



HAL
open science

**Usure induite par vibrations sous écoulement: le cas des grappes de commande des réacteurs a eau pressurisée.
Des études théoriques aux applications industrielles**

M. Zbinden, M. Dragon-Louiset

► **To cite this version:**

M. Zbinden, M. Dragon-Louiset. Usure induite par vibrations sous écoulement: le cas des grappes de commande des réacteurs a eau pressurisée. Des études théoriques aux applications industrielles. *Mechanics & Industry*, 2000, 1, pp.581-592. hal-00111296

HAL Id: hal-00111296

<https://hal.science/hal-00111296>

Submitted on 28 Aug 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Usure induite par vibrations sous écoulement : le cas des grappes de commande des réacteurs à eau pressurisée. Des études théoriques aux applications industrielles

Marc Zbinden ^{a*}, Marta Dragon-Louiset ^b

^a EDF, Division Recherche et Développement, Département Mécanique et Technologie des Composants, Les Renardières, 77818 Moret-sur-Loing cedex, France

^b Laboratoire de Mécanique des Solides, CNRS-UMR-7649, École Polytechnique, 91128 Palaiseau cedex, France

Résumé — Différents composants internes des réacteurs à eau pressurisée (REP), et en particulier les grappes de commande, subissent un endommagement par usure sous l'action des vibrations induites par les écoulements. Pour faire face à ce problème, un important programme de R&D a été lancé par EDF et ses partenaires. Afin de permettre des calculs prédictifs, un modèle industriel d'usure a été développé, fondé à la fois sur des résultats expérimentaux et sur la cinétique d'usure réelle observée en réacteur. La modélisation de l'usure proprement dite est le maillon final d'une suite de calculs qui commence par la détermination des excitations hydrauliques, se poursuit par le calcul de la réponse dynamique de la structure et des chargements dans les zones de contact, pour s'achever par l'estimation des volumes et des profondeurs d'usure. Des travaux plus théoriques, visant à comprendre et à modéliser les phénomènes mis en jeu ont également été entrepris. Une démarche pour la simulation des phénomènes d'usure douce est proposée, en annexe, associant une étude thermodynamique globale à un modèle de l'interface des deux corps en contact. Elle permet de tenir compte de l'influence de ce milieu complexe sur le chargement et l'usure des solides. L'originalité de ce travail réside dans la prise en compte de la perte de matière et de la physique de l'interface dans un modèle macroscopique. © 2000 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Électricité de France / réacteur nucléaire à eau pressurisée / grappe de commande / usure / contact / frottement / frontière mobile / troisième corps / loi d'interface

Abstract — **Wear under flow induced vibrations: rod cluster control assemblies in pressurized water reactors. From theoretical studies to industrial applications.** Several internal components in pressurized water reactors (PWR), especially the rod cluster control assemblies, are damaged by wear under flow induced vibrations. In order to solve this problem, an important R&D program has been launched by EDF and its partners. To allow predictive computations, an industrial wear model has been developed. This model is supported, on one hand, by experimental results and, on the other hand, by the real wear kinetics observed in the reactor. The modeling of wear itself represents a final link in a succession of calculations which begins by the determination of hydraulic excitations induced by the flow. One then proceeds in the dynamic response calculation of the structure to finish up with an estimation of the wear volume and the wear depth. More theoretical studies, aimed at understanding and modeling the phenomena, have also been undertaken. A thought process to simulate the mild wear phenomenon is proposed, as an addendum, where one associates a thermodynamic study with an interface model of the two contacting bodies. This method allows taking into account the influence of the complex interface medium both on loading and also on wear of the first bodies. The originality of this study lies in considering the loss of wear debris and the interface physics in a macroscopic model. © 2000 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Électricité de France / pressurized water reactor / rod cluster control assembly / wear / contact / friction / mobile border / third body / interface law

1. INTRODUCTION : PRÉSENTATION DU PROBLÈME INDUSTRIEL

Deux rôles essentiels sont assignés aux grappes de commande :

- contrôler la réactivité dans le cœur du réacteur et donc en piloter la puissance à la demande ; ceci est obtenu par des mouvements pas à pas des grappes de réglage,
- arrêter rapidement le réacteur en cas de besoin, par la chute de l'ensemble des grappes et en particulier du groupe des grappes d'arrêt qui se trouvent, à cette fin, normalement maintenues en position haute dans leurs guides de grappes.

* Correspondance et tirés à part : marc.zbinden@edf.fr

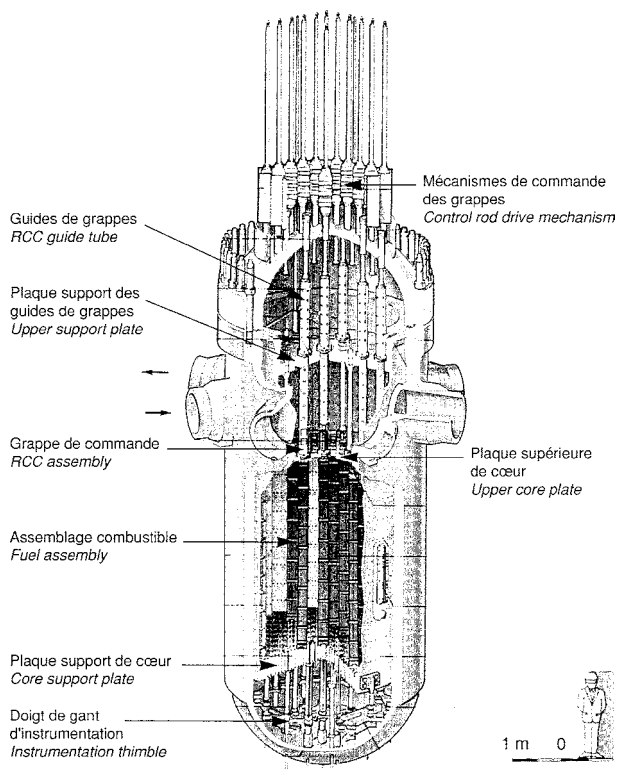


Figure 1. Cuve de réacteur (1 300 MW).
Figure 1. Reactor vessel (1 300 MW).

Un réacteur (*figure 1*) compte plusieurs dizaines de grappes de commande (65 grappes pour les réacteurs du palier 1300 MW). Chaque grappe (*figures 2 et 3*) est constituée de 24 « crayons » (de diamètre proche de 10 mm et de longueur environ 4 m) qui contiennent le matériau neutrophage, protégé par une gaine en acier inoxydable austénitique d'épaisseur inférieure à 1 mm (*figure 4*). Les crayons sont maintenus par une pièce de forme étoilée, appelée araignée, elle-même solidaire d'une tige de commande cannelée qui permet de manœuvrer la grappe à l'aide de dispositifs électromagnétiques situés au dessus du couvercle du réacteur.

Le déplacement pas à pas d'une grappe est obtenu par un double système de grappins, s'ouvrant de façon alternée et commandés par des électro-aimants. En cas d'arrêt d'urgence, on commande l'ouverture des deux grappins, et la grappe chute sous l'action de la pesanteur.

Au-dessus du cœur, chaque grappe prend place dans une structure de guidage qui peut la contenir entièrement. Ce « guide de grappe » (*figures 5 et 6*) comporte, juste au-dessus de l'élément combustible, une zone de guidage continu.

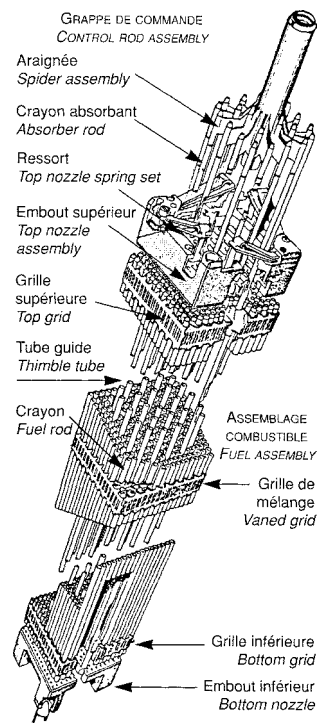


Figure 2. Assemblage combustible et grappe de commande.
Figure 2. Fuel assembly and rod cluster control assembly.

Aux altitudes plus élevées, le guidage devient discontinu et il est réalisé par des « cartes » de guidage, plaques épaisses découpées de façon à permettre le passage de l'araignée qui porte les crayons. Des jeux radiaux suffisants, de l'ordre de 0,5 mm, sont prévus dans les cartes de guidage et dans le guidage continu ; ils ont pour but de permettre un mouvement aisé des grappes, et en cas d'arrêt d'urgence, d'autoriser leur chute en un temps inférieur à une valeur fixée par un critère de sûreté et n'excédant guère deux secondes. Le guide de grappe est également en acier inoxydable austénitique.

Les écoulements du fluide réfrigérant soumettent les grappes de commande à des excitations qui les sollicitent en vibrations et provoquent des contacts intermittents avec leurs structures de guidage. En partie supérieure, le guide de grappe se termine par la plaque de logement ; percée d'un trou circulaire elle permet le passage de la tige de commande. Un débit significatif traverse cette plaque et peut engendrer des excitations hydrodynamiques, à la fois par turbulence et par couplage fluide-structure dans la zone annulaire.

L'endommagement qui en résulte est appelé usure par impacts-glissements, il a comme conséquence un affaiblissement de la tenue mécanique des crayons qui peut aller jusqu'au percement des gaines (*figure 7*)

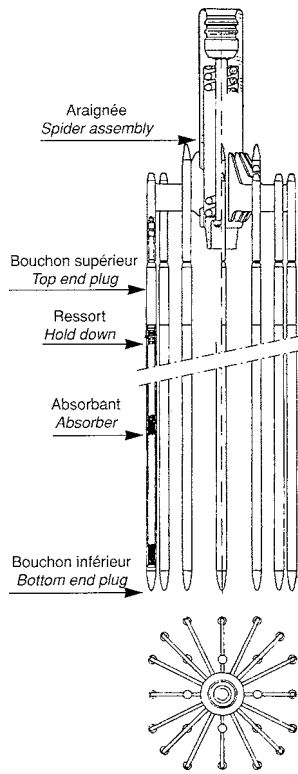


Figure 3. Grappe de commande.
Figure 3. Rod cluster control assembly (RCCA).

et même, dans un très petit nombre de cas, jusqu'à la rupture d'un crayon, avec risque de blocage de la grappe. Le percement d'une gaine met en contact le matériau neutrophage avec l'eau pressurisée, il en résulte une dissémination dans le circuit primaire du réacteur d'éléments activés conduisant à une augmentation de la dosimétrie globale. A l'opposé, l'usure excessive de la structure antagoniste peut provoquer une dégradation de sa fonction de guidage et perturber les mouvements de la grappe.

Les grappes d'arrêt sont particulièrement vulnérables à ce mode d'usure car, en situation normale, elles demeurent constamment extraites du cœur du réacteur, maintenues en position haute dans les guides de grappes ; étant immobiles, les usures qu'elles subissent sont localisées en altitude. Les grappes de réglage, par contre, sont fréquemment sollicitées par les mécanismes de commande et subissent de nombreux mouvements pas à pas qui peuvent engendrer une usure en glissement longitudinal qui se répartit le long de la gaine ; ce mode d'usure, qui était le plus redouté à l'origine, s'est révélé moins nocif que l'usure par impacts-glissements des grappes d'arrêt [1, 2].

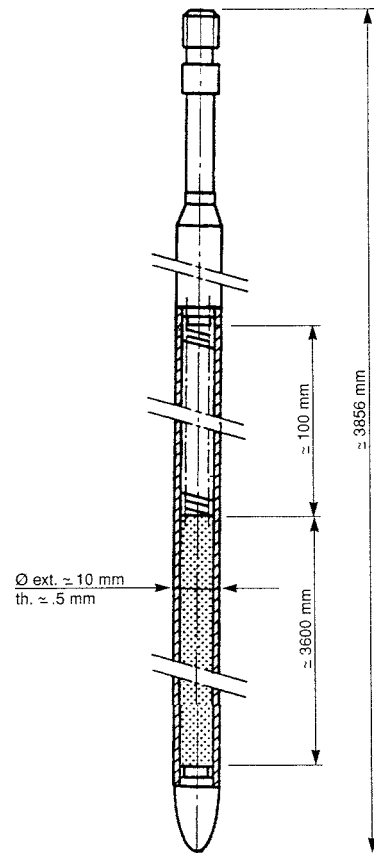


Figure 4. Crayon absorbant (900 MW).
Figure 4. Absorbing rod (900 MW).

2. UN ENSEMBLE D'ACTIONS POUR MAÎTRISER L'USURE

Plusieurs unités d'EDF, le CEA, ainsi que le constructeur FRAMATOME ont uni leurs efforts pour résoudre le problème en engageant différentes actions :

- Des calculs de tenue mécanique des crayons usés sont effectués, pour évaluer les usures maximales admissibles et dégager des critères de rebut des grappes usées.
- Une stratégie de maintenance est mise en œuvre, avec des contrôles périodiques des usures (par courants de Foucault et par ultrasons). Des déplacements de quelques pas des grappes d'arrêt sont pratiqués entre les contrôles, afin de répartir les usures sur plusieurs zones. Les résultats des contrôles sont rassemblés dans une base de données du retour d'expérience qui permet, à l'aide du logiciel PITAGORE 4, d'effectuer des études statistiques en vue de dégager des comportements significatifs et des cinétiques d'usure. Certaines années, plus de 200 grappes

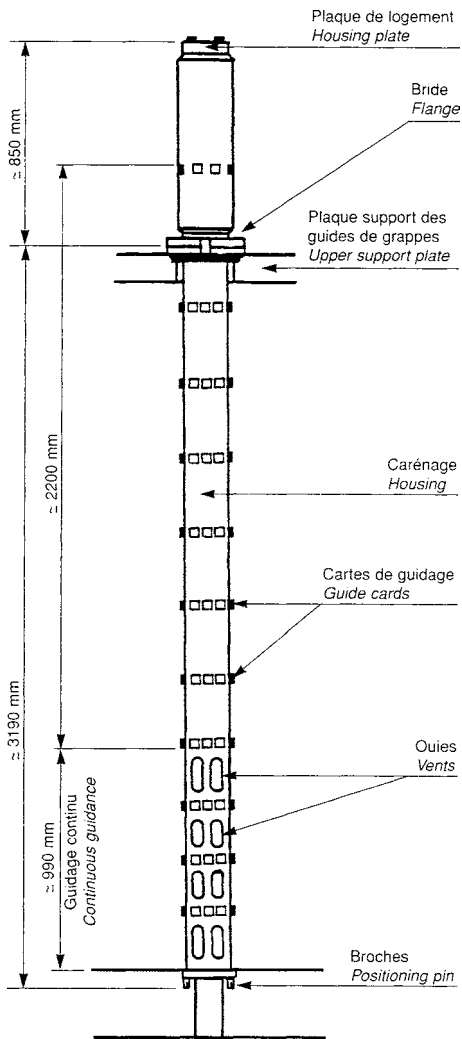


Figure 5. Guide de grappe (900 MW).

Figure 5. RCCA guide tube (900 MW).

sont rebutées pour usure et l'on constate parfois des percements de gaines en moins d'un an.

- Des expertises de gaines usées en réacteur sont effectuées en cellule chaude, à Chinon, en vue de caractériser les faciès d'usure et d'éclairer la compréhension des mécanismes mis en jeu.
- Le constructeur, FRAMATOME, développe un procédé d'amélioration de la tenue à l'usure des grappes de commande par nitruration ionique des gaines des crayons [3]. Il a également étudié la possibilité de réduire les vibrations des grappes en agissant sur les écoulements afin de plaquer les crayons dans leurs guides mais cette dernière solution a dû être abandonnée car elle conduisait

à une augmentation inacceptable du temps de chute des grappes.

- Un vaste programme de R&D est lancé, afin de comprendre et de modéliser l'enchaînement des phénomènes physiques mis en jeu : écoulements et sources hydrauliques d'excitation de la grappe, réponse de la structure en dynamique non-linéaire avec chocs, usure par impacts-glissements des crayons qui viennent en contact avec leurs guides (figure 8).

3. UN VASTE PROGRAMME DE R&D

3.1. Objectif

Dans le panorama d'ensemble, ci-dessus, l'objectif ambitieux fixé à la R&D est d'élaborer un outil de simulation globale de l'usure des grappes et des guides, permettant d'interpréter les constats du retour d'expérience et d'effectuer des études prédictives afin d'éclairer le choix d'une solution. Cet outil se présente comme un ensemble d'opérateurs du *Code_Aster*[®], code de mécanique de la Division R&D d'EDF.

La compréhension et la modélisation des phénomènes qui aboutissent à l'usure relèvent d'une double pluridisciplinarité qui fait appel à différentes équipes de spécialistes :

- à un premier niveau : mécanique des fluides, interactions fluide-structure, dynamique non linéaire, tribologie,
- mais la tribologie est elle même pluridisciplinaire : mécanique des contacts, science des matériaux, physico-chimie des surfaces et des interfaces : tribo-corrosion.

Dans toutes ces disciplines se combinent des approches fondamentales, de la simulation numérique et une part indispensable d'activité expérimentale.

3.2. Écoulements et sources d'excitations hydrodynamiques

La connaissance des écoulements au travers des structures internes du réacteur est un préalable à la détermination des excitations hydrauliques qui mettent les grappes en vibration. Le Code N3S développé par le Laboratoire National d'Hydraulique d'EDF Chatou est utilisé à deux reprises pour cela. Un premier calcul global, dans lequel

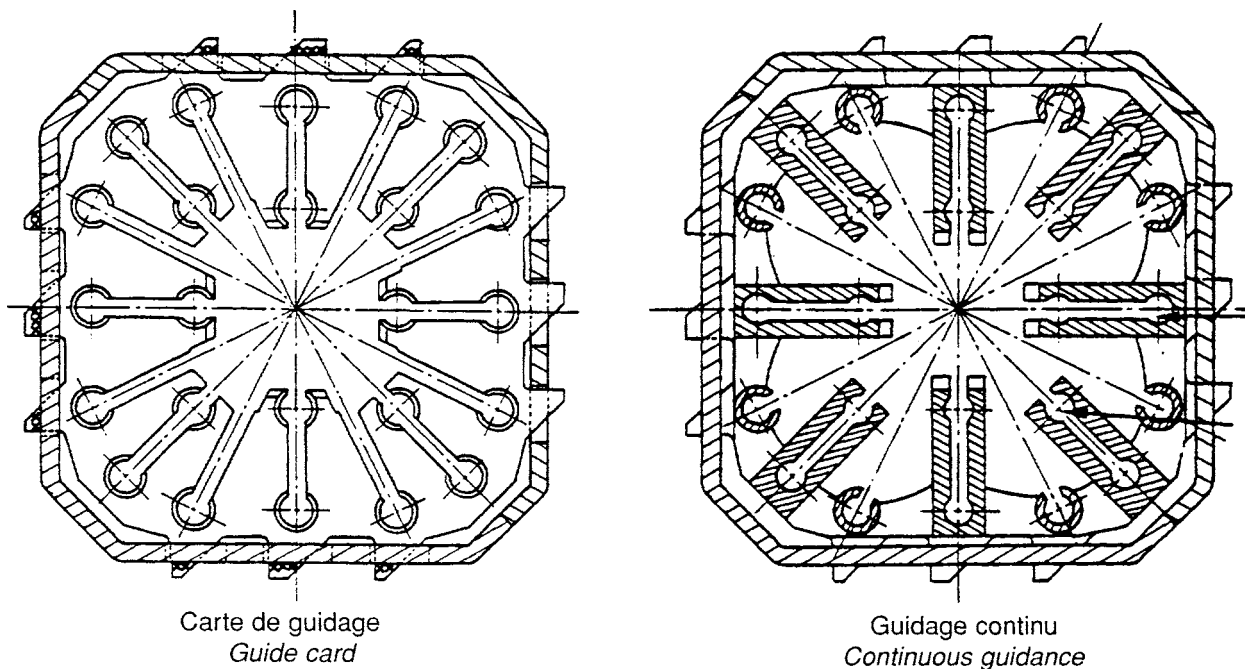
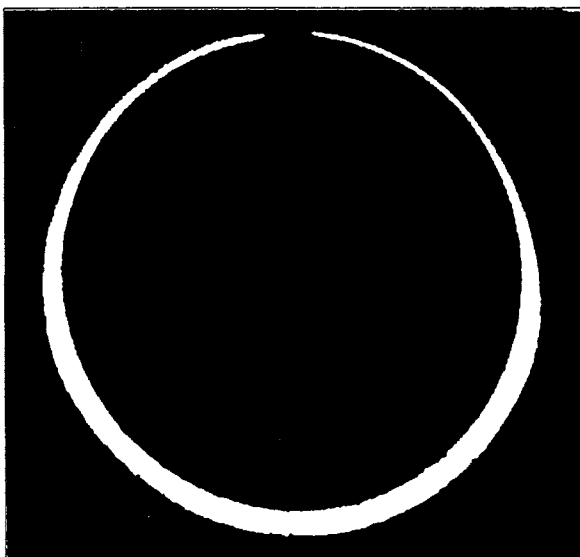
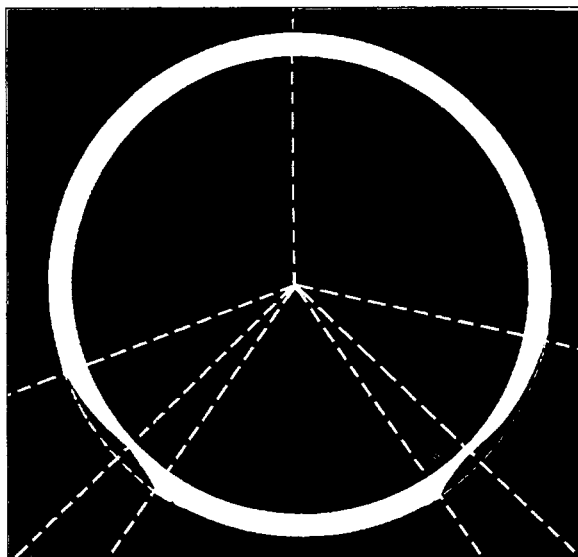


Figure 6. Carte de guidage et guidage continu (900 MW).
 Figure 6. Guide card and continuous guidance (900 MW).

Macrographies : EDF, Service Contrôle des Matériaux Irradiés, SCMI, Chinon



Trace d'usure «en lunule»
 «Crescent shape» wear scar



Trace d'usure «en V»
 «V shape» wear scar

(Macrographs: EDF Irradiated Material Control Department, SCMI, Chinon)

Figure 7. Coupes de crayons usés en réacteur.
 Figure 7. Cross sections of rods worn in reactor.

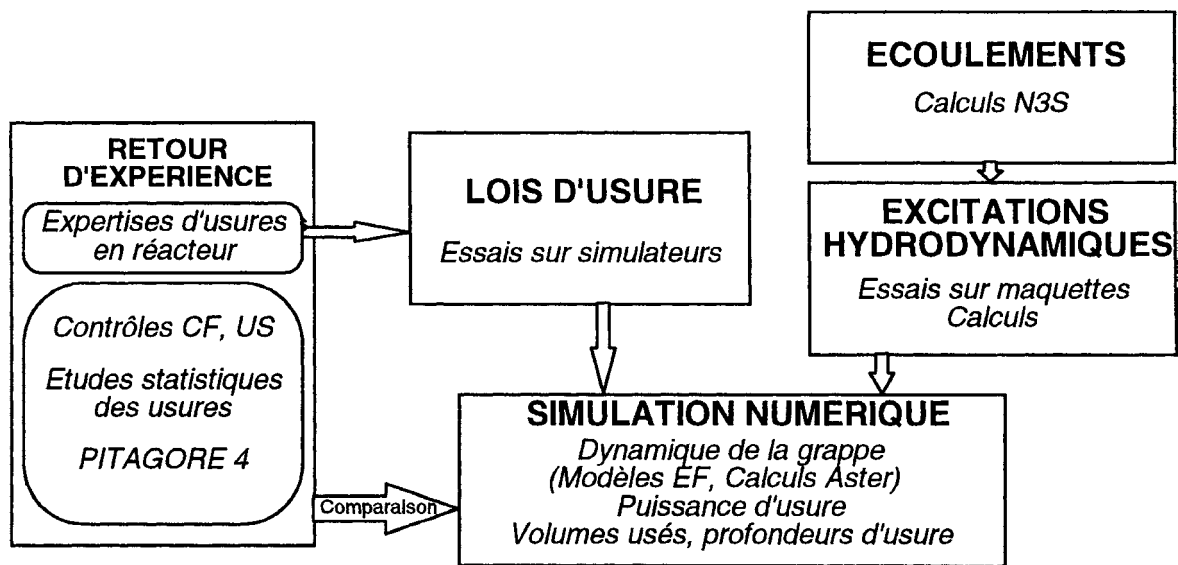


Figure 8. Organigramme de l'étude globale de l'usure des grappes.
 Figure 8. Whole study chart of RCCA wear.

le « plenum supérieur » du réacteur est représenté par un maillage de plus de 300 000 nœuds, fournit les vitesses et pressions des écoulements d'ensemble. Ce premier calcul fournit les conditions aux limites pour un second calcul qui détermine les écoulements à l'intérieur d'un guide de grappe.

Mais, dans un cas complexe comme celui d'une grappe de commande dans son guide, il n'existe pas de méthode permettant de déterminer directement les excitations hydrauliques à partir de la géométrie des structures et de la connaissance des écoulements qui les traversent : la caractérisation des sources d'efforts hydrauliques s'appuie nécessairement sur des mesures sur maquettes. Une maquette d'ensemble, MAGALY, construite par FRAMATOME à la demande d'EDF permet de localiser les principales sources d'excitations, des maquettes analytiques sont ensuite mises en œuvre pour faire les mesures.

Une méthode inverse permet, à partir de mesures par jauges de déformations sur un crayon de la maquette, d'obtenir les excitations modales sous forme fréquentielle. Une méthode de Monte Carlo génère ensuite des efforts turbulents, restitués dans le domaine temporel par transformée de Fourier inverse, qui sont appliqués dans l'étape suivante aux nœuds du modèle aux éléments finis de la grappe de commande.

3.3. Comportement vibratoire de la grappe, mouvements et forces de contact dans les guidages

La détermination des mouvements des crayons dans leurs guidages et celle des forces mises en jeu aux instants de contact est un problème de dynamique non-linéaire.

La résolution de ce problème se fonde sur une méthode approchée qui permet de réduire considérablement la taille du système, la méthode de réduction de Ritz, dans laquelle le problème est projeté sur une base réduite qui est la base des modes propres de la structure libre [4].

Les non linéarités de choc et de frottement sont régularisées à partir des descriptions théoriques (conditions de Signorini pour le contact normal, loi de Coulomb pour le frottement) par une technique de pénalisation qui fait intervenir une raideur et un amortissement pour les chocs, un coefficient de frottement et un amortissement pour les phases de glissement.

Plusieurs modèles aux éléments finis sont élaborés pour représenter les caractéristiques propres aux grappes de commande et aux guides de grappes des différents paliers.

Dans tous les cas, afin de réduire le nombre des nœuds de choc (nœuds du maillage situés au niveau d'une zone

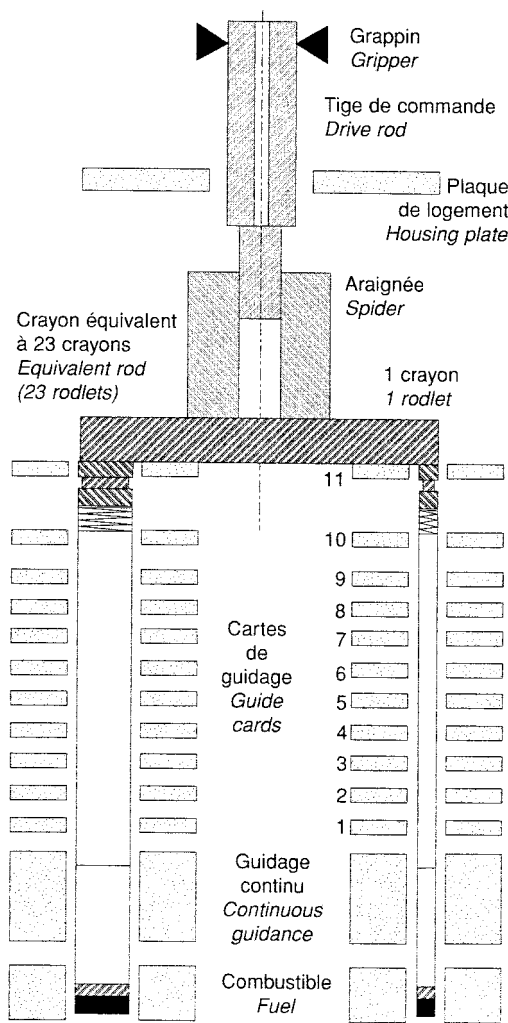


Figure 9. Modélisation de la grappe de commande (1 300 MW).
Figure 9. RCCA modelling (1 300 MW).

de contact où sont engendrées les non-linéarités), le modèle représente les contacts d'un seul crayon, les 23 autres étant figurés par un « gros » crayon unique présentant des caractéristiques de masse, raideur et amortissement équivalentes à celles de l'ensemble des 23 crayons. Ce procédé permet d'alléger considérablement les calculs non-linéaires tout en représentant correctement le système mécanique vu du crayon étudié, en raison de la raideur importante de l'araignée (figure 9).

Les chargements hydrauliques exprimés sous forme temporelle sont appliqués sur des nœuds du maillage de la structure.

Les valeurs des déplacements et des forces de contact sont fournies à chaque pas du calcul. Les fichiers corres-

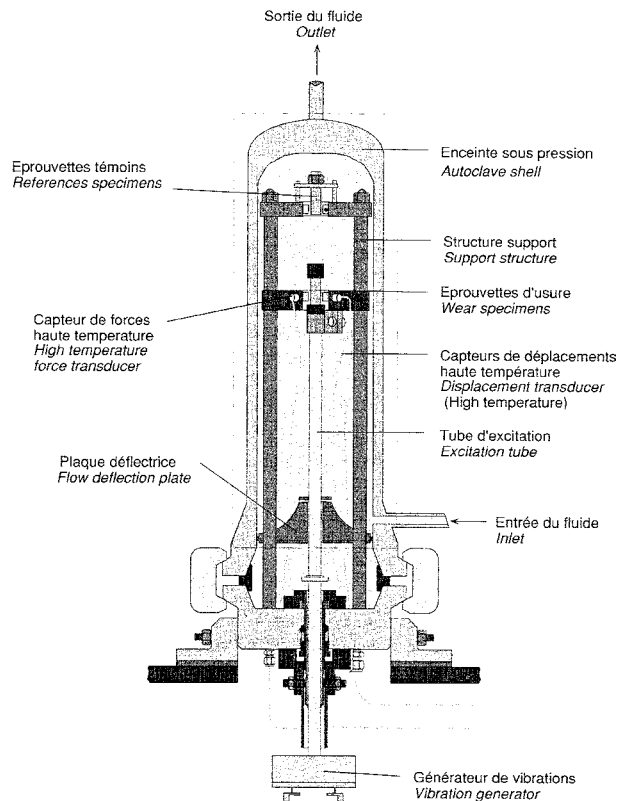


Figure 10. ERABLE, simulateur d'usure AECL.
Figure 10. ERABLE (MAPLE), wear simulation built by AECL.

pondants sont ensuite post-traités pour obtenir les grandeurs d'entrée (en particulier la « puissance d'usure ») des modèles d'usure présentés ci-dessous.

3.4. Usure

Faute de lois fondamentales, la modélisation de l'usure se fonde largement sur des résultats expérimentaux. Les essais d'usure sont effectués sur des simulateurs à l'aide desquels on s'efforce de reproduire au mieux l'ensemble des conditions du système tribologique réel (matériaux, géométrie, états de surface, conditions de contact). Les simulateurs sont instrumentés en capteurs haute température de forces et de déplacements, ils sont alimentés par une boucle qui fournit une circulation d'eau pressurisée de caractéristiques thermodynamiques et chimiques proches de celles du circuit primaire des REP (figure 10) [5-7].

La démarche de modélisation, de type semi-empirique, consiste à corréler les volumes usés obtenus aux grandeurs énergétiques dans le contact, mesurées et

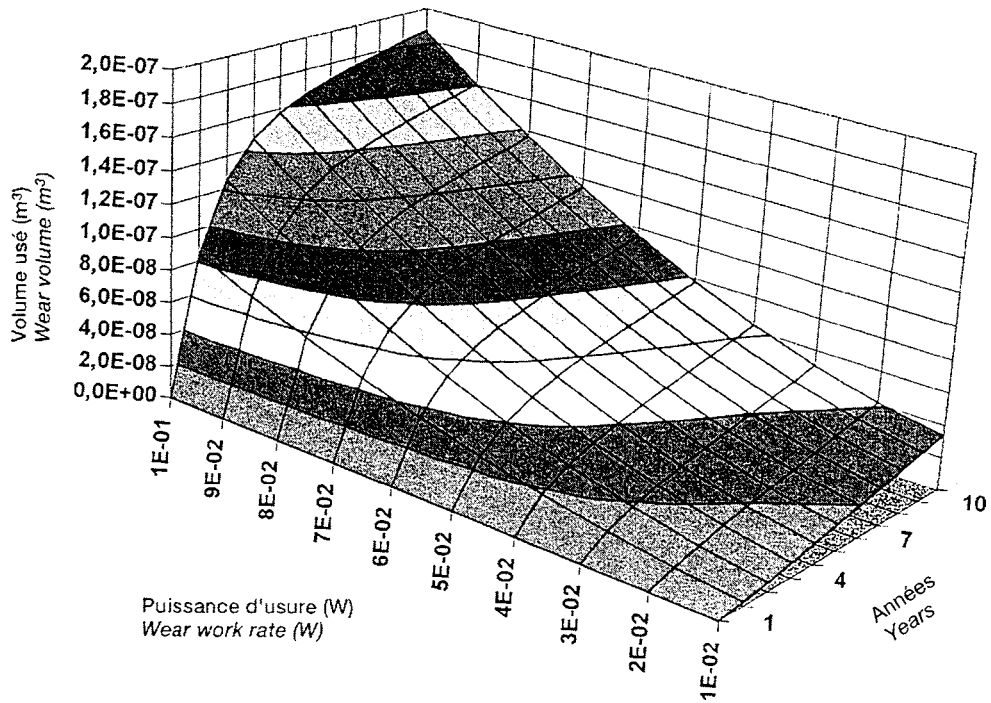


Figure 11. Modèle d'usure avec cinétique : calcul de volumes usés en fonction du temps et de la puissance d'usure.
Figure 11. Kinetic wear model: computation of wear volumes as functions of time and wear rate.

calculées pendant l'essai. La cinétique d'usure à long terme est ensuite introduite dans le modèle à partir des données du retour d'expérience (*figure 11*) [8, 9].

Pour un couple de matériaux choisi et pour des conditions de contact spécifiées, les essais fournissent des coefficients d'usure au sens de la loi d'Archard, mais l'ensemble des résultats permet aussi d'établir des corrélations plus représentatives des phénomènes réels que ne l'est la loi linéaire d'Archard.

L'usure des éprouvettes est mesurée par pesée et par profilométrie. Des mesures d'usure en continu ont aussi été mises en œuvre à l'aide d'une technique d'activation superficielle des éprouvettes. Des expertises métallurgiques sont pratiquées sur les éprouvettes usées (observations au MEB, coupes métallographiques, microduretés...) pour obtenir des informations sur les mécanismes d'usure et pour permettre des comparaisons avec les observations effectuées sur des usures réelles en réacteur.

Différentes études paramétriques ont été conduites pour apprécier l'influence de la température, l'importance des conditions de contact (impact « pur », glissement, impact-glissement), l'effet des revêtements et traitements de surface.

Les « lois d'usure » ainsi élaborées fournissent le dernier maillon dans l'enchaînement des modèles mis en œuvre dans l'outil numérique de simulation globale de l'usure des grappes de commande et de leurs guides.

L'outil permet finalement de calculer des volumes usés et des profondeurs d'usure en fonction du temps. Afin d'estimer l'évolution des formes des surfaces en contact au cours du processus d'usure, des calculs itératifs ont été effectués avec des réactualisations qui simulent des périodes d'usure de trois mois en réacteur.

De surcroît, ces travaux sont éclairés par des approches plus fondamentales développées notamment dans le cadre de thèses [10–12]. Ainsi l'annexe au présent article décrit-elle une démarche de modélisation globale de l'usure fondée sur une approche thermodynamique avec prise en compte du comportement des débris dans l'interface.

4. ABOUTISSEMENT ET LIMITES DE LA DÉMARCHE. CONCLUSION

Au terme de l'important effort de R&D exposé ci-dessus, de nombreuses connaissances ont été acquises

dans différentes disciplines, des méthodes et des outils numériques ont été développés, des moyens expérimentaux ont été construits, des travaux universitaires ont été suscités et se poursuivent, les compétences des équipes se sont renforcées.

Tous ces efforts n'ont pas, cependant, totalement vaincu la complexité du réel. Les travaux de recherche se déroulent selon leurs rythmes propres : là où les données de base sont disponibles une progression rapide est possible, mais si les connaissances fondamentales font défaut (et c'est assez largement le cas pour la tribologie du contact sec) les avancées sont beaucoup plus lentes, plus empiriques, et peuvent décourager les attentes industrielles qui portent sur les choix à faire dans le court terme.

La confrontation entre les résultats fournis par l'outil de simulation et les constats issus du retour d'expérience sur les usures réelles des grappes en réacteur est, en général satisfaisante, mais elle montre parfois des écarts dont il n'est pas aisé de rendre compte. C'est le cas pour certaines usures rapides, peu fréquentes et mal expliquées, qui semblent résulter de puissances ou de coefficients d'usure supérieurs à ceux qui nous sont connus.

Les études paramétriques numériques, menées de manière déterministe, laissent-elles échapper des configurations particulièrement pénalisantes, car les paramètres sont nombreux et de large variabilité ? Le recours aux méthodes probabilistes a été tenté mais le volume des calculs est important et impose de limiter le nombre des paramètres pris en compte simultanément pour éviter des temps, et donc des coûts, de calcul prohibitifs.

Le retour à la physique des phénomènes conduit à différentes interrogations :

- Toutes les sources d'excitation hydrodynamiques ont-elles bien été identifiées ?
- Le modèle aux éléments finis de la grappe est très simplificateur, malgré les différentes validations, peut-il encore présenter des imperfections ?
- Les essais qui permettent d'établir les lois d'usure sont-ils suffisamment représentatifs de la réalité en réacteur, notamment les phénomènes de tribo-corrosion (formation et élimination des couches d'oxydes) sont-ils bien simulés ?

Les essais et le retour d'expérience en réacteur ont confirmé les qualités des traitements de surface ou revêtements finalement retenus pour rendre négligeable l'usure des grappes de commande. La nitruration ionique (ou le chromage électrolytique) des gaines améliorent considérablement leur tenue à l'usure ; on peut craindre, cepen-

dant, un certain accroissement de l'usure des structures de guidage antagonistes, qu'il conviendra de surveiller. L'outil de simulation numérique rend compte de cette situation et pourra apporter des informations appréciables sur l'usure des guides de grappes.

RÉFÉRENCES

- [1] Zbinden M., Lina A., L'usure dans les réacteurs à eau pressurisée : le cas des grappes de commande, EPURE, revue trimestrielle publiée par la Division R&D d'EDF, N° 63, juillet 1999, pp. 14–29.
- [2] Ko P. L., Taponat M.C., Robertson M.F., Zbinden M., Friction and wear studies of nuclear power plant components in pressurized high temperature water environments, in : ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Boston, 1998.
- [3] Hertz D., Peyran J.C., La nitruration ionique remède à l'usure des crayons de grappes de commande, in : Fontevraud 3, International Symposium, SFEN, Proceedings, Vol. 2, 1994, pp. 752–759.
- [4] Jacquart G., Gay N., Computation of impact–friction interaction between a vibrating tube and its loose supports, in : Proceedings of International Symposium on Flow Induced Vibration and Noise, Vol. 2, ASME, 1992.
- [5] Lina A., Zbinden M., Hersant D., Méthodes de mesures tribologiques associées aux essais d'usure des composants internes des réacteurs nucléaires à eau pressurisée, in : Actes des Journées d'Études de la Société Tribologique de France, Neuchâtel, SIRPE éditeur, Paris, 1997.
- [6] Hersant D., Lina A., Moinereau D., Zbinden M., Experimental study of impact/sliding wear of rod cluster control assemblies of PWR nuclear power plants, in : 8th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE 8, Baltimore, avril 2000.
- [7] Hersant D., Lina A., Zbinden M., Traitements de surface pour améliorer la tenue à l'usure par impacts–glissements des structures internes des réacteurs à eau pressurisée, in : Actes des Journées d'Études de la Société Tribologique de France, Nancy, SIRPE éditeur, Paris, 1995.
- [8] Cauvin R., Hertz D., Zbinden M., Lelait L., Gauthier A., Mécanismes d'usure des crayons de grappes de commande : apports de l'expertise, in : Fontevraud 4, International Symposium, SFEN, Proceedings, Vol. 2, 1998, pp. 1289–1299.
- [9] Zbinden M., Durbec V., A kinetic model for impact/sliding wear of PWR internal components : application to rod cluster control assemblies, in : The 1996 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Montreal, 21–26 juillet 1996, PVP 328, pp. 379–395.
- [10] Noël B., Dégradations tribologiques de contacts de géométrie conforme sollicités par impacts/frottements, Thèse de doctorat en mécanique, INSA Lyon, 1995.
- [11] Clair D., Noël B., Berthier Y., Zbinden M., An attempt to a phenomenological approach of the wear of PWRs components, in : The First World Tribology Congress, Londres, 8–12 septembre 1997.
- [12] Clair D., Baillet L., Berthier Y., Modélisation tribologique d'un contact. Réalité, difficultés et apport industriel, in : Journées Techniques organisées par le CETIM « Frottement–usure. Conception et tests des solutions industrielles », Senlis, 15–16 décembre 1999.

ANNEXE

Modélisation des phénomènes de l'usure de contact

1. INTRODUCTION

L'usure par contact de glissement et frottement, caractérisée par une perte de matière, diminue la durée de vie des pièces des mécanismes, et doit dans ce cas être contrôlée pour le remplacement des organes affectés. EDF se trouve confronté à ce problème pour divers organes des centrales nucléaires, où les mesures de maintenance sont difficiles et coûteuses à mettre en œuvre. Dans certains cas cette usure est recherchée, à condition d'être maîtrisée. Qu'elle soit voulue ou redoutée, l'usure ne peut être évaluée a priori, car il n'existe pas actuellement de modèle macroscopique du phénomène applicable à une structure complexe.

Une littérature abondante est consacrée à l'usure : Meng et Ludema [1] en font un bilan, et plus particulièrement concernant l'usure des organes de centrales nucléaires, on peut se référer à Ko [2]. La plupart des modèles existants sont issus d'observations expérimentales, et ne sont fiables que pour des configurations (géométrie, chargement, environnement) proches de l'application qui a servi à les établir. Leur transposition à des structures complexes est rarement possible. On peut cependant classer grossièrement l'ensemble des travaux en deux catégories : les modèles macroscopiques et les études à l'échelle des aspérités. Les premiers, indispensables aux ingénieurs, s'appuient pour la plupart sur la loi d'Archard [3], pour qui le volume de matière perdu au cours de l'usure d'un solide par contact, est proportionnel à la longueur glissée et à la force normale que subit le solide. Le coefficient de proportionnalité, établi empiriquement, est parfois lié aux paramètres des matériaux en présence, comme la dureté. Les seconds, les modèles microscopiques, sont nécessaires pour la compréhension des mécanismes, mais ne sont pas suffisants pour fournir un outil de simulation à l'échelle macroscopique.

Un modèle pour l'usure douce en présence d'un fluide (lubrifiant ou simplement faisant partie de l'environnement) est proposé ici. Il se compose de deux volets complémentaires : un modèle global, obtenu par une approche thermodynamique du phénomène, et un modèle de l'interface, obtenu d'après des considérations micro et méso, ajustable suivant la physique du processus. Les mécanismes intervenant sont nombreux et souvent couplés : corrosion, abrasion, érosion... Causant une usure douce ou sévère, ces phénomènes se produisent dans l'interface des deux solides en contact et peuvent, par leur apparition

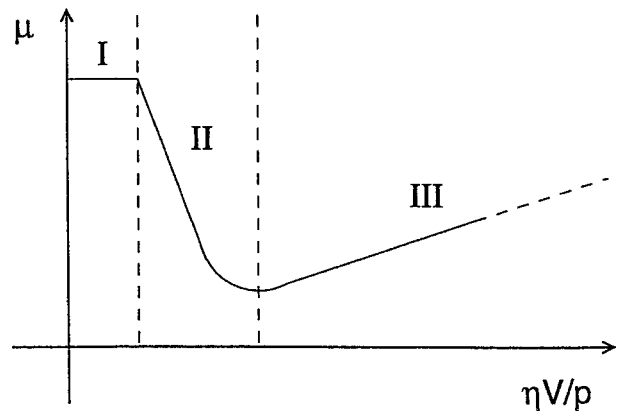


Figure A1. Courbe de Stribek.

Figure A1. Stribek curve.

et leur disparition, modifier entièrement les conditions de contact et donc les débits d'usure qui en découlent. Leur prise en compte est indispensable pour fournir un modèle réaliste, mais la complexité que cette prise en compte entraîne doit être limitée.

La courbe de Stribeck (*figure A1*) illustre le net passage de l'usure forte et sèche à l'usure douce et lubrifiée, par l'évolution du coefficient de frottement (μ) au cours d'un essai en fonction de $\eta V/p$ (où η est la viscosité du fluide, V la vitesse relative des deux solides et p la pression) (voir Havet [4]).

Lorsque $\eta V/p$ est faible, le fluide ne recouvre pas entièrement les surfaces en contact et l'usure est sèche, forte, le coefficient de frottement reste important (régime I). Au fur et à mesure que le fluide s'étale, μ décroît ; le régime II est une phase transitoire instable. Quand le fluide constitue une couche uniforme, l'usure est douce (régime III) ; μ est au plus bas, et augmente doucement avec $\eta V/p$. Cette étude s'intéresse à ce régime dit « hydrodynamique ». Pour l'usure sévère, on peut consulter l'article de Mröz et Stupkiewicz [5].

2. PRINCIPE DE L'APPROCHE THERMODYNAMIQUE

Considérant les deux solides 1 et 2 en contact et leur interface (*figure A2*), on définit trois zones : les deux parties saines des solides (Ω_1 et Ω_2), et l'interface Ω_3 .

Les surfaces en contact sont endommagées. La densité des fissures décroît si on s'éloigne de l'interface ; une frontière (Γ_1 et Γ_2) est définie délimitant le matériau dit sain (au comportement connu), de sa partie

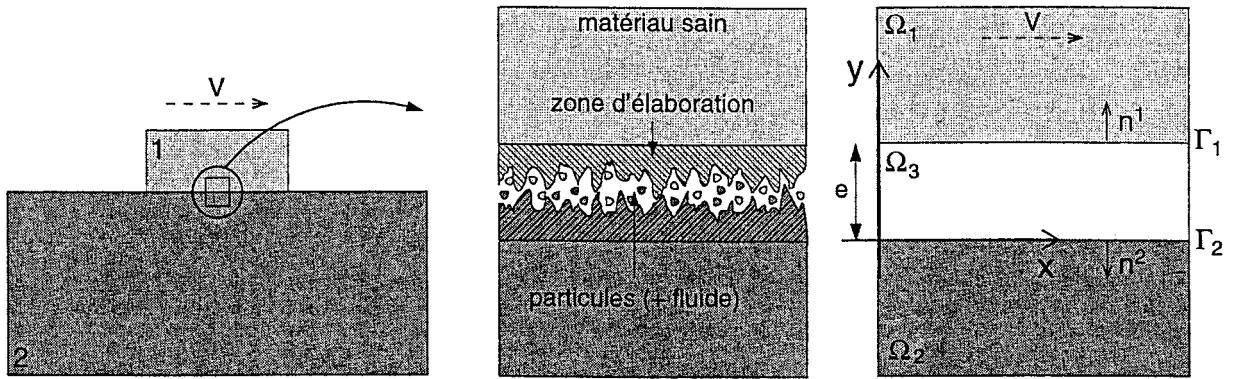


Figure A2. Modèle constitué de 3 domaines.
Figure A2. Three domain model.

poreuse, endommagée. Ces zones fissurées, dites zones d'élaboration, et le troisième corps (débris d'usure et fluide) constituent l'interface, qui est l'objet du paragraphe suivant. Les frontières sont mobiles sous l'effet de l'usure et de la perte de matière (se référer à [6] pour l'étude d'un système à frontières mobiles). L'ensemble des lois de conservation est écrit pour ce système à 3 domaines. L'hypothèse d'un phénomène dissipatif conduit à exprimer un critère d'usure [7, 8], en fonction de deux taux de restitution d'énergie pour chacun des solides Ω_i ($i = 1, 2$) : g^i et g^{3i} , dépendant des contraintes, du gradient des déplacements et de l'énergie libre respectivement du côté sain de i de Γ_i et du côté de l'interface, dont il faut évaluer le comportement moyen. La vitesse d'évolution des frontières correspond à la vitesse d'usure des deux solides ; elle est évaluée d'après le critère.

3. INTERFACE DU SYSTÈME

L'interface complexe est le siège des processus de détachement des particules par rupture des aspérités. A partir d'observations à l'échelle microscopique, il est possible d'établir un modèle de comportement suffisant pour décrire l'évolution de cette interface avec la quantité de débris d'usure qu'elle contient, sous la forme d'une loi d'interface.

A l'échelle des aspérités μ (figure A3), les zones fissurées se distinguent de la partie centrale où les particules sont mélangées et emportées par le fluide. Godet [9, 10], Berthier [11] et Georges [12, 13] ont travaillé sur une modélisation à l'échelle mésoscopique (m), décrivant trois zones dans cette interface. Ω_{31} et Ω_{32} sont ainsi adhérentes aux solides en contact, poreuses et composées de particules respectivement de 1 et 2. Ω_{33} constitue une couche cisailée, faite d'une suspension dont la viscosité

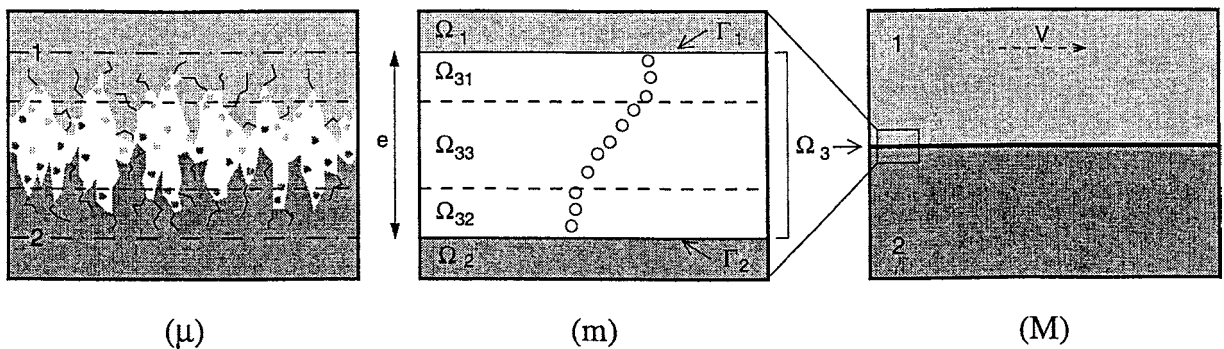


Figure A3. De l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique.
Figure A3. From microscopic to macroscopic scale.

varie avec la concentration de particules. Cette fraction volumique de particules ϕ constitue le paramètre interne du modèle de l'interface, écrit sous la forme d'une loi d'interface à l'échelle macroscopique (M). La loi relie les contraintes dans l'interface à sa déformation :

$$\sigma_{xy} = \eta(\phi)(\dot{u}_x^1 - \dot{u}_x^2) \quad \text{et} \quad \sigma_{yy} = \kappa(\phi)(u_x^1 - u_x^2)$$

(voir [14]). Le coefficient $\eta(\phi)$ est donné par la loi d'Einstein, valable pour une concentration en particules en-deçà de 0,6. Le coefficient $\kappa(\phi)$ découle de l'additivité des déformations, d'après la loi de Reuss. La relation entre la fraction volumique des particules, l'épaisseur de l'interface et la vitesse d'usure (déterminée par le critère d'usure) est fournie par la conservation de matière, formulée pour une section de Ω_3 .

4. CONCLUSION

Un modèle global permettant la prise en compte de mécanismes d'usure et de l'influence de l'interface chargée de débris est proposé. Son application peut se faire à l'aide de la méthode des éléments finis, en déterminant l'état mécanique global, en calculant le critère et ajustant le paramètre interne de l'interface ; le résultat obtenu est la quantité de matière perdue, un coefficient de frottement indicatif et la vitesse d'usure. Ceci fait l'objet des travaux actuels, et ouvre la perspective de l'application de ce modèle à des structures industrielles complexes.

RÉFÉRENCES DE L'ANNEXE

- [1] Meng H.C., Ludema K.C., Wear models and predictive equations ; their form and content, *Wear* 181–183 (1995) 443–457.
- [2] Ko P.L., Wear of power plant components due to impact and sliding, *Appl. Mech. Review* 50 (7) (1997) 387–411.
- [3] Archard J.F., Contact and rubbing of flat surfaces, *J. Appl. Phys.* 24 (8) (1953) 981–988.
- [4] Havet L., Caractérisation tribologique de biolubrifiants, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 1998.
- [5] Mroz Z., Stupkiewicz S., A model of third body abrasive friction and wear in hot metal forming, *Wear* 231 (1999) 124–138.
- [6] Pradeilles-Duval R.M., Stolz C., Mechanical transformations and discontinuities along a moving surface, *J. Mech. Phys. Solids* 43 (1) (1995) 91–121.
- [7] Dragon M., Stolz C., Constantinescu A., Approche énergétique et simulation de l'usure continue, in : Actes du Quatrième Colloque National en Calcul des Structures de Giens, 18–21 mai 1999, pp. 473–478.
- [8] Dragon-Louiset M., Stolz C., Approche thermodynamique des phénomènes liés à l'usure de contact, *C. R. Acad. Sci. Paris Sér. Iib* 327 (1999) 1275–1280.
- [9] Godet M., Extrapolation in tribology, *Wear* 77 (1) (1982) 29–44.
- [10] Godet M., Third bodies in tribology, *Wear* 136 (1) (1990) 29–45.
- [11] Berthier Y., Experimental evidence for friction and wear modelling, *Wear* 139 (1990) 77–92.
- [12] Georges J.M., Millot S., Loubet J.L., Tonck A., Drainage of thin liquid films between relatively smooth surfaces, *J. Chem. Phys.* 98 (9) (1993) 7345–7359.
- [13] Georges J.M., Régimes limites et tribologie, *Le Courrier du CNRS* 71 (1988) 109.
- [14] Dragon-Louiset M., Modélisation micromécanique de l'interface d'un système tribologique dans une approche thermodynamique de l'usure continue, *Méc. Ind.* 1 (1) (2000) 37–42.