



HAL
open science

Modélisation numérique du comportement à l'usure de la fonte à graphite sphéroïdal

Mohamed Ben Tkaya, Hassan Zahouani, Salah Mezlini, Philippe Kapsa,
Abdelwaheb Dogui

► **To cite this version:**

Mohamed Ben Tkaya, Hassan Zahouani, Salah Mezlini, Philippe Kapsa, Abdelwaheb Dogui. Modélisation numérique du comportement à l'usure de la fonte à graphite sphéroïdal. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01493133

HAL Id: hal-01493133

<https://hal.science/hal-01493133v1>

Submitted on 21 Mar 2017

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.

Public Domain

Modélisation numérique du comportement à l'usure de la fonte à graphite sphéroïdal

M.Ben Tkaya* — H.Zahouani* — S.Mezlini** — P.Kapsa* — A.Dogui**

* Laboratoire de tribologie et dynamique des systèmes,
UMR 5513 CNRS – ECL – ENISE,
Ecole Centrale de Lyon, BP 163, 69131 Ecully cedex, France

** Laboratoire de Génie Mécanique,
Avenue Ibn El Jassar, 5019 Monastir, Tunisie

RÉSUMÉ. A partir de 1948, la date de son invention, la fonte à graphite sphéroïdal devient de plus en plus utilisée. Ceci grâce aux performances mécaniques et tribologiques que peut offrir la fonte par rapport aux autres types d'acier. La fonte ductile est utilisée pour plusieurs applications structurelles particulièrement dans celles qui nécessitent une rigidité combinée avec une bonne usinabilité. Le second large domaine d'utilisation de la fonte ductile est l'industrie automobile grâce à la faible densité par rapport à l'acier 10%, sa bonne résistance à l'usure et son faible coefficient de frottement. Dans ce travail des essais d'usure expérimentaux permettent de mettre en valeur le rôle du graphite dans la diminution de coefficient de frottement apparent au cours de l'usure. Des simulations numériques par le code d'élément finis ABAQUS de l'essai de frottement sphère plan permettent d'étudier l'usure de la fonte à graphite sphéroïdal. La simulation numérique permet de mettre en évidence la concentration des contraintes perlitiques à cause de la présence du graphite.

ABSTRACT. Since 1948, the date of its invention, nodular cast iron becomes more and more used. This, thanks to the mechanical and tribological performances which the cast iron can offer, compared to the other types of steel. Ductile iron is used for several structural applications particularly in that which require rigidity combined with good usinability. The second largest area of application of ductile iron is the automobile industry thanks to its lower density (10% less to steel), good wear resistance and its low coefficient of friction. In this work an experimental wear test allow to emphasize the role of graphite in the reduction in apparent friction coefficient during wear. Numerical simulations of sphere in plan friction test, with finite element code ABAQUS, make it possible to study the wear of nodular cast iron. The numerical simulation makes it possible to highlight the concentration of the perlitic stress caused by the presence of graphite.

MOTS-CLÉS : fonte à graphite sphéroïdal, usure, éléments finis, endommagement

KEYWORDS: nodular cast iron, finite element, wear, damage

1. Introduction

La fonte à graphite sphéroïdal est un matériau hétérogène. A l'échelle macroscopique la réponse de ce matériau est obtenue par l'essai de traction d'une éprouvette normalisée et ces résultats sont utilisés par la mécanique de structure. L'étude à l'échelle microscopique montre que l'endommagement ductile se produit par les cavitations plastiques et l'instabilité de la matrice ductile entourant les sphéroïdes qui agissent comme de larges cavités. La rupture finale peut se produire par l'accroissement de micro-lacune et les cavitations qui entourent les inclusions dans la phase ferritique. Le niveau méso-échelle donne la possibilité de caractériser la fonte à graphite par une matrice constituée par trois constituants : ferrite, perlite en plus du graphite sphéroïdal.

Les modèles micromécaniques sont utilisés pour comprendre les mécanismes locaux qui gouvernent la déformation macroscopique élastique et plastique des solides hétérogènes. Elles donnent la réponse globale à travers les propriétés connues des constituants individuels et leurs interactions.

Le module de Young de la phase graphite est mesuré par des essais de nano-indentation. Les résultats obtenus vont être utilisés comme paramètres d'entrée pour la simulation numérique de l'usure de la fonte et pour étudier le comportement du graphite au cours de l'essai. Au début le comportement de la fonte à l'usure sera étudié expérimentalement. Dans la deuxième partie on présente une modélisation de l'usure développée par le code de calcul ABAQUS. Les résultats numériques sont comparés avec les résultats expérimentaux simulant l'usure par essai de rayage instrumenté.

2. Etude du comportement à l'usure de la fonte

La résistance à l'usure de la fonte a été étudiée expérimentalement par essai de frottement bille plan. Dans une deuxième partie, une modélisation numérique de cet essai est réalisée. L'étude numérique permet de suivre le comportement de la fonte au cours de l'usure.

2.1. *Etudes expérimentales*

Le principe de l'essai consiste à réaliser des rayures en gardant un effort normal et une vitesse de frottement constants. Ces essais sont faits avec une configuration de contact type bille / plan avec une bille de diamètre 4 mm et un échantillon testé en fonte à graphite sphéroïdal. L'effort normal et la vitesse de rayage sont maintenus constants respectivement à 15N et 1mm/s. La longueur de la trace est fixée à 5mm. Afin de simuler les sollicitations répétitives, nous avons réalisé des cycles de rayage représentés comme le schématise la figure 1.

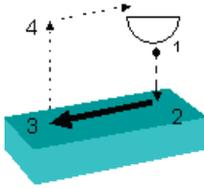


Figure 1 : *Cycles de rayage*

Des mesures réalisées par l'interférométrie en lumière blanche permettent de calculer le volume d'usure pour une trace de longueur 1.3 mm. Le profil observé par l'interféromètre montre la présence des bosses dans la trace d'usure (figure 2.b).

Afin de suivre l'usure de la fonte, des observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB) suivies des mesures interférométriques ont été réalisées. La figure 2 montre que les bosses observées dans les traces sont des graphites. Au cours des essais ce graphite, qui a des propriétés mécaniques plus faibles que la matrice, va jouer le rôle d'un lubrifiant ce qui explique la diminution du coefficient de frottement apparent (figure 3).

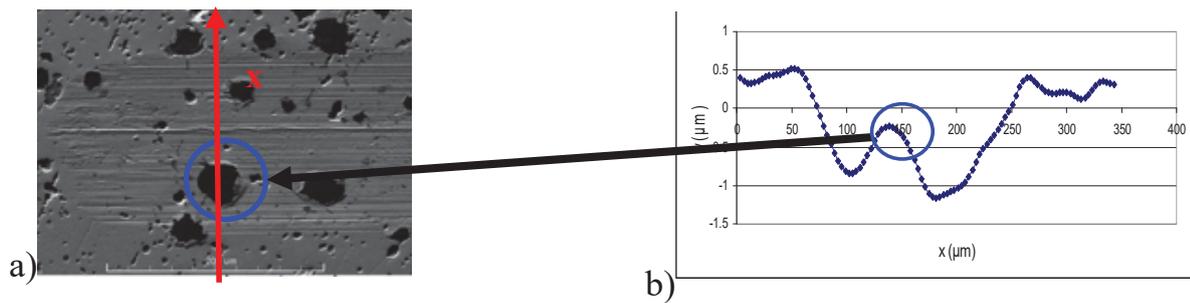


Figure 2 : *Fonte à graphite sphéroïdal après le 15^{ème} cycle a) image MEB de la trace ; b) profil transversal suivant la direction x*

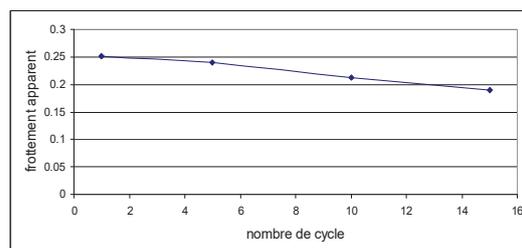


Figure 3 : *Evolution du coefficient de frottement apparent en fonction du nombre de cycles*

Afin de mieux comprendre le comportement du graphite au cours de l'usure des modélisations par éléments finis en 2D sont réalisées.

2.2. Etude numérique du comportement à l'usure par des essais de glissement répétitifs de la bille sur la fonte

Dans cette partie une série de simulation numérique est réalisée pour comprendre les phénomènes qui se produisent expérimentalement. Le modèle développé est un modèle 2d.

2.2.1. Description du modèle numérique

N.K.Fukumasu et al (N.K.Fukumasu 2005) ont supposé que le graphite dans le fonte gris est élastoplastique. Zhang (Zhang.K.S 1999) a étudié le rupture ductile de la fonte à graphite sphéroïdal et il a supposé que le graphite comme des cavités (des vides de forme sphéroïdale). Dans son étude L.Collini(COLLINI 2004) a supposé que la graphite a un comportement élastique et il a montré que seulement la réponse élastique de la fonte pendant un essai de traction est influencée par la présence du nodule du graphite. Dans notre étude le graphite est supposé élastique de module de Young $E=17\text{GPa}$. Des essais de rayage cyclique comme ceux décrits expérimentalement sont réalisés. Une charge normale constante de 15 N et un déplacement de 1mm sont appliqués sur l'indenteur pendant le rayage. Le module ABAQUS/Standard est utilisé dans cette partie.

Le tableau 1 donne les propriétés déterminées par indentation instrumentée de la phase perlitique et ferritique. Au cours de l'essai l'échantillon est soumis à un cycle de charge et décharge. Les résultats obtenus permettent de calculer le module de Young en se basant sur la procédure décrite dans la littérature (M.G.V.Cuppari 2002).

	Module de Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Limite d'élasticité (MPa)
Ferrite	209	0.3	427
Perlite	209	0.3	552

Tableau 1 : propriétés mécaniques des différentes phases (N.K.Fukumasu 2005)

On a utilisé un modèle 2D non homogène avec une matrice perlitique (Tableau1) et une distribution uniforme du graphite (disc de rayon 30 microns et distante de 150 micron). Des éléments quadrilatéraux en contrainte plane sont utilisés. Le modèle utilisé est simplifié et il ne peut pas reproduire la variation de la distribution du graphite dans la direction perpendiculaire au plan. L'indenteur est un disque de diamètre 4mm supposé rigide.

2.2.2. Résultats

La figure 4 montre la trace de la rayure après 5 cycles de glissement. On remarque que le graphite présente des bosses dans la trace et qu'il y a entassement de la matière au voisinage du graphite. Ces résultats sont confirmés par les résultats expérimentaux (figure 2.b) où on remarque un entassement de

la matière au voisinage du graphite (zones bleues). Ceci permet de dire que le graphite a un comportement élastique et il ne se comporte pas de la même manière que la matrice. Ce retour élastique qui caractérise le graphite lui permet de jouer le rôle d'un lubrifiant au cours de l'usure.

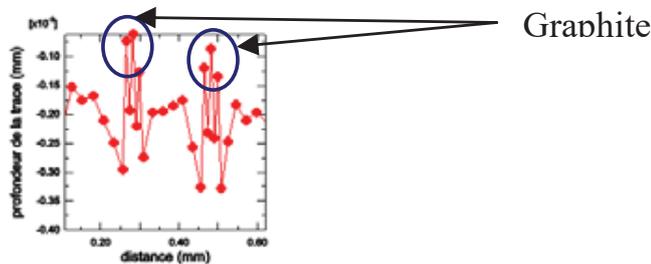


Figure 4 : Profil longitudinal du rayage obtenu numériquement après 5 cycles

2.3. Comportement de la fonte à l'usure dans le cas de fortes sollicitations

Dans la suite de ce travail on va étudier le comportement du graphite dans le cas de fortes sollicitations. Le même modèle utilisé dans l'étude précédente sera utilisé. Un déplacement de 10 micromètre dans la direction verticale sera appliqué sur l'indenteur. ABAQUS/ explicit est utilisé afin d'éviter la divergence du calcul rencontrée dans le module ABAQUS/Standard

La figure 5.a montre la distribution des contraintes dans le cas d'un matériau perlitique homogène. Sous l'indenteur on remarque la présence des contraintes de compression. Au cours du mouvement de l'indenteur la valeur de cette contrainte diminue mais il y a une contrainte résiduelle qui persiste dans le matériau. On remarque aussi qu'après passage de l'indenteur la contrainte résiduelle est localisée en surface. La figure 5 montre que la contrainte de compression sous l'indenteur diminue par la présence du graphite.

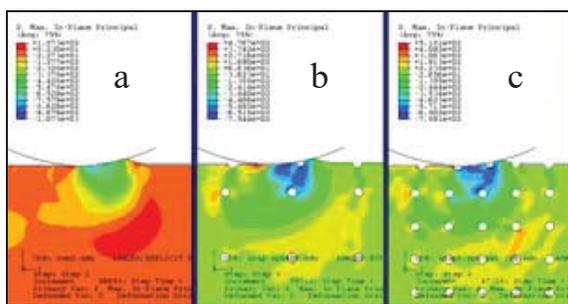


Figure 5 : Contrainte principale maximale : a) matériau homogène ; b) matériau avec graphite (élastique) de distance inter graphite 400 µm ; c) matériau avec graphite (élastique) de distance inter graphite 200 µm

Les figures 6.b et 6.c montrent qu'il y a une concentration de contraintes près du graphite. Ceci montre que cette zone subit plus des déformations plastiques. Une forte hétérogénéité de contraintes est bien notée. Le graphite se

comporte comme des cavités qui présentent une zone de concentration de contraintes et de propagation de fissures. Dans la figure 6 on remarque la présence d'une concentration de contraintes le long d'une bande qui lie un graphite à un autre, ces zones représentent des régions de rupture. On remarque aussi que la zone rouge qui correspond à la valeur maximale de contraintes devient plus large en augmentant la densité du graphite

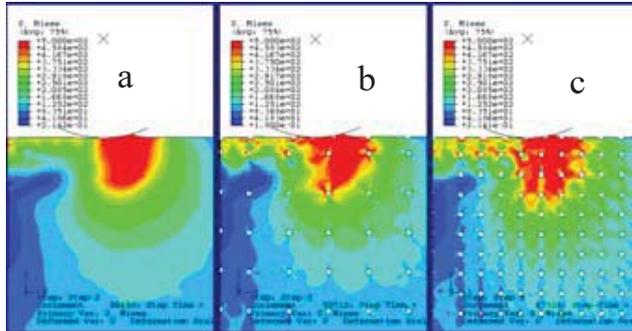


Figure 6 : *Contraintes de Von Mises*

Conclusion

Le graphite joue un rôle important dans l'usure de la fonte. Il se comporte comme un film fluide qui s'intercale entre les deux antagonistes et fait diminuer le frottement et l'usure de la fonte. Mais en même temps il joue le rôle de cavité. La simulation numérique nous a permis de constater que le graphite représente la région de localisation des contraintes et de l'endommagement. Une étude supplémentaire doit être réalisée pour caractériser l'interface graphite matrice. Cette étude doit tenir compte de la présence de la ferrite.

Cette étude montre que la modélisation numérique permet d'expliquer certains phénomènes tribologiques et donne plus de détails sur les mécanismes interfaciaux qui sont difficiles à observer expérimentalement.

- BERTRAND-LAMBOTTE, P. (2001). Sur les mécanismes de rayure des vernis de finition automobile, Ecole centrale de Lyon: 143.
- COLLINI, L. (2004). Micromechanical modeling of the elasto-plastic behavior of heterogeneous nodular cast iron, UNIVERSITA'DEGLI STUDI DI PARMA: 141.
- Jault, J. (2007). "*Fontes à graphite sphéroïdal: propriétés d'utilisation.*" Techniques de l'ingénieur(M 4 610): 1-25.
- M.G.V.Cuppari (2002). Relation between microstructure and resistance to cavitation of cast alloys based in quaternary system Fe-Cr-Ni-C, University of Sao Paulo.
- N.K.Fukumasu, P.L.Pelegriño,G.cueva,R.M.Souza,A.Sinator (2005). "Numerical analysis of the stress developed during the sliding of a cylinder over compact graphite iron." *wear* **259**: 1400-1407.
- Zhang.K.S, Bai.J.B,Francois.D (1999). "ductile fracture of materials with high void volume fraction." *international journal of solids and structures* **36**: 3407-3425.