

Modélisation Analytique et Optimisation des Gammes de Machines Synchrones à Concentration de Flux

Bill Sesanga, Albert Foggia, Frédéric Wurtz

▶ **To cite this version:**

Bill Sesanga, Albert Foggia, Frédéric Wurtz. Modélisation Analytique et Optimisation des Gammes de Machines Synchrones à Concentration de Flux. EF 2009 – Electrotechnique du Futur, Sep 2009, Compiègne, France. pp.96. hal-00420312

HAL Id: hal-00420312
https://hal.science/hal-00420312

Submitted on 28 Sep 2009

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.

Conférence EF 2009
UTC, Compiègne, 24-25 Septembre 2009

Modélisation Analytique et Optimisation des Gammes de Machines Synchrones à Concentration de Flux

Bill SESANGA, Albert FOGGIA, Fréderic WURTZ
Grenoble Electrical Engineering Laboratory (G2Elab)
ENSE3 (Grenoble INP-UJF, CNRS UMR 5529)
BP 46 -38402 Saint Martin d'Hères Grenoble Cedex, France
Bill.sesanga@g2elab.grenoble-inp.fr

Résumé

Dans cet article nous allons parler de l'optimisation des gammes de machines à concentration de flux. Pour faire cette étude, nous avons commencé par établir un modèle analytique (magnétique et thermique) que nous avons validé numériquement sous FLUX et expérimentalement par des essais à basse et à grande vitesse. Le modèle a été ensuite intégré dans l'outil d'optimisation CADES [1-2] et nous avons utilisé un algorithme déterministe de type SQP [3-4]. La fonction objectif est la minimisation du coût à puissance nominale. Le rendement minimal visé tient compte des normes pour un ratio couple/kg élevé. Les courbes de Pareto ont permis en dernier lieu d'opérer de des choix stratégiques en toute connaissance des causes.

Mots clés : Modélisation analytique, Optimisation des gammes, courbes de Pareto

MODELISATION ANALYTIQUE

Le calcul de l'induction dans l'entrefer est le point central de cette modélisation. La forme d'onde de cette induction est obtenue par la résolution d'un système d'équation non linéaire implicite (1). La première équation de ce système est directement obtenue par l'application du théorème d'Ampère. L'évolution de la force magnétomotrice a été supposé sinusoïdale et les ampères-tours dans la culasse ont été négligés. La loi de la conservation du Flux permet d'obtenir la deuxième équation du système. La figure 1 présente une paire de pôles, ainsi que le contour d'application du théorème.

$$\begin{cases} H_{mg} * W_{m_mg} + \dfrac{2 * B_g(\theta)}{\mu_0} * \left[g(\theta) + \dfrac{kt * h_{te}}{\mu_r(B_g(\theta))} \right] = Line_Load * \dfrac{\Phi_b}{p} * \sin(\theta - \alpha) \\ \Phi_{mg}(H_{mg}) = \Phi_g(B_g(\theta)) + \Phi_f(H_{mg}) + \Phi_{f3D}(H_{mg}) \end{cases} \quad (1)$$

H_{mg} est le champ magnétique dans les aimants, W_{m_mg} est la largeur des aimants, h_{te} est la hauteur des dents du stator, k_t est un coefficient géométrique permettant de calculer l'induction dans les dents à partir de l'induction dans l'entrefer. $B_g(\theta)$ est l'induction dans l'entrefer, $g(\theta)$ est l'entrefer géométrique corrigé, θ est l'angle électrique pouvant varier sur un pôle et α est l'angle d'autopilotage. Φb est le diamètre

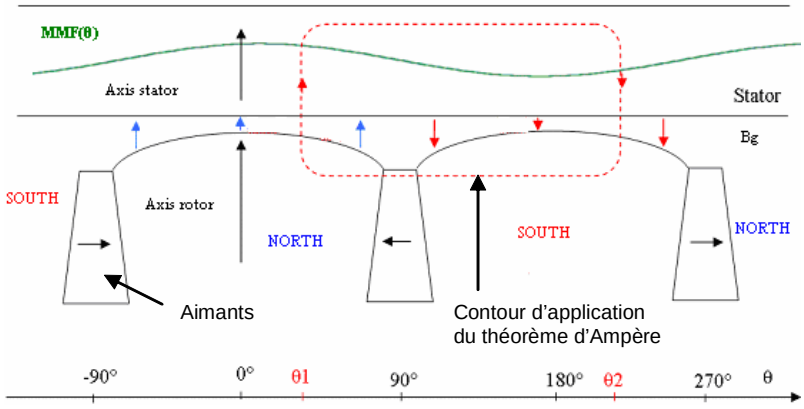


Figure 1. Paire de pôles et contour d'application du théorème d'Ampère.

extérieur et p le nombre de paires des pôles. Toutes les autres grandeurs se calculent à partir de l'induction. Φ_{mg} est le flux crée par 2 aimants d'un même pôle, ce flux alimente à la fois le flux d'entrefer (Φ_g), le flux de fuite (Φ_f) et les flux de fuite tridimensionnels aux extrémités du moteur.

L'intégration d'un modèle analytique s'est révélée fort judicieuse, puisque la température a un impact néfaste sur les matériaux de la machine et surtout sur les aimants permanents. Mais la modélisation thermique des machines est extrêmement laborieuse, puisqu'il faut connaître beaucoup des paramètres qui sont difficilement accessibles. Le modèle intégré tient compte de la conduction et de la convection, le rayonnement ayant été négligé [5].

Hypothèses et choix de structure

- De part la construction des machines (feuilletage de tôles au stator et au rotor), la dissipation de la chaleur s'est faite radialement. C'est pourquoi nous pouvons représenter le moteur par un modèle thermique 2D sous FLUX.
- L'entrefer peut être considéré comme une barrière thermique, les pertes au rotor étant très négligeables (pas de courant ni de variation de flux), ce qui signifie que les pertes au rotor n'auront pas d'incidence sur l'échauffement du cuivre [6].

Ces deux hypothèses ainsi que la présence des symétries dans la machine, nous permettent de travailler sur un pas dentaire.

Les résistances thermiques de conduction se calculent par la relation :

$$Rth_cond = \frac{1}{\lambda}\frac{L}{S} \quad (2)$$

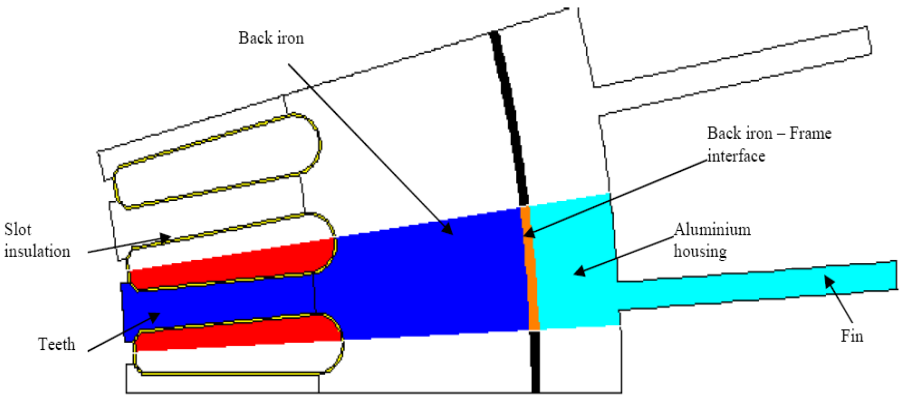


Figure 2. Structure pour établir le modèle analytique

λ est la conductivité thermique du matériau, L la longueur du flux thermique et S la surface traversée par le même flux. La relation de Fourier permet de déterminer la résistance thermique de convection, h_conv étant le coefficient d'échange.

$$Rth_conv = \frac{1}{h_conv * S} \quad (3)$$

Nous avons choisi une machine de diamètre 300 dont les pertes et échauffement ont été entièrement évalués par des essais. Le module thermique de Flux a été utilisé pour analyser les températures dans les différentes parties de la machine. Une comparaison entre les résultats du calcul et ceux des essais expérimentaux a prouvé la fiabilité du modèle. Les courbes isothermes ci-dessus permettent de voir que le flux de chaleur suit une direction radiale.

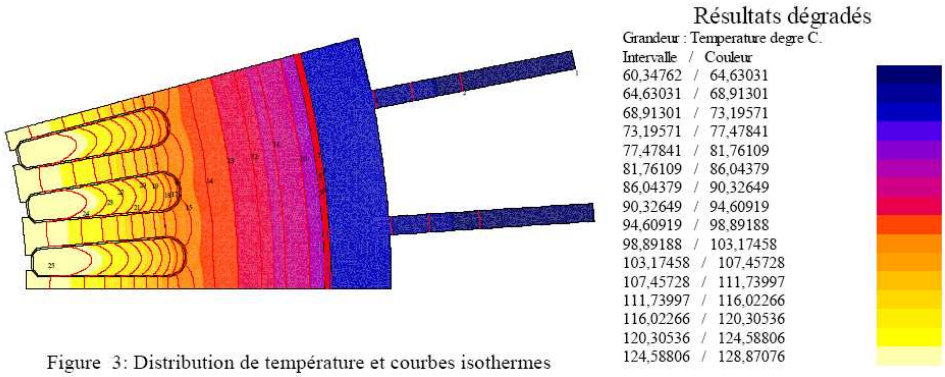


Figure 3: Distribution de température et courbes isothermes

Ensuite, nous avons modélisé un réseau de résistances thermiques sous Pspice. Dans ce modèle, les pertes joule et fer sont considérées comme des sources de courant, la température à un nœud est équivalente à un potentiel et les résistances thermiques sont équivalentes aux résistances électriques. Pour valider ce réseau de résistances thermiques, nous avons fait une comparaison entre les résultats de Pspice et de FLUX. Les résultats contenus dans le Tableau 1 montrent que les différences entre les 2 modèles sont inférieures à 2%, ce qui est très acceptable pour un modèle thermique.

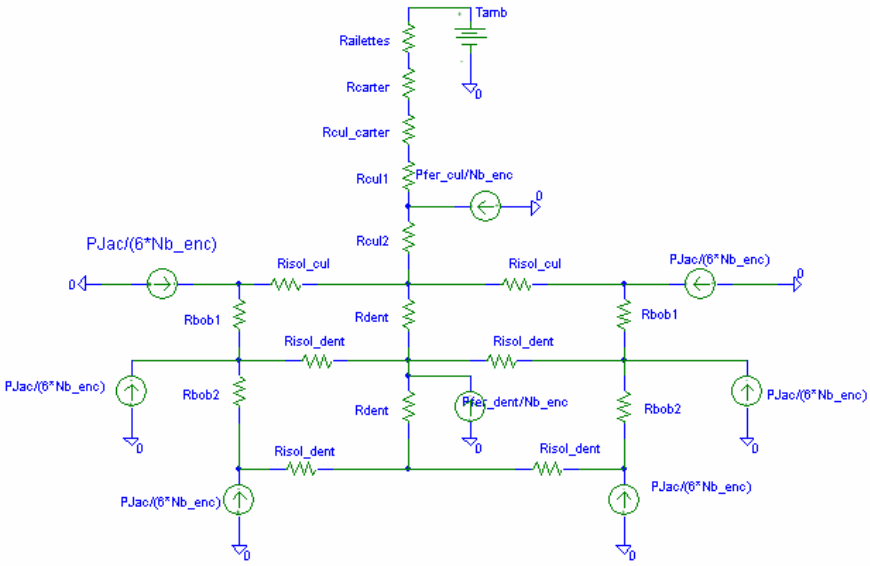


Figure 4. Réseau des résistances thermiques

Noeud	Modèle Flux 2D (°C)	Modèle Pspice (°C)	Différence (%) En Kelvin
Température Ambiante	20	20	0
Bas ailettes	66,9	64,5	-0,71
Bas de carter	68,3	65,6	-0,79
diamètre extérieur	81,7	79	-0,76
centre de la culasse	90,9	88,6	-0,63
Haut des dents	101,8	97,5	-1,15
Haut des bobines	103,8	106,3	0,66
centre des bobines	123,4	119,2	-1,06
Bas des bobines	127,4	122,1	-1,32
Centre des dents	118	117,4	-0,15
Bas de dents	123,4	120,1	-0,83

Tableau 1. Comparaison des températures

OPTIMISATION

Avant de lancer une étude d'optimisation, le modèle a été validé par comparaisons à des essais expérimentaux. L'objectif étant d'optimiser une gamme de machines, la validation s'est faite sur 2 machines. La première a un diamètre extérieur de 240 mm et la seconde un diamètre de 473,5, ce qui nous donne un ratio de 2. En ce qui concerne la vitesse, la première machine tourne à 7200 tours/min, tandis que la seconde tourne à 700 tours/min, ce qui donne un ratio de 10. Nous pouvons aussi noter que la première machine a 6

	Machine 1		Machine 2	
	Essais	Modèle	Essais	Modèle
diamètre extérieur (mm)	240		473,5	
Couple (N.m)	111		1504	
Vitesse (tours/min)	7199,6		701,01	
Puissance utile (kW)	83,6		110,4	
Puissance absorbée (kW)	89	90	114	113,9
Rendement (%)	93,87	93,45	96,88	96,5
courant (A)	194,6	195,9	175,4	177
Tension (V)	341,2	328,1	399	399,8
angle d'autopilotage (°)	12,73	12,73	35,58	27

Tableau 2. Comparaison des résultats des essais et du modèle

paires des pôles et la seconde a 8 paires des pôles. Comme on peut le voir sur le Tableau 2, les résultats des essais et du modèle sont sensiblement très proches, les écarts ne dépassent pas le 3% et peuvent s'expliquer par les incertitudes de mesure et les hypothèses de calcul (Pas de saturation et la non prise en compte des harmoniques de dentures).

Optimisation Mono objectif

Notre modèle contient au total 249 paramètres dont 25 paramètres de conception et 36 paramètres contraints, 2 types de contraintes peuvent être appliqués aux paramètres, une contrainte d'égalité qui consiste à fixer la valeur du paramètre ou une contrainte d'inégalité qui consiste à déterminer un intervalle de variation. Le Tableau 3 ci contre présente une partie des spécifications.

Tension aux bornes du moteur	< 340 V	diamètre extérieur	fixé
Induction dans les dents statorique	< 2 T	Champs magnétique dans les aimants	< 650 kA/m
entrefer géométrique maximal	1,5*E_min < E_max < 4*E_min	Échauffement maximal du cuivre	< 80 °
Nombre des pôles	6 ou 8 en fonction du diamètre de la machine	Nombre d'encoches	3 slots /pôle/phase

Tableau 3. Quelques spécifications

La figure 5 ci-dessous présente la hiérarchie des composants CADES, dont nous donnerons une brève explication.

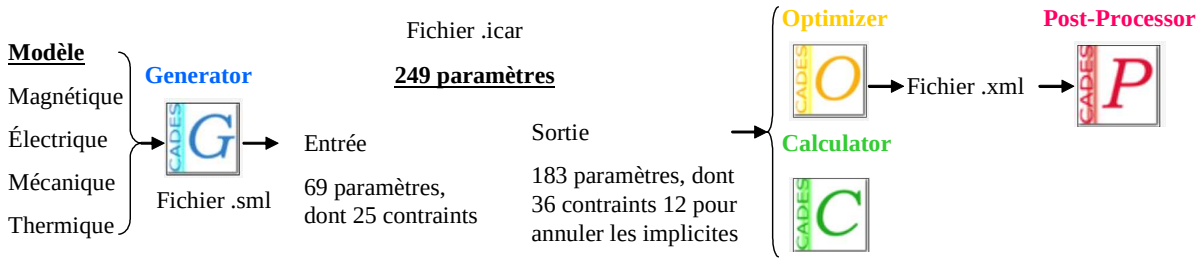


Figure 5. Hiérarchie des composants CADES.

- Generator Crée un fichier .icar (**I**nterface for **C**omponent **Ar**chitecture) utilisable par les composants optimizer et Calculator à partir de l'écriture sous forme de texte des équations analytiques du modèle.
- Calculator permet d'effectuer des études de sensibilité des sorties par rapport aux entrées.
- Optimizer permet la réalisation des optimisations à partir du modèle, du choix de l'algorithme d'optimisation et d'un cahier des charges.
- Post-Processor permet d'obtenir plusieurs informations sur le déroulement d'une optimisation, comme l'évolution de la valeur de chaque paramètre au cours des itérations dans le cas d'un algorithme déterministe, les paramètres en butée, mais aussi l'évolution de la géométrie du dispositif, à condition d'avoir écris un fichier Java qui décrit cette géométrie.

Les algorithmes de type SQP imposent l'utilisation de fonctions objectifs et de contraintes continues et dérivables [7], d'où l'impossibilité de traiter dès la phase de spécification le cas des grandeurs discrètes. Néanmoins, pour certaines grandeurs, ce problème peut être contourné en les considérant comme continues. C'est notamment le cas des grandeurs liées au bobinage (diamètre de fil, nombre de spires,…) puisque les combinaisons sont si nombreuses qu'il sera toujours possible en jouant sur un paramètre ou l'autre de bobiner la machine de façon à obtenir la tension souhaitée tout

en respectant les contraintes géométriques. Concernant d'autres paramètres discrets tels que le nombre de pôles ou d'encoches par exemple, il est beaucoup plus délicat de raisonner ainsi, car le nombre de valeurs est relativement restreint et penser que choisir le résultat le plus proche de celui fourni par l'algorithme peut conduire à des résultats totalement faux. C'est pourquoi il est plus prudent de fixer la valeur de ces paramètres dès la phase de spécification des contraintes. Bien entendu, cette méthode peut être très lourde si le nombre de paramètres discrets est important mais dans cette étude, seuls deux paramètres sont concernés (polarité et nombre d'encoches), ce qui permet d'utiliser cette démarche. La fonction objectif de l'optimisation est la minimisation du coût total des matières actives au point nominal de fonctionnement. Un autre problème lié à l'usage d'un algorithme déterministe est celui de minima locaux de la fonction objectif. C'est pourquoi toutes les optimisations ont été validées dans un second temps par l'utilisation d'un algorithme génétique [8]. Ceci permet de localiser systématiquement le minimum global, qui a ensuite été affiné par l'utilisation de l'algorithme SQP. Cette méthode est longue en terme de temps de calcul (entre 10 et 20 minutes contres quelques secondes pour le SQP seul) mais permet de s'assurer que le minimum fourni par SQP est bien le minimum global.

	Machine Initial	Optimisation 1	Optimisation 2
Coût des matières actives (€)	405,45	366,42	364,39
Couple (N,m)	271		
Échauffements (Tamb=40° C)	66	66	65
Puissance utile (kW)	85		
Tension aux bornes (V)	345,1	340	340
Courant (A)	167,2	167,2	167,2
Rendement (%)	95,9	95,9	95,9
Champ magnétique dans les aimants (kA/m)	433	440	454
Facteur de puissance	0,905	0,917	0,918
angle d'autopilotage (°)	24,31	27,9	27,72
Ratio Coût/Couple	1,5	1,35	1,35
Ratio Couple/kg	2,53	2,76	2,76
itérations en déterministe		35	33
itérations en génétique		12867	7344

Tableau 4. Résultats des optimisations

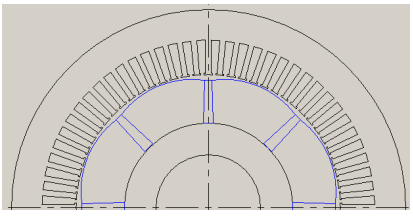


Figure 5. design Initial

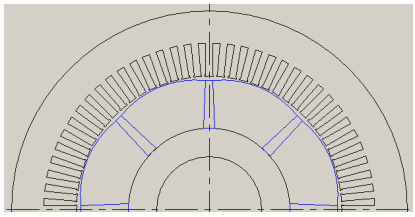


Figure 6. design Optimisation 1

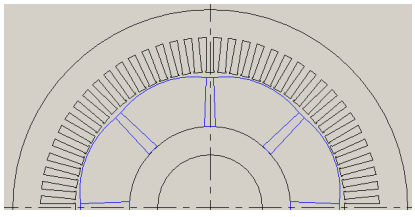


Figure 7. design Optimisation 2

Les figures 5, 6 et 7 sont les représentations graphiques des différentes optimisations ; l'optimisation 1 a été réalisée avec un diamètre d'alésage fixe et l'optimisation 2 avec un diamètre d'alésage libre. Les résultats du Tableau 4 montrent clairement que les machines optimisées offrent les mêmes performances que la machine initiale, mais pour un coût matières moins important. L'optimisation 1 apporte un gain de -9,63 en termes de coût des matières actives. L'optimisation 2 apporte un gain de 10,63 toujours en termes de coût matières. On pourra noter que le facteur de puissance est meilleur que celui de la structure initiale.

Optimisation Multi objectifs

Les optimisations précédentes ont été réalisées sur une seule machine et pour une vitesse particulière. Mais les designs ont besoin d'avoir un bon équilibre entre le coût et les performances.

C'est pourquoi en dehors du coût, le rendement, la compacité, le poids ainsi que le facteur de puissance sont tout aussi importants pour les designers. Ainsi, les courbes de Pareto permettent de traiter les problèmes d'optimisations multi objectif [9], où les objectifs ont tendance à aller dans des directions opposées. Ces courbes représentent un jeu d'optimisations basées sur les spécifications, elles sont un outil de décision très intéressant en conception.

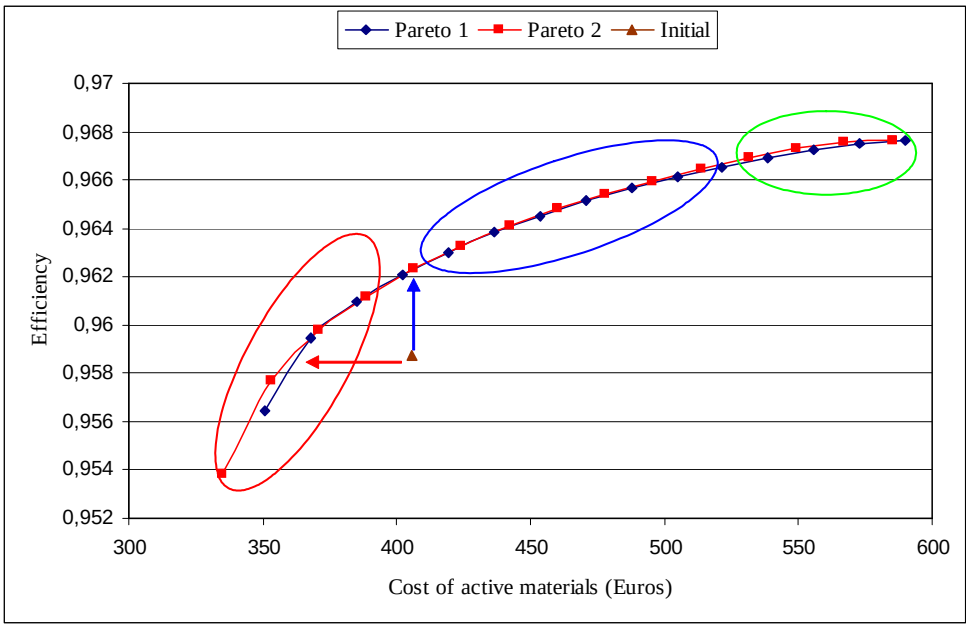


Figure 8. Courbes de Pareto

La courbe Pareto 1 a été réalisée avec un diamètre d'alésage fixe et la courbe Pareto 2 avec un diamètre d'alésage libre. Ces 2 courbes mettent en évidence 3 zones matérialisées par des ellipses rouge, bleu et vert.

- La zone rouge : Une faible augmentation du coût des matières actives entraîne une augmentation sensible du rendement.
- La zone bleue : C'est la zone la plus importante, le rendement n'est que légèrement affecté par l'augmentation du coût des matières actives.
- La zone verte : Dans cette zone on a plus intérêt à augmenter les coûts des matières actives, puisque le rendement n'augmente que très légèrement pour une forte augmentation de coût.

Ces courbes apportent d'autres informations intéressantes :

- Pour le même coût des matières actives, il est possible de faire une machine avec un rendement plus important et avec un meilleur facteur de puissance de 0,931.
- Pour un même rendement, il est possible de faire une machine à un coût des matières actives inférieur.

Optimisation des gammes

Jusqu'à maintenant, toutes les optimisations réalisées ont été indépendamment faites pour chaque machine, aussi bien pour les optimisations mono objectifs que pour des courbes de Pareto, or notre objectif principal est d'optimiser toute la gamme. Pour atteindre ce but et avoir une meilleure compréhension du comportement d'un groupe de machines. Nous avons utilisé une méthodologie qui nous a aidés à optimiser toutes nos machines.

Nous avons d'abord pensé que pour optimiser N machines en parallèle il suffisait de dupliquer le modèle N fois, cette méthode de procéder à montrer des limites parce que la taille du code à générer est tellement importante que seule une duplication est possible. Nous avons opté pour une autre méthode qui consiste à importer des composants .sml. Cette façon de procéder réduit le nombre des paramètres contraints en sortie (217 contre 324 pour la duplication), soit une réduction de 33%. En ce qui concerne le nombre des paramètres libres en sortie, il est très sensiblement réduit (64 contre 1323

pour la duplication) soit une réduction de plus de 95%, ce qui restreint considérablement la taille du code.

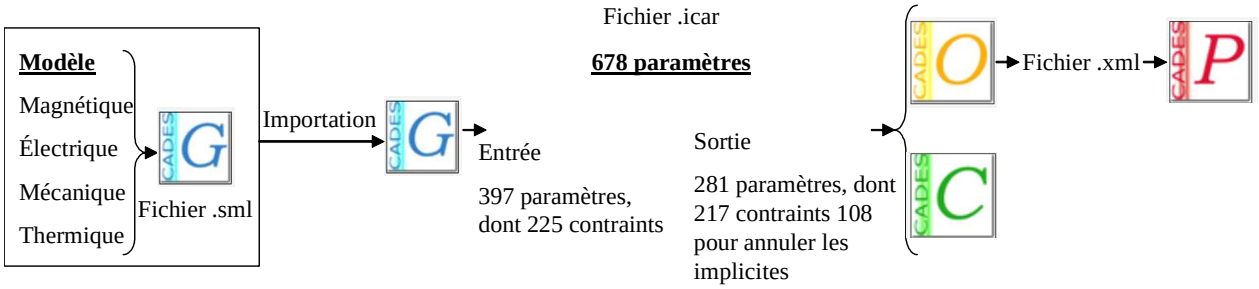


Figure 10. Hierarchie des composants CADES pour optimiser les gammes

Pour un diamètre de stator donné (pour garder le même carter), nous avons lancé l'optimisation pour différentes machines tournant à des vitesses différentes et pour des puissances et des longueurs différentes. Nous avons obtenu autant de designs optimaux (tôles et aimants) que de machines. Les résultats nous ont conduits, dans chaque cas à une conception optimale différente de feuilletage et d'aimants. Nous avons remarqué que certains designs étaient sensiblement proches, nous avons fait partager les éléments (tôles et aimants) à ces machines. Nous avons relancé l'optimisation et avons pu converger vers la structure optimale de la gamme. Les courbes de Pareto permettent d'effectuer le choix approprié.

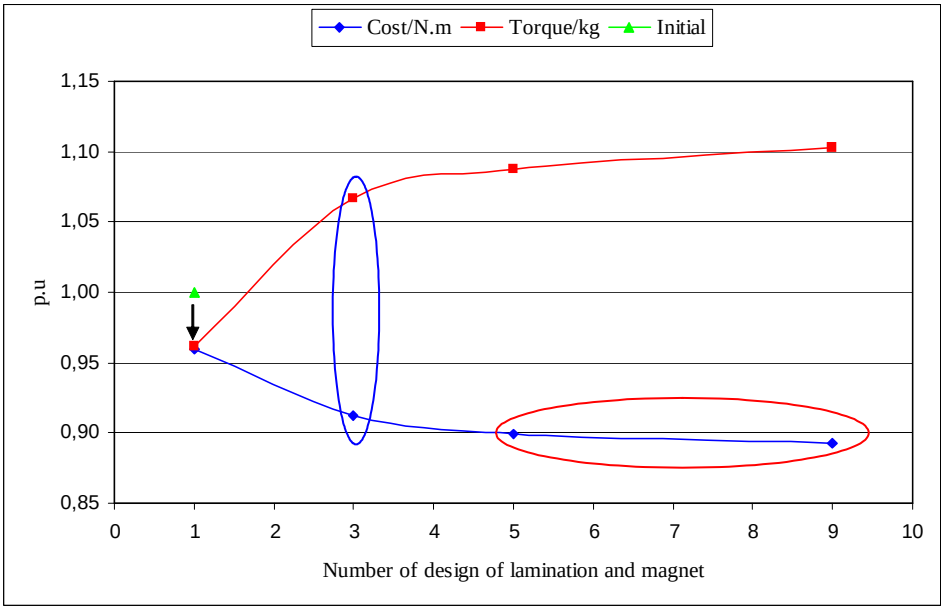


Figure 11. Pareto gamme

A partir de ces courbes nous pouvons noter que :

- Les résultats obtenus avec 5 tôleries différentes sont presque identiques à ceux obtenus avec 9. Mais l'impact en terme de coût d'industrialisation est plus important avec 9 tôleries (voir ellipse rouge).
- L'ellipse bleu montre qu'il est plus intéressant d'avoir 3 tôleries dans la gamme, en effet les gains ne sont pas importants quand on passe de 3 à 5 designs dans la gamme, alors qu'on observe une variation sensible quand on passe de 1 à 3 designs.
- La solution finale à 1 design est aussi intéressante (voir la flèche noire). Nous pouvons clairement voir qu'il est possible de réduire le coût/N.m, mais le ratio couple/kg est inférieur à celui de la configuration initiale.

Conclusion

Dans cet article nous avons parlé de l'optimisation de gamme de machines. Pour faire cette optimisation, nous avons commencé par établir un model analytique (magnétique et thermique). Ce

modèle a été validé expérimentalement par des essais. Nous avons opté pour ce type de modèle à cause du très grand nombre d'inconnues et des contraintes.

Ensuite le modèle a été intégré dans l'outil d'optimisation CADES. Les résultats des premières optimisations ont montrés qu'il est possible de réduire le coût des matières actives. Finalement nous avons mis au point une méthode pour optimiser toute la gamme, cette méthode consiste à faire partager les mêmes composants à plusieurs machines. Nous avons pu voir grâce aux courbes de Pareto que le choix idéal n'était celui d'avoir N designs pour N machines.

REFERENCES

[1] B. Delinchant, D. Duret, L. Estrabaut, L. Gerbaud, H. Nguyen Huu, B. du poux, H.L. Rakotoarison, F. Verdiere, F. Wurtz, "An Optimizer using the Software Component Paradigm for the Optimization of Engineering Systems", COMPEL, Vol. 26, Issue 2, pp 368-379, 2007.

[2] P. Enciu, F. Wurtz, L. Gerbaud, B. Delinchant, "Automatic Differentiation for Electromagnetic Models used in Optimization", COMPEL, (to be published).

[3] Powell M.J.D., "On the quadratic programming algorithm of Goldfarb and Idnani", Mathematical Programming Study 25, pp 46-61, 1985.

[4] C.Singh, D. Sarkar, "Practical considerations in the optimization of induction motor design", IEE-PROCEEDINGS-B, Vol. 139, N°4, pp 365-373, July 1992.

[5] Y. Bertin, "Refroidissement des machines électriques tournantes", Techniques de l'ingénieur, Doc D 3460.

[6] B. Multon, "Les machines synchrones autopilotées", Préparation à l'agrégation de génie électrique, E.N.S de CACHAN, pp 5, 1993-2004.

[7] C. Courtel, F. Wurtz, J. Bigeon, A comparative study of two methods for constrained optimisation with implicit parameters, Proc. of CEFC98, June 1998, Tucson, USA.

[8] Olivier Gizolme, Modelisation et Optimisation d'une machine synchrone et de son alimentation pour la traction électrique, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1997, pp 84-85.

[9] D. Magot, "Méthodes et outils d'aide au dimensionnement. Application aux composants magnétiques et aux filtres passifs", Thèse de doctorat de l'INPG, pp. 54-58, 2004.