



Etude numérique des pertes par ventilation générées par une denture hélicoïdale

Yann Marchesse, Nicolas Voeltzel, Christophe Changenet, Fabrice Ville

► To cite this version:

Yann Marchesse, Nicolas Voeltzel, Christophe Changenet, Fabrice Ville. Etude numérique des pertes par ventilation générées par une denture hélicoïdale. CFM 2015 - 22ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2015, Lyon, France. hal-03445012

HAL Id: hal-03445012

<https://hal.science/hal-03445012>

Submitted on 23 Nov 2021

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.

Étude numérique des pertes par ventilation générées par une denture hélicoïdale

Y. MARCHESSE^a, N. VOELTZEL^{a,b}, C. CHANGENET^a, F. VILLE^b

a. Université de Lyon, ECAM Lyon, LabECAM, 40 montée St-Barthélemy, 69005 LYON

b. Université de Lyon, CNRS, INSA–Lyon, LaMCoS UMR5259, 18-20, rue des Sciences, 69621 Villeurbanne

Résumé :

Cette étude s'intéresse aux pertes par ventilation observées dans les transmissions mécaniques par engrenages lorsque les vitesses périphériques sont importantes. Les formulations permettant de prévoir ce type de perte dans le cas de dentures hélicoïdales sont peu fréquentes. Une approche numérique, utilisée précédemment pour simuler des écoulements au passage de dentures droites, est alors adaptée aux dentures hélicoïdales. Les prévisions numériques sont proches de celles mesurées dans des configurations identiques. Il apparaît cependant que l'influence de l'angle d'hélice, mais aussi de la largeur, est complexe et qu'une formulation simple des pertes par ventilation soit difficile à atteindre.

Abstract :

In this paper a computational fluid dynamics code is applied to three-dimensional simulations of windage power losses generated by helical gears rotating in air. Comparisons between numerical and experimental data show good agreement. A parametric study is then led where both the helix angle and the tooth width vary. The influence of these parameters is complex and one simple formulation for the losses seems challenging to reach.

Mots clefs : CFD ; pertes par ventilation ; dentures hélicoïdale ; corrélation ; transmissions par engrenages

1 Introduction

Les études s'intéressant aux transmissions haute vitesse par engrenages ont mis en évidence la prépondérance des pertes d'origine aérodynamique et générées par la rotation des roues dentées dans le mélange air/huile [5]. De nombreuses études ont été menées afin de mieux comprendre l'origine de ces pertes appelées pertes par ventilation. Elles ont permis d'autre part de proposer des formulations quantifiant ces pertes. Par exemple Anderson et Loewenthal [1] et Townsend [12] ont établi des modèles basés sur la largeur et les rayons primitifs des roues dentées alors que l'approche de Dawson [2] considère en plus le module dans sa formulation. Diab *et al.* [3] proposent plus tard une corrélation des pertes basée sur une surface localisée sur la partie supérieure des dents et éjectant le fluide. Seetharaman et Kahraman [11] ont développé à partir d'une approche analytique un modèle prédisant simultanément les pertes par barbotage et par ventilation. Récemment Pallas *et al.* ont établi une approche numérique très simplifiée lui permettant de retrouver fidèlement les pertes par ventilation [10] et de proposer une formulation de ces pertes à l'aide d'une analogie avec la théorie des turbomachines [9]. La plupart de ces études reposent sur des approches expérimentales. Depuis peu l'essor des méthodes numériques, de type *CFD*, a permis la simulation d'écoulements au passage d'engrenages. Ces études concernent essentiellement les pertes générées par des dentures droites [6, 7, 9] et étudient par ce biais la possibilité de diminuer les pertes à l'aide de flasques placées à la périphérie des dents ou dans la région proche des flancs.

Cette étude présente l'influence de l'angle d'hélice et de la largeur sur l'écoulement dans la région proche des dents et sur les pertes par ventilation. Dawson [2] montre en effet, expérimentalement, que ces pertes diminuent avec l'angle d'hélice pour des dentures hélicoïdales ayant une largeur importante (largeur égale à

187 mm). Il semble alors intéressant d'étudier le cas de dentures hélicoïdales ayant des largeurs plus faibles utilisées fréquemment dans l'industrie. La première partie de cet article présente l'approche numérique utilisée précédemment pour des dentures droites et adaptée au cas des dentures hélicoïdales. Les résultats numériques sont comparés à ceux obtenus expérimentalement dans des configurations identiques. Une étude paramétrique est menée ensuite pour mieux comprendre l'influence de l'angle d'hélice et de la largeur des dentures. Enfin une discussion sera menée dans laquelle les pertes prévues par le modèle de Townsend [12], impliquant l'angle d'hélice dans ses paramètres, seront comparées à celles estimées numériquement.

2 Approche numérique

L'approche numérique utilisée ici est similaire à celle mise en place par les auteurs pour étudier les écoulements au passage de dentures droites [10]. Cette approche simplifiée repose sur la périodicité de l'écoulement qui autorise alors la simulation sur une seule dent uniquement. Néanmoins la symétrie utilisée dans le cas de dentures droites ne peut plus être utilisée pour les dentures hélicoïdales. La largeur entière est donc prise en compte (Figure 1). Les flancs ne sont pas entièrement considérés dans le calcul numérique et les pertes qu'ils génèrent sont estimées à partir d'un modèle [7]. Les équations de Navier-Stokes moyennées sont résolues à l'aide du logiciel commercial ANSYS-CFX 14.5 sur un maillage essentiellement non-structuré dans le domaine à l'exception de la région des parois, le maillage structuré dans cette dernière permet de tenir compte de la sous-couche visqueuse (*i.e.* $y^+ < 5$). La fermeture des équations moyennées est réalisée à partir du modèle de turbulence SST $k - \omega$ [8]. Il a été montré que l'utilisation d'un modèle de turbulence haut-Reynolds n'était pas adaptée à prévoir correctement les pertes par ventilation dans le cas de grandes vitesses périphériques [6, 7]. Une vitesse nulle est imposée aux nœuds placés sur la surface de la roue, et une condition de périodicité sur les surfaces latérales. Des profils de vitesses radiale et orthoradiale proposés par Pallas *et al.* [10] sont imposés sur les surfaces appelées VITESSE sur la figure 1. Des conditions permettant au fluide d'entrer ou de sortir librement du domaine de calcul sont imposées aux trois surfaces restantes. Le fluide considéré ici est de l'air pur et ses propriétés physiques sont celles considérées à 25°C (*i.e.* $\rho = 1,185 \text{ kg/m}^3$ et $\mu = 1,831 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$). La convergence est contrôlée à la fois par l'examen des résidus associés à chaque équation, mais aussi par la valeur du couple de traînée généré par l'écoulement sur la dent et la surface latérale associée.

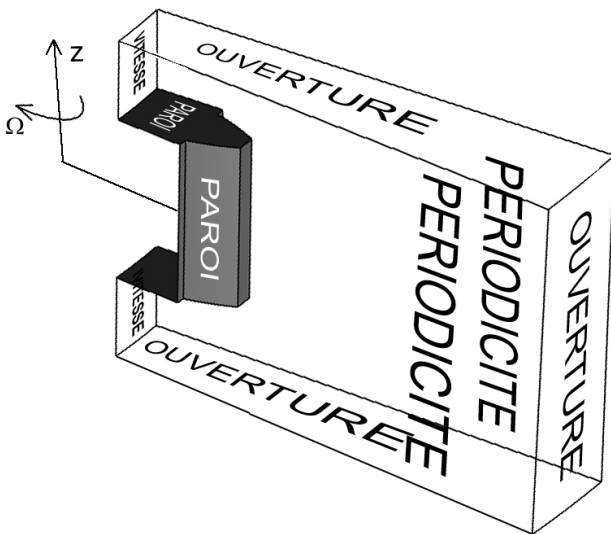


FIGURE 1 – Schéma d'un domaine de calcul et conditions limites.

3 Validation de l'approche numérique

L'approche numérique est validée par comparaison des résultats obtenus numériquement avec ceux atteints expérimentalement à partir d'une part d'un banc d'essais utilisé dans la référence [3] et d'autre part à partir des configurations de l'étude de Dawson [2] pour laquelle des valeurs de pertes par ventilation sont disponibles.

3.1 Caractéristiques des dentures pour la validation

Différentes dentures sont testées dans cette étude et sont rassemblées dans le tableau 1. Les roues 1 et 2 ont des largeurs identiques valant 24 mm et ont été placées sur le banc expérimental utilisé par Diab *et al.* [3] sur

lequel la vitesse de rotation maximale testée vaut 700 rad/s. L'écoulement et les pertes générées par la roue 1 ont déjà été étudiées numériquement par les auteurs [9]. Les dentures 3 ont des largeurs plus importantes ($b = 560$ mm) et sont toutes similaires entre elles à l'exception de l'angle d'hélice dont la valeur évolue de 0° (denture droite) jusqu'à $51,05^\circ$. Elles ont des caractéristiques identiques aux dentures étudiées par Dawson [2] et comme cela est le cas dans cette étude une seule vitesse de rotation sera étudiée (78,53 rad/s).

Roue	D_p (mm)	m_n (mm)	b (mm)	β ($^\circ$)
1	288	4	24	0
2	288	4	24	15
3	560	16	187.10	0 à $51,05^\circ$

TABLE 1 – Caractéristiques géométriques des roues des calculs numériques (D_p : diamètre primitif, m_n : module normal, b : largeur, β : angle d'hélice).

3.2 Résultats numériques

Les pertes prévues par l'approche numérique sont proches de celles mesurées quelle que soit la géométrie de denture. Les écarts-relatifs restent inférieurs à 14% dans le cas des dentures 3, et plus faibles encore dans le cas des roues 1 et 2 (Figure 2). On observe des influences de l'angle d'hélice opposées sur les pertes lorsque les largeurs sont différentes. Ainsi une augmentation des pertes est notée lorsque l'angle d'hélice augmente dans le cas des deux roues ayant les largeurs les plus faibles ($b = 24$ mm) contrairement à ce qui est observé pour la roue 3 ($b = 187,10$ mm). Par exemple, à 700 rad/s, les pertes de la roue 2 sont 14% supérieures à celles de la denture droite équivalente (roue 1) alors que pour les roues de Dawson (roue 3) une évolution équivalente de l'angle d'hélice (*i.e.* de 0° à $13,7^\circ$) conduit cette fois-ci à une réduction proche de 27% des pertes. Ces évolutions différentes des pertes avec l'angle d'hélice, mesurée d'une part, sont retrouvées d'autre part à l'aide de l'approche numérique. Celle-ci est validée étant donné les écarts-relatifs faibles observés.

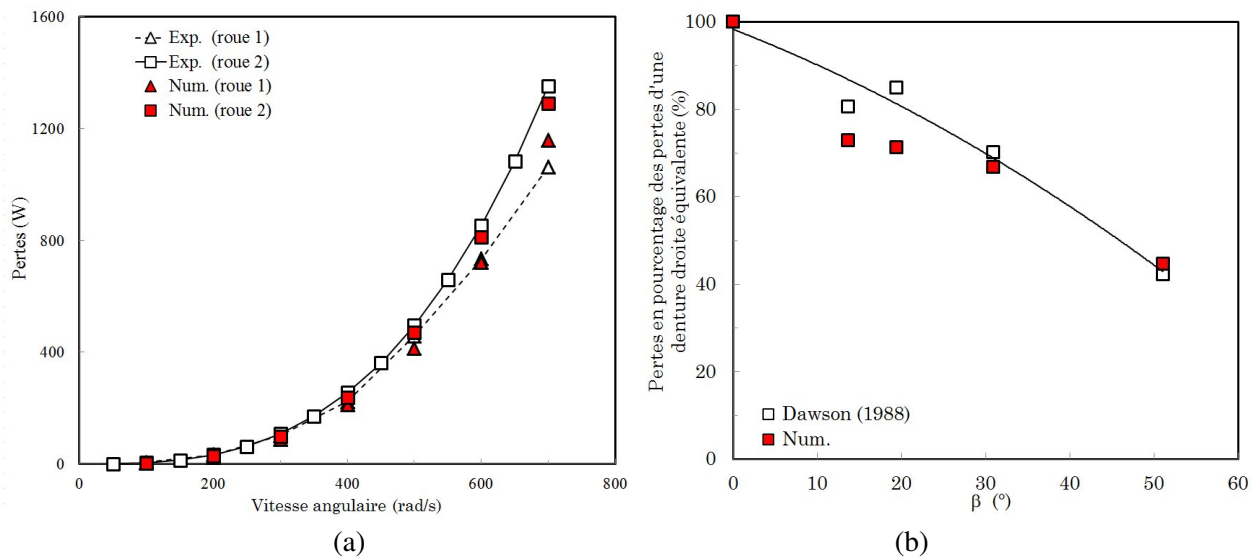


FIGURE 2 – Influence de l'angle d'hélice sur les pertes par ventilation pour les roues 1 et 2 [$b = 24$ mm, $D_p = 288$ mm] (a) et pour les roues 3 évoluant à 78,53 rad/s [$b = 187,10$ mm, $D_p = 560$ mm] (b).

3.3 Forme de l'écoulement

Comme il est montré sur la figure 3.a, l'écoulement au passage d'une denture hélicoïdale entre par un flanc, une recirculation de l'écoulement prend naissance dans la région entre deux dents consécutives. Une partie de cet écoulement est ensuite éjectée par l'autre flanc, une autre partie étant éjectée par la surface supérieure. Cette forme d'écoulement apparaît être différente de celle observée au passage d'une denture droite (Figure 3.b) pour laquelle l'aspiration est réalisée par les deux flancs et l'éjection radiale par la surface supérieure. Ces écoulements totalement différents en fonction de la présence d'un angle d'hélice peuvent conduire à une difficulté importante à modéliser à l'aide d'une unique formulation les pertes générées dans tous les cas.

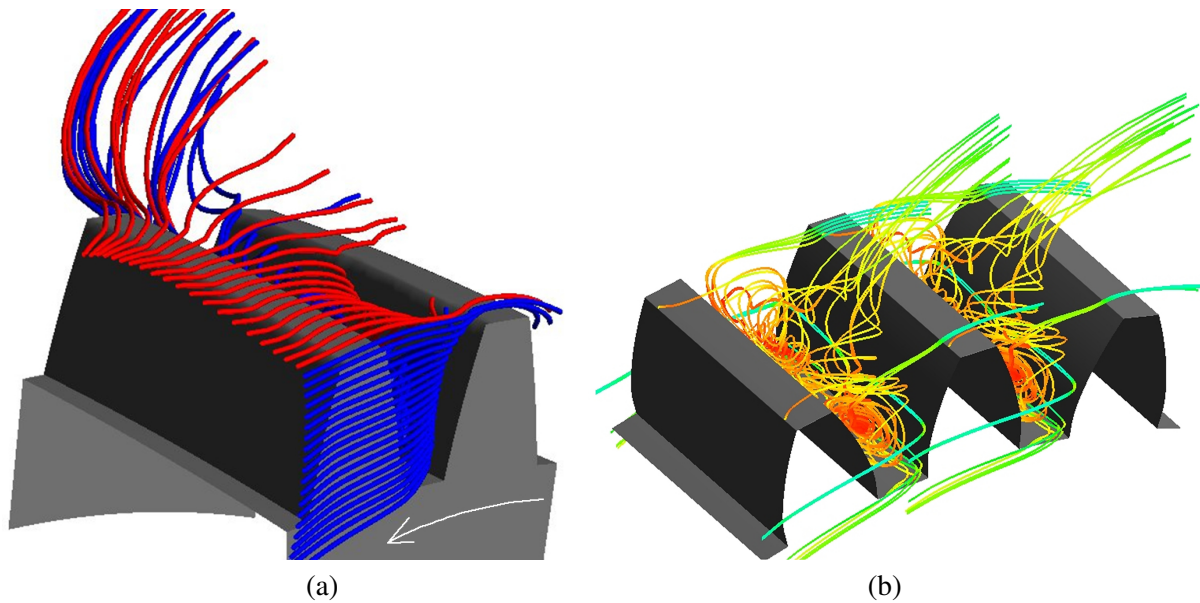


FIGURE 3 – a, écoulement au passage d’une denture hélicoïdale (roue 2 à 700 rad/s ; $m_n = 4$ mm, $b = 24$ mm, $\beta = 15^\circ$) ; b, écoulement au passage d’une denture droite (roue 1 à 700 rad/s ; $m_n = 4$ mm, $b = 24$ mm, $\beta = 0^\circ$) d’après Pallas *et al.* [9].

4 Influence de la largeur et de l’angle d’hélice sur les pertes par ventilation

L’approche numérique validée plus haut est utilisée dans le but de prévoir les pertes par ventilation pour des valeurs différentes de largeur et d’angle d’hélice. Pour cela des roues ayant toutes des valeurs de diamètre primitif et module identiques à celles des roues 1 et 2 sont étudiées numériquement (Tableau 2). Une unique vitesse de rotation égale à 700 rad/s est considérée.

Diamètre primitif (mm)	largeur (mm)	module normal (mm)	angle d’hélice (°)
288	20, 30, 40, 50, 60	4	0, 5, 10, 15, 20, 30

TABLE 2 – Caractéristiques géométriques des roues de l’étude paramétrique numérique.

La figure 4 rassemble les résultats numériques obtenus dans le cadre de cette étude. On note une augmentation des pertes avec l’angle d’hélice, exception faite lors de l’évolution entre 0° (denture droite) à 5° pour laquelle la perte diminue. Cette dernière observation est probablement consécutive au changement radical de la forme d’écoulement entre les deux types de denture (figure 3). D’autre part les largeurs plus grandes entraînent généralement des pertes plus importantes même si pour certaines valeurs d’angle d’hélice les pertes observées lorsque $b = 20$ mm peuvent être plus importantes que celles lorsque $b > 30$ mm. Ainsi les pertes observées lorsque $b = 20$ mm et $\beta = 20^\circ$ sont supérieures à celles prévues lorsque $b = 50$ mm et $\beta = 5^\circ$. Enfin les pertes évoluent de façon moins importante dans le cas de l’angle d’hélice le plus grand.

5 Discussion sur les modèles des pertes par ventilation

Le modèle formulé par Townsend [12] est l’un des rares à proposer l’angle d’hélice dans ses paramètres. Les pertes totales sont obtenus par addition des contributions des flancs et des dents. Ces dernières s’écrivent :

$$P_{\text{dents}} = C_3 N^3 D_p^4 b \left(\frac{R_f}{\sqrt{\tan \beta}} \right) \quad (1)$$

où C_3 est une constante, N la vitesse de rotation (tr/min), et R_f une constante d’ajustement dont la valeur dépend du module. On note que la prévision des pertes par le modèle avec la vitesse de rotation est en accord avec les résultats numériques (*i.e.* $\propto N^3$ sur la figure 2). Cependant la contribution de la largeur telle qu’elle est

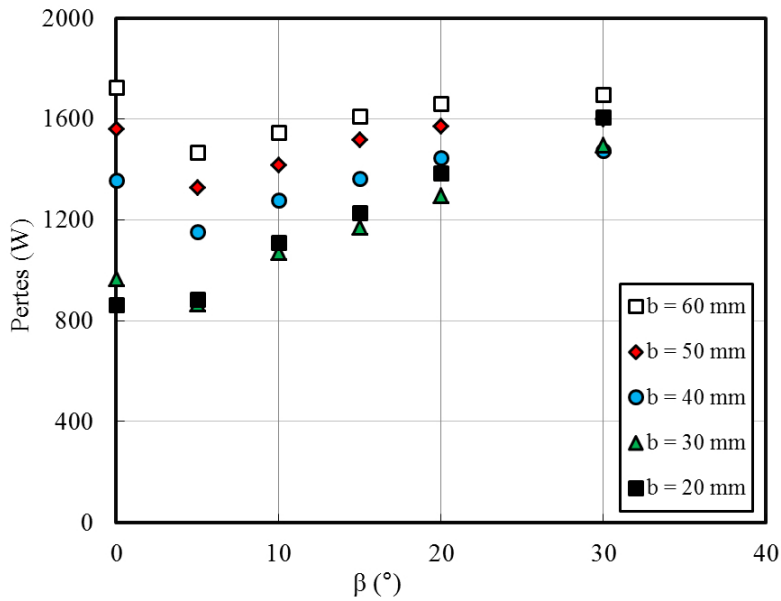


FIGURE 4 – Pertes par ventilation générée par les dents (largeur et angle d'hélice des roues du tableau 2).

annoncée par le modèle (1), *i.e.* $\propto b$, n'est pas retrouvée par les résultats numériques qui mettent en évidence une influence complexe de la largeur et l'angle d'hélice. La figure 5 présente les pertes obtenues à partir des valeurs de largeur et d'angle d'hélice du tableau 2 et des valeurs prévues par le modèle de Townsend (Eq. 1). On note globalement que des écarts importants apparaissent entre les valeurs numériques et celles du modèle (1) à l'exception des résultats basés sur l'angle d'hélice le plus faible ($\beta = 5^\circ$). Lorsque les valeurs d'angle d'hélice sont plus grandes le modèle de Townsend sous-estime très fortement les pertes. Il semble alors que la réduction des pertes par ventilation avec l'angle d'hélice observée par Dawson et décrit par le modèle (1) ne soit pas une règle générale, et tout particulièrement dans le cas de largeur faible. Si on s'intéresse aux pertes par ventilation générées par dent pour les roues 3 du tableau 1, on note qu'une augmentation de l'angle d'hélice de 0° à 12° conduit à une diminution notable des pertes (Figure 6) alors qu'une augmentation supplémentaire n'entraîne pas de modification significative des pertes. Ainsi la perte par ventilation avec l'angle d'hélice, pour les roues 3, semble être liée à la diminution importante du nombre de dents plus qu'à une modification importante de l'écoulement à l'origine d'une augmentation des pertes totales des dents.

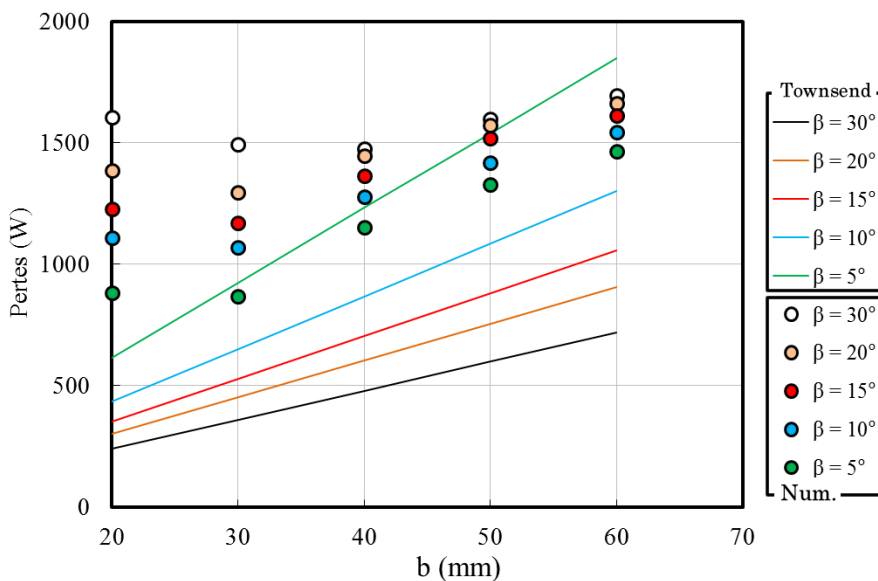


FIGURE 5 – Pertes par ventilation issues de l'étude paramétrique numérique (largeur et angle d'hélice des roues du tableau 2) et du modèle de Townsend [12].

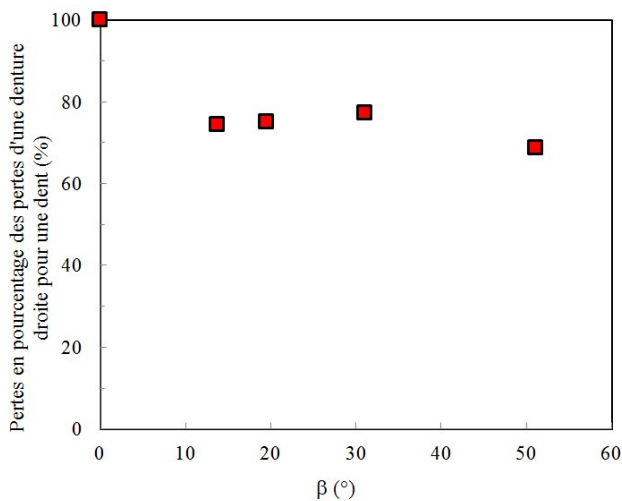


FIGURE 6 – Influence de l'angle d'hélice sur les pertes par ventilation par dent (roues 3 du tableau 1).

6 Conclusion

Cette étude s'est intéressée aux pertes par ventilation générées par des roues hélicoïdales. Pour cela une approche numérique précédemment utilisée pour simuler des écoulements au passage de dentures droites a été adaptée pour tenir compte de l'angle d'hélice. Les prévisions numériques sont proches des valeurs mesurées dans des configurations similaires. On note que l'angle d'hélice, mais aussi la largeur, influencent de façon complexe les pertes et aucune règle globale et simple apparaît franchement. Les prévisions du modèle proposé par Townsend [12] ont été confrontées aux valeurs numériques de l'étude paramétrique et des écarts importants sont notés entre les résultats des deux approches.

Références

- [1] Anderson N. E., Loewenthal S. 1981 Effect of geometry and operating conditions on spur gears system power loss. *ASME J. Mech. Des.*, 130, pp. 151-159
- [2] Dawson P. H. 1984 Windage loss in larger high-speed gears. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 198A(1), pp. 51-59
- [3] Diab Y., Ville F., Vex P., Changenet C. 2004 Windage losses in high speed gears - preliminary experimental and theoretical results. *ASME J. Mech. Des.*, 126, pp. 903-908
- [4] Dixon S. L. 1998 Application and validation of unstructured overset CFD technology for rotorcraft gearbox windage aerodynamics simulation. *Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery (4th edition, Butterworth Heine-mann)*
- [5] Handschuh R.F., Kilmain C.J. 2003 Preliminary comparison of experimental and analytical efficiency results of high-speed helical gear trains. *DETC'03 ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2-6 Sept. Chicago (Illinois - USA)
- [6] Hill M. J., Kunz R. F., Noack R. W., Long L. N., Morris P. J., Handschuh R. F. 2008 Application and validation of unstructured overset CFD technology for rotorcraft gearbox windage aerodynamics simulation. *In Proc. of 64th American Helicopter Society Annual Forum, Montreal, Canada*, 9 p.
- [7] Marchesse Y., Changenet C., Ville F., Vex P. 2011 Investigation on CFD simulation for predicting windage power losses in spur gears. *ASME J. Mech. Design*, 133, 7 p.
- [8] Menter F.R. 1994 Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications *A.I.A.A. Journal* **32**(8) 1598-1605
- [9] Pallas S., Marchesse Y., Changenet C., Ville F., Vex P. 2012 A windage power loss model based on CFD study about the volumetric flow rate expelled by spur gears *Mechanics and Industry*, 13(5), pp. 317-323.
- [10] Pallas S., Marchesse Y., Changenet C., Ville F., Vex P. 2013 Application and validation of a simplified numerical approach for the estimation of windage power losses in spur gears *Computers and Fluids*, 84, pp. 39-45.
- [11] Seetharaman S., Kahraman A. 2009 Load-independent spin power losses of a spur gear pair : model formulation. *ASME J. Tribology*, 131 (2), pp. 1-11
- [12] Townsend D. P. 1992 *Dudley's gear handbook : the design, manufacture, and application of gears (2nd edition, New-York McGraw-Hill)*