point des surfaces réelles. Cette méthode exige des moyens de travail considérables et ne permet pas la compréhension des phénomènes de base dans la lubrification EHD. Depuis une dizaine d'années une autre approche est développée. Elle consiste à étudier la déformation élastique d'une composante harmonique dans le contact EHD, d'abord analytiquement, ensuite numériquement. La théorie actuelle permet de prédire la déformation d'une composante harmonique en fonction des conditions de fonctionnement. Le modèle est basé sur le comportement Newtonien du fluide.

Le but du présent travail est d'étudier l'influence du fluide sur la déformation des rugosités harmoniques - isotropes. Le modèle utilisé est celui de Ree-Eyring. L'approche numérique est basée sur la méthode des MultiGrilles et MultiIntegration (MLMI). Les résultats obtenus sont présentés en fonction des conditions de fonctionnement. Finalement, un paramètre adimensionné gouvernant la réduction d'amplitude est présenté afin d'unifier tous les résultats.

INFLUENCE DES PHENOMENES THERMIQUES SUR L'ESTIMATION DU RENDEMENT D'UNE BOITE DE VITESSES MANUELLE A 6 RAPPORTS

Christophe CHANGENET
Equipe SMC – Groupe CM

Un modèle est présenté afin d'estimer les pertes de puissance dans une boîte de vitesses manuelle à 6 rapports. Cette transmission est composée de 3 arbres (primaire, secondaire et marche arrière) et d'un différentiel. Chaque arbre est supporté par un ensemble de deux roulements, ils peuvent être à billes, à rouleaux cylindriques ou coniques. Les arbres primaire et secondaire supportent un ensemble de pignons fixes et de pignons fous, ces derniers étant associés à des synchroniseurs.

Les sources suivantes de pertes mécaniques sont prises en compte :

- a)- le frottement au niveau des dentures
- b)- les pertes aux roulements
- c)- le cisaillement d'huile au niveau des synchroniseurs et à l'interface entre les pignons fous et les arbres
- d)- les pertes dues au barbotage des pignons

En ce qui concerne cette dernière source, un modèle spécial a été développé.

Pour modéliser les échanges de chaleur, la méthode des réseaux thermiques a été utilisée. Cette méthode, basée sur une analogie électrique, consiste à diviser le système étudié en éléments supposés isothermes (dans notre cas la boîte a été divisée en 44 éléments) et à relier ces éléments par des résistances thermiques qui prennent en compte les différents échanges de chaleur :

- a)- le carter échange de la chaleur avec l'air ambiant et avec l'huile
- b)- les pignons sont assimilés à des cylindres qui conduisent la chaleur vers les arbres et qui échangent avec l'huile par le phénomène de projection centrifuge ; une résistance thermique de striction est également prise en compte pour simuler l'étranglement du flux de chaleur au niveau des dentures en contact
- c)- les autres éléments (arbres, roulements, synchroniseurs) sont traités comme des cylindres

La comparaison entre des résultats expérimentaux, réalisés par PSA Peugeot Citroën, et les résultats numériques montre une bonne adéquation du modèle. Si les phénomènes thermiques peuvent être négligés quand le bain d'huile est stabilisé à une valeur supérieure à 80°C, il apparaît par contre que pour une basse température du bain d'huile (environ 40°C) l'estimation correcte des pertes de puissance ne peut se faire indépendamment d'un calcul thermique. En effet, dans ces conditions les échauffements locaux, et donc les variations de viscosité induites, ne sont pas négligeables.

METHODE ELEMENTS FINIS MULTI-EHELLE ESPACE TEMPS A PRECISION CONTROLEE POUR LA DYNAMIQUE RAPIDE

Pauline CAVIN
Equipe MSE – Groupe ISE

La capacité croissante des ordinateurs permet aux ingénieurs de modéliser par éléments finis (EF) des phénomènes physiques de plus en plus complexes. La prise en compte des effets dynamiques, des effets non linéaires ou encore d'autres effets conduit à des modèles numériques pouvant atteindre des millions de degrés de liberté. Les techniques numériques de résolution doivent donc évoluer afin d'effectuer des calculs en des temps raisonnables. De plus, les utilisateurs de la méthode EF sont souvent plus intéressés par les ordres de grandeurs des quantités qu'ils traitent que par la précision des résultats obtenus. Cependant il est important de connaître cette précision afin de garantir le bon dimensionnement d'une pièce ou la sécurité de fonctionnement d'un mécanisme. La solution la plus économique est de garantir la même précision sur le tout le domaine de calcul. Ainsi pour garantir cette précision constante il est généralement nécessaire de faire varier la finesse du maillage de la structure. C'est pourquoi ce travail s'intéresse à une méthode élément fini (FEM) multi-échelle à précision contrôlée espace temps pour la dynamique. Cette méthode est appelée la STAR méthode (Space Time Automatic Refinement).

Le travail présenté ici propose un solveur EF particulier pour résoudre automatiquement des problèmes dynamiques linéaires et non linéaires. Ce solveur est basé sur un concept d'élément « espace-temps » qui permet de coupler la discrétisation en espace à celle du temps au cours du calcul. A partir de deux niveaux de discrétisations en espace et en temps grossiers, un indicateur d'erreur permet de définir automatiquement les zones à raffiner (en espace et en temps). Ainsi différents maillages espace-temps de plus en plus fins sont successivement créés jusqu'à ce que la précision des résultats, spécifiée par l'utilisateur, soit atteinte. Au cours de la résolution les maillages créés peuvent être définis sur la totalité ou seulement une partie du maillage initial.

Lorsqu'une partie du maillage est raffinée des conditions aux limites (CL) particulières doivent être appliquées autour du nouveau domaine espace-temps de calcul. Ces CL doivent être choisies avec précautions puisqu'elles conditionnent la stabilité du calcul. C'est pourquoi une étude approfondie de la stabilité de la STAR méthode est menée. Elle permet de s'assurer que l'énergie du système se conserve pendant le calcul.

La STAR méthode est illustrée en s'appuyant sur l'exemple d'une poutre unidimensionnelle sollicitée en traction. Cet exemple est traité dans le cas de la dynamique linéaire. Les développements actuels s'intéressent aux évolutions à apporter pour traiter le cas de la dynamique non linéaire

ETUDE DU FONCTIONNEMENT TRIBOLOGIQUE D'UNE ARTICULATION SAINTE

Ana-Maria SFARGHIU
Equipe TMI – Groupes ML2 et FULS

Une articulation saine est un système tribologique performant car elle peut fonctionner normalement plus de 70 ans. Par conséquent, la compréhension de son fonctionnement tribologique est essentielle pour améliorer les traitements des maladies articulaires et optimiser la conception des prothèses.

La bibliographie propose différents points de vue : médical, physico-chimique et mécanique, du fonctionnement normal et surtout pathologique des composants articulaires (cartilage, synovie, ligaments...). Quelques articles réunissent ces points de vue et tentent de proposer des vues d'ensemble du fonctionnement biologique, physico-chimique et mécanique. Mais ils restent focalisés sur un seul des composants, comme par exemple le cartilage articulaire. Quant aux faibles valeurs du frottement articulaire elles sont corrélées principalement aux caractéristiques rhéologiques complexes de la synovie sans tenir compte des interfaces lipidiques. De plus, ces valeurs sont extrêmement dispersées car elles sont obtenues dans des conditions de sollicitations mécaniques très diverses et éloignées du fonctionnement tribologique réel d'une articulation saine.

Dans les faits, le rôle tribologique réel de la synovie dépend non seulement des sollicitations locales de l'articulation, c'est-à-dire de l'ensemble moteur (tendons, muscles, ligaments), mais aussi des interactions des deux corps en contact (cartilages) qui ont une structure mécanique sophistiquée et des caractéristiques physico-chimiques complexes. Il convient donc de réaliser une analyse tribologique globale (biologique, mécanique et physico-chimique) de l'ensemble synovie - cartilages d'un contact articulaire sain. Pour cela, en réunissant les différents points de vue de la littérature, nous proposons une hypothèse du fonctionnement tribologique d'une articulation. Afin de valider cette hypothèse nous avons défini un modèle expérimental *ex vivo* réaliste, intégrant des substituts de synovie et de cartilage, destinés à caractériser les mécanismes tribologiques locaux de fonctionnement articulaire, en particulier à l'échelle moléculaire.

Des essais de frottement avec visualisation aident à clarifier le rôle des interfaces lipidiques dans la lubrification articulaire. Pour ce faire, un dispositif expérimental respectant les conditions de dynamique locale imposées par l'ensemble moteur d'une articulation saine a été mis au point. On comparera les comportements tribologiques du modèle de cartilage avec ou sans couches lipidiques, associé au substitut de synovie contenant ou non des lipides. Des observations dynamiques en microscopie optique à travers une plaque transparente permettront, grâce à des marqueurs spécifiques fluorescents, d'étudier les mouvements des molécules lipidiques dans la zone de contact.

RESOLUTION D'UN CONTACT ELASTO-PLASTIQUE SOUS CHARGEMENT NORMAL ET TANGENTIEL

Eduard ANTALUCA

Equipe MSE – Groupe MEPM

La fatigue de contact, mais aussi l'usure ou le rodage d'une surface, sont liés au niveau des contraintes en surface et en sous-couche du matériau. Lorsque la limite d'écoulement est atteinte, ce qui est habituellement le cas sous sollicitations sévères (défauts géométriques, températures élevées, régime de lubrification limite), il est nécessaire de résoudre le problème élasto-plastique pour connaître l'état des contraintes. La déformation plastique équivalente est toutefois limitée dans les problèmes de contact, par exemple 2% sous une pression de Hertz de 8 GPa pour un contact sphère plan et un acier à haute limite d'élasticité de type AISI 52100. Ceci permet de rester dans les hypothèses des petites déformations linéaires. Ainsi le modèle proposé s'appuie sur les hypothèses de massifs semi-infinis. L'approche élasto-plastique nécessite la prise en compte de l'évolution de la surface, et donc de la pression de contact avec l'apparition des déformations plastiques, mais aussi de l'apparition des contraintes résiduelles d'écrouissage liées au chargement cyclique. La formulation est écrite de manière incrémentale, pour respecter le caractère irréversible des déformations plastiques qui dépendent du trajet de chargement. Deux types de trajet de chargement peuvent être considérés, une mise en charge verticale du contact ou un roulement des massifs en contact. Les méthodes utilisées pour résoudre le problème sont de type coefficients d'influence, dont les expressions sont déterminées analytiquement. Le principal avantage de cette méthode est la limitation du maillage à la zone plastique, permettant ainsi une grande économie de mémoire et de temps de calcul notamment par rapport aux méthodes éléments finis. Par ailleurs le frottement en surface conduit à abaisser la pression normale pour laquelle un premier point atteint sa limite d'écoulement. Les principaux développements ont ainsi porté (i) sur la prise en compte des effets tangentiels en surface dans la formulation du problème, (ii) l'implémentation de différents modèles de plasticité, et (iii) l'accélération du code par l'utilisation intensive des FFT, en particulier pour le module de résolution du contact normal par la méthode du gradient conjugué (CGM)

ELABORATION D'UN OUTIL PREDICTIF DE SIMULATION DE L'USINAGE DES MATERIAUX DURS PAR OUTIL COUPANT

Tarek MABROUKI
Equipe MSE – Groupe MEPM

L'usinage des métaux par outil coupant est un procédé de mise en forme qui, bien que très développé et très répandu, n'est pas encore maîtrisé du point de vue des phénomènes physiques mis en jeu et des simulations numériques. Cela est dû, entre autres, à la complexité des phénomènes mécaniques, thermiques et métallurgiques présents. Dans le cadre d'études d'optimisation des conditions de coupe en usinage, il est fondamental de disposer d'outils numériques de simulation de l'usinage par enlèvement de matière afin de compléter les connaissances nécessaires à une appréhension globale et industrielle de la coupe.

En production mécanique, les procédés de finition par abrasion, tout particulièrement la rectification, sont coûteux. Pour les matériaux durs, la rectification des pièces de révolution est concurrencée par le tournage dur (TD). Il bénéficie des progrès technologiques apportés par la R & D en UGV (usinage à grande vitesse): évolutions des organes de machines outils et performances des matériaux des outils de coupe. L'évolution de l'usinage vers l'UGV et le TD, c'est à dire vers les limites des paramètres de coupe appelle aussi une meilleure maîtrise et un meilleur contrôle du procédé, assuré par l'association de la fabrication à des stratégies de contrôle développées dans des environnements de production automatisé très puissants.

Dans ce contexte il reste de nombreuses questions concernant la maîtrise de ce procédé d'usinage par outil coupant et les démarches classiques ne satisfont pas les besoins de l'industrie :

- La vision technologique classique est incapable de prévoir l'influence de l'évolution des caractéristiques des matériaux de l'outil et de la pièce sur les valeurs des constantes des modèles prédictifs empiriques,
- La vision scientifique classique basée sur la mécanique du solide et la tribologie est incapable de prédire le type de la forme du copeau sous des conditions opératoires spécifiques. La difficulté de traiter différents matériaux (lois de comportement difficile à identifier) et d'analyser les effets de diverses géométries d'outil sur les mécanismes d'enlèvement de matière,
- La difficulté de traiter de nouvelles opérations d'usinage à grande vitesse (le contournage).

De plus, l'usure de l'outil et la puissance de coupe ne sont plus les seuls facteurs de limitations des opérations de coupe en production. D'autres critères d'optimisation sont considérés : les déformations de la machines induites par toutes les composantes des efforts de coupe, les caractéristiques de la surface obtenue (rugosité, intégrité surface), etc. Tout ceci confirme les motivations pour une maîtrise scientifique de la coupe basée sur des modèles de comportement physique.

Les modélisations de la coupe ont utilisé la méthode des éléments finis depuis une vingtaine d'années. Ces modèles sont souvent alimentés par des essais expérimentaux. De manière générale, les simulations numériques donnent des résultats quant à la répartition du champ de déformations, des contraintes et/ou de température au sein du matériau usiné et de l'outil. En raison de la complexité des phénomènes, ces modèles numériques sont généralement relatifs à la coupe orthogonale (modèles plans, 2D). Il s'agit ici d'exposer une première étape sur l'étude thermomécanique de la coupe orthogonale bidimensionnelle pour appréhender la problématique de la modélisation numérique de la coupe. Dans une seconde étape, les perspectives d'un passage plus rapide et plus conséquent au cas tridimensionnel seront envisagées.

IDENTIFICATION DE FAILLES SISMIQUES A L'AIDE DE MESURE D'ACCELERATION EN SURFACE.

Hubert MAIGRE
Equipe MSE –Groupe ISE

L'identification des failles souterraines, notamment celles qui ont provoqué des séismes, reste un problème difficile puisqu'il est pratiquement impossible de les observer directement. Les seules données permettant une investigation restent des mesures en surface comme celles enregistrées par des accéléromètres. Nous proposons une méthode de reconstruction exacte du plan de la faille à l'aide des mesures en surface. Cette reconstruction s'appuie sur le théorème de réciprocité en élastodynamique couplé à un choix judicieux de solutions adjointes

La méthode peut être étendue à l'extension de la faille dans son plan ainsi qu'à l'identification de fissures non planes. Toutefois plus la complexité du défaut à identifier augmentera plus il sera difficile de trouver les bonnes fonctions adjointes et le résultat sera plus sensible aux erreurs de mesure.

INTERACTIONS CONTACT - SYSTEME MECANIQUE. APPLICATION A LA MODELISATION DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES REDUCTEURS A ENGRENAGES

Sébastien BAGUET
Equipe SMC – Groupe CM

Les progrès technologiques accomplis ces dernières années ont permis d'augmenter considérablement le rapport puissance transmise sur poids des trains d'engrenages. Malgré cela, les exigences des constructeurs en terme de performance demeurent croissantes. Dans ce contexte, l'étude du comportement dynamique de transmissions de puissance par engrenages est plus que jamais d'actualité.

Un réducteur à engrenages est constitué de plusieurs éléments (engrenages, paliers, arbre) qui ont chacun un rôle déterminant dans le comportement global du mécanisme. L'étude de ces différents composants et de leur interaction constitue depuis de nombreuses années un des principaux axes de recherche de l'équipe SMC.

De ces travaux résultent deux codes de calcul distincts, l'un orienté plus spécifiquement vers une modélisation fine de l'engrènement, l'autre vers une modélisation fine du comportement des paliers à roulements. Dans le premier, on résout simultanément l'équilibre d'une ligne d'arbre modélisée par éléments finis classiques et le contact au niveau de l'engrènement en prenant en compte le caractère non-linéaire de la raideur d'engrènement et les écarts de forme. Les paliers (fluides ou à roulements) et éléments extérieurs sont quant à eux simulés par des raideurs additionnelles constantes. Les paliers à roulements font l'objet du second code de calcul. Dans celui-ci, on résout simultanément l'équilibre d'une ligne d'arbre, soumise à un torseur d'efforts extérieurs représentant les charges transmises par les dentures, et les conditions de contact non-linéaires entre corps roulants et bagues.

Ces modèles, bien que très performants, ne permettent pas d'étudier de manière précise les interactions entre les différents composants du mécanisme. Il convient pour cela de modéliser finement à la fois l'engrènement et les paliers.

Dans un premier temps, une modélisation fine des paliers fluides a été ajoutée dans le premier code de calcul. Les effets des paliers sur les arbres sont modélisés par des forces extérieures au système obtenues par intégration du champ de pression. On aboutit ainsi à un problème non-linéaire que l'on résout en couplant un schéma d'intégration temporelle de Newmark et un algorithme de type Newton-Raphson. Il devient alors possible de mettre en évidence les effets de l'engrènement sur la trajectoire des centres des paliers. L'intégration d'une modélisation fine des paliers à roulements devrait suivre.

Parallèlement à l'interaction des différents composants du mécanisme, il convient d'étudier également l'interaction entre la structure (phénomènes globaux) et le mécanisme (phénomènes locaux à l'échelle du contact). Pour cela, les différents modèles de roulements sont en cours d'extension pour prendre en compte la structure environnante. A plus long terme, l'utilisation des méthodes de sous-structuration est envisagée pour modéliser le plus fidèlement possible cette structure.

ON SLIDING FRICTION IN FULL-FILM HEAVILY LOADED LUBRICATED CONTACTS

Guillermo MORALES
Visiting Professor from SKF

Recently Jacod [1] introduced the so-called friction mastercurves to describe the frictional behaviour in full-film EHL contacts with different rheological models. These curves have been obtained by full numerical simulations and show that the frictional behaviour of an EHL contact depends mainly on the behaviour of the lubricant in the central zone (high pressure area).

In the present work some simplifications to the full equations are introduced (e.g. Hertzian geometry and pressure, shear stress independent on the pressure gradient, etc) to show some physical basis for the Jacod mastercurves. Thermal effects are introduced and a simplified model for 2D contacts is proposed and discussed.

[1]. Jacod, Benoit. "Friction in Elasto-Hydrodynamic Lubrication". PhD Thesis, University of Twente, 2002.