



**HAL**  
open science

**Dimensionnement et comparaison de machines synchrones à concentration de flux à encochage fractionnaire pour une application véhicule hybride**  
Phi Hung Nguyen, Emmanuel Hoang, Mohamed Gabsi, Michel Lécivain

► **To cite this version:**

Phi Hung Nguyen, Emmanuel Hoang, Mohamed Gabsi, Michel Lécivain. Dimensionnement et comparaison de machines synchrones à concentration de flux à encochage fractionnaire pour une application véhicule hybride. *Electrotechnique du Futur* 2009, Sep 2009, Compiègne, France. hal-00488993

**HAL Id: hal-00488993**

**<https://hal.science/hal-00488993>**

Submitted on 3 Jun 2010

**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.



# DIMENSIONNEMENT ET COMPARAISON DE MACHINES SYNCHRONES A CONCENTRATION DE FLUX A ENCOCHAGE FRACTIONNAIRE POUR UNE APPLICATION VEHICULE HYBRIDE

NGUYEN Phi Hung, HOANG Emmanuel, GABSI Mohamed, LECRIVAIN Michel  
SATIE, ENS Cachan, CNRS, UniverSud  
61 av du président Wilson, F-94230 Cachan, France  
Email: pnguyen@satie.ens-cachan.fr

## Résumé

Deux machines synchrones à aimants permanents et à concentration de flux sont présentées dans cet article. Ce sont deux machines à bobinages concentrés au stator et à encochage fractionnaire avec des aimants enterrés au rotor. Nous présentons premièrement la structure, la comparaison en terme du couple et puis le dimensionnement systémique de ces deux machines dans l'objectif d'obtenir le rapport couple/pertes cuivre maximal. Enfin, nous présentons le calcul des pertes moyennes pour un cycle de fonctionnement du véhicule hybride.

## Abstract

Two permanent magnet synchronous machines with fractional slot and concentrated flux are presented in this paper. They are characterized by a concentrated windings stator and focusing permanent magnet rotor. First, we present the structure and the comparison and then the design of these two machines in order to acquire the ratio of maximum torque/losses. Finally, we present the computation of average losses for an operating cycle of the hybrid vehicle.

**Mots Clés.** Machines synchrones, aimants permanents, concentration de flux, encochage fractionnaire, motorisation électrique de camion, cycle de fonctionnement.

## I. INTRODUCTION

Le véhicule hybride permet d'allier les avantages des véhicules thermiques et des véhicules électriques. Plusieurs chercheurs et industriels font des recherches sur des technologies de machines pour ce type d'applications [1-6]. Cet article s'inscrit dans le contexte d'une motorisation électrique de camion avec un couple élevé et une vitesse de rotation réduite. Il présente le dimensionnement et la comparaison de deux structures de machines synchrones à aimants permanents à concentration de flux. Ce sont des machines à aimants permanents enterrés au rotor, à bobinages concentrés et à encochage fractionnaire. Les calculs et les modélisations sont basés sur l'analyse par éléments finis (EF-2D) en tenant compte la saturation magnétique.

## II. STRUCTURES

Dans le cas de cette étude, la motorisation électrique d'un camion, le cahier des charges donne un couple pouvant atteindre 500 Nm et une vitesse maximale 3000 tr/min. Nous présentons tout d'abord dans cet article une structure de concentration de flux de base. C'est une machine à bobinage concentré et à aimants permanents enterrés au rotor. Dans le cas de cette machine à 4 paires de pôles, nous avons 8 aimants au rotor et 12 encoches au stator. C'est une machine à encochage fractionnaire dont le nombre d'encoches par pôle et par phase  $N_{\text{ep}}$  est égal à 1/2:

$$N_{\text{ep}} = \frac{N_e}{2p * q} \quad [4] \quad (1)$$

Où  $N_e$  : nombre d'encoches  
 $p$  : nombre de paires de pôles  
 $q$  : nombre de phases

Les paramètres initiaux de la machine:

Tableau I. Paramètres

Nombre de paires de pôles, $p$	4	Largeur de la dent, mm	23
Nombre d'encoches, $N_e$	12	Hauteur de la culasse, mm	10
Rayon d'entrefer (mm)	90	Rayon d'arbre, mm	31
Diamètre extérieur (mm)	250	Aimant $B_r$ , T	1.2
Longueur active (mm)	250	Largeur de l'aimant au niveau de l'entrefer, mm	5.2
Entrefer (mm)	1	Largeur de l'aimant au niveau de l'axe, mm	8.8

A partir de cette structure initiale, nous avons gardé le même stator et multiplié par deux le nombre d'aimants au rotor. Nous avons par conséquent obtenu une machine de mêmes dimensions avec 16 aimants au rotor, le nombre d'encoches par pôle et par phase est de  $N_{\text{app}}=1/4$ .

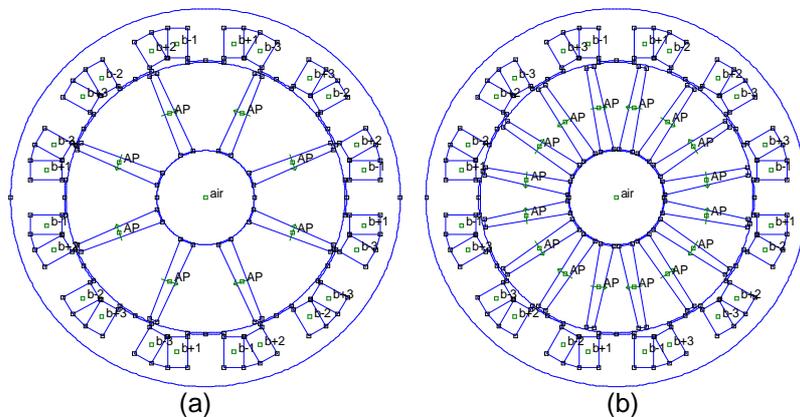


Figure 1. Structure initiale de machine synchrone à concentration de flux avec 12 encoches et 8 aimants(a) et 16 aimants(b)

Nous nous intéressons à dimensionner et à comparer ces deux machines dans le but de les optimiser pour une application de motorisation électrique du véhicule.

Pour mieux comprendre la performance des machines à encochage fractionnaire, nous allons faire une première comparaison des deux machines dans les mêmes conditions: dimensions, densité du courant d'induit.

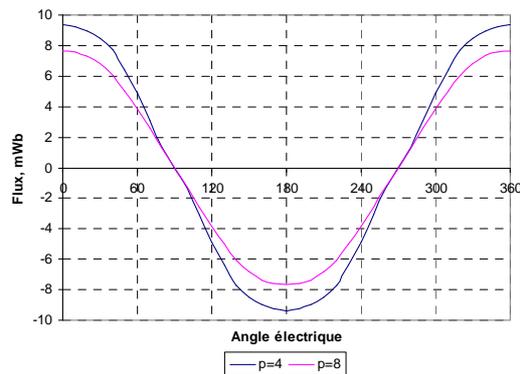


Figure 2. Flux à vide par spire et par pôle d'une phase des deux machines

Le couple électromagnétique dépend du nombre de paires de pôles, du flux et du courant d'induit:

$$C = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Phi \cdot I \quad [6-7] \quad (2)$$

Les flux à vide pour les deux machines ne sont pas très différents (figure 2). En plus, pour la même valeur de la densité de courant d'induit ( $J_{\text{eff}}=10\text{A/mm}^2$ ), nous avons obtenu le couple moyen presque deux fois plus élevé ( $p=8$ ) par rapport à ( $p=4$ ):

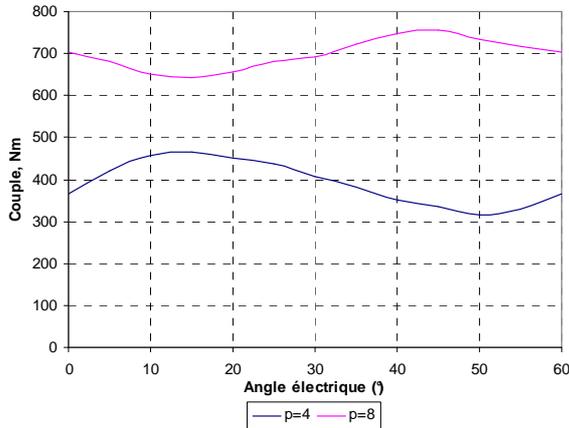


Figure 3. Couple électromagnétique

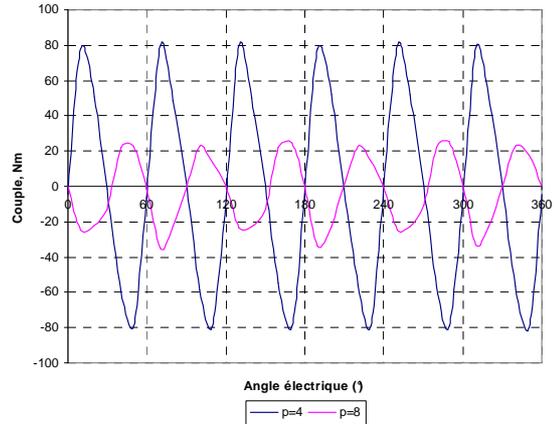


Figure 4. Couple de détente

L'intérêt de la machine à  $p=8$  dans ce cas est de donner un couple très élevé (deux fois plus) et de diminuer fortement l'ondulation du couple (16% contre 38% pour  $p=4$ ).

Tableau II. Résultat du couple

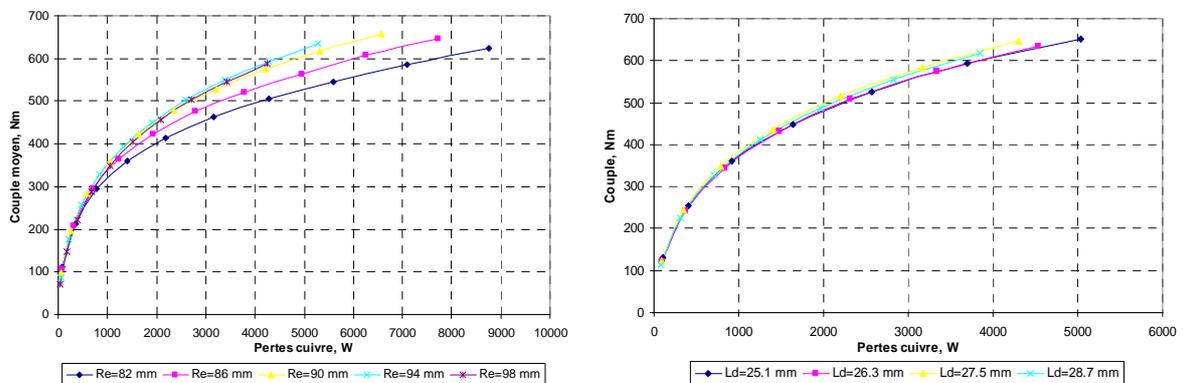
	$p=4$	$p=8$
Couple moyen, Nm	393	702
Ondulation de couple	38%	16%

### III. ETUDE PARAMETRIQUE

Nous avons ensuite dimensionné les deux machines pour obtenir de meilleures performances. Nous avons choisi trois variables géométriques importantes :

- Rayon de l'entrefer  $R_e$
- Largeur de la dent stator  $L_d$
- Hauteur de la culasse  $H_c$

Le critère de dimensionnement est d'obtenir le rapport Couple/Pertes Joule (pertes cuivre) le plus élevé. Les valeurs de chaque variable sont changées par variation différentielle, ce qui permet d'approcher le plus précisément les dimensions optimales. Nous avons utilisé la même méthode pour dimensionner géométriquement les deux machines. Cependant, nous ne présentons dans cet article que quelques courbes Couple/Pertes Joule de la machine à  $p=4$  en fonction de ces trois variables.



(a)

(b)

Figure 5. Couple – Pertes Joule en variation du rayon de l'entrefer  $R_e$  (a) de la largeur de la dent  $L_d$  (b)

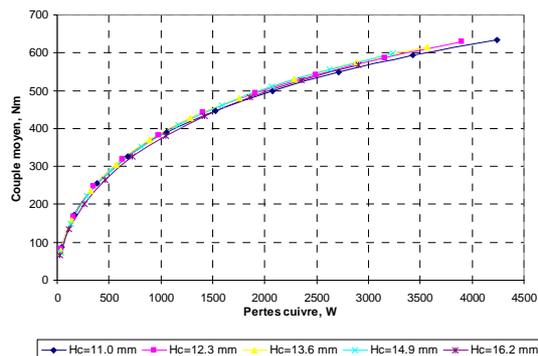


Figure 6. Couple – Pertes Joule en variation de la hauteur de la culasse  $H_c$ .

Le résultat de dimensionnement en variation de trois variables pour deux machines ci-dessus est présenté dans ce tableau:

Tableau III. Résultat du dimensionnement

Valeur en mm	$p=4$	$p=8$
$R_e$	92	90
$L_d$	27.5	22.0
$H_c$	14.0	11.0

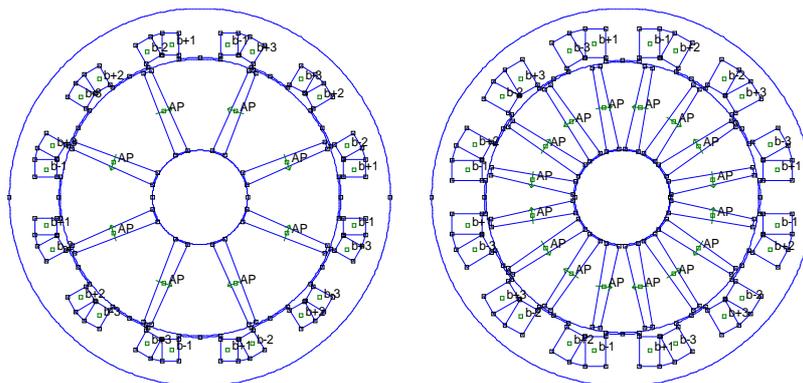


Figure 7. Deux machines optimisées

Après le dimensionnement, nous avons obtenu des dimensions optimales et de meilleures performances des deux machines par rapport des dimensions initiales, qui sont illustrées dans la figure suivante:

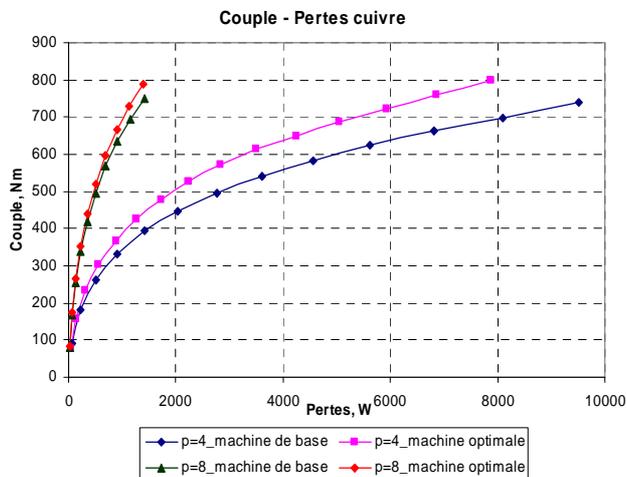


Figure 8. Courbe Couple – Pertes Joule avant et après le dimensionnement

## IV. PERTES MOYENNES POUR UN CYCLE DE FONCTIONNEMENT

Dans plusieurs études sur les machines pour application véhicule hybride, nous trouvons que les calculs sont essentiellement faits pour quelques points particuliers du cahier des charges [2-5]. Pour notre étude, nous nous intéressons plus particulièrement à calculer les pertes moyennes dissipées sur un cycle de fonctionnement du camion (figure 9). L'intérêt de ce calcul est de donner une vue globale de l'optimisation sur un cycle de fonctionnement.

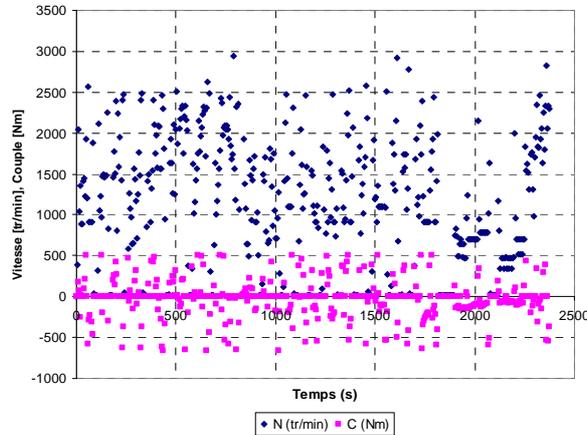


Figure 9. Un cycle de fonctionnement du véhicule

### 4.1. Modèle du couple

A partir des courbes couple moyen en fonction de la densité de courant efficace (figure 10), nous avons établi le modèle du couple moyen en fonction de la densité de courant d'induit efficace sous forme:

$$C = k_{c1} * \delta + k_{c2} * \delta^2 \quad (3)$$

Où  $k_{c1}$ ,  $k_{c2}$  sont des coefficients et  $\delta$  est la densité de courant efficace en  $A/mm^2$ .

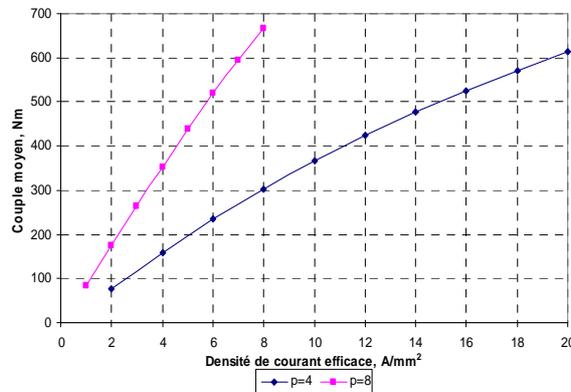


Figure 10. Couple moyen en fonction de la densité de courant efficace

Pour les deux machines, nous avons trouvé les modèles du couple en fonction de la densité de courant efficace suivants:

Tableau IV. Coefficients du couple

Coefficients	p=4	p=8
$k_{c1}$	42.39	91.92
$k_{c2}$	-0.59	-1.02

### 4.2. Pertes cuivre

A partir de la courbe Couple-Pertes cuivre obtenue, nous avons trouvé le modèle du couple en fonction de la densité de courant. Nous avons calculé pour chaque point (chaque valeur du couple) dans le cycle la densité de courant efficace et puis la valeur des pertes cuivre correspondante à la valeur de la densité de courant. En conséquence, nous avons toutes les valeurs des pertes cuivre pour tous les points. Enfin, nous pouvons déterminer la valeur moyenne de pertes cuivre pendant un cycle de fonctionnement du véhicule. Le coefficient de bobinage est  $k_b=0.6$ .

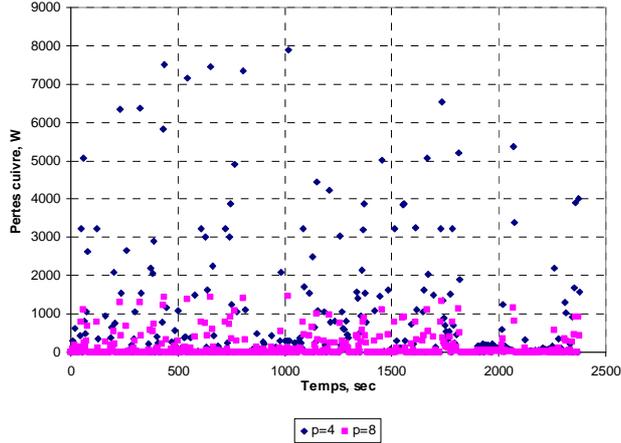


Figure 11. Pertes cuivre sur le cycle de fonctionnement

### 4.3. Pertes fer

En se basant sur l'hypothèse que les pertes fer en charge sont les mêmes qu'à vide, nous avons calculé les pertes fer uniquement dans le stator en présence des aimants permanents.

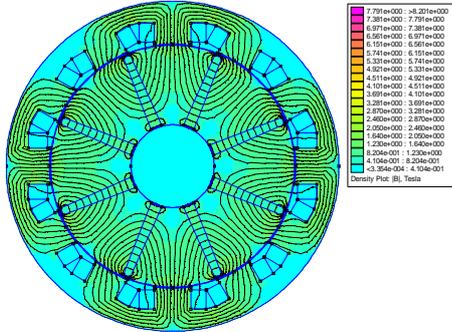


Figure 12. Densité de flux à vide pour p=4

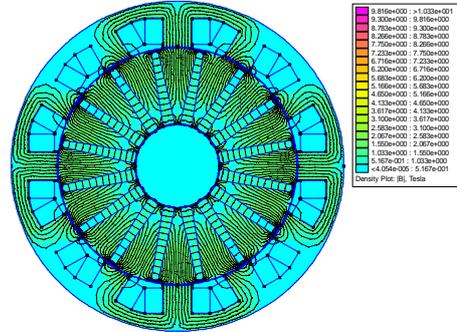


Figure 13. Densité de flux à vide pour p=8

Les pertes fer se composent de deux parties: pertes par hystérésis et pertes par courants de Foucault [7-8]:

$$P_{fer} = P_{hys} + P_{CF} \quad (4)$$

En se basant sur l'hypothèse que l'induction est sinusoïdale et homogène dans toute la zone considérée, nous avons le modèle de calcul de pertes fer [7-8]:

$$P_{fer} = [k_{h1}(2B_m) + k_{h2}(2B_m)^2]f + 2\Pi^2\alpha_p B_m^2 f^2 \quad (5)$$

Les valeurs des coefficients  $k_{h1}$ ,  $k_{h2}$  et  $\alpha_p$  sont déterminées à partir de données fournies par les fabricants des tôles. En effet, nous avons calculé et obtenu ces valeurs, ce qui nous a donné le modèle des pertes fer volumiques (en  $W/m^3$ ):

$$P_{fer} = [(50*4*B_m^2)*f + 20*0.042*B_m^2*f^2] \quad (6)$$

Où :

$$f = p * \frac{N}{60} : \text{la fréquence}$$

N: la vitesse, en tr/min

$B_m$ : l'induction maximale, T

Pour avoir un résultat plus précis, nous avons divisé le stator en plusieurs parties (figure 14 par exemple). Connaissant la valeur de l'induction et le volume dans chaque partie, nous pouvons en déduire une valeur de pertes fer pour chaque point dans le cycle (chaque vitesse). En fin, nous pouvons déterminer la valeur moyenne de pertes fer pendant le cycle. Le fait que les pertes sont calculées à vide et uniquement au stator permet d'obtenir un ordre de grandeur de ces pertes.

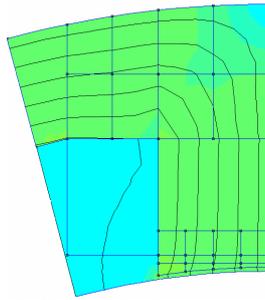


Figure 14. Densité de flux à vide dans une moitié de la dent stator

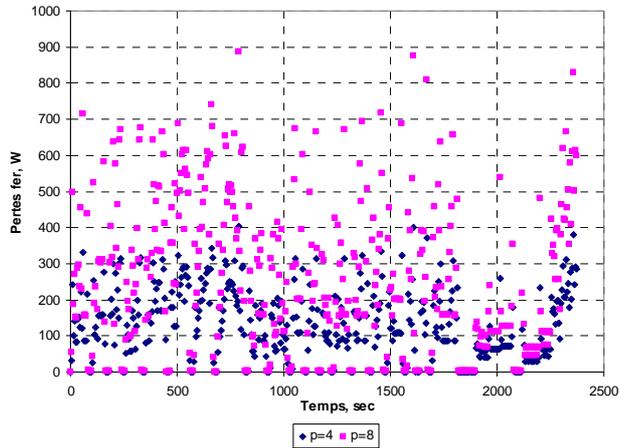


Figure 15. Pertes fer sur le cycle de fonctionnement

Le résultat de ces calculs est présenté dans le tableau suivant, ce qui donne une vue globale des pertes moyennes sur un cycle de fonctionnement du véhicule.

Tableau V. Pertes moyennes sur le cycle de fonctionnement

	p=4	p=8
Pertes cuivre moyennes (W)	522	163
Pertes fer moyennes (W)	185	445
Pertes totales moyennes (W)	707	608

Ces résultats nous montrent que la machine à p=4 donne plus de pertes cuivre alors que la machine à p=8 donne plus de pertes fer. En totalité, les pertes moyennes sur un cycle de fonctionnement pour p=8 sont plus faibles que la machine à p=4. Ils nous montrent également que l'amélioration du rendement de la machine p=4 passe par l'optimisation des pertes cuivre alors que celle de la machine p=8 nécessite la diminution des pertes fer.

Nous revenons au cycle de fonctionnement du véhicule. La puissance électromagnétique instantanée durant le cycle est montrée dans la figure 16, il y a des points pouvant atteindre la puissance de 160kW mais la valeur de puissance moyenne sur le cycle est de 4238W.

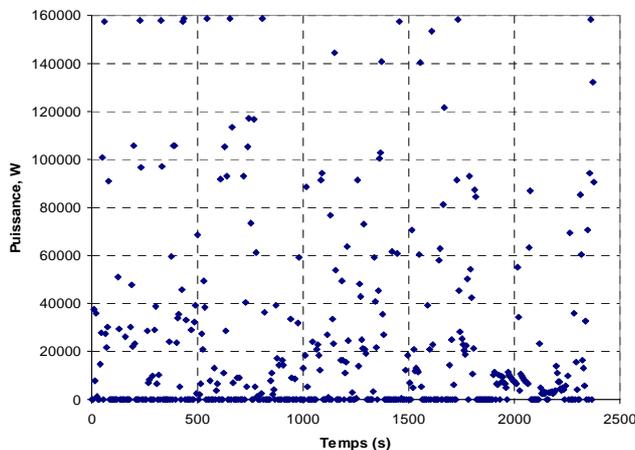


Figure 16. Puissance instantanée sur le cycle de fonctionnement

Les puissances moyennes demandées sont de 4945W et de 4846W respectivement pour la machine  $p=4$  et la machine  $p=8$ , ce qui nous donne respectivement le rendement moyen de ces deux machines fonctionnant durant le cycle de fonctionnement 85.7% et 87.4%.

Tableau VI. Rendements moyens sur le cycle de fonctionnement

	$p=4$	$p=8$
Rendement moyen sur le cycle (%)	85.7	87.4

En conséquence, pour bien faire fonctionner ces deux machines durant le cycle de fonctionnement, nous avons besoin d'onduleurs capables de délivrer, au moins, 160kW, alors qu'ils sont sollicités, au moyen, pour une puissance moyenne de l'ordre de 4.9kW.

## V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans cet article, nous avons étudié deux machines à aimants permanents à concentration de flux et à encochage fractionnaire. Nous avons évalué l'influence des dimensions sur les performances des machines. Le point le plus important de cet article est de comparer deux machines par le calcul des pertes moyennes sur un cycle de fonctionnement du véhicule, ce qui donne une vue globale sur les performances des machines en termes de la consommation d'énergie.

**Perspectives:** Dans cet article, nous avons utilisé des hypothèses pour simplifier des calculs. Elles entraînent évidemment un résultat qui n'est pas très précis. C'est pourquoi, nous chercherons à calculer et minimiser des pertes en ajoutant les points suivants:

- Les pertes fer au rotor
- Le calcul de pertes fer moyennes sur le cycle en tenant compte du courant d'induit
- L'optimisation pour d'autres cahiers de charges

## REFERENCES

- [1] Z.Q.ZHU, HOWE David, "Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles" Proceedings of the IEEE, vol. 95, No. 4, April 2007.
- [2] J.SAINT-MICHEL, "Electric machines for hybrid vehicles applications" AEA 2006 Conference, 5-6 April 2006, Poitiers, Futuroscope.
- [3] HLIOUI Sami, AMARA Racine, VIDO Lionel, GABSI Mohamed, LECRIVAIN Michel, MIRAOUI Abdelatif, "Dimensionnement électromagnétique d'une machine synchrone à aimants permanents à bobinages concentriques et à concentration de flux", Conférence C'SAME 2007, ENSEEIHT, Toulouse, 6-7 Septembre 2007.
- [4] CROS Jérôme, VIAROUGE Philippe, "Synthesis of High Performance PM Motors With Concentrated Windings", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No. 2, June 2002, p.p. 248-253.
- [5] Amara Y., Vido L., Gabsi M., Hoang E., Lécrivain M., Chabot F., "Hybrid Excitation Synchronous Machines: Energy Efficient Solution for Vehicle Propulsion", VPPC Conference, Windsor, England, UK, September 2006.
- [6] Ayman M. EF-Refai, Thomas M. Jahns, "Optimal Flux Weakening in Surface PM Machines Using Fractional-Slot Concentrated Windings", IEEE Transactions on industry applications, vol. 41, No. 3, May/June 2005, p.p. 790-800.
- [7] M. Liwschitz, "Calcul des machines électriques", Book SPES Lausanne, 1969.
- [8] HOANG Emmanuel, "Etude, Modélisation et Mesure des pertes magnétiques dans les moteurs à réluctance variable à double saillance", Thèse de doctorat, 1995, ENS de Cachan.