

ALGORITHME GÉNÉTIQUE MULTICRITÉRIEL POUR L'OPTIMISATION DE L'ARCHITECTURE DES MÉCANISMES ENTRAÎNÉS PAR CÂBLES - APPLICATION À UN SIMULATEUR DE VOL

Catherine Leclerc, Clément Gosselin

Département de Génie Mécanique, Université Laval, Québec, Québec, Canada

E-mail: catherine.leclerc.2@ulaval.ca; clement.gosselin@gmc.ulaval.ca

Received October 2009, Accepted November 2009

No. 09-CSME-47, E.I.C. Accession 3133

RÉSUMÉ

Cet article présente une méthode rapide et efficace d'optimisation de l'architecture d'un mécanisme entraîné par câbles, qui permet d'en maximiser l'espace atteignable et de minimiser les risques d'interférences. La contribution principale de ces travaux est la détermination de l'architecture optimale d'un mécanisme à câble servant de plate-forme de génération de mouvement pour un nouveau concept de simulateur de vol. La méthode d'optimisation utilise un algorithme génétique multicritériel qui permet également de dégager quelques règles générales de design des mécanismes à câbles.

Mots-clés : mécanisme entraîné par câbles; optimisation; espace atteignable; interférence.

MULTIOBJECTIVE GENETIC ALGORITHM FOR OPTIMIZING CABLE-DRIVEN MECHANISMS - A FLIGHT SIMULATOR APPLICATION

ABSTRACT

This paper presents a fast and effective optimization method applied to cable-driven mechanisms in order to find an architecture that maximizes the workspace and minimizes the risk of cable interference. The main contribution of this work is the determination of an optimal architecture for a cable-driven mechanism used as the motion platform of a new concept of flight simulator. The multiobjective optimization technique used here also provides us with valuable insight on the design of cable-driven mechanisms in general.

Keywords: cable-driven mechanism; optimization; workspace; interference.

1. INTRODUCTION

Deux avantages manifestes des mécanismes parallèles entraînés par câbles sont leur vaste espace de travail et leur grand ratio “charge supportée” versus “poids total” du mécanisme. Ces deux caractéristiques combinées permettent d’atteindre et de soutenir de grandes accélérations. Cela constitue un avantage considérable par rapport aux mécanismes parallèles conventionnels et aux mécanismes sériels. Toutefois, les mécanismes à câbles présentent certains inconvénients qui limitent leurs applications pratiques. Entre autre, le fait que les câbles sont des segments souples et non des liens rigides, tend à favoriser le phénomène de vibration, réduisant ainsi la précision du mécanisme [1]. Aussi, tel que cela est décrit dans [2], puisque les câbles ne peuvent être sollicités qu’en tension, la détermination des poses que peut atteindre le mécanisme, pour lesquelles tout torseur doit être équilibré par les tensions dans les câbles, est une tâche très complexe. Les interférences, qui peuvent se produire entre deux câbles ou entre un câble et l’effecteur, limitent également l’espace de travail, notamment lorsque les câbles sont nombreux, croisés et que les trajectoires à générer comportent des rotations de grande amplitude. Nos recherches ont par ailleurs démontré que les architectures qui possèdent un vaste espace atteignable par équilibrage des efforts sont fortement susceptibles de générer un faible espace atteignable libre d’interférence [3].

Dans cet article, nous présentons un moyen d’optimiser rapidement l’architecture d’un mécanisme à câbles utilisé comme plate-forme mobile d’un nouveau concept de simulateur de vol [3], de façon à considérer deux objectifs en opposition, soit la limitation des interférences et l’équilibrage des efforts externes. Pour ce faire, nous avons eu recours aux algorithmes génétiques multicritériels [4], qui permettent d’obtenir un ensemble de solutions optimales représentant les meilleurs compromis entre les deux objectifs à atteindre. Nous discuterons également de comment il est possible, par cette même méthode, de tirer des conclusions fondamentales, appelées *innovisations* [5], quant à l’optimisation des mécanismes à câbles.

2. MÉCANISMES ENTRAÎNÉS PAR CÂBLES

Un mécanisme parallèle entraîné par câbles est constitué d’un effecteur mobile, d’une base fixe et de câbles reliant en parallèle l’effecteur à la base. Chaque câble est attaché à un enrouleur fixé sur la base à une extrémité, et à un point sur l’effecteur à son autre extrémité. En contrôlant la longueur des câbles, on parvient à contrôler la pose de l’effecteur, c’est à dire sa position et son orientation. Le schéma d’un mécanisme parallèle entraîné par huit câbles, tel que celui qui sera utilisé pour le simulateur de vol, est illustré à la figure 1.

2.1. Modèle Dynamique

Dans l’analyse qui suit, les câbles sont approximés par des segments de droite et leur masse est négligée. Ainsi, pour un mécanisme à 6 ddl actionné par 8 câbles, les équations dynamiques du système en translation se traduisent par:

$$[\mathbf{d}_1 \ \mathbf{d}_2 \ \dots \ \mathbf{d}_8] \mathbf{t} = -\mathbf{f}_e + m\ddot{\mathbf{p}} \quad (1)$$

où \mathbf{t} est le vecteur des tensions dans les câbles, \mathbf{d}_i est un vecteur unitaire le long du câble i , qui origine à la plate-forme, \mathbf{f}_e est le vecteur des forces externes agissant sur la plate-forme, m est la masse et \mathbf{p} le vecteur position de la plate-forme.

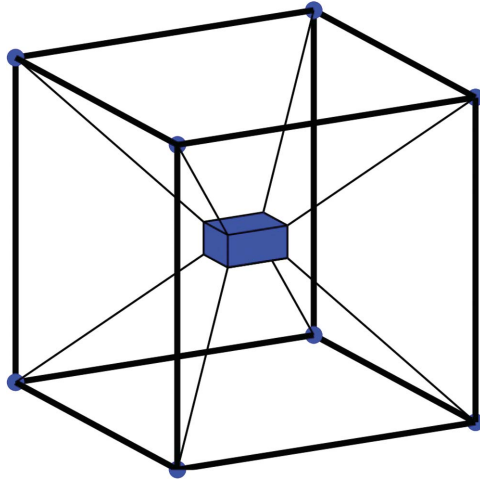


Fig. 1. Mécanisme parallèle à 6 degrés de liberté (ddl) entraîné par huit câbles. Image tirée de [2].

De la même façon, les équations dynamiques du système en rotation s'expriment:

$$[\mathbf{e}_1 \ \mathbf{e}_2 \ \dots \ \mathbf{e}_8] \mathbf{t} = -\boldsymbol{\tau}_e + (\mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}\boldsymbol{\omega}) \quad (2)$$

où \mathbf{e}_i est un vecteur dans la direction du moment qu'exerce un câble sur la plate-forme, $\boldsymbol{\tau}_e$ est le vecteur des moments externes agissant sur la plate-forme, $\boldsymbol{\omega}$ est le vecteur de la vitesse angulaire et \mathbf{I} la matrice d'inertie de la plate-forme.

En combinant les équs. (1) et (2), on obtient l'équation complète de la dynamique du système:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{d}_1 & \mathbf{d}_2 & \dots & \mathbf{d}_8 \\ \mathbf{e}_1 & \mathbf{e}_2 & \dots & \mathbf{e}_8 \end{bmatrix} \mathbf{t} = - \begin{bmatrix} \mathbf{f}_e \\ \boldsymbol{\tau}_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m\ddot{\mathbf{p}} \\ \mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}\boldsymbol{\omega} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Ce système d'équations est de la forme $\mathbf{A}\mathbf{t} = \mathbf{b}$. Dû au fait que les câbles ne peuvent être sollicités qu'en tension, les mécanismes à câbles possèdent habituellement, comme c'est le cas à la figure 1, au moins un câble de plus que de ddl à contrôler. On dit alors du système qu'il est indéterminé puisqu'il possède davantage d'inconnues que d'équations d'équilibre des efforts. En conséquence, il existe une infinité de solutions possibles, et pour choisir une combinaison de tensions dans les câbles pouvant contrer les conditions dynamiques et les efforts externes, on a recours à un problème d'optimisation.

En somme, le problème consiste à minimiser une fonction objectif mesurant la norme au carré des tensions dans les câbles (eq. 4a), tout en satisfaisant aux exigences des contraintes d'égalité (eq. 4b) et d'inégalité (eq. 4c) de l'équation du mouvement. Mathématiquement, cela correspond à:

$$\min_{\mathbf{t}} \frac{1}{2} \mathbf{t}^T \mathbf{H} \mathbf{t} \quad (4a)$$

$$\text{assujetti à } \mathbf{A}\mathbf{t} = \mathbf{b} \quad (4b)$$

$$t_i \geq 0$$

(4c)

pour $i = 1, \dots, 8$

où $\mathbf{H} = \mathbf{1}$ est une matrice de pondération 8×8 permettant ici une minimisation homogène des forces internes dans les câbles et l'équation $\mathbf{A}\mathbf{t} = \mathbf{b}$ correspond à l'éq. (3).

2.2. Interférence

Dans le but de déterminer si un contact s'est produit entre deux câbles pendant un intervalle de temps donné, la trajectoire à parcourir est divisée en très petits intervalles et la plus petite distance séparant chacune des paires de câbles est calculée pour les positions initiales et finales de chaque intervalle [6]. Une interférence entre deux câbles est détectée si l'expression mathématique de la distance entre ces câbles en fonction du temps subit un changement de signe entre deux points de la trajectoire discrète, ou si elle est égale à zéro.

La figure 2 représente deux câbles à un instant arbitraire. Le segment L_r , perpendiculaire à la fois au câble 1 et au câble 2, représente la plus petite distance entre ces deux câbles. L_1 est la distance entre l'origine du câble 1 et l'origine de L_r . De même, L_2 représente la distance entre l'origine du câble 2 et l'extrémité de L_r . Les vecteurs unitaires passant par le câble 1, le câble 2 et L_r sont respectivement \mathbf{d}_1 , \mathbf{d}_2 et \mathbf{d}_r .

En débutant à la position \mathbf{p}_1 , il est possible d'atteindre la position \mathbf{p}_2 en ne cheminant que par les trois segments L_1 , L_2 et L_r . L'équation de continuité est donc:

$$\mathbf{p}_1 + L_1\mathbf{d}_1 + L_r\mathbf{d}_r - L_2\mathbf{d}_2 = \mathbf{p}_2 \quad (5)$$

L'éq. (5) constitue un système de 3 équations à 3 inconnues, dont l'une d'elles, L_r , correspond à la valeur recherchée, c'est à dire la plus petite distance entre les deux câbles.

Il existe deux types d'interférence qu'il est important de savoir discerner: réelle ou fictive. Une interférence est réelle si elle satisfait aux deux conditions suivantes:

- La valeur du segment liant L_r de la paire de câbles est zéro ou subit un changement de signe pendant l'intervalle de temps testé.
- Les valeurs initiales et finales des segments L_1 et L_2 sont supérieures à zéro et inférieures à la longueur de leur câble respectif ρ_i , calculée par le problème géométrique inverse [3].

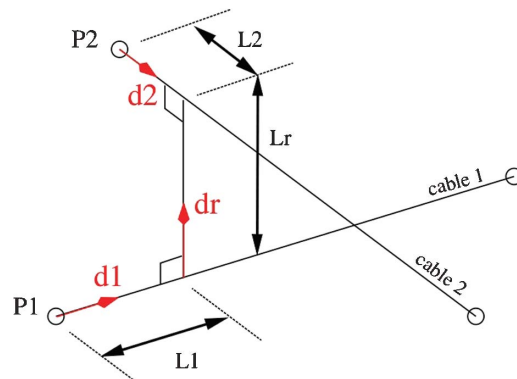


Fig. 2. Perpendiculaire commune: la plus petite distance entre deux segments de droite.

Table 1. Limites des simulateurs de vol actuellement sur le marché (de [3]).

Débattements			Débattements Angulaires		
x	y	z	ϕ	θ	ψ
$\pm 1.13m$	$\pm 3.00m$	$\pm 2.50m$	$\pm 60^\circ$	$\pm 60^\circ$	$\pm 45^\circ$
Vitesses		Vitesses Angulaires		Accélérations Angulaires	
$\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$	$\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$	$\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$	$\ddot{\phi}, \ddot{\theta}, \ddot{\psi}$		
$\pm 2.00m/s$	$\pm 45^\circ/s$	$\pm 20m/s^2$	$\pm 500^\circ/s^2$		

Si ces conditions ne sont pas respectées, cela signifie qu'un contact fictif a eu lieu sur la prolongation du segment et non sur le câble lui-même. Dans ce cas, il n'y a donc pas réellement d'interférence.

2.3. Objectifs

La détermination des objectifs en ce qui a trait à l'espace atteignable en translation et en rotation est basée sur une compilation des limites physiques et des débattements maximums des différentes plate-formes de Gough-Stewart et autres systèmes qui se trouvent actuellement sur le marché. Ces résultats sont exprimés selon la convention d'angles d'Euler $Z(\psi)Y(\theta)X(\phi)$ et sont présentés au tableau 1.

Afin de vérifier si ces débattements sont suffisants pour simuler les mouvements de la majorité des modèles d'avion, nous comparons ceux-ci aux débattements nécessaires pour simuler un avion de chasse (*generic fighter*) [7]. Les débattements nécessaires pour remplir la très exigeante tâche de simuler un avion de chasse sont présentés au tableau 2.

Cette comparaison confirme que les exigences fixées au tableau 1 quant à l'espace atteignable en orientation sont amplement suffisantes. Par contre, elle révèle qu'il y a un manque à combler en ce qui concerne l'espace atteignable en translation. Ainsi, on cherche à obtenir:

- Un espace atteignable en translation de dimensions $4m \times 7m \times 5m$.
- Un espace atteignable en rotation permettant des débattements angulaires, selon la convention *Tilt & Torsion* [8], tel que décrit au tableau 3.

Table 2: Débattements limites requis pour un avion de chasse typique (de [7]).

Débattements			Débattements Angulaires		
x	y	z	ϕ	θ	ψ
$\pm 1.653m$	$\pm 3.414m$	$\pm 1.1786m$	$\pm 8^\circ$	$\pm 22^\circ$	$\pm 17^\circ$

Table 3: Débattements angulaires visés selon la convention *T&T*.

ϕ	θ	σ
$[-180^\circ, +180^\circ]$	$[0^\circ, +60^\circ]$	$[-45^\circ, +45^\circ]$

La convention $T&T$ n'utilise que deux rotations, $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_1(\theta)\mathbf{Q}_2(\sigma)$. La première rotation est définie par un axe horizontal dont l'orientation est fixée par l'angle ϕ , appelé *azimut* (voir [8]).

Pour notre étude, il est plus important que les objectifs quant à l'espace atteignable en rotation soient atteints plutôt que ceux pour l'espace atteignable en translation car il est possible d'augmenter l'espace atteignable en translation en augmentant tout simplement les dimensions de la base fixe, ce qui conserve les propriétés en rotation. C'est pourquoi nous avons optimisé l'architecture du mécanisme de façon à maximiser l'espace atteignable en rotation.

3. OPTIMISATIONS ET ALGORITHMES GÉNÉTIQUES

Les algorithmes évolutionnaires (EAs) sont une classe d'algorithmes d'optimisation basés sur les principes de l'évolution et de la sélection naturelle élaborée par Charles Darwin. En bref, une population est d'abord initialisée en respectant les contraintes du problème à résoudre (environnement), puis évolue de génération en génération à l'aide d'opérateurs de sélection, de recombinaison et de mutation. L'environnement doit par la suite se charger d'évaluer les individus en leur attribuant un degré de performance. Cette valeur déterminera la sélection des meilleurs individus, à qui sera accordé le droit de se reproduire, de façon à progressivement améliorer la performance globale de la population. Le plus connu et utilisé des EAs est l'algorithme génétique.

3.1. Algorithmes Génétiques Multicritériels et NSGA-II

Les algorithmes génétiques multicritériels permettent d'optimiser simultanément deux ou plusieurs critères en opposition. Le résultat n'est pas une solution unique, comme c'est le cas des optimisations usuelles, mais plutôt un front de solutions. Ce front des solutions (appelé front *pareto-optimal*) représente les meilleurs compromis possibles (les solutions non-dominées) qui doit par la suite être étudié afin de sélectionner le ou les solutions optimales. Une solution nondominée signifie qu'il n'est pas possible d'améliorer la performance de cette solution par rapport à l'un des critères (fonctions objectif) sans produire un effet nuisible sur au moins un des autres.

L'algorithme génétique multicritériel utilisé dans ce chapitre est le *Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)* [4], développé par le *Kanpur Genetic Algorithms Laboratory* [9]. Au moment où ce travail a été réalisé, cet algorithme était considéré comme le plus performant disponible. Ainsi, bien qu'il ne soit pas possible de démontrer formellement que cet algorithme soit le mieux adapté au problème traité ici, cet algorithme a été utilisé.

3.2. Principes d'Innovations

L'analyse des résultats de l'optimisation multicritérielle peut permettre de lever le voile sur des principes de design innovateurs reliant les paramètres et les fonctions objectif. En d'autres termes, cela peut permettre d'approfondir notre compréhension du problème à l'étude. C'est ce qu'on appelle "innovation" (*innovation through optimization*). Plusieurs exemples d'application du principe d'innovation sont disponibles dans [5].

4. DÉFINITION DU PROBLÈME

Notre problème consiste à maximiser l'espace atteignable où il est possible d'équilibrer les efforts tout en maximisant l'espace atteignable libre d'interférence, à l'aide d'un algorithme génétique multicritériel.

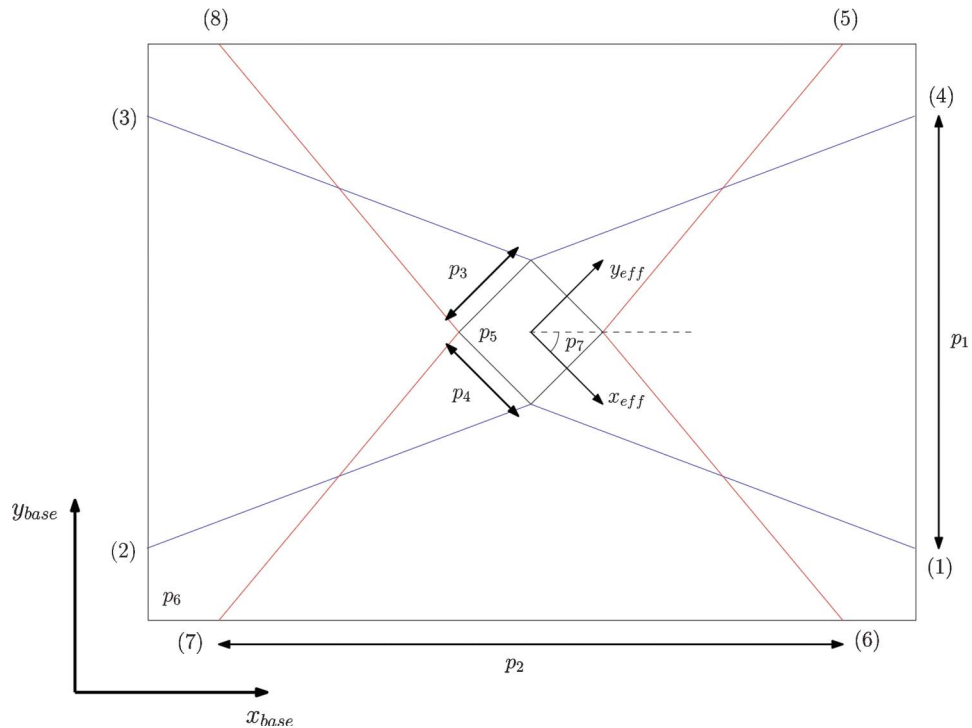


Fig. 3. Architecture paramétrisée.

4.1. Architecture Paramétrisée

La figure 3 illustre le modèle paramétrisé de l'architecture de mécanisme à câbles à optimiser. Nous y avons privilégié la symétrie des points d'attache à la base.

La base fixe et l'effecteur mobile sont tous deux des prismes rectangulaires de dimensions variables. Les câbles 1,2,3 et 4 relient les sommets de la face supérieure de l'effecteur aux points d'attache situés sur la face inférieure de la base fixe tandis que les câbles 5,6,7 et 8 relient les sommets de la face inférieure de l'effecteur aux points situés sur la face supérieure de la base. Voici le détail des paramètres:

p_1 : Distance séparant les points d'attache des câbles fixés sur la partie inférieure de la base fixe. (selon y_{base})

p_2 : Distance séparant les points d'attache des câbles fixés sur la partie supérieure de la base fixe. (selon x_{base})

p_3 : Dimension du côté de l'effecteur parallèle à y_{eff} .

p_4 : Dimension du côté de l'effecteur parallèle à x_{eff} .

p_5 : Hauteur de l'effecteur.

p_6 : Hauteur séparant les deux niveaux de points d'attache à la base.

p_7 : Angle initial de la plate-forme (ψ_{init}) par rapport au référentiel de base.

Les intervalles sur lesquels seront testés ces paramètres sont donnés au tableau 4.

4.2. Fonctions Objectif

Les critères de sélection sont calculés à partir d'un test de trajectoire en orientation pour la position cartésienne (0, 0, 3.64), qui correspond *grosso-modo* au centre estimé de l'espace atteignable.

Table 4: Intervalles de l'espace des paramètres d'optimisation.

p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
[5, 10]	[6, 12]	[0.1, 1.0]	[0.1, 1.0]	[0, 1.0]	[4, 8]	[-180, 180]

Ces trajectoires sont de type *pick and place* entre l'orientation de référence (0, 0, 0) et l'orientation $\theta = 60^\circ$, pour chaque combinaison (ϕ, σ) testée. On teste pour les intervalles suivants: $-180^\circ < \phi < 180^\circ$ et $-45^\circ < \sigma < 45^\circ$. À chacune de ces trajectoires, on enregistre à la fois l'angle θ maximal atteint avant de rencontrer une pose où il n'est pas possible d'équilibrer les efforts et l'angle maximal atteint avant de rencontrer une interférence. Lorsqu'un seul ou ces deux évènements ne se sont toujours pas produits à la fin de la trajectoire, on enregistre la valeur de l'angle maximal de la trajectoire, $\theta = 60^\circ$.

On a optimisé la moyenne, pour l'ensemble des couples (ϕ, σ) testés, des orientations maximales (θ) auxquelles le mécanisme peut se rendre avant de rencontrer respectivement une interférence et une pose inatteignable de par son incapacité à équilibrer les efforts en jeu.

Lorsqu'on a testé l'ensemble des (ϕ, θ, σ) pour une architecture donnée, on peut visualiser le volume de l'espace atteignable en orientation sur un système de coordonnées cylindriques. En effet, Bonev et al. [8] ont démontré que l'utilisation de la convention *Tilt & Torsion* permet de représenter l'espace atteignable en orientation d'un mécanisme d'une façon compacte et intuitive sur un tel système de coordonnées. Par exemple, l'espace atteignable en orientation obtenu pour le mécanisme à câbles de la figure 4(a) est illustré à la figure 4(b).

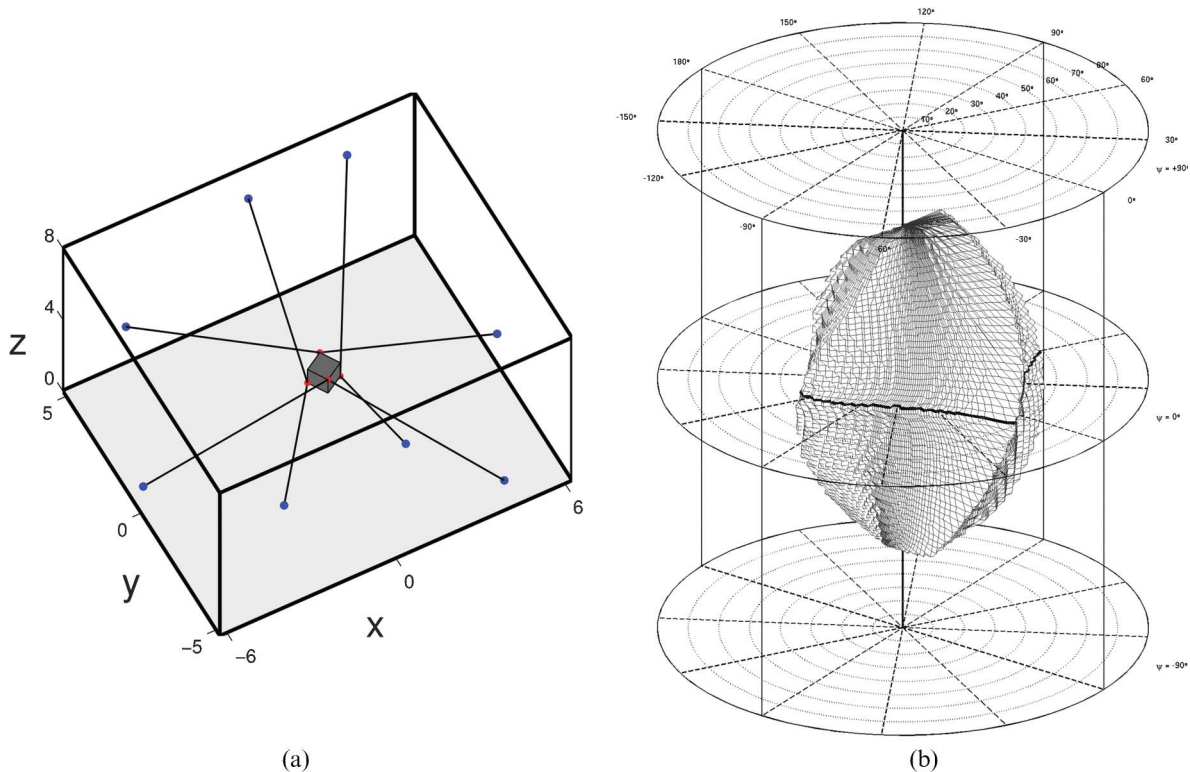


Fig. 4. (a) Un mécanisme entraîné par câbles et (b) son espace atteignable en orientation, l'axe vertical représente l'angle σ , la direction radiale l'angle θ et l'angle polaire représente l'angle ϕ .

Table 5: Discrétisation et paramètres d'optimisation.

n_ϕ	n_σ	dt	n_{pop}	n_{cpu}	n_{gen}	temps de calcul
8	9	15	48	12	20	16 h 50 min

Puisque les temps de calcul des fonctions à optimiser, qui contiennent elles-mêmes des sousoptimisations, peuvent augmenter très rapidement avec la finesse de la discrétisation en ϕ , θ , σ utilisée, mais également en fonction du pas de temps de la trajectoire, les optimisations multicritérielles ont été exécutées sur le réseau québécois de calcul haute performance (RQCHP) [10], ce qui permet de réaliser des calculs en parallèle sur plusieurs ordinateurs à la fois et ainsi, de diminuer le temps réel du calcul.

5. RÉSULTATS

5.1. Résultats de l'Optimisation Multicritérielle

Les paramètres définissant la discrétisation utilisée de même que ceux définissant l'algorithme génétique sont présentés au tableau 5. Dans ce tableau, n_ϕ et n_σ correspondent respectivement au nombre de pas de discrétisation selon ϕ et σ tandis que dt est le nombre de pas de la trajectoire selon θ . De plus, n_{pop} définit la taille de la population, n_{cpu} est le nombre de cpu sur lequel le calcul a été divisé en parallèle et n_{gen} est le nombre de générations sur lequel la population évolue. Le fait de diviser le calcul sur 12 cpu signifie que le calcul sera de 6 à 12 fois plus rapide que s'il avait été effectué sur un seul ordinateur. La figure 5 illustre le front de solutions obtenu.

Sur cette figure, nous avons mis en évidence la solution jugée optimale, $(f_1, f_2) = (1.017, 1.017)$ radians. Celle-ci permet d'obtenir une orientation moyenne identique pour les deux critères. Les paramètres pour cette solution sont présentés au tableau 6.

5.2. Innovisations

En analysant de plus près les résultats de cette optimisation, il est possible de déduire certaines règles générales de design pour cette paramétrisation de mécanisme à câbles. En effet,

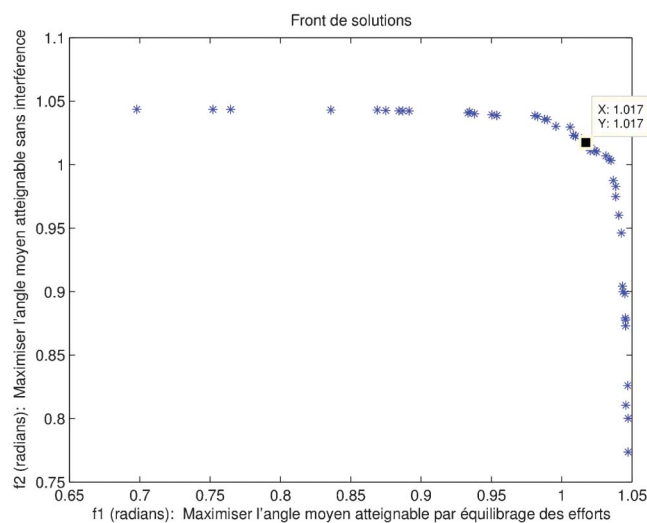


Fig. 5. Optimisation de l'architecture complète, f_1 vs f_2 .

Table 6: Paramètres de la solution optimale.

p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7
9.43m	9.10m	0.495m	0.124m	0.0651m	7.04m	-48°

nous obtenons que l'angle initial (paramètre p_7) sera toujours celui qui maximise la symétrie du croisement des câbles vue de haut. Aussi, à première vue, il semble avantageux de fixer p_1 à sa valeur maximale admissible. La longueur p_2 prend alors une valeur légèrement plus petite ou plus grande que cette dernière. De plus, il semble préférable d'avoir un effecteur qui soit de forme prismatique et de dimensions telles que $p_4 \leq p_3$. Il est également préférable d'utiliser la valeur maximale admissible pour le paramètre p_6 , qui correspond à la distance des points d'attache à la base. Enfin, le paramètre p_5 , c'est à dire la distance selon z_{eff} séparant les points d'attache à l'effecteur, prend optimalement une valeur faible mais non-nulle.

5.3. Architecture Optimale

La figure 6 illustre l'architecture du mécanisme optimal obtenu par l'optimisation multicritérielle.

À première vue, le ratio "dimension de l'effecteur" sur "dimension de la base fixe" peut sembler trop petit pour imaginer construire un simulateur à échelle réelle à partir de cette architecture. Nous avons en effet laissé les dimensions de l'effecteur varier de 0.1m à 1.0m. On pourrait refaire une optimisation en augmentant les valeurs limites des dimensions de l'effecteur, ou tout simplement utiliser l'architecture de la plate-forme obtenue, en augmentant ses dimensions de façon à conserver les proportions actuelles. La forme de l'espace atteignable serait ainsi conservée, mais le volume diminuerait légèrement en fonction des dimensions de l'effecteur.

5.4. Espace Atteignable en Orientation

La figure 7(a) illustre l'espace atteignable en orientation pour le mécanisme idéal lorsqu'il est situé à la position de référence $(x, y, z) = (0, 0, 3.64)$. La solution optimale visée était d'atteindre

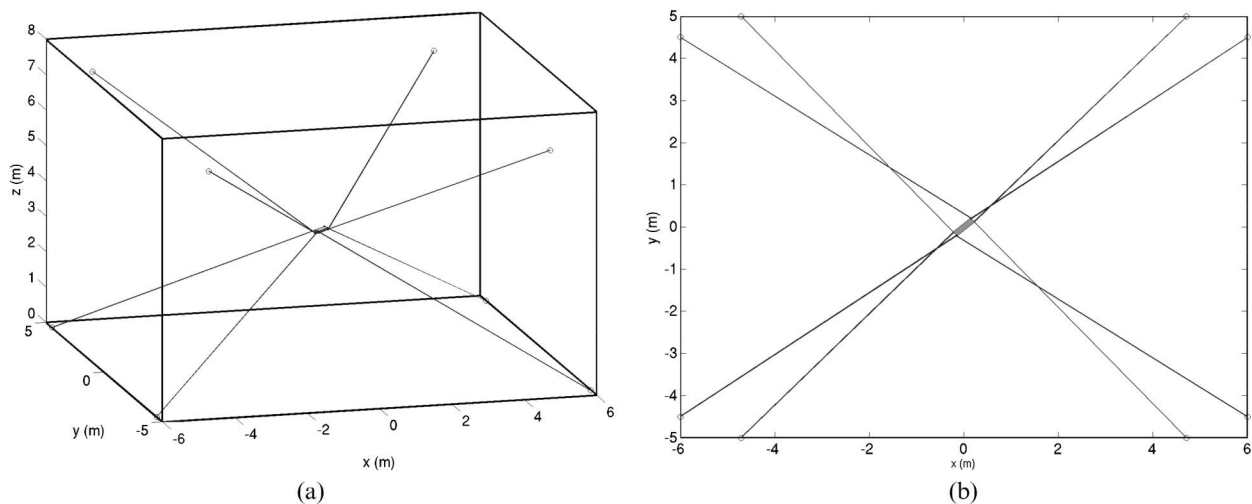


Fig. 6. Architecture optimale du simulateur de vol: (a) vue 3D et (b) vue XY.

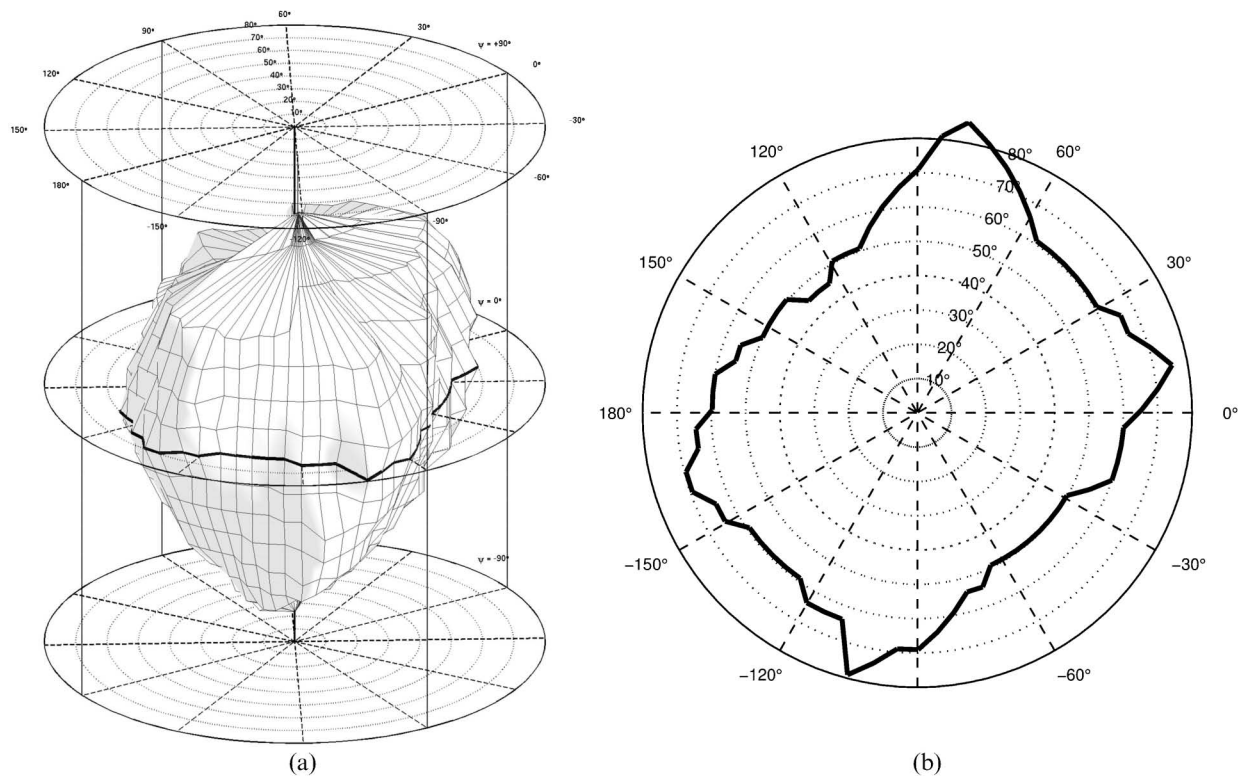


Fig. 7. Espace atteignable en orientation pour le mécanisme idéal: (a) vue 3D et (b) vue 2D pour $\sigma = 0^\circ$.

une moyenne angulaire de $\theta = 60^\circ$. La solution obtenue permet d'atteindre en moyenne un angle $\theta = 58.26^\circ$ pour chacun des critères.

Ce qui est particulièrement intéressant de cette architecture, c'est que pour l'ensemble de la discrétisation en ϕ , le mécanisme parvient à atteindre une orientation de près de $\theta = \pm 60^\circ$, pour tous les plans $\sigma = cte$ de l'intervalle $-45^\circ \leq \sigma \leq 45^\circ$. Cette dextérité angulaire est très rare dans le cas des mécanismes à câbles et elle est fortement souhaitable.

La figure 7(b) illustre le plan $\sigma = 0^\circ$ de cet espace atteignable. On y constate qu'effectivement, la surface de l'espace atteignable couvre pratiquement tout le disque borné par $\theta = 60^\circ$.

6. CONCLUSION

Nous avons approfondi notre connaissance des mécanismes à câbles en introduisant l'utilisation d'algorithmes génétiques multicritériels, ainsi que le principe d'innovation, afin de rapidement découvrir une architecture optimale ainsi que quelques règles de design pour les mécanismes à câbles.

Pour ce qui est de l'application au simulateur de vol, nos résultats sont très encourageants puisque nous avons obtenu, pour notre architecture finale, un espace atteignable en orientation qui couvre 97.1% des exigences visées et un espace atteignable en translation qui couvre 92.88% du prisme des exigences visées.

Dans le futur, il serait primordial de pousser plus loin l'étude et le développement des outils de détermination de l'espace atteignable. En effet, nous avons obtenu nos résultats pour le cas d'une optimisation basée sur des tests de trajectoire, qui sont très exigeants en temps de calcul.

Dans le futur, les deux sous-ensembles de l'espace atteignable pourront être calculés par, respectivement, la méthode de l'EPP [2] et une détermination efficace des lieux d'interférence. Ces outils permettraient de réduire significativement le temps de calcul nécessaire et ainsi rendre l'optimisation beaucoup plus efficace.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie de Canada (CRSNG) pour le support financier accordé à ce projet.

REFERENCES

1. Bouchard, S. and Gosselin, C.M., "A Simple Control Strategy for Overconstrained Parallel Cable Mechanisms," *Proceeding of the 20th Canadian Congress of Applied Mechanics (CAN-CAM 2005)*, Montreal, Canada, 2005.
2. Gouttefarde, M. and Gosselin, C.M., "On the Properties and the Determination of the Wrench-Closure Workspace of Planar Parallel Cable-Driven Mechanisms," *Proc. ASME DETC*, Salt Lake City, UT, USA, 2004.
3. Leclerc, C., 2009, "Analyse et Optimisation des mécanismes parallèles entraînés par câbles: application au simulateur de vol," Mémoire de maîtrise, Département de génie mécanique, Faculté des sciences et de génie, Université Laval, Québec, Canada.
4. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T., "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, 2002.
5. Deb, K. and Srinivasan, A., "INNOVIZATION: Innovative Design Principles Through Optimization," *KanGAL Report Number 2005007*, 2005.
6. Lambert, P. and Gosselin, C., "Large Parallel Cable-Driven Flight Simulator," Technical Report, Département de Génie Mécanique, Université Laval, 2007.
7. Hosman, R., Advani, S. and Haeck, N., "Integrated Design of Flight Simulator Motion Cueing System," *Royal Aeronautical Society Conference on Flight Simulation*, London, 2002.
8. Bonev, I.A., Zlatanov, D. and Gosselin, C.M., 2002, "Advantages of the Modified Euler Angles in the Design and Control of PKMs," *Parallel Kinematic Machines International Conference*, pp. 171–188, Chemnitz, Allemagne, April 23–25, 2002.
9. Kanpur Genetic Algorithms Laboratory, —Site internet—, "*Softwares Developed at KanGAL*," <http://www.iitk.ac.in/kangal/codes.shtml>
10. Réseau québécois de calcul haute performance, —Site internet—, <https://rqchp.ca/>