

# Optimisation mécatronique d'un multiplicateur magnétique pour le grand éolien

M. DESVAUX<sup>a</sup>

a. Laboratoire SATIE, ENS Rennes, Université de Bretagne Loire, UMR CNRS 8029

## Résumé :

*Afin d'optimiser le coût des éoliennes, on choisit souvent d'insérer entre la turbine et la génératrice un multiplicateur de vitesse mécanique à engrenages. Son intérêt est de réduire le coût de la génératrice électrique via la réduction de son couple mécanique. Malheureusement, les multiplicateurs mécaniques sont sujet à des défaillances qui augmentent le coût de fonctionnement de l'éolienne. Ainsi les coûts de maintenance peuvent devenir si importants que certains industriels cherchent à se passer de ce composant, tout particulièrement dans les applications offshore. Parmi les solutions alternatives aux chaînes de conversion à multiplicateur mécanique, une voie innovante consiste à remplacer le multiplicateur à engrenages par une technologie magnétique. Pour évaluer de façon pertinente une telle solution, il est indispensable d'adopter une approche transversale mécatronique considérant à la fois les aspects magnétiques et mécaniques. Une telle approche est originale et pour la mener à bien, il a été nécessaire de développer des modèles multi-physiques afin d'évaluer les performances. Ainsi, les travaux de cet article s'appuient sur l'élaboration de modèles électromagnétiques, mécaniques et thermiques d'une architecture de multiplicateur magnétique. Pour mener à bien une optimisation globale, ces modèles doivent être très performants en termes de compromis temps de calcul / précision. Nous présentons dans cet article une optimisation globale des parties magnétiques et mécaniques d'un multiplicateur magnétique pour une éolienne multi-mégawatt et nous montrons qu'une approche mécatronique permet d'obtenir de meilleurs résultats qu'une méthode traditionnelle consistant à découpler les dimensionnements magnétiques et mécaniques.*

**Mots clefs : Optimisation, mécatronique, éolienne, multiplicateur magnétique**

## 1 Introduction

L'un des objectifs de cette thèse était de fournir des indications sur la pertinence d'intégrer des multiplicateurs magnétiques dans une chaîne éolienne de forte puissance. Pour atteindre cet objectif, nous pensons que seule une optimisation globale d'un multiplicateur magnétique permettrait d'apporter une première réponse. Nous avons alors réalisé cette optimisation en considérant un critère de masse pour l'architecture de multiplicateur magnétique appelé Type I [1]. Pour réaliser une optimisation globale d'un tel système, nous avons développé durant cette thèse des modèles permettant de considérer :

- le couple magnétique transmissible par le système, évalué à partir du modèle analytique basé sur la méthode des sous-domaines [2] ;

- l'induction maximale dans les parties ferromagnétiques évaluée aussi à partir de la méthode des sous-domaines [3] ;
- les pertes magnétiques (uniquement pour l'architecture de Type I), à partir des modèles analytiques [4] ;
- les efforts radiaux et tangentiels magnétiques, calculés analytiquement à partir du tenseur de Maxwell [5] ;
- les déplacements et contraintes engendrés par les différents chargements, évalués analytiquement à partir d'un modèle MMC pour les structures en tube, d'un modèle plaque mince pour les structures en disque [6] et d'un modèle multi-corps pour la couronne de plots [7] ;
- la température maximale à fonctionnement nominal associée aux pertes magnétiques, et déterminée analytiquement par un réseau de résistances thermiques avec un refroidissement à air en convection forcée [6].

A partir de ces modèles, nous souhaitons réaliser pour une optimisation bi-objectif mécatronique. Afin de mettre en évidence l'optimum mécatronique de masse, nous choisissons deux objectifs à minimiser, pas nécessairement contradictoires, les masses des parties magnétiques et mécaniques. Ensuite, l'objectif sera la minimisation de la masse totale.

## 2 Dimensions imposées par l'application

En accord avec notre partenaire industriel (Jeumont Electric), nous appliquons cette étude à une chaîne éolienne de 6 MW à 12,5 tr/min. La grandeur la plus dimensionnante pour le multiplicateur magnétique est alors le couple nominal à transmettre  $T_{rated}$  que nous fixons à 4,6 MNm. Les lois d'échelle des machines électriques font que la densité de couple d'un système électromagnétique augmente en fonction du diamètre de la machine. Même si le principe des engrenages magnétiques n'est pas soumis aux pertes par effet Joule de ces dernières et que ses lois d'échelle sont sensiblement différentes, le diamètre a également un effet positif sur la densité de couple [8]. Or, les dimensions de la nacelle de l'éolienne et les contraintes de transport conduisent à une contraintes sur le diamètre extérieur  $D$ .

## 3 Variables d'optimisation

Pour éviter d'obtenir des solutions absurdes, il est important de définir des plages de valeurs pertinentes pour les variables. Les différentes variables magnétiques et les plages de valeurs associées sont présentées Figure 1 et Tableau I. La Figure 2 et le Tableau II présentent les différentes variables mécaniques et les plages de valeurs associées

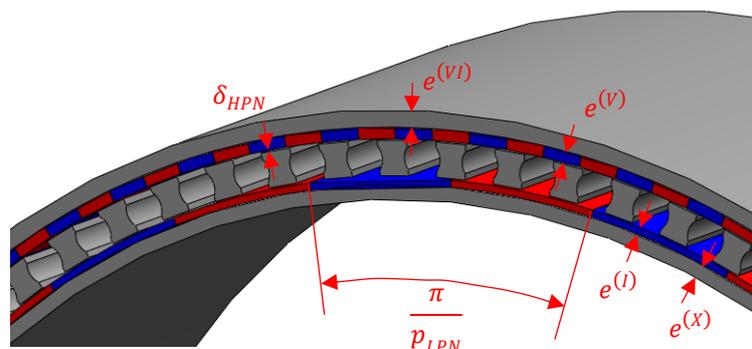


Figure 1. Description des variables d'optimisations magnétiques de l'architecture de Type I avec couronne HPN fixe.

TABLEAU I  
VARIABLES D'OPTIMISATION MAGNETIQUE ET PLAGES DE VALEURS ASSOCIEES POUR L'OPTIMISATION  
DE L'ARCHITECTURE DE TYPE I AVEC COURONNE D'AIMANTS HPN FIXE

Symbole	Désignation	Valeur min	Valeur max
$e^{(X)}$	Epaisseur de la culasse LPN	10 mm	100 mm
$e^{(I)}$	Epaisseur des aimants LPN	10 mm	60 mm
$e^{(V)}$	Epaisseur des aimants HPN	10 mm	60 mm
$e^{(VI)}$	Epaisseur de la culasse HPN	10 mm	100 mm
$\delta_{LPN}$ = $\delta_{HPN}$	Epaisseur des entrefers LPN et HPN	5 mm	20 mm
$p_{LPN}$	Nombre de paires de pôles LPN	4	50

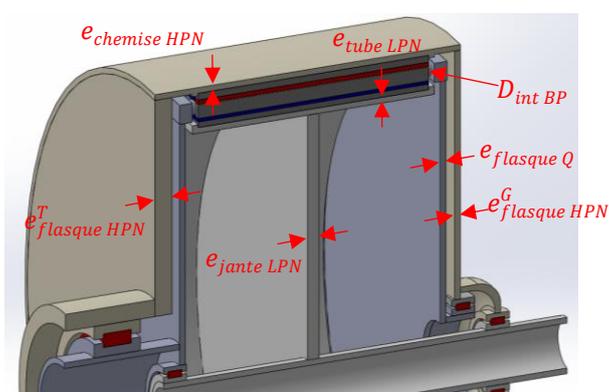


Figure 2. Description des variables d'optimisation mécanique de l'architecture Type I avec la couronne HPN fixe.

TABLEAU II  
VARIABLES D'OPTIMISATION MECANIQUE ET PLAGES DE VALEURS ASSOCIEES POUR L'OPTIMISATION  
DE L'ARCHITECTURE DE TYPE I AVEC COURONNE D'AIMANTS HPN FIXE

Symbole	Désignation	Valeur min	Valeur max
$e_{tube LPN}$	Epaisseur du tube LPN	10 mm	80 mm
$e_{chemise HPN}$	Epaisseur de la chemise HPN	10 mm	80 mm
$e_{jante LPN}$	Epaisseur de la jante LPN	20 mm	200 mm
$e_{flasque Q}$	Epaisseur du flasque de la couronne de plots	20 mm	200 mm
$e_{flasque HPN}^G$	Epaisseur du flasque HPN côté génératrice	20 mm	200 mm
$e_{flasque HPN}^T$	Epaisseur du flasque HPN côté turbine	50 mm	300 mm
$D_{int BP}$	Diamètre intérieur des barres porteuses	$0.5 * D_{ext BP}$	$0.9 * D_{ext BP}$

## 4 Contraintes d'optimisation

Dans cette procédure d'optimisation mécatronique, nous avons défini des contraintes à la fois magnétiques, mécaniques et thermiques.

### 4.1 Contraintes d'optimisation magnétique

Compte tenu de nos hypothèses de régime linéaire mais également de la nécessité de limiter les pertes magnétiques, nous souhaitons limiter l'induction à une valeur de 1,5 T au sein des parties ferromagnétiques.

### 4.2 Contraintes d'optimisation mécanique

Concernant la structure porteuse, nous définissons des contraintes d'optimisation en contrainte mécanique maximale et des limites de déplacement notamment dans les zones d'entrefer. Les structures porteuses de l'architecture de Type I se décomposent en sept sous-parties correspondant aux variables mécaniques décrites sur la Figure II:

- tube LPN avec la variable associée à son épaisseur  $e_{tube\ LPN}$  ;
- jante LPN avec la variable associée à son épaisseur  $e_{jante\ LPN}$  ;
- barres porteuses avec la variable associée à leur diamètre intérieur  $D_{int\ BP}$  ;
- deux flasques (identiques) de la couronne de plots avec la variable associée à leur épaisseur  $e_{flasque\ Q}$  ;
- chemise HPN avec la variable associée à son épaisseur  $e_{chemise\ HPN}$  ;
- flasque HPN côté génératrice avec la variable associée à son épaisseur  $e_{flasque\ HPN}^G$  ;
- flasque HPN côté turbine avec la variable associée à son épaisseur  $e_{flasque\ HPN}^T$ .

Pour chacune d'elles, nous vérifions que la contrainte de Von Mises  $\sigma_{VM\ k}^{Type\ I}$  reste inférieure à la limite élastique du matériau  $\sigma_e$ . Afin de réduire le nombre de contraintes d'optimisation vues par l'algorithme, elles sont regroupées en comparant la contrainte de Von Mises la plus élevée à la limite élastique ( $\max(\sigma_{VM\ k}^{Type\ I}) < \sigma_e$ ).

Les contraintes des différentes flasques et de la jante LPN sont déterminées à partir du modèle MAPM (modèle analytique par plaque mince) [6]. Les contraintes sur la chemise HPN et le tube LPN sont déterminées à partir du modèle MATI (modèle analytique par tube infini) [6]. Et les contraintes au niveau des barres porteuses sont déterminées à partir du modèle analytique multi-corps (incluant un modèle de dimensionnement de type poutre) [7]. Concernant les contraintes d'optimisation en déplacement, nous vérifions que les déplacements radiaux, en fonctionnement, restent inférieurs à 10% de l'entrefer  $\delta_{LPN}$  et que les déplacements axiaux, en position verticale, restent inférieurs à 2% de la longueur magnétique  $L$  (I), comme proposé dans [9][10].

$$\left\{ \begin{array}{l} u_r^{Type I} \max tube LPN < 0,1 * \delta_{LPN} \\ z_{max}^{Type I} jante LPN < 0,02 * L \\ x_{Type I}^{(q)} < 0,1 * \delta_{LPN} \\ z_{max}^{Type I} flasque Q < 0,02 * L \\ u_r^{Type I} \max chemise HPN < 0,1 * \delta_{HPN} \\ z_{max}^{Type I} flasque G HPN < 0,02 * L \\ z_{max}^{Type I} flasque T HPN < 0,02 * L \end{array} \right. \quad (I)$$

Parallèlement, les contraintes de déplacement (tout comme celles en contrainte de Von Mises) seront utilisées afin d'optimiser en local les variables mécaniques. Afin de réduire le nombre de contraintes d'optimisation vues par l'algorithme, elles peuvent être regroupées en deux ensembles comme le montrent les équations (II) et (III).

$$\max(u_r^{Type I} \max tube LPN, x_{Type I}^{(q)}, u_r^{Type I} \max chemise HPN) < 0,1 * \delta_{LPN} \quad (II)$$

$$\max(z_{max}^{Type I} jante LPN, z_{max}^{Type I} flasque Q, z_{max}^{Type I} flasque G HPN, z_{max}^{Type I} flasque T HPN) < 0,02 * L \quad (III)$$

Avec ces regroupements de contraintes, nous avons finalement réduit à trois les contraintes d'optimisation mécanique.

### 4.3 Contraintes d'optimisation thermique

Comme nous l'avons décrit en section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, nous intégrons à la procédure d'optimisation un modèle thermique en fonctionnement nominal, en considérant un système de refroidissement à convection forcée axiale. Pour minimiser le dimensionnement du système de ventilation, nous choisissons de raisonner à débit d'air fixe (recommandation de Jeumont Electric). Nous vérifions alors qu'avec une ventilation composée de  $N_v$  ventilateurs (de débit  $Q_v$ ) offrant un débit global  $N_v \cdot Q_v = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ , les élévations de température maximales  $\Delta T_{max}^{Type I}$  restent inférieures à  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  dans les régions d'aimants

## 5 Procédure d'optimisation

Le problème d'optimisation de l'architecture de Type I comprend deux objectifs ( $Obj_1$  et  $Obj_2$ ), six variables globales  $[X_k^{Type I}]_6$ , sept variables locales  $[Y_k^{Type I}]_7$  et cinq contraintes  $[C_k^{Type I}]_5$ . Dans une procédure d'optimisation bi-objectif, l'algorithme a pour rôle de trouver les jeux de paramètres présentant les meilleurs compromis vis à vis des deux objectifs de masses magnétique et mécanique, tels qu'ils ont été définis en section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Pour trouver ces compromis, nous utilisons un algorithme basé sur la méthode des essais particuliers (PSO) [11]. Cette méthode d'optimisation, s'inspire du monde du vivant, en traduisant avec un modèle simple, le comportement social d'individus dans un groupe. Contrairement aux algorithmes génétiques qui s'appuient sur la compétition entre individus, la méthode des essais particuliers préfère encourager la collaboration. Chaque individu a accès à des informations venant de ses proches voisins mais aussi à une mémoire primaire de ses expériences passées. Il peut ainsi modifier son comportement et progresser dans son environnement.

La procédure d'optimisation que nous avons réalisée est décrite Figure 3 :

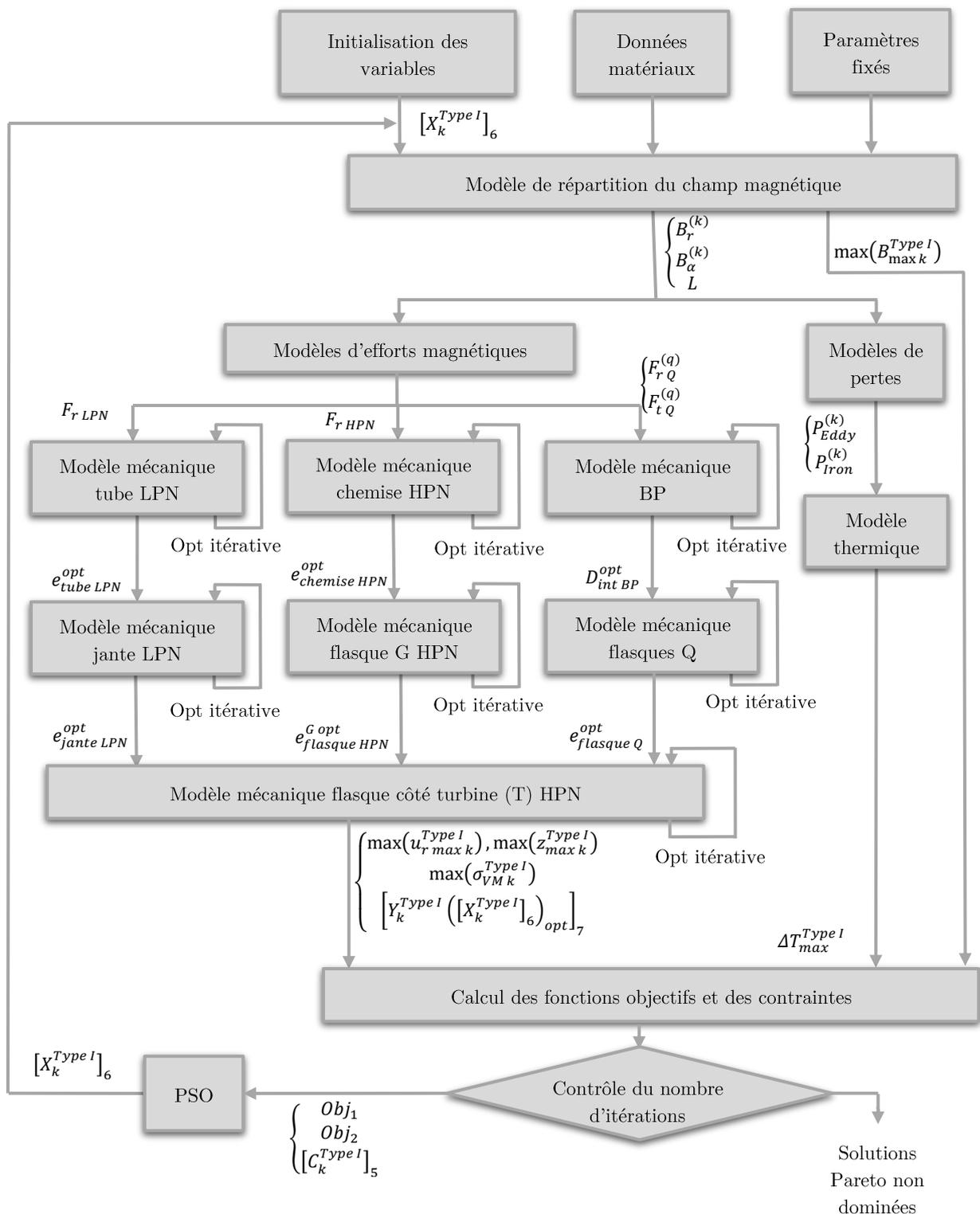


Figure 3. Description de la procédure d'optimisation.

La procédure d'optimisation de l'architecture de Type I est réalisée avec 120 particules, 60 itérations pour 4 rapports de multiplication  $G_{magn}$  différents ( $G_{magn} \in \{2, 4, 6, 8\}$ ). L'optimisation contient 20 fois plus de particules que de variables globales. En moyenne, le cycle d'évaluation d'une

particule prend 30 secondes avec un Intel Xeon E5-1630 v3, 3.70 GHz, 8 cœurs. Pour les quatre rapports de multiplication, le temps de calcul total est de 10 jours.

## 6 Résultats

La Figure 4 permet d'observer l'évolution de l'objectif  $Obj_2$  (masse mécanique  $M_{mech}$ ) en fonction de l'objectif  $Obj_1$  (masse magnétique  $M_{magn}$ ) que l'on obtient pour les différents rapports de multiplication  $G_{magn}$ .

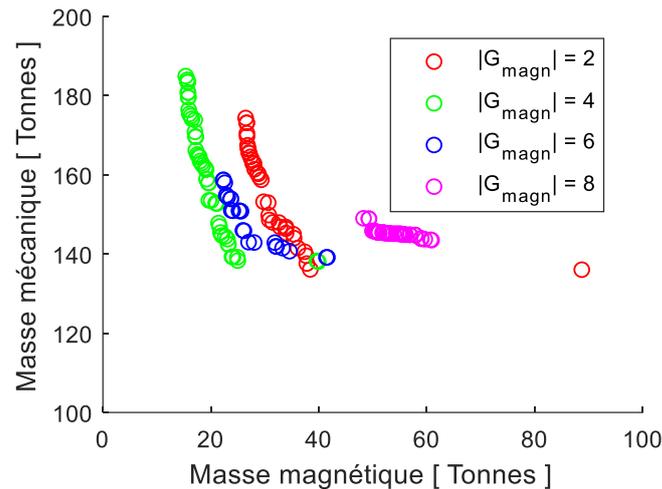


Figure 4. Résultats d'optimisation : évolution de l'objectif masse mécanique en fonction de l'objectif masse magnétique pour 4 valeurs du rapport de multiplication  $G_{magn}$ .

Un autre point important que nous voulions analyser à travers cette thèse est l'impact d'une optimisation mécatronique. Nos travaux permettent en effet de quantifier l'intérêt de mener une telle optimisation globale (optimisation mécatronique en couplage fort). L'optimisation bi-objectif masse magnétique - masse mécanique permet d'obtenir l'évolution de la masse totale ( $M_{magn} + M_{mech}$ ) en fonction de la masse magnétique  $M_{magn}$  pour les différents fronts de Pareto (voir Figure 5).

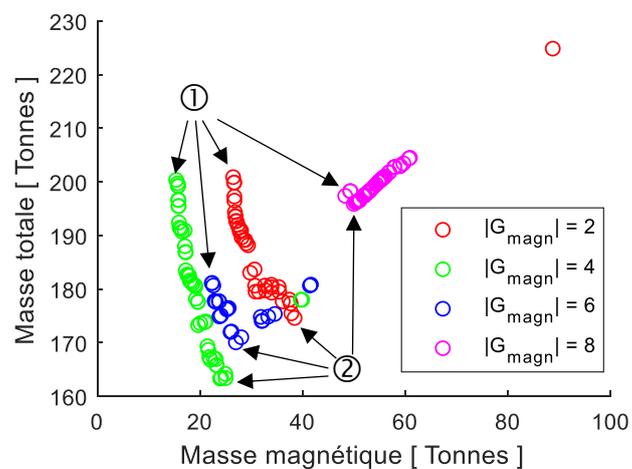


Figure 5. Evolution de la masse totale ( $M_{magn} + M_{mech}$ ) en fonction de la masse magnétique  $M_{magn}$  pour les fronts de Pareto des différents rapports de multiplication  $G_{magn}$ .

$$\textcircled{1} = (M_{magn})_{min} + (M_{mech}(M_{magn})_{min})_{min} \quad (IV)$$

$$\textcircled{2} = (M_{magn} + M_{mech})_{min} \quad (V)$$

Sur la Figure 5, les points minimisant la masse magnétique (le point le plus à gauche des graphes pour un rapport de multiplication  $G_{magn}$  donné) correspond à une optimisation des parties magnétiques puis à une optimisation des parties mécaniques (appelé aussi optimisation mécatronique en couplage faible). On définit alors ces points comme étant les points  $\textcircled{1}$  (IV). Pour les différents rapports  $G_{magn}$ , on observe que les points qui minimisent la masse magnétique ne correspondent pas aux plus faibles masses totales. Les points qui minimisent la masse totale correspondent alors aux optimums mécatroniques de l'ensemble {partie magnétique + partie mécanique} correspondant aux points  $\textcircled{2}$  (V). La démarche d'optimisation mécatronique permet alors de réaliser des gains de masse compris entre 15 tonnes et 40 tonnes en fonction des rapports de multiplication.

## 7 Conclusion

La procédure d'optimisation que nous avons développée a permis de valider l'intérêt de mener une optimisation mécatronique en couplage fort. En effet, nous avons obtenu un gain sur la masse totale compris respectivement entre 15 tonnes et 40 tonnes pour les rapports de multiplication  $G_{magn} = 4$  et  $G_{magn} = 6$ , qui nous semblent offrir le meilleur compromis masse totale – rapport de multiplication. Cela correspond à un gain relatif sur la masse totale compris entre 8% et 20%. La prise en compte de critères de coût pourra changer ces résultats, mais il est actuellement impossible d'imaginer ce qu'ils seront.

Le rapport de multiplication est une variable clé d'optimisation du dimensionnement de la chaîne de conversion complète (FMID). Dans ces conditions, il est alors nécessaire d'intégrer la génératrice au problème. Seulement, compte tenu de la lourdeur des calculs, il sera nécessaire d'adopter des approches astucieuses, par exemple de mener des optimisations séparées du multiplicateur et de la machine en fonction du paramètre intermédiaire  $G_{magn}$  et/ou d'adopter des techniques de réduction de modèles.

## Références

- [1] K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe, "Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear," *IEE Proc - Electr. Power Appl.*, vol. 151, no. 2, pp. 135–143, 2004.
- [2] M. Desvaux, B. Traullé, R. Le Goff Latimier, S. Sire, B. Multon, and H. Ben Ahmed, "Computation Time Analysis of the Magnetic Gear Analytical Model," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 5, pp. 1–10, 2017.
- [3] M. Desvaux, B. Multon, S. Sire, and H. Ben Ahmed, "Analytical Iron Loss Model for the Optimization of Magnetic Gear," *IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. 2017, IEMDC2017*, 2017.
- [4] M. Desvaux, S. Sire, S. Hlioui, B. Multon, and H. Ben Ahmed, "Development of a Hybrid Analytical Model for a Fast Computation of Magnetic Losses and Optimization of Coaxial Magnetic Gears," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. Submitted, 2018.
- [5] M. Desvaux, B. Multon, H. Ben Ahmed, and S. Sire, "Magneto-mechanical analysis of magnetic gear pole pieces ring from analytical models for wind turbine applications," *Wind Eng.*, vol. 42, no. 4, pp. 276–285, 2018.
- [6] M. Desvaux, "Optimisation mécatronique de multiplicateurs magnétiques pour le grand éolien," *Ecole Normale Supérieure de Rennes (ENS Rennes)*, 2018.

- 
- [7] M. Desvaux, B. Multon, H. Ben Ahmed, and S. Sire, “Supporting the laminated ferromagnetic pole pieces in a magnetic gear : a structure behaviour analysis from a multibody model,” in *6th International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics – MuSMe2017*, 2017, pp. 85–94.
  - [8] B. Multon, H. Ben Ahmed, M. Ruellan, and G. Robin, “Comparaison du couple massique de diverses architectures de machines tournantes synchrones à aimants,” *Rev. l’Electricité l’Electronique*, vol., p. 85, 2006.
  - [9] A. S. McDonald, M. A. Mueller, and H. Polinder, “Structural mass in direct-drive permanent magnet electrical generators,” *IET Renewable Power Generation*. 2008.
  - [10] A. Zavvos, A. S. Mcdonald, and M. Mueller, “Structural optimisation tools for iron cored permanent magnet generators for large direct drive wind turbines,” in *IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011)*, 2011.
  - [11] R. Eberhart and J. Kennedy, “A new optimizer using particle swarm theory,” *MHS’95. Proc. Sixth Int. Symp. Micro Mach. Hum. Sci.*, pp. 39–43.