



DIMENSIONNEMENT D'UN ACTIONNEUR LINEAIRE A HAUTE DYNAMIQUE POUR POMPES A MEMBRANES

VIVIER Stéphane, LEMOINE Didier, FRIEDRICH Guy
Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne
stephane.vivier@utc.fr, didier.lemoine@utc.fr, guy.friedrich@utc.fr

Résumé

Les pompes à membranes sont utilisées dans de nombreuses applications (cœurs artificiels, etc. [1]). Cependant, elles fonctionnent par mouvements alternatifs, qu'il devient difficile à assurer pour des fréquences mécaniques importantes, en particulier lorsque des systèmes de transformations de mouvement (tels que les cames) sont utilisés. Ce type d'actionneur doit tenir compte de diverses contraintes et spécifications, telles que, 1) une partie mobile de masse relativement importante par rapport à celle de la membrane, 2) une (très) grande dynamique demandée, 3) un environnement à hautes températures.

En raison de la dynamique importante demandée, une structure résonnante (i.e. avec au moins un ressort) de l'actionneur est utilisée [2]. De plus, les fortes contraintes thermiques ont écarté l'utilisation d'aimants permanents.

Cet article présente la structure à réluctance variable retenue, décrit les modèles correspondants ainsi que les processus d'optimisation utilisés pour se conformer in fine à un cahier des charges donné.

Plusieurs démarches d'optimisation sont menées : la première utilise l'algorithme séquentiel du simplexe, alors que la seconde se base sur une technique de type *space mapping* [3]. Des résultats sont donnés pour une alimentation électrique particulière.

Mots Clés. Actionneur linéaire, Eléments finis, Réseau de réluctances, Optimisation, Méthode séquentielle de simplexe, Space mapping

MODELISATIONS DE L'ACTIONNEUR

Présentation

Cette étude se base sur le cahier des charges suivant.

De manière générale, on cherche à déplacer linéairement le pourtour d'une membrane de pompe selon un mouvement le plus sinusoïdal possible, avec une fréquence (propre) f_0 devant être supérieure ou égal à 200 Hz.

Le débattement maximum appliqué au pourtour de la membrane est noté δ et est fixé 8 mm (+/-4 mm).

Une force supérieure ou égale à 360 N doit être appliquée au pourtour de la membrane, lorsque celle-ci est en position médiane (i.e. à $\delta/2$).

Ce contexte particulier d'utilisation de l'actionneur a conduit à opérer des choix quant à la structure de l'actionneur.

La génération d'un mouvement linéaire à haute fréquence (et avec de grands efforts) peut être réalisée par un système classique de transformation de mouvement rotation-translation appliqué en sortie d'arbre d'un moteur. Cette solution présente deux inconvénients majeurs : elle n'est que de peu d'intérêt du point de vue du dimensionnement du moteur, et elle se situe en limite technologique du point de vue mécanique (cela fait appel à des solutions utilisées en Formule 1). Dans ce contexte, la solution de l'actionneur linéaire a été retenue. De plus, la nécessité de hautes fréquences appelle assez naturellement au recours à une structure résonnante, c'est-à-dire utilisant des systèmes intermédiaires de stockage d'énergie tels que des ressorts.

Enfin, compte tenu de la forte température probable de l'environnement de l'actionneur, il a été décidé de ne pas utiliser d'aimant permanent. La structure de l'actionneur est donc purement passive (à réluctance variable).

Diverses considérations annexes ont conduit à la structure suivante.

L'actionneur est composé de 2 bobinages alimentés séparément.

La partie mobile, libre de se mouvoir linéairement et verticalement, possède une section de coupe trapézoïdale. Elle est liée à la membrane et à un ou deux ressorts (non représentés), eux-mêmes attachés à des références fixes. Les dimensions choisies sont telles que le flux magnétique ne traverse qu'un seul grand entrefer (e_1) correspondant à la zone de déplacement de la partie mobile. L'autre entrefer (e_2) est minimal et sert de guide mécanique à la translation.

Cette configuration présente ainsi un avantage certain par rapport à la structure « classique » utilisée pour les soupapes électromagnétiques [2].

En raison de son utilisation et de son lieu d'installation, un espace cylindrique intérieur doit être respecté, donnant de facto à l'actionneur une forme axisymétrique. La partie mobile est donc un anneau ferromagnétique.

La Figure 1 représente la partie droite de la coupe de la structure axisymétrique de l'actionneur. Elle fait apparaître les grandeurs caractéristiques entrant dans la définition de la machine.

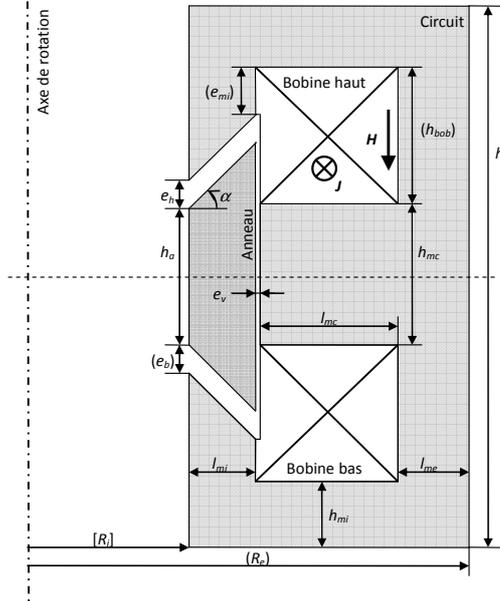


Figure 1. Géométrie axisymétrique de l'actionneur

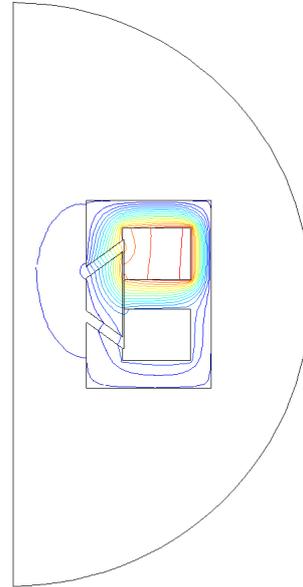


Figure 2. Exemple de lignes de champ du modèle éléments finis

Certaines dimensions sont fixées par le cahier des charges. Il s'agit en premier lieu du rayon intérieur R_i de l'actionneur, tenant compte de l'espace réservé pour le passage du tube d'évacuation du fluide. L'épaisseur de l'entrefer vertical e_v est elle-aussi fixée, de la même manière que pour le débattement maximum δ de la partie mobile de l'actionneur solidaire de la membrane.

Les problèmes de dimensionnement et d'optimisation présentés plus loin auront la capacité de modifier les valeurs des paramètres d'entrée (également appelés *facteurs*), dont les définitions sont données par le Tableau 1.

Tableau 1. Grandeurs variables (*facteurs*)

	Nom	Borne inf.	Borne sup.	Unité	Description
Circuit magnétique fixe					
1	h	50	150	mm	Hauteur totale circuit
2	l_{mi}	0.5	30	mm	Largeur circuit branche intérieure
3	l_{mc}	0.5	30	mm	Largeur circuit branche extérieure
4	h_{mi}	0.5	30	mm	Hauteur circuit (branches périphériques)
5	l_{mc}	0.5	30	mm	Largeur circuit branche centrale
6	h_{mc}	0.5	30	mm	Hauteur circuit branche centrale
Anneau mobile					
7	h_a	0.5	30	mm	Hauteur anneau côté intérieur
8	e_b	0	δ	mm	Hauteur d'entrefer haut
Grandeurs communes					
9	α	0	75	deg	Inclinaison des « entrefers » horizontaux
Alimentation électrique					
10	J	0	10	A/mm ²	Densité de courant bobine haute

Sans perte de généralité, on fera par la suite l'hypothèse de l'utilisation de 2 ressorts, de raideurs k_b et k_b de longueurs à vide l_b et l_b et d'allongements δ'_b et δ'_b à l'équilibre, respectivement.

Approche dynamique

Cette partie a pour objet de définir certaines grandeurs liées à la dynamique de la partie mobile, qui seront reprises dans les démarches d'optimisation à venir.

On rappelle que la fonction de l'actionneur est l'application d'un mouvement linéaire, le plus sinusoïdal possible, aux points d'accroche d'une membrane de pompe. On note $x(t)$ la position de la membrane en fonction du temps.

Le bilan des forces principales appliquées aux points d'accroche de la membrane, est alors le suivant :

- le poids $\vec{P} = -M \cdot g \vec{u}_x$: on fait ici l'hypothèse que l'actionneur est vertical et que le poids agit entièrement sur la partie mobile ; M est la masse totale en mouvement ; M comprend donc la masse de la membrane, celle de son système d'accroche ainsi que celle de la partie mobile de l'actionneur ; on fera l'hypothèse que le mouvement (i.e. la déformation) des ressorts n'induit pas une masse équivalente supplémentaire ;

- la force globale « de rappel » des 2 ressorts attachés à la membrane : $\vec{T}_R = \vec{T}_{Rb} + \vec{T}_{Rb}$ avec $\vec{T}_{Rb} = -k_b(\delta_b + x)\vec{u}_x$ et $\vec{T}_{Rb} = -k_b(-\delta_b + x)\vec{u}_x$;

- la force exercée par la membrane elle-même ; on fait l'hypothèse qu'elle correspond à un frottement de type visqueux, d'où $\vec{F}_m = -\lambda \cdot dx/dt \vec{u}_x$, avec λ le coefficient de frottement visqueux ;

- la force électromagnétique, créée par l'actionneur : \vec{F}_{em} : son expression doit être déterminée ;

- la force d'accélération : $\vec{F}_{acc} = M \cdot d^2x/dt^2 \vec{u}_x$.

En prenant par hypothèse $x=0$ à l'équilibre, et en posant $k = k_b + k_b$ la raideur équivalente totale des 2 ressorts, l'équation différentielle correspondante est alors :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\lambda}{M} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{k}{M} \cdot x = \frac{F_{em}(x(t))}{M}$$

Il a été mis en exergue dans la relation précédente, le fait important que la force d'origine électromagnétique est fortement fonction de la variable de position $x(t)$ (ce point est montré dans les paragraphes à suivre).

Si l'on exprime le mouvement $x(t)$ de la partie mobile en fonction du temps, dans le cas d'un mouvement libre (sans apport d'énergie extérieure au cours du mouvement : donc pour $F_{em}=0$ N), on déduit la position $x(t)$:

$$x(t) = X_0 \cdot e^{-a \cdot \omega_0 \cdot t} \left(\cos(\omega t) + \frac{a}{\sqrt{1-a^2}} \cdot \sin(\omega t) \right)$$

Ce résultat est établi en considérant une position initiale $x(t=0) = X_0$ et une vitesse correspondante nulle ($v(t=0) = 0$). De plus, on note $\omega_0 = \sqrt{k/M}$ la pulsation propre, $a = \lambda/2 \cdot \omega_0 \cdot M$ le coefficient d'amortissement et $\omega = \omega_0 \cdot \sqrt{1-a^2}$ la pseudo-pulsation. Puisque l'on recherche un régime oscillatoire (s'appliquant à la membrane), on ne considérera que les configurations d'amortissement faible pour lesquelles $(0 < a < 1)$.

Ce fonctionnement n'est pas « idéal », compte tenu de l'amortissement, c'est-à-dire en raison de l'existence de la force de frottement visqueux due principalement à la membrane (\vec{F}_m).

L'énergie perdue par l'existence de cette force peut être idéalement réinjectée via le travail de la force d'origine électromagnétique \vec{F}_{em} . En d'autres termes, si il est possible de créer une force électromagnétique \vec{F}_{em} exactement égale à la force de frottement visqueux \vec{F}_m , on aboutira à une équation de mouvement décrivant un mouvement harmonique :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{M} \cdot x = 0$$

Pour laquelle la solution est $x(t) = X_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)$. L'hypothèse utilisée ci-dessus ($\vec{F}_{em} = \vec{F}_m$) signifie notamment que les deux ressorts fournissent par eux-mêmes les efforts d'accélération ($\vec{T}_{Rb} + \vec{T}_{Rb} = \vec{F}_{acc}$).

Elle implique également que l'expression « idéale » de la force devant être développée par l'actionneur, est :

$$F_{em} = -\lambda \cdot X_0 \cdot \omega_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)$$

La configuration la plus importante est celle correspondant au mobile en position médiane ($x=0$), c'est-à-dire pour $t = T_0/4$. Pour le cas où l'anneau mobile est décalé initialement de $X_0 = \delta/2$:

$$F_{em,0} = |F_{em}(T_0/4)| = \lambda \cdot \omega_0 \cdot X_0 = \pi \cdot \lambda \cdot f_0 \cdot \delta$$

Cette relation démontre la dépendance linéaire de la force électromagnétique à fournir (à la position médiane) à la fréquence propre d'oscillation (f_0) et au débattement maximum de l'anneau mobile (δ).

Enfin, les réductances \mathcal{R}_{gb} , \mathcal{R}_{gb} , \mathcal{R}_{fb} et \mathcal{R}_{fb} dépendent de la position de la partie mobile de l'actionneur. La résolution numérique de ce circuit équivalent est réalisée par simples substitutions avec application d'une approche incrémentale.

Le second modèle semi-analytique est une version simplifiée du premier, car il ne tient plus compte des flux de fuite. Les réductances fer gardent toutefois leur caractéristique non linéaire. La Figure 4 représente ce modèle simple.

Pour les deux modèles semi-analytiques, la force d'origine électromagnétique F_{em} doit être évaluée. Les formules utilisées par chacun d'eux sont données en regard des représentations des réseaux de réductances correspondants (Figure 3 et Figure 4). En posant :

- \mathcal{P} la perméance globale du système, évaluée de manière formelle ;
- S_g une estimation de la surface d'entrefer (haut ou bas) ;
- B_{gb} et B_{gb} les inductions dans les entrefers bas et hauts respectivement.

La Figure 5 donne une comparaison des évaluations de la force générée par l'actionneur, effectuées par le premier modèle semi-analytique et le modèle éléments finis, pour différentes positions x de la partie mobile. Dans cette application numérique, l'actionneur n'est pas encore dimensionné de manière optimale, et pour tous les points, seule la bobine supérieure est alimentée. On constate un écart moyen entre ces deux résultats de 6%.

METHODES D'OPTIMISATION

Les différents modèles décrits plus tôt sont utilisés par des algorithmes d'optimisation, afin de définir les « meilleures » dimensions caractéristiques de l'actionneur, c'est-à-dire celles permettant de satisfaire le cahier des charges. Il s'agit donc de la résolution par processus itératifs de problèmes inverses.

Deux techniques d'optimisation très différentes entre elles, sont utilisées. La première est la méthode séquentielle du simplexe, et la seconde est dénommée « Output Space Mapping ».

Suivant la méthode considérée, le problème d'optimisation est posé différemment, essentiellement en termes de contraintes et de fonction objectif, cette dernière entité correspondant à l'unique grandeur considérée du problème et qui doit être minimisée (par convention).

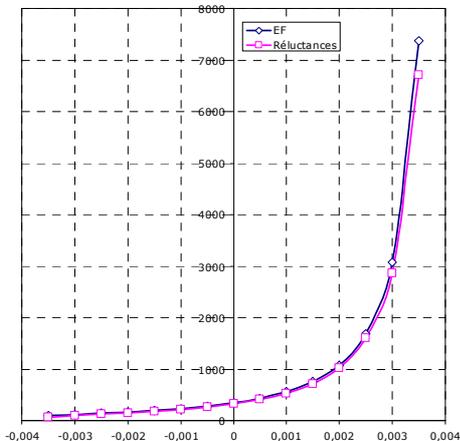


Figure 5. Comparaison des modèles éléments finis et semi-analytique « complexe »
 $F_{em}(x) = f(x)$ avec $-\delta/2 \leq x \leq \delta/2$

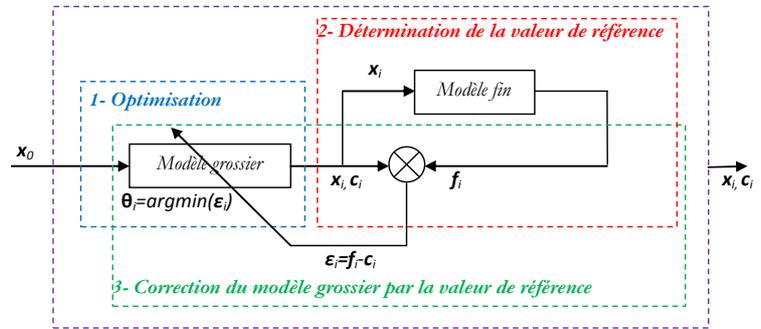


Figure 6. Schéma de principe des techniques de « Output Space Mapping »

Méthode séquentielle du simplexe

La méthode séquentielle du simplexe est une technique d'optimisation basée exclusivement sur les valeurs de la fonction objectif (et pas sur ses dérivées) [4]. Cette caractéristique en fait une méthode plus robuste relativement au bruit, que les techniques utilisant les gradients.

Cette méthode présente également l'avantage d'être facilement programmable, car très son principe est très simple. Si on se place dans le domaine d'étude k -dimensionnel des k variables d'entrée, un point appartenant à cet espace représente de fait les spécifications, et donc la définition d'un actionneur particulier. Ce point possède dans notre étude les coordonnées $\mathbf{x} = \langle b \quad l_{mi} \quad l_{mc} \quad h_{mi} \quad l_{mc} \quad h_{mc} \quad h_a \quad \alpha \rangle^T$ (voir Tableau 1).

Un simplexe se définit comme un polytope à $k+1$ sommets dans un espace à k dimensions (i.e. un triangle si $k=2$). Un simplexe définit donc $k+1$ configurations \mathbf{x}_i d'actionneur.

Lors de la première itération, un premier simplexe est évalué : les $k+1$ configurations \mathbf{x}_i (correspondant à ses $k+1$ sommets) sont évaluées par un des modèles présentés précédemment.

Parmi les $k+1$ résultats, le moins bon point du simplexe est identifié et est supprimé. Il est noté W (*worst*). Un nouveau point est déduit (noté R (*reflected*) et évalué au cours de l'itération suivante) comme étant celui obtenu en appliquant à W un effet miroir relativement au centre de gravité C (*centroid*) des k points restants. Des règles complémentaires permettent à cet algorithme de s'arrêter dans tous les cas et de gérer les contraintes. La version utilisée dans cette étude est une version modifiée de cet algorithme originel. Elle est appelée « Controlled Weighted Centroid Method » [5].

Techniques de « Output Space Mapping » (OSM)

L'idée principale de cette famille d'algorithmes repose sur l'intérêt manifeste à utiliser 2 modélisations du même actionneur conjointement au cours de l'optimisation.

Ces 2 modèles doivent présenter des caractéristiques bien distinctes et identifiées.

1. le premier doit être rapide, au détriment éventuellement de la précision des résultats, afin de lui faire supporter la totalité des efforts de recherche des conditions optimales ;
2. le second doit être précis, sans réelle considération du temps d'évaluation, afin de (ré)étalonner régulièrement les résultats d'optimisations obtenus à partir du modèle rapide.

La différence de nature et de précision des deux modèles implique de fait une faible correspondance (*mapping*) entre l'espace (*space*) des entrées (vecteur d'entrée x : *input*) et/ou des sorties (la fonction objectif: *output*). L'algorithme retenu pour cette étude est une version particulière d'OSM car elle effectue un recalage automatique des sorties des deux modèles, à chaque itération [6].

A partir d'une configuration initiale de l'actionneur définie par le vecteur x_0 , le modèle rapide effectue une optimisation et fournit alors la valeur c_1 de la fonction objectif et le vecteur x_1 correspondant. Le modèle précis utilise alors ce vecteur x_1 pour réévaluer cette même fonction objectif dont il donne la valeur f_1 . L'écart entre c_1 et f_1 permet de corriger (pour cette itération) le modèle rapide par simple pondération. Ce schéma est recommencé tant qu'une évolution significative x_i est constatée d'itération en itération.

La Figure 6 représente ce schéma itératif.

L'optimisation du modèle rapide lors de l'étape 1 utilise l'algorithme séquentiel du simplexe, présenté plus tôt.

DEMARCHES D'OPTIMISATION

L'actionneur décrit précédemment est à présent dimensionné par deux algorithmes différents : l'algorithme séquentiel du simplexe et une technique d'OSM. Cette mise en parallèle permettra de comparer l'efficacité de ces méthodes, dans le cadre de cette recherche des conditions optimales.

Tous les résultats d'optimisation seront comparés entre eux, ainsi qu'à une première configuration, dite de référence.

Configuration initiale

Le premier jeu de données utilisé dans cette étude correspond à des valeurs intérieures aux intervalles de variation des huit paramètres d'entrée choisis (Tableau 2), définis selon les règles de l'art. En considérant un fonctionnement en régime permanent, la densité de courant du bobinage supérieur est fixée à 4 A/mm². L'anneau mobile est mis en position médiane. Le Tableau 3 donne les caractéristiques correspondantes de l'actionneur.

Tableau 2. Jeu initial des valeurs de paramètres d'entrée

Nom	Valeur	Unité	Description
h	80	mm	Hauteur totale
l_{mi}	10	mm	Largeur de branche interne
l_{me}	10	mm	Largeur de branche externe
h_{mi}	10	mm	Hauteur de branche externe
l_{mc}	20	mm	Largeur de pôle central
h_{mc}	20	mm	Hauteur de pôle central
h_a	20	mm	Hauteur intérieure de l'anneau
α	45	deg	Angle de l'entrefer de déplacement

Tableau 3. Caractéristiques initiales de l'actionneur

Nom	Valeur	Unité	Description
M_{ring}	0.430	kg	Masse de l'anneau
M_{tot}	7.1	kg	Masse totale de l'actionneur
F_{tot}	320	N	Force électromagnétique
P_{moy}	804	W	Puissance moyenne
P_{moy}/V_{tot}	0.74	kW/dm ³	Ratio puissance/volume

Le volume total utilisé ci-dessus correspond à l'encombrement réel de l'actionneur : $V_{tot} = \pi \cdot h \cdot R_c^2$.

Il apparaît ainsi que cet actionneur est mal dimensionné, au vu de sa masse importante et de la petite force générée. Cette configuration servira de référence vis-à-vis des résultats des calculs d'optimisation à venir.

Optimisation par l'algorithme séquentiel du simplexe

L'optimisation par la méthode séquentielle du simplexe a cherché à minimiser l'opposé du ratio puissance moyenne / volume total de l'actionneur (i.e. $-P_{moy}/V_{tot}$), tout en considérant les contraintes supplémentaires suivantes :

- $340 \leq F_{tot} \leq 360$ N
- $380 \leq M_{ring} \leq 400$ g
- Génération de géométries viables.

On notera que la recherche de la fonction objectif amène assez naturellement à maximiser dans le même temps la force générée F_{tot} ; cette contrainte est donc uniquement limitative. De là, seule la seconde contrainte portant sur la masse de la partie mobile est réellement contradictoire (en plus d'être elle-même limitative).

Les nouvelles performances de l'actionneur ainsi redimensionné sont données ci-après. Les valeurs correspondantes des facteurs sont également reportées.

Tableau 4. Jeu optimisé des valeurs de paramètres

Nom	Valeur	Unité
h	78.40	mm
l_{mi}	8.58	mm
l_{mc}	5.13	mm
h_{mi}	6.61	mm
l_{mc}	19.27	mm
h_{mc}	16.75	mm
h_a	21.04	mm
α	53.03	deg

Tableau 5. Caractéristiques finales de l'actionneur

Nom	Valeur	Unité
M_{ring}	0.389	kg
M_{tot}	5.42	kg
F_{tot}	359.6	N
P_{moy}	903.8	W
P_{moy}/V_{tot}	1.07	kW/dm ³

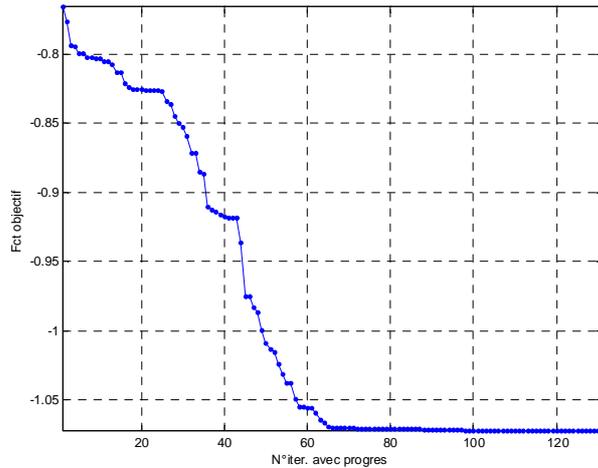


Figure 7. Convergence de l'algorithme séquentiel du simplexe

L'algorithme d'optimisation a donc trouvé une configuration optimale, satisfaisant toutes les contraintes prédéfinies. La Figure 7 donne la progression du rapport $-P_{moy}/V_{tot}$, à chaque itération pour laquelle une diminution a été constatée. En définitive, il a fallu 605 itérations pour parvenir à la solution (donnée par les Tableaux 4 et 5), en considérant une précision sur la fonction objectif de 10^{-6} .

Cette optimisation a permis de diminuer la masse de l'actionneur de 1.65 kg, et de parvenir à une puissance volumique de 1.07 kW/l. Il est clair que ce dernier résultat fait abstraction de toute considération thermique.

Optimisation par la technique de « Output Space Mapping »

Classiquement, l'optimisation par une technique de *space mapping* se fait en définissant des objectifs a priori.

On choisit dans notre cas de viser simultanément les valeurs suivantes :

- $F_{tot} \approx 360\text{N}$ (cahier des charges) ;
- $M_{ring} \approx 0.4\text{ kg}$;
- $P_{moy}/V_{tot} \approx 1\text{ kW/dm}^3$
- $M_{tot} \approx 5.6\text{ kg}$.

Ainsi, à la différence du cas précédent, on ne définit ici plus de contraintes (mis à part celles impliquant des géométries viables), mais uniquement des objectifs. On notera que l'objectif d'une masse totale d'actionneur égale à 5.6 kg a été ajouté, afin de se rapprocher des résultats fournis par l'algorithme du simplexe.

Tableau 6. Jeu optimisé des valeurs de paramètres

Nom	Valeur	Unité
h	73.5	mm
l_{mi}	8.6	mm
l_{mc}	6.65	mm
h_{mi}	6.06	mm
l_{mc}	20.69	mm
h_{mc}	14.83	mm
h_a	23.79	mm
α	75.56	deg

Tableau 7. Caractéristiques finales de l'actionneur

Nom	Valeur	Unité
M_{ring}	0.402	kg
M_{tot}	5.87	kg
F_{tot}	369.6	N
P_{moy}	928.9	W
P_{moy}/V_{tot}	1.06	kW/dm ³

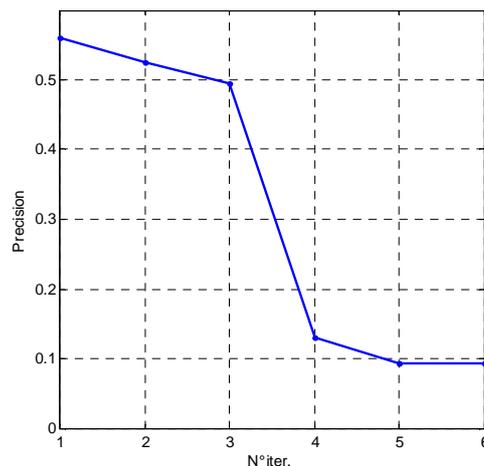


Figure 8. Convergence de l'algorithme d'optimisation par *output mapping*

Si on note \mathbf{y} le vecteur des valeurs visées ($\mathbf{y} = \langle 360 \ 1 \ 0.4 \ 5.6 \rangle^T$) et \mathbf{f}_i le vecteur des valeurs réellement obtenues par le modèle précis à l'itération i , on définit la précision à cette itération par $prec_i = \|(\mathbf{f}_i - \mathbf{y})/\mathbf{y}\|$. Si cette mesure passe sous un seuil donné, ou si $prec_{i+1} \geq prec_i$, l'algorithme est arrêté.

L'OSM essaye donc de satisfaire au mieux tous les objectifs à la fois, en n'en favorisant aucun. La fonction objectif à minimiser se définit alors comme la distance de la solution à tous les sous-objectifs :

$$f_{obj} = \|\mathbf{f}(\mathbf{x}) - \mathbf{y}\|$$

A la vue des Tableaux 6 et 7, ainsi que de la Figure 8, il est clair que l'algorithme d'optimisation a été en mesure de trouver une solution très satisfaisante au problème multi-objectif posé, en 5 itérations uniquement (la dernière itération (n°6) n'améliore pas la solution).

La force générée est supérieure à 360 N, comme initialement souhaitée, et on constate une diminution de la masse de l'anneau mobile et une amélioration de sa puissance volumique. On aboutit ainsi à un actionneur répondant au cahier des charges et offrant une meilleure compacité, tout en améliorant de fait ses performances dynamiques.

Comparaison des résultats d'optimisation

Les figures suivantes montrent les géométries de l'actionneur, avant et après optimisations.

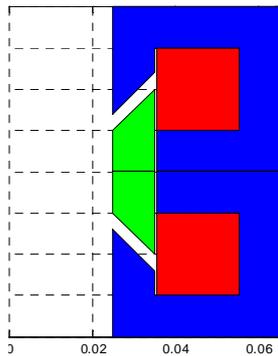


Figure 9. Configuration d'origine

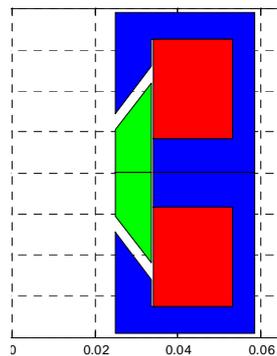


Figure 10. Config. optimisée
(algo. séquentiel du simplexe)

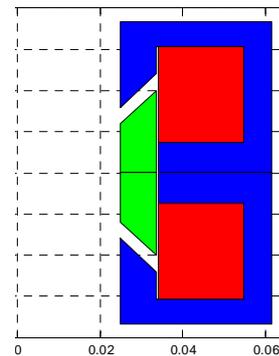


Figure 11. Config. optimisée
(algo. de OSM)

CONCLUSION & PERSPECTIVES

Cet article a présenté les résultats d'une optimisation paramétrique d'un actionneur linéaire oscillant.

Deux algorithmes d'optimisation de nature très différente ont été utilisés pour résoudre les problèmes inverses posés, consistant à trouver les meilleures dimensions caractéristiques de l'actionneur afin de satisfaire des objectifs, tels que l'augmentation du ratio puissance/volume total et la minimisation de la masse de la partie mobile.

Les deux approches ont permis d'aboutir à des configurations intéressantes, satisfaisant les contraintes. Elles sont basées sur trois modélisations différentes du même actionneur : les deux premières sont semi-analytiques et utilisent des réseaux de réductances, alors que la troisième utilise la méthode des éléments finis.

Les deux approches d'optimisation fournissent des solutions assez proches. Elles se distinguent majoritairement par « l'effort » demandé pour acquérir ces résultats.

L'algorithme du simplexe demande plusieurs centaines d'évaluations du modèle de l'actionneur, (re)démontrant ainsi la relative « lenteur » de convergence de cette méthode, en particulier pour un grand nombre de variables d'entrée.

A l'inverse, il a été démontré, par la suite, l'extrême efficacité de l'optimisation par l'Output Space Mapping (OSM). Cette approche utilise en effet judicieusement un premier modèle simple et rapide afin de réaliser les calculs d'optimisation proprement dits, et un second modèle précis pour recalibrer les résultats du premier. Bien que demandant le développement de deux modèles de l'actionneur (plutôt qu'un seul dans l'approche précédente), il fait systématiquement montre d'une vitesse de convergence sans égal.

La poursuite de cette étude s'effectuera notamment par l'ajout de modélisations thermiques de l'actionneur dans le contexte de l'optimisation par OSM.

REFERENCES

- [1] CRAVEN M, RAMPHAL P, Design of an electromagnetic pump system for training heart cardiac surgery, Proceedings IEEE Southeast conf, Kingston, pp. 192-196, 5-7, (2002)
- [2] BERNEZ C., Conception et modélisation d'actionneurs électriques à très forte accélération: application aux soupapes électromagnétiques, Thèse ENS CACHAN, (2006)
- [3] ECHEVERRIA D., Multi-level optimization: Space mapping and Manifold mapping, Thèse de doctorat, (2007)
- [4] WALTERS F.H., MORGAN S.L., PARKER Jr L.R., DEMING S.N., "Sequential Simplex Optimization", 1991, CRC Press
- [5] RYAN P.B., BARR R.L., TODD H.D., "Simplex Techniques for Nonlinear Optimization", Analytical Chemistry, 1980, N°52, pp. 1460-1467
- [6] TRAN T. V., BRISSET S., ECHEVERRIA D., LAHAYE D., BROCHET P., Space-Mapping techniques applied to the optimization of a safety isolating transformer, ISEF 2007