

# Pertes de puissance par piégeage de l'huile lubrifiant dans les engrenages

A. LASRI<sup>1</sup>, L. BELFALS<sup>1</sup>, B. NAJJI<sup>2</sup>, M. ZAOUÏ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> : laboratoire de Qualité, Sécurité et Maintenance (QSM) de l'EMI Rabat

<sup>2</sup> : laboratoire de Mécanique, Thermique et Matériaux (LMTM) de l'ENSMR Rabat

(E mail : [lasri@enim.ac.ma](mailto:lasri@enim.ac.ma) ou lasri\_enim@yahoo.fr)

## Résumé

Ce travail cherche à prédire les pertes de puissance dues au piégeage de l'huile de lubrification dans l'espace inter dent des engrenages à dentures droites. L'étude de la variation de l'espace inter dent pendant la phase d'engrènement permet de déterminer à chaque instant, le volume de l'huile piégée et les surfaces de fuites à travers lesquelles une partie de l'huile piégée est expulsée. La pression de l'huile piégée sera calculée à l'aide des caractéristiques de l'huile de lubrification et des paramètres de conception et de fonctionnement des engrenages. Enfin, la méthode de calcul et les résultats des pertes de puissance par piégeage seront présentés.

**Mots clés :** engrenage, huile de lubrification, piégeage, pertes de puissance

## 1. Introduction

Il est généralement admis que les pertes de puissance dans les engrenages sont dues aux frottements, à la ventilation des éléments tournants, au piégeage de l'huile de lubrification (ou de l'air ou mélange air - huile) dans l'inter dent et aux pertes propres au mode de lubrification (barbotage, jet d'huile...) [1], [2].

Plusieurs études ont traité les différentes sources de pertes de puissance dans les engrenages [1] [2]. Mais relativement, peu ont détaillé les pertes par piégeage [3]. La présente étude aborde et se limite aux pertes de puissance dans les engrenages par piégeage et tente de porter une contribution à la compréhension des pertes de puissance dans les engrenages.

L'étude cherche à quantifier et prédire les pertes de puissance due au phénomène de piégeage dans les engrenages droits par un modèle numérique. Pour atteindre ce but trois étapes sont réalisées :

La première étape est dédiée à l'aspect géométrique et cinématique de l'engrènement et des dentures. Ainsi, on arrive à déterminer à chaque instant, le volume de contrôle du fluide piégé et ses frontières libres et ceux en contact avec les surfaces des dents des roues pendant l'engrènement [4].

La deuxième étape est consacrée à la détermination des variations de la pression en fonction du temps ou de l'angle de rotation [5].

La troisième est dernière étape présente la méthode de calcul des pertes de puissance par piégeage et les résultats obtenus.

## 2. Phénomène de piégeage

Dans une transmission entre un pignon menant et une roue menée, pendant la phase d'engrènement, on peut schématiser les dentures et l'espace inter dent en coupe (partie teintée) selon La figure 1 ci-dessous.

Pour simplifier le problème, on va supposer qu'initialement, le creux du pignon avant l'engrènement avec une dent de la roue est rempli de fluide et ayant un volume  $V$ . Nous allons nous intéresser seulement à ce qui se passe dans le creux : Au fur et à mesure de la progression dans l'engrènement le volume  $V$  du fluide dans le creux se voit diminuer d'un volume  $v$ . la différence  $(V-v)$  s'écoule vers d'autres creux (radialement) et vers l'extérieur (axialement) figure 2 et figure 3. Ensuite, la dent commence à sortir du creux, une dépression est alors créée à l'intérieur du creux et le fluide pénètre jusqu'à séparation de la dent de la zone du creux. Une partie du fluide chassé par la dent s'écoule vers l'extérieure des roues, l'autre partie s'échappe vers d'autres creux de la roue supérieure.

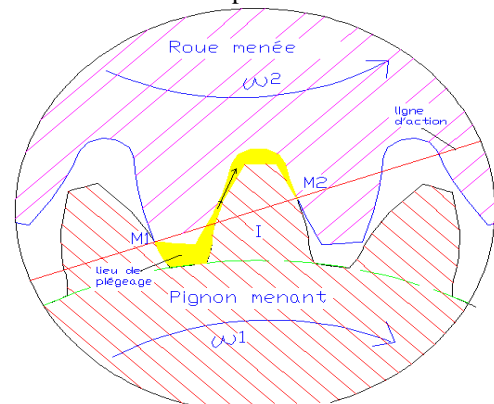


Figure 1 : fluide piégé et espace inter dent

## 3. Le calcul du volume de fluide piégé et les surfaces de fuites

La figure 2 représente en plan le fluide piégé et ses frontières ainsi que les surfaces de fuite. L'élaboration d'un outil numérique permettant le calcul du volume de l'huile piégée et des surfaces de fuites en fonction de l'angle de rotation [4]. Le code réalisé discrétise les profils des dents pour le cas des dentures en développante de cercle et permet de calculer les surfaces de fuites radiales  $Sr1$  et  $Sr2$  qui sont définies par la largeur des dentures multipliée par la distance minimale qui sépare les profils conjugués de chaque côté (figure 2). Le volume est aussi calculé par la multiplication de la largeur des dentures avec la surface  $Sa$  obtenue par intégration numérique. Les résultats des variations des

surfaces de fuites et du volume piégé sont publiés en article [4].

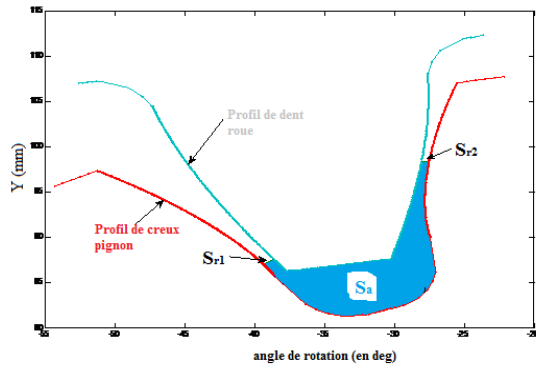


Figure 2 : Surfaces de fuites radiales et axiales

On considère que l'engrènement s'effectue dès que les cercles de tête de la roue et du pignon se rencontrent. L'angle d'engrènement est défini par les deux points d'intersection des cercles de tête et l'origine du pignon [4]. Le temps d'engrènement se déduit de la vitesse de rotation du pignon et de l'angle d'engrènement. Ce dernier est l'objet d'une deuxième discrétisation (voir figure 3). Le temps de cycle de chevauchement dépend de la vitesse : tant que la vitesse est élevée tant que le temps en question est très court [4].

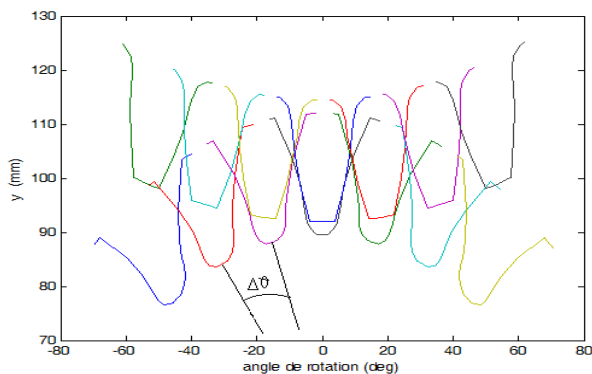


Figure 3 : discrétisation angulaire

Les données numériques des engrenages :

**Tableau 1 : engrenage 1**

	$r_p$	m	$\alpha$	x	Largeur b
pignon	100	10	20°	0.2	100
Roue	200	10	20°	-0.2	100

**Tableau 2 : engrenage intérieur 2**

	$r_p$	m	$\alpha$	x	Largeur b
pignon	100	10	20°	0	100
Couronne	200	10	20°	0	100

Avec m le module (en mm),  $r_p$  le rayon primitive (en mm),  $\alpha$  l'angle de pression et x le coefficient de déport.

#### 4. Estimation de la pression de l'huile piégée

Pour estimer la pression de l'huile piégée, une analogie entre ce qui se passe dans l'espace inter dent et une seringue est effectuée en prenant les hypothèses entre

l'instant t et t +  $\Delta t$ , et à chaque position angulaire, on peut faire correspondre les grandeurs suivantes :

La surface de sortie de fluide ( $S_s$ ) avec la somme des surfaces de fuites

$$S_s = S_{r1} + S_{r2} + 2 * S_a$$

La surface de piston ( $S_p$ ) avec la surface de la dent qui est en contact avec le fluide.

La surface du creux en contact avec le fluide est supposée fixe. En plus nous supposons :

- l'écoulement permanent
- l'échange thermique négligeable
- fluide incompressible et iso visqueux

Dans ces conditions, on peut utiliser l'équation de Bernoulli :  $(1/2 \rho v^2 + \rho gz + p = Cte)$

La figure 4 ci-dessous montre les éléments de calcul de la vitesse du piston.

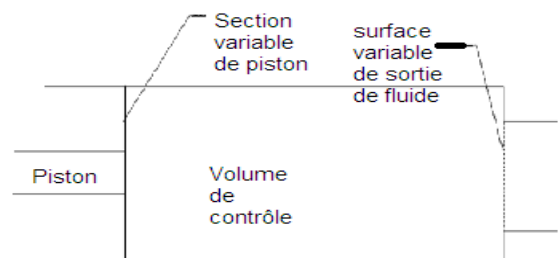


Figure 4 : Eléments de calcul de la vitesse du piston

D'une part, entre deux positions i-1 et i successives le programme élaboré permet de calculer les volumes piégés pour chaque position (ou incrémentation). La soustraction entre les deux volumes donne le volume  $dV$ .

$$dV = V_i - V_{i-1}$$

D'autre part, le programme permet de calculer la surface de piston  $S_{p_i}$  comme cela a été expliqué au paragraphe précédent pour chaque position i.

$$dl = dV/S_{p_i} \quad dt \approx \Delta t = T/Nps$$

$dt$  est le temps mis entre la position i-1 et i

Avec T : le temps d'engrènement et  $Nps$  le nombre de positions pris dans la discrétisation angulaire. La vitesse de rotation du pignon est constante.

La vitesse de piston pour une position i est donnée par

$$vp_i = \frac{dl}{dt} = (dV * Nps)/(T * S_{p_i})$$

La pression relative instantanée peut être exprimée par :

$$p_i = \frac{1}{2} * \rho * vp_i^2 * \left( \left( \frac{S_{p_i}}{S_{s_i}} \right)^2 - 1 \right)$$

#### 5. Pertes de puissance par piégeage

##### 5-1. les éléments de calcul des pertes par piégeage :

La vitesse de l'huile de lubrification expulsée pendant une incrémentation i à l'extérieur de l'espace inter dent peut être exprimée par :  $v_{\theta i} = - dl/dt$

Avec  $v_{\theta i}$  : vitesse du fluide expulsé pendant l'incrément  $i$ ,

$dl$  est la longueur du volume de fluide expulsé

Pour une incrément  $i$  la surface totale de fuite  $S_{\theta i}$  est constante et on peut écrire :

$$v_{\theta i} = -\frac{dl}{dt} = -\frac{1}{S_{\theta i}} * \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{S_{\theta i}} * \frac{dV}{d\theta} * \omega$$

Avec

$dV$  est la variation du volume de fluide piégé,

$d\theta$  est la variation angulaire

$\omega$  est la vitesse de rotation du pignon supposée constante.

Cette formule peut être approximée par :

$$v_{\theta i} \approx -\frac{1}{2 * Sa_{\theta i} + ds1_{\theta i} + ds2_{\theta i}} * \frac{V_i - V_{i-1}}{\Delta\theta} * \omega$$

La force exercée par la structure sur le fluide peut être approchée par la force exercée par la structure sur la partie de l'huile expulsée à l'extérieur de l'espace inter dent

$$F_{\theta i} = p_{\theta i} * (2 * Sa_{\theta i} + ds1_{\theta i} + ds2_{\theta i})$$

Avec

$F_{\theta i}$  est la force appliquée par la structure sur le fluide

$Sa_{\theta i}$ ,  $ds1_{\theta i}$ ,  $ds2_{\theta i}$  sont les surfaces de fuite axiale, radiale 1 et 2 en position  $\theta i$ .

Les pertes de puissance instantanées dues au piégeage sont données par :

$$P_i = F_{\theta i} * v_{\theta i}$$

Les pertes de puissance par piégeage dues à l'engrènement par une dent et un creux est :

$$P_{moyenne} = \frac{1}{nbr \Delta\theta} \sum_i P_i$$

Avec :  $nbr \Delta\theta$  est le nombre de  $\Delta\theta$  de la subdivision du moitié de l'angle d'engrènement où on a la compression de l'huile piégée.

### 5-2. Pertes de puissance par piégeage : résultats

Les figures 5 et 6, représentent les résultats trouvés en termes de pertes de puissance par piégeage pour les engrenages 1 et 2. Il s'agit des pertes en fonction des vitesses de rotation du pignon. Les caractéristiques prises pour chaque engrenage sont tel qu'elles sont définies dans les tableaux 1 et 2 avec des coefficients de déport nuls.

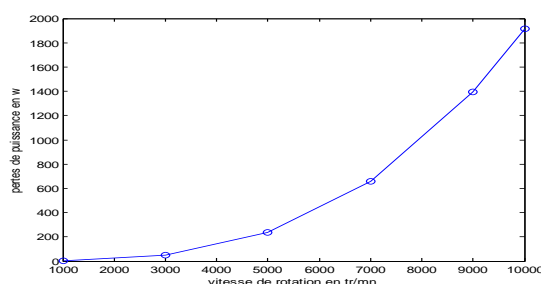


Figure 5 : Pertes de puissance par piégeage engrenage 1

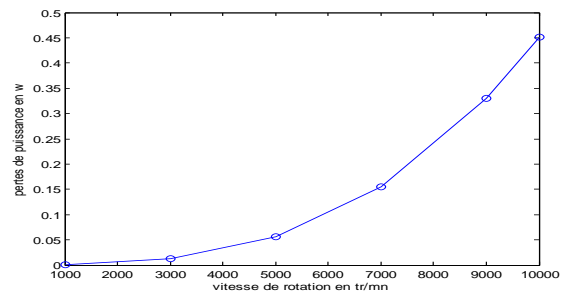


Figure 6 : Pertes de puissance par piégeage engrenage 2

A partir de ces résultats, Il apparaît que les pertes de puissance par piégeage dépendent fortement de la vitesse de rotation. Ceci est compatible avec les résultats de l'influence de la vitesse de rotation sur la pression du fluide piégé traitée [5]. On constate que les pertes pour l'engrenage 1 sont importantes alors que celles de l'engrenage intérieur sont très faibles.

## 6. Conclusion

Le calcul des pertes de puissance par piégeage dans un engrenage cylindrique à denture droite extérieur et intérieur est effectué grâce à la modélisation numérique de l'engrènement et aux hypothèses simplificatrices utilisées pour déterminer la pression de l'huile piégée. Les résultats sous formes de tracés de l'évolution des pertes instantanées en fonction des vitesses de rotation ont été présentés et ont montré de très faibles pertes de puissance dans le cas de l'engrenage intérieur relativement aux engrenages extérieurs étudiés (dont un seul exemple est présenté). Les résultats ont confirmé que les pertes de puissance par piégeage sont très importantes dans le cas des engrenages tournant à grande vitesses.

## Références

- [1] Durand de Gevigney J., *analyse thermomécanique d'un réducteur épicycloïdal application aéronautique* thèse, INSA de Lyon (2013).
- [2] Diab Y., *Analyse des Pertes de Puissance dans les Transmissions par Engrenages à Grande Vitesse, applications aux réducteurs industriels et aux machines textiles*, PhD, INSA de Lyon (2005)
- [3] Y Diab, F Ville, H Houjoh, P Sainsot and P Vex *Experimental and numerical investigations on the air-pumping phenomenon in high-speed spur and helical gears*, Mechanical Engineering Sciences, Part C, vol. 219, no. 8, pp. 785–800, 2005
- [4] A Lasri, F. Ville, L. Belfals, B. Najji, *Preliminary Modeling of the Oil Trapping between Teeth for Spur Gears*, Mechanics & Industry vol 15, pp. 393-402, 2014
- [5] A Lasri, L. Belfals, B. Najji, B. Mushirabwoba *Pressure Estimation of the Trapped and Squeezed Oil between teeth spaces of Spur Gears*, Applied Mathematical Sciences, Vol. 8, 2014, no. 107, 5317 5328