



HAL
open science

Approche thermodynamique des phénomènes liés à l'usure de contact

Marta Dragon-Louiset, Claude Stolz

► **To cite this version:**

Marta Dragon-Louiset, Claude Stolz. Approche thermodynamique des phénomènes liés à l'usure de contact. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Serie II, 1999, 327, pp.1275-1280. 10.1016/S1287-4620(99)90001-7 . hal-00092158

HAL Id: hal-00092158

<https://hal.science/hal-00092158>

Submitted on 26 Mar 2024

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.

Approche thermodynamique des phénomènes liés à l'usure de contact

Marta DRAGON-LOUSET, Claude STOLZ

LMS, CNRS UMR 7649, École polytechnique, 91128 Palaiseau cedex, France

Résumé. On propose un cadre théorique d'étude des phénomènes d'usure dus au contact entre deux solides. L'usure est caractérisée par la perte de matière des solides en contact. Les particules détachées ainsi que les parties endommagées des deux solides forment une interface aux propriétés mécaniques complexes. Les zones frontières des deux solides, en contact avec ce milieu, sont le siège d'une dissipation associée à la perte de matière des corps en contact. Un taux de restitution d'énergie associé à cette dissipation d'usure est défini et sert à l'élaboration d'un critère. On examine le cas de l'usure continue et on met en évidence des quantités globales caractéristiques du phénomène d'usure.

usure / frottement / frontières mobiles / taux de restitution d'énergie

A thermodynamical approach to contact-wear

Abstract. *This paper proposes a theoretical framework for the study of contact-wear. Wear phenomena due to contact and relative motion between two solids are characterized by a loss of material. The detached particles as well as damaged contact areas of the solids form an interface with complex mechanical properties. Using an analysis of the dissipation in this interface, an energy release rate and then a wear criterion are defined. This dissipation associated with loss of material will be called wear dissipation. An application to steady-state wear processes is then given.*

wear / fretting / moving boundaries / energy release rate

Abridged English Version

Contact-wear phenomena are complex processes depending on load amplitude, design, contact geometry and material properties. Loss of material is characteristic of wear phenomena. In the contact area, the products of wear or lost particles and the damaged subsurfaces of both solids define the so-called interface. Particles are detached, asperities are cracked, and failures occur in this interface making its description difficult. Our aim is to characterize the continuous evolution of the boundaries separating both solids from their common interface.

We study, as in [1], the evolution of these boundaries between sound and damaged materials submitted to wear. Energy associated with the boundaries' evolution is defined.

Many investigations on wear modelling are based on experimental observations which depend closely on operating conditions (for example Archard's law [2]), and cannot provide enough information about the wear of a structure [3]. Our motivation in the present work is to derive a criterion for the wear of both contacting bodies, describing the local quantities involved in the wear process in a more fundamental manner.

Analysing a system of two contacting solids (*figure 1*), we distinguish three different areas: Ω_1 and Ω_2 , the sound parts of the bodies with known constitutive laws, and Ω_3 their interface. For $i = 1, 2$, Γ_i is the moving boundary between Ω_i and Ω_3 , W_i is the geometrical velocity of Γ_i , and μ_i is the mass flux through the boundary. The balance of mass (1), momentum (2) and energy (3) take into account this transport of material through the boundaries Γ_i . At the layer, the entropy source is given by (4).

Owing to the second law of thermodynamics, the internal entropy production is non-negative. The thermal energy has the form (5), and the mechanical energy is given by the equation (6). The wear energy produced at the layers is expressed by (7), which reduces to zero when there is no flux of material ($\mu_i = 0$) from one of the body to the interface through the boundary Γ_i . (In this case $[\nu]_{\Gamma_i} = 0$ because of the continuous displacement between the body and the interface.)

Let us analyse more precisely the production of entropy in the interface, given by (8). D is the sum of D_3 , the dissipation in the volume (9), and the wear energies associated with the mass fluxes μ_i (assuming here there is no temperature jump at the boundaries). Knowing the relative velocity V of the two solids and the load, we can separate the frictional energy from the wear energy in the global energy.

Applying this approach to the case of the steady-state wear, several assumptions lead to equation (13), giving D in the isothermal case. We suppose there is no displacement jump at the boundaries (10), writing then D as in (11), with G_i and G_{3i} given by (12). The first term in (11) is the frictional energy and the second is the sum of the wear energy for both boundaries. We can notice that G_i are defined in the sound parts of the solids and can be determined knowing their thermomechanical state; they are similar to the well-known energy release rate of fracture mechanics. The free energy of the interface, which is supposed to be viscous, is neglected in (14) showing clearly frictional dissipation.

A wear criterion is defined introducing a potential Φ which gives the velocity of the boundary Γ_i as follows: $\phi_i = \partial\Phi/\partial\gamma_i$ with $\gamma_i = G_i - G_{3i}$. Such a criterion for the evolution of the boundary considers G_{3i} as an internal parameter describing the influence of the interface on Γ_i .

In order to validate this criterion in the case of a mild wear, the two contacting solids will be assumed to be elastic. This makes G_i (equation (12)) easy to determine according to (15), where γ is a closed curve (*figure 1*).

Operating conditions in the classical wear experiments have to enable the continuous measurement of the geometrical evolution and the loss of material during the process, providing enough information for the development of the wear law.

1. Introduction

Les phénomènes liés à l'usure sont fonction des conditions de chargement entre deux corps solides en contact et mouvement relatif. Il y a usure dès que les corps perdent de la matière par détachement de particules. La taille de ces particules dépend des conditions de chargement, des caractéristiques

mécaniques des deux corps en présence. Les particules détachées et la zone d'élaboration contenant tous les processus d'endommagement et de fissuration constituent un ensemble complexe que l'on appellera milieu interface. On propose de caractériser l'évolution de la frontière entre le milieu interface et chacun des solides qui s'use.

Ces deux frontières sont des domaines de transition entre le matériau sain du solide non dégradé et le matériau endommagé de la zone d'élaboration. Elles constituent des frontières mobiles au sens de [1]. L'approche générale des discontinuités mobiles est appliquée au cas de l'usure et propose alors de définir des quantités énergétiques sur les deux fronts d'usure.

Les surfaces au contact voient leur géométrie évoluer, et en même temps le milieu interface se constitue. Cette phase de mise en charge est complexe, mais pour des conditions de géométrie et de chargement particulières un régime stabilisé s'établit avec un flux de matière constant : c'est un état d'usure continue. Cet état aux aspects de stationnarité maîtrisés expérimentalement permet de définir classiquement des lois d'usure comme celle d'Archard [2]. Cependant, ces lois dépendent notamment de la géométrie des corps en contact et de la configuration de l'essai, elles ne sont pas intrinsèques et aptes à définir des critères pour caractériser l'évolution de l'usure des pièces mécaniques [3].

L'approche proposée ici permet d'associer des quantités locales aux deux fronts d'usure. Ces quantités dépendent des caractéristiques des matériaux en présence, les deux solides, et de celles du milieu interface, constitué des deux zones d'élaboration de la dégradation et des particules solides détachées en mouvement.

L'analyse des quantités locales permet de faire la distinction entre des grandeurs mécaniques évaluées sur une géométrie et pour un chargement donnés et des grandeurs plus intrinsèques liées à l'évolution des fronts d'usure. Ces grandeurs, dont certaines sont accessibles à l'expérience, permettent d'élaborer et de proposer des critères d'usure.

2. Analyse générale du phénomène d'usure

On étudie un système (*figure 1*) composé de deux corps (Ω_1 et Ω_2) en contact et en mouvement relatif. La zone de contact entre les deux corps est une interface Ω_3 aux propriétés mécaniques que l'on suppose connues et décrites par les lois usuelles de la mécanique des milieux continus. Cette interface, d'épaisseur faible par rapport aux autres dimensions du système, dépend des mécanismes de dégradation des deux solides. En dehors des zones d'élaboration, les deux solides possèdent un comportement habituel décrit par la donnée d'une énergie libre et d'un potentiel de dissipation. L'élaboration du milieu interface est définie par le mouvement d'une surface séparant un matériau sain de la zone de matière partiellement endommagée de la zone d'élaboration.

On note Γ_i la frontière commune entre Ω_i et Ω_3 . Pour chaque front Γ_i la normale n_i est orientée vers le milieu sain. Cette frontière est mobile et son évolution est associée à la progression de l'usure. La vitesse géométrique d'avancée de ce front d'usure est notée W_i sur la configuration actuelle. Le long de ces surfaces les quantités mécaniques f peuvent être discontinues ; on note $[f]_{\Gamma_i} = f_i - f_{3i}$, où la quantité i est celle définie du côté Ω_i et la quantité $3i$ du côté de Ω_3 .

Exprimant comme en [1] l'ensemble des équations de conservation dans chacun des domaines et le long des surfaces de discontinuité, on obtient :

– conservation de la masse

$$\dot{\rho} + \text{div } \rho v = 0, \text{ et sur } \Gamma_i \quad \mu_i = \rho_i^+ (v_i^+ - W_i) \cdot n_i = \rho_i^- (v_i^- - W_i) \cdot n_i \quad (1)$$

– conservation de la quantité de mouvement

$$\text{div } \sigma = \rho \gamma, \text{ et sur } \Gamma_i \quad n_i \cdot [\sigma]_{\Gamma_i} = \mu_i [v]_{\Gamma_i} \quad (2)$$

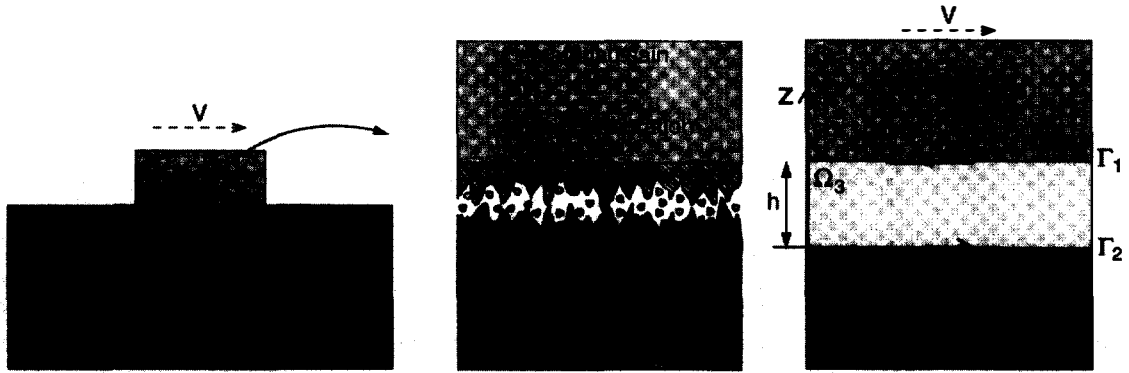


Figure 1. Système de deux corps en contact et leur interface.

Figure 1. System of two contacting bodies and their interface

– conservation de l'énergie totale ($\bar{\sigma}_i = (\sigma_i + \sigma_{3i})/2$)

$$\rho \dot{e} = \sigma : \dot{\varepsilon} - \text{div } q, \text{ et sur } \Gamma_i \quad \mu_i [\psi + sT]_{\Gamma_i} - n_i \bar{\sigma}_i \cdot [v]_{\Gamma_i} + [q]_{\Gamma_i} \cdot n_i = 0 \quad (3)$$

La conservation de l'énergie sur l'interface (3) montre qu'il existe une source de chaleur d'intensité :

$$\mu_i \mathbb{G}_{th} = \mu_i [\psi + sT]_{\Gamma_i} - n_i \bar{\sigma}_i \cdot [v]_{\Gamma_i} \quad (4)$$

3. Analyse de la production d'entropie

La production intérieure d'entropie est positive et se décompose en deux familles de contribution supposées séparément positives : la partie due aux irréversibilités intérieures mécaniques et la partie due à la conduction. La partie due à la conduction est essentiellement volumique :

$$D_{th} = -q \cdot \frac{\nabla T}{T^2} \geq 0 \quad (5)$$

la partie mécanique intrinsèque s'écrit pour chaque élément de volume :

$$D_m = \frac{1}{T} (\sigma : \text{grad } v - \rho (\dot{\psi} + s\dot{T})) \geq 0 \quad (6)$$

et sur chaque ligne de discontinuités potentielles Γ_i :

$$D_r = \frac{1}{T} (\mu_i [\psi]_{\Gamma_i} - n_i \bar{\sigma}_i \cdot [v]_{\Gamma_i}) \geq 0 \quad (7)$$

Si sur chaque élément de surface le flux de matière est nul, cette dernière contribution est nulle car le déplacement étant continu entre le milieu sain et le milieu endommagé de la zone d'élaboration, le saut de vitesse est nul. La dissipation D_r est donc une caractéristique de la perte de matière saine, c'est la part due à l'usure.

4. Approche globale du comportement de l'interface

Le milieu interface est d'épaisseur faible h et sa surface moyenne Γ définit la surface de contact. Un élément de matière de l'interface a pour volume élémentaire le cylindre d'aire de contact dS et de hauteur h . Par aire de contact, la dissipation totale dans l'interface est alors exprimée comme :

$$D = \int_h \mathcal{D}_3 dz + \sum_i \frac{1}{T_i} (\mu_i [\psi]_{\Gamma_i} - n_i \bar{\sigma}_i \cdot [v]_{\Gamma_i}) \geq 0 \quad (8)$$

où la quantité \mathcal{D}_3 est la dissipation volumique du milieu interface :

$$\mathcal{D}_3 = -q_3 \cdot \frac{\nabla T_3}{T_3^2} + \frac{1}{T_3} (\sigma_3 : \text{grad } v_3 - \rho_3 (\dot{\psi}_3 + s_3 \dot{T}_3)) \quad (9)$$

Cette dissipation globale associée à chaque aire de contact élémentaire contient deux contributions distinctes : une dissipation de frottement associée au mouvement relatif des deux solides (1 et 2), et la part due à l'usure associée à chacun des flux de matière perdue (μ_1 et μ_2).

Se donnant les caractéristiques mécaniques du milieu interface, la résolution des équations d'évolution de la bande d'épaisseur h soumise à des sollicitations uniformes de part et d'autre et à une vitesse relative de glissement donnée, permet de séparer les termes de frottement des termes d'usure dans la dissipation globale caractérisant l'interface.

Une démarche analogue est proposée par Zmitrowicz [4], cependant notre approche donne une caractérisation directe de la dissipation d'usure.

5. Applications

Les déplacements sur les fronts Γ_i sont continus entre le milieu sain et l'interface. Le flux de masse est donné par $\mu_i = \rho_i \phi_i$, où la vitesse ϕ_i est faible par rapport à la vitesse de glissement relatif des deux solides V . Cette remarque montre que les vecteurs contraintes sont continus au premier ordre en ϕ_i , et les sauts de vitesses prennent la forme :

$$[v]_{\Gamma_i} + \phi_i [\nabla u]_{\Gamma_i} \cdot n_i = 0 \quad (10)$$

La dissipation totale se met alors sous la forme :

$$D = \int_h \mathcal{D}_3 dz + \sum_i \frac{\phi_i}{T_i} (G_i - G_{3i}) \geq 0 \quad (11)$$

$$G_i = \rho_i \psi_i - n_i \cdot \sigma_i \cdot \nabla u_i \cdot n_i \quad \text{et} \quad G_{3i} = \rho_{3i} \psi_{3i} - n_i \cdot \sigma_{3i} \cdot \nabla u_{3i} \cdot n_i \quad (12)$$

Dans D (équation (11)), les deux contributions sont de natures différentes. Le premier terme de volume dans l'interface se résume à une dissipation surfacique ramenée à l'aire de contact ; il s'agit du terme de frottement dont les caractéristiques varient comme celles du milieu 3. Les deux contributions supplémentaires sont les termes liés à l'usure. Les quantités G_i (équation (12)) sont définies dans les milieux sains, elles ne dépendent que de l'état thermomécanique des solides en contact et ont une forme analogue au taux de restitution d'énergie bien connu en rupture.

On suppose la température uniforme dans l'interface et l'évolution isotherme. Dans ce cas, la dissipation globale rapportée à l'aire de contact se met sous la forme :

$$D = \frac{1}{T} \left(\int_h (\sigma_3 : \text{grad } v_3 - \rho_3 \dot{\psi}_3) dz + \sum_i \phi_i (G_i - G_{3i}) \right) \geq 0 \quad (13)$$

Lorsque le milieu interface a un comportement de corps visqueux, dès que le cisaillement atteint la valeur critique τ_c , le champ de vitesse v dans l'interface cisailée à la vitesse V de glissement relatif de 1 et 2, est donné par $v = \frac{V}{h} z e_x$. L'énergie libre du milieu interface étant supposée négligeable, la dissipation se réduit à :

$$D = \frac{1}{T} \left(\tau_c V + \sum_i \phi_i (G_i - G_{3i}) \right) \geq 0 \quad (14)$$

Le premier terme dû à la viscosité correspond à la dissipation de frottement dans cet exemple simple.

6. Critère d'usure et commentaires

Un critère d'usure est défini par une relation entre la vitesse d'avancée du front ϕ_i et la force thermodynamique associée $\gamma_i = G_i - G_{3i}$. La donnée d'un potentiel de dissipation Φ , fonction convexe de γ_i , fournit une telle relation par la loi de normalité $\phi_i = \partial\Phi/\partial\gamma_i$ et garantit la positivité de la production intérieure d'entropie.

La définition la plus simple est analogue à un critère de type Griffith, pour lequel Φ est la fonction d'appui du convexe $\gamma_i \leq \gamma_c$. On notera que si l'on se place du point de vue du matériau i , le critère d'usure qui détermine l'évolution de la frontière Γ_i est défini à l'aide d'un paramètre interne G_{3i} qui caractérise l'influence du milieu d'interface.

Dans ce modèle de comportement de contact et d'usure, il est nécessaire de déterminer par l'expérience cinq paramètres ($\tau_c, \gamma_c^i, G_{3i}$).

L'analyse de l'usure douce et continue constitue à court terme une première validation d'un tel critère. Dans ce cas particulier les solides en contact peuvent être considérés comme élastiques. Les quantités G_i (équation (12)) sont alors mesurables par l'équation de conservation :

$$\int_{\gamma} (\rho_i \psi_i N \cdot n_i - N \cdot \sigma_i \cdot \nabla u_i \cdot n_i) da = 0 \quad (15)$$

pour tout contour γ fermé de normale N extérieure s'appuyant sur Γ_i (figure 1). L'établissement d'une loi d'usure repose alors sur une réinterprétation des résultats des essais classiques d'usure comme l'essai pion-disque. Cette interprétation nécessite de mesurer l'évolution de la géométrie et de la perte de matière au cours du temps.

Remerciements. Cette étude est menée avec la collaboration du département Mécanique et Technologie des Composants d'EDF/DER.

Références bibliographiques

- [1] Stolz C., Pradeilles-Duval R.M., Approche énergétique de la propagation dynamique de discontinuités mécaniques, C. R. Acad. Sci. Paris, série IIb, 322 (1996) 525–532.
- [2] Archard J.F., Contact and rubbing of flat surfaces, J. Appl. Phys. 24 (8) (1953) 981–988.
- [3] Meng H.C., Ludema K.C., Wear models and predictive equations; their form and content, Wear 181–183 (1995) 443–457.
- [4] Zmitrowicz A., A thermodynamical model of contact, friction and wear: I Governing equations, Wear 114 (1987) 135–168.