

Modélisation et Optimisation Multi-Objective de Robot Delta Linéaire

K. Mansouri, I. Belaidi

Résumé—La conception d'architectures innovantes de machines agiles dédiées à l'UTVG nécessite la mise en œuvre de modèles analytiques et numériques pour l'optimisation du comportement cinématique, statique et dynamique de la machine, avec prise en considération des déformations élastiques et leur compensation au niveau de la commande de la machine. Dans le contexte d'une optimisation multi-objectif, il s'agit dans une première partie d'identifier les paramètres et variables inhérents à chaque élément constitutif d'une machine de type robot DELTA, dont le but d'optimiser les éléments essentiels de sa structure. Ceci nécessite une formulation du problème multi-objectif en exprimant les fonctions objectives, les contraintes et les espaces de recherche correspondants, ainsi que la résolution du problème par l'utilisation de méthodes et outils mathématiques performants (Algorithmes génétique,...).

Mots clefs—Algorithmes génétique, Modélisation géométrique et cinématique, Optimisation multi-objectif, Robot parallèle, Système poly-articules

INTRODUCTION

Le robot delta est un tel robot parallèle qui est construit à l'aide de mécanismes en forme de parallélogramme et la plateforme mobile possède trois degrés de liberté en translation et une rotation par rapport à la base [1]. Après que de nombreuses études ont été versées dans le robot delta et ses architectures. Pierrot et al. ont donné les équations correspondant à différents modèles tels que la cinématique directe et inverse ainsi que la dynamique inverse [2]. Codourey a étudié la modélisation dynamique et l'évaluation de la matrice de masse des robots Delta basées sur une application directe du principe de travail virtuel[3]. Récemment, les topologies ont été conçus pour plusieurs versions de machines à cinématique parallèle [4-6].

La synthèse dimensionnelle reste une étape importante de la conception optimale des robots parallèles parce que les critères de performance d'un robot donné sont très sensibles à leur géométrie. Parmi toutes les mesures cinématiques, l'espace de travail est l'un des principaux indices importants dans la conception d'un robot parallèle [1, 7, 8].

En tenant compte uniquement la maximisation de l'espace de travail ne garantit pas une conception optimale, car il est possible que le robot a cinématique (et / ou dynamique) indésirables performances au sein de son espace de travail. Alors que, pour surmonter ce problème, le concepteur doit tenir compte de l'un des nombreux indices de performance qui

ont été proposées pour l'estimation et l'évaluation des performances des robots [9, 10].

Dans ce travail, et dont le but de trouver une structure parallèle optimisé de type Delta, Nous donnons une formulation du problème multi-objectif en exprimant les fonctions objectives, les contraintes et les espaces de recherche correspondants, ainsi que la résolution du problème par l'utilisation de méthodes et outils mathématiques performants (Algorithmes génétique,...).

I. DESCRIPTION ET MODELISATION DE ROBOT DELTA

A. La géométrie de robot Delta

Les modèles géométriques direct et inverse sont les relations qui expriment la situation de l'organe terminal du robot (la nacelle dans le cas présent) en fonction de la configuration du mécanisme (coordonnées articulaires) et inversement[10].

Dans notre cas de l'architecture Delta l'orientation reste constante (le paramétrage de l'orientation de la nacelle est inutile car cette dernière reste parallèle à un plan de référence) et seulement trois actionneurs sont utilisés. Nous devons alors résoudre un système de trois équations à trois inconnues [10, 11].

Les paramètres géométriques de robot Delta sont présentés dans (Fig.1).

Coordonnées des points P_i dans le repère fixe :

$$[P_1 \ P_2 \ P_3] = \begin{bmatrix} R & -\frac{R}{2} & -\frac{R}{2} \\ 0 & R\frac{\sqrt{3}}{2} & -R\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Coordonnées des points B_i dans le repère mobile R_n :

$$[B_1 \ B_2 \ B_3] = \begin{bmatrix} r & -\frac{r}{2} & -\frac{r}{2} \\ 0 & r\frac{\sqrt{3}}{2} & -r\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Composantes des vecteurs u_i dans le repère fixe :

$$[u_1 \ u_2 \ u_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

K.Mansouri, Département Mécanique, Université D'El-Oued, Poste Centrale El-Oued CP789 39000 Algérie (e-mail: khaledhod@hotmail.com).

I. Belaidi, Groupe de Recherche en Modélisation et Simulation en Mécanique, Laboratoire d'Energétique Mécanique et Ingénierie (LEMI), Université M'hamed Bougara Boumerdes, Avenue de l'Indépendance 35000 Algérie (e-mail: idir.belaidi@gmail.com).

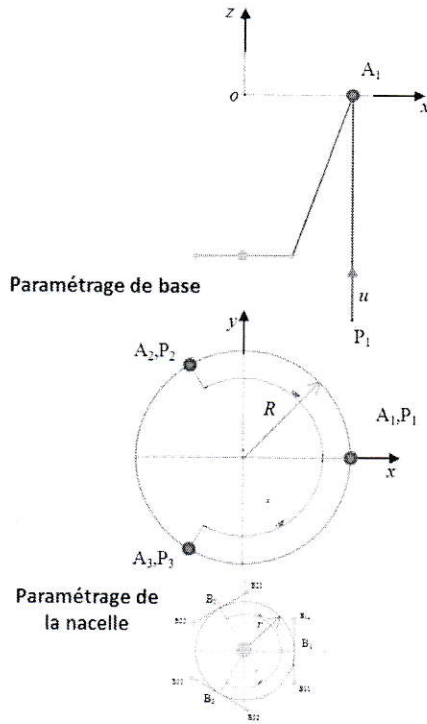


Fig. 1 Paramètres géométriques

Nous obtenons l'expression analytique du modèle géométrique inverse :

$$q_i^2 - q_i[2(x - P_i B_i)u_i] + [(x - P_i B_i)^2 - l_i^2] = 0 \quad (4)$$

$$q_i = (x - P_i B_i)u_i + \sqrt{[(x - P_i B_i)u_i]^2 - [(x - P_i B_i)^2 - l_i^2]} \quad (5)$$

$$\begin{cases} q_1 = z + \sqrt{L^2 - (r - R + x)^2 - y^2} \\ q_2 = z + \sqrt{L^2 - \left((R - r)\frac{1}{2} + x\right)^2 - \left((r - R)\frac{\sqrt{3}}{2} + y\right)^2} \\ q_3 = z + \sqrt{L^2 - \left((R - r)\frac{1}{2} + x\right)^2 - \left((r - R)\frac{\sqrt{3}}{2} + y\right)^2} \end{cases} \quad (6)$$

Pour obtenir l'expression analytique du modèle géométrique direct, nous devons résoudre le système suivant par rapport aux variables x , y et z .

$$\begin{cases} (r - R + x)^2 + y^2 + (z - q_1)^2 = L^2 \\ \left((R - r)\frac{1}{2} + x\right)^2 + \left((r - R)\frac{\sqrt{3}}{2} + y\right)^2 + (z - q_2)^2 = L^2 \\ \left((R - r)\frac{1}{2} + x\right)^2 + \left((r - R)\frac{\sqrt{3}}{2} + y\right)^2 + (z - q_3)^2 = L^2 \end{cases} \quad (7)$$

Le système peut se réécrire :

$$\begin{cases} (A^2 + C^2 + 1)z^2 + 2((C(D - (R - r)) + A * B - q_1) \\ + z + (B^2 + (D - (R - r))^2 + q_1^2 - L^2) = 0 \\ y = Az + B \\ x = Cz + D \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{Avec : } A = \frac{(q_2 - q_3)}{\sqrt{3}(r - R)} \quad B = \frac{q_3^2 - q_2^2}{\sqrt{3}(r - R)} \quad C = \frac{2(q_2 - q_1) - A\sqrt{3}(r - R)}{3(R - r)} \\ D = \frac{q_1^2 - q_2^2 - B\sqrt{3}(r - R)}{3(R - r)}$$

La première équation du système admet deux solutions qui correspondent à deux positions de la nacelle. La solution correspondant à la machine étudiée est la position basse. Connaissant z , nous pouvons ensuite calculer x et y de manière unique.

B. Modélisation cinématique

Le modèle cinématique établit la relation entre la vitesse de la nacelle en translation et en rotation (que nous noterons \dot{x}) et \dot{q} (vitesse linéaire des actionneurs) pour une position et une orientation données de la nacelle.

Pour la barre numéro i , nous avons :

$$V_{A_i} \cdot A_i B_i = V_{B_i} \cdot A_i B_i \quad (9)$$

L'écriture pour l'ensemble des k barres nous donne l'écriture matricielle :

$$J_q \dot{q} = J_x \dot{x} \quad (10)$$

Avec :

$$J_q = \begin{bmatrix} A_1 B_1 \cdot u_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 B_2 \cdot u_2 & 0 \\ 0 & 0 & A_3 B_3 \cdot u_3 \end{bmatrix} \quad (11),$$

$$\text{et } J_x = \begin{bmatrix} (A_1 B_1)_x & (A_1 B_1)_y & (A_1 B_1)_z \\ (A_2 B_2)_x & (A_2 B_2)_y & (A_2 B_2)_z \\ (A_3 B_3)_x & (A_3 B_3)_y & (A_3 B_3)_z \end{bmatrix} \quad (12)$$

Le modèle cinématique inverse est l'expression de \dot{q} en fonction de \dot{x} . L'écriture du modèle cinématique inverse à partir de (10) est alors :

$$\dot{q} = J_q^{-1} J_x \dot{x} \quad (13)$$

Soit en posant $J = J_x^{-1} J_q$

$$\dot{q} = J^{-1} \dot{x} \quad (14)$$

Où J est appelée la matrice Jacobienne.

Le modèle cinématique direct est l'expression de \dot{x} en fonction de \dot{q} . Le modèle cinématique direct s'écrit :

$$\dot{x} = J \dot{q}$$

Dans le cas de l'architecture choisie, les matrices J_x et J_q s'écrivent :

$$J_x = \begin{bmatrix} r - R + x & y & z - q_1 \\ \frac{1}{2}(R - r) + x & \frac{\sqrt{3}}{2}(r - R) + y & z - q_2 \\ \frac{1}{2}(R - r) + x & \frac{\sqrt{3}}{2}(R - r) + y & z - q_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$J_q = \begin{bmatrix} z - q_1 & 0 & 0 \\ 0 & z - q_2 & 0 \\ 0 & 0 & z - q_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

C. Performance dynamique

Pour pouvoir écrire le modèle dynamique, nous établissons :

- La relation entre \ddot{q} et \ddot{x} .

- La relation entre un effort appliqué sur la nacelle et l'effort résultant sur les moteurs.
- Les masses en mouvement.

Nous recherchons l'expression de \ddot{q} (accélération des moteurs) en fonction de \ddot{x} (accélération désirée de la nacelle). L'expression recherchée s'obtient en dérivant le modèle cinématique par rapport au temps. En dérivant l'équation (14), nous obtenons:

$$\ddot{q} = J^{-1}\ddot{x} + J_q^{-1}(\dot{J}_x - \dot{J}_q J^{-1})\dot{x} \quad (17)$$

Pour l'arrangement de l'architecture Delta que nous avons retenu, les matrices \dot{J}_x et \dot{J}_q , s'expriment analytiquement :

$$\dot{J}_x = \begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} - \dot{q}_1 \\ \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} - \dot{q}_2 \\ \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} - \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\dot{J}_q = \begin{bmatrix} \dot{z} - \dot{q}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{z} - \dot{q}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{z} - \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Nous constatons que l'accélération des moteurs est composée de la somme de deux termes :

- $J^{-1}\ddot{x}$ L'accélération des actionneurs due à l'accélération de la nacelle.
- $(\dot{J}_x - \dot{J}_q J^{-1})\dot{x}$ L'accélération des actionneurs due au déplacement de la nacelle à une vitesse constante.

Nous calculons dans un premier temps la relation qui relie l'effort de poussée des moteurs aux efforts appliqués sur la nacelle du point de vue statique.

$$F_{mot} = {}^t J F_{nac}$$

$$F_{nac} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_x \\ F_z \end{bmatrix} \quad et \quad F_{mot} = \begin{bmatrix} F_{mot1} \\ F_{mot2} \\ F_{mot3} \end{bmatrix}$$

- F_{mot} Effort de poussée des moteurs
- F_{nac} Torseur des efforts appliqués sur la nacelle.

➤ Masses en mouvement:

La pratique montre que, pour simplifier les calculs, la masse de chaque barre de fixation peut être répartie pour une moitié sur la nacelle et pour l'autre moitié sur le secondaire des moteurs, tandis que son inertie est négligée. La simplification proposée ci-dessus nous donne les masses corrigées:

Masse corrigée de la nacelle :

$$M_{nac} = M_1 + 6 \frac{M_b}{2} = M_1 + 3M_b \quad (20)$$

Masse corrigée de chaque secondaire de moteur :

$$M_{mot} = M_2 + 2 \frac{M_b}{2} = M_2 + M_b \quad (21)$$

II. FORMULATION DU PROBLEME D'OPTIMISATION

Plusieurs critères ont été proposés afin de comparer différents mécanismes par rapport à leur géométrie, leur architecture ou leurs dimensions. Ces critères peuvent être de plusieurs natures (Géométrique, Cinématiques, Dynamiques, ...etc.)

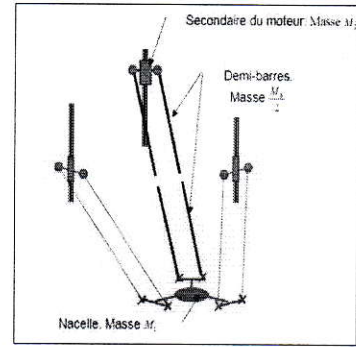


Fig. 2 Répartition de la masse des barres.

Dans notre travail, le problème d'optimisation multi-objectif (conception optimale) de robots parallèles peut être résumé comme suit:

Ce qui a pour rôle de trouver la meilleure dimension des paramètres géométriques du robot qui assure l'obtention de critères de performance (grand espace de travail dextérité avec une accélération maximale de l'organe terminal) par rapport à des contraintes différentes.

A. Les critères de performance

1) Performance cinématique

Par les performances cinématiques, nous entendons la dextérité cinématique et statique. La dextérité cinématique est définie par l'aptitude du la nacelle du robot pour effectuer avec une grande précision et facilité de déplacements arbitraires autour d'un point dans l'espace de travail, et la dextérité statique est définie par l'aptitude du la nacelle du robot pour appliquer des forces et moments dans toutes les directions de l'espace de travail.

Pour mesurer la performance cinématique, nous pouvons utiliser l'indice d'isotropie (conditionnement de la matrice Jacobienne)

$$c = cond(J) = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \quad (22)$$

L'indice d'isotropie cinématique est retenu comme indice de mesure des performances cinématiques du robot parallèle, parce que l'isotropie est une propriété importante dans les applications qui exigent de la précision (par exemple l'usinage).

2) Espace de travail :

L'espace de travail E est l'un des facteurs les plus importants pour la conception de robots parallèles [12-14]. Théoriquement, c'est l'ensemble de l'espace de configuration que l'organe terminal peut atteindre. Cet espace est défini par ses limites qui sont imposées par les articulations (active et passive), les longueurs des segments et par les collisions internes.

Par conséquent, le problème que nous posons ici est la suivante:

Quel est le meilleur dimensionnement (vecteur des paramètres géométriques optimisés) d'un robot parallèle (robot Delta) qui permet d'avoir le plus grand espace de travail dextérité?

Le but de ce travail est de trouver un vecteur de paramètres géométriques P^* qui maximise l'espace de travail du robot parallèle E_{dex} tout en respectant une contrainte fondée sur un critère cinéto-statique (exemple: le nombre de conditionnement de la matrice jacobienne). Par conséquent, la fonction objective est:

$$E_{dex} = \{Point \in E_T \text{ : } CondJ \leq CondJ_{max}\}$$

D'où

$$e_t = \frac{n_p(E_{dex})}{n_p(E_T)} \quad (23)$$

3) Capacité de l'accélération de la nacelle.

D'après l'équation (17) :

$$\ddot{x} = J(\ddot{q} - J_q^{-1}(\dot{J}_x - \dot{J}_q J^{-1})\dot{x}) \quad (24)$$

B. Variables et contraintes :

1) Limite de l'espace de travail et variables de conception

- Limite des variables articulaires

$$q_{es} = q_{i \min} \leq q_i \leq q_{i \max}$$

- Limites des variables de conception

$$(X_{c,i})_{\min} \leq X_{c,i} \leq (X_{c,i})_{\max}, i = 1, \dots, n$$

$$X_c = \{L, R, r, D\}$$

- R : Rayon de la base fixe
- r : Rayon de la nacelle
- L : Longueur des barres
- D_b : Diamètre de section des barres

- Limites cinématiques articulaires :

$$|\dot{q}_j| \leq (\dot{q}_j)_{\max}, j = 1, 2, 3 \text{ et } |\ddot{q}_j| \leq (\ddot{q}_j)_{\max}, j = 1, 2, 3$$

- Limites de forces extérieures :

Les forces extérieures agissent sur la nacelle, qui sont les forces de coupes, ne dépassent pas une limite donnée.

$$|(F_{ext})_j| \leq (F_{ext})_{\max}, j = 1, 2, 3$$

2) La rigidité des barres :

Comme nous avons présenté précédemment que toutes les articulations sont considérées parfaitement rigides.

Par construction, les barres sont sollicitées uniquement en traction-compression. Ces sollicitations restent suffisamment petites pour que les problèmes liés au flambement ne soient pas présents. La déformation d'une de ces barres est :

$$Df_b = \frac{F_b L}{SE} \quad (25)$$

Avec :

- F_b : Effort de traction-compression dans la barre
- L : Longueur initiale de la barre
- S : Surface d'une section droite de la barre
- E : Module d'Young du matériau dans lequel sont réalisées les barres

Cette déformation ne faut pas dépasser une valeur admissible trop petite $Df_b \leq (Df_b)_{ad}$ pour éviter la grande erreur de déplacement de la nacelle, qui influé négativement sur la rigidité de la machine.

3) L'absence de la configuration singulière :

Les configurations singulières sont des postures particulières de l'organe terminal où la rigidité naturelle des manipulateurs parallèles subit une grande détérioration.

On peut aussi introduire les singularités en abordant sommairement la notion d'équilibre mécanique d'un robot parallèle. Pour un manipulateur parallèle nous notons τ le vecteur des forces articulaires et \mathcal{F} le torseur des efforts externes appliqués sur l'organe terminal. Pour un torseur \mathcal{F} appliqué sur le plateau mobile, le système mécanique est en équilibre s'il existe des forces articulaires dont l'action sur la plate-forme est l'opposée de \mathcal{F} . Si ce n'est pas le cas, l'organe terminal du manipulateur va se déplacer jusqu'à ce qu'une nouvelle position d'équilibre soit atteinte. Or il existe une relation bien connue entre τ et \mathcal{F} :

$$\mathcal{F} = J^{-t} \tau \quad (26)$$

Où J^{-t} est la transposée de la matrice Jacobienne cinématique inverse. L'équation précédente décrit un système linéaire en terme de composantes du vecteur τ qui admettra en général une solution en τ pour tout \mathcal{F} (solution qui conduit donc à un équilibre mécanique du système) sauf dans le cas où la matrice J^{-t} est dégénérée : dans ce cas le système linéaire n'admet pas de solution et le système mécanique n'est plus en équilibre.

Donc on prend comme contrainte :

$$|J^{-t}| \neq 0$$

Pour éliminer cette contrainte il suffit d'éviter les singularités parallèles et serials.

- Singularité serial ($|J_q| = 0$)

$$\begin{aligned} |J_q| = 0 &\Rightarrow (z - q_1)(z - q_2)(z - q_3) = 0 \\ &\Rightarrow (z = q_1) \vee (z = q_2) \vee (z = q_3) \end{aligned}$$

Cette singularité apparaît lorsque l'un ou deux ou même trois parallélogrammes deviennent perpendiculaires aux directions des actionneurs linéaires. En d'autres termes, ces configurations sont obtenues lorsque $L = R - r$. Pour les éliminer, il est nécessaire de choisir $L > R - r$.

- Singularité parallèle ($|J_x| = 0$)

$$|J_x| = 0, \text{ signifie que les trois vecteurs } (B_1 - A_1)^t,$$

$(B_2 - A_2)^t, (B_3 - A_3)^t$ sont coplanaires. Pour les éliminer, il faut de choisir $L > R - r$.

4) Forces des Moteur :

Les forces fournies par les moteurs doivent être compatibles avec les limites de performances attendues (vitesses, accélérations et charge autorisées) en tout point de l'espace de travail.

L'expression des forces des moteurs est donnée par :

$$F_{mot} = M_{mot} \ddot{q} + M_{nac} {}^t J \ddot{x} + {}^t J F_{ext} \quad (27)$$

$$\text{avec } F_{mot} \leq (F_{mot})_{ad}$$

- $M_{mot} \ddot{q}$ composante de l'effort moteur due à l'accélération de la masse (M_{mot}) de la partie mobile

des moteurs (secondaire du moteur + liaison rotule).
Tous les moteurs sont identiques (modularité).

III. PROCEDURE ALGORITHMIQUE DEVELOPPEES

L'approche numérique que nous avons utilisée pour résoudre notre problème d'optimisation multi-objectif représente dans Fig.3.

- ${}^t J F_{ext}$ Composante de l'effort moteur due aux efforts extérieurs (principalement les efforts de coupe) appliqués à la nacelle.
- ${}^t J F_{nac,acc,D} = M_{nac} {}^t J \ddot{x}$: Composante de l'effort moteur due à l'accélération de la masse de la nacelle (M_{nac}).

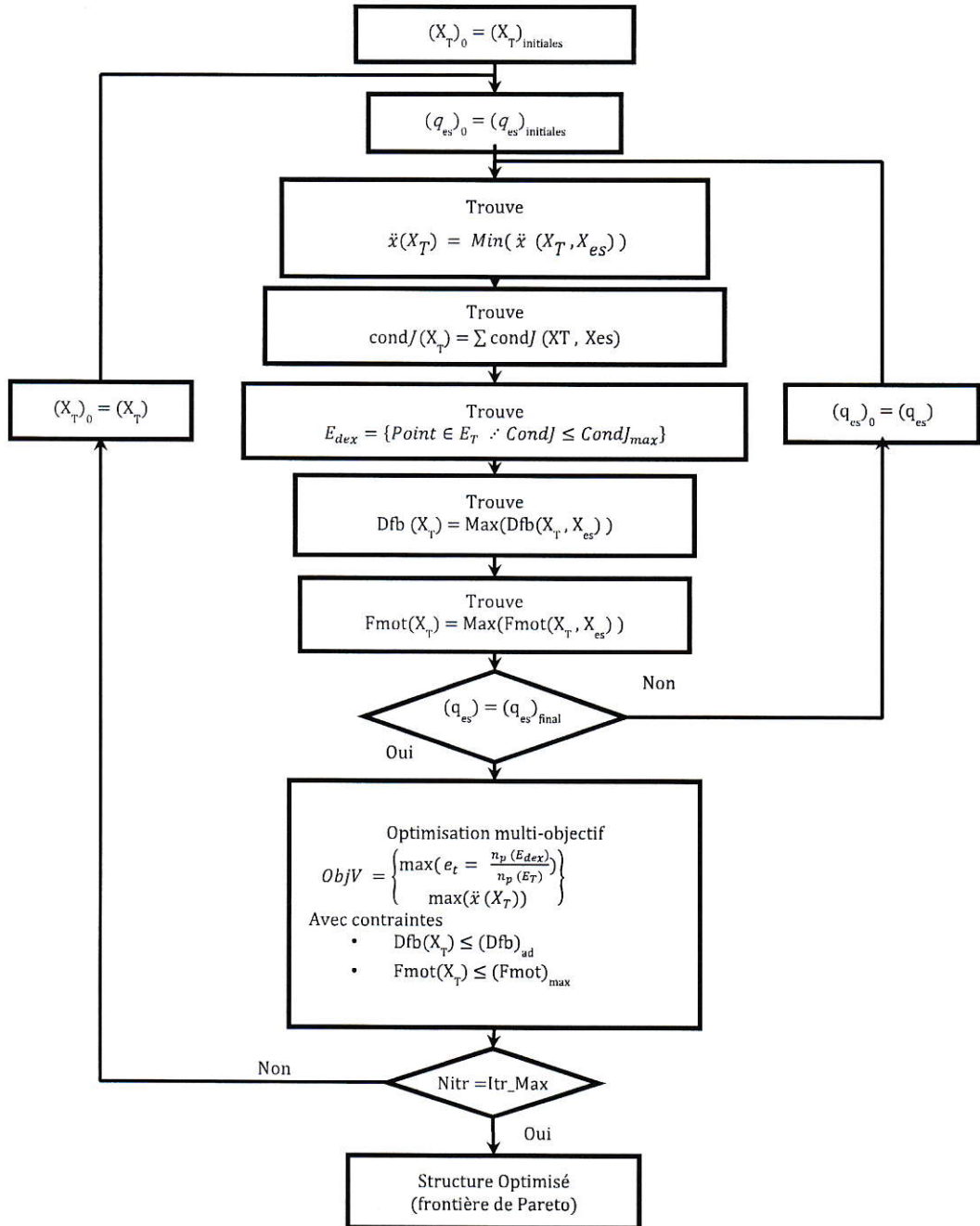


Fig. 3 Procédure algorithmique développées

A. Données de l'algorithme génétique et les caractéristiques du robot :

TABLE I
Données de l'algorithme NSGA II

Paramètres	Valeurs
Taille de la population	200 Individus
Nombre de générations	700 générations
Nombre de fonctions objectives	02 fitness
Nombres de contraintes	02
Pression de sélection	1.9
Type de mutation	mutation real
Probabilité de mutation	0.2
Type de codage	Codage real

TABLE II
Caractéristiques du robot

	Paramètre	Valeur	
		Min	Max
Espace de recherche	q (m)	0	0.6
	R (m)	0.5	0.7
	r (m)	0.1	0.3
	L (m)	0.8	1.7
	D_b (m)	0.01	0.05
	$ \dot{q}_j _{max}$ (m/s)	0.2	
	$ \ddot{q}_j _{max}$ (m/s ²)	0.2	
	$(F_{ext})_{max}$ (N)	1000	
Paramètres de robot	$CondJ_{max}$	4	
	(M_1) Masse de Nacelle (kg)	20	
	(M_2) Masse de Moteur (kg)	10	
	$(Df_b)_{ad}$ (mm)	0.1	
	$(F_{mot})_{ad}$ (N)	9000	

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

D'après l'exécution du programme de l'algorithme génétique NSGA II sous Matlab, donne les résultats graphiques qui sont présentées dans Fig.4, Ces résultats graphiques contiennent : La frontière de Pareto en 2D qui représente la solution de la meilleure itération, et les représentations de les deux fonctions objectif en fonction de (L-(R-r)).

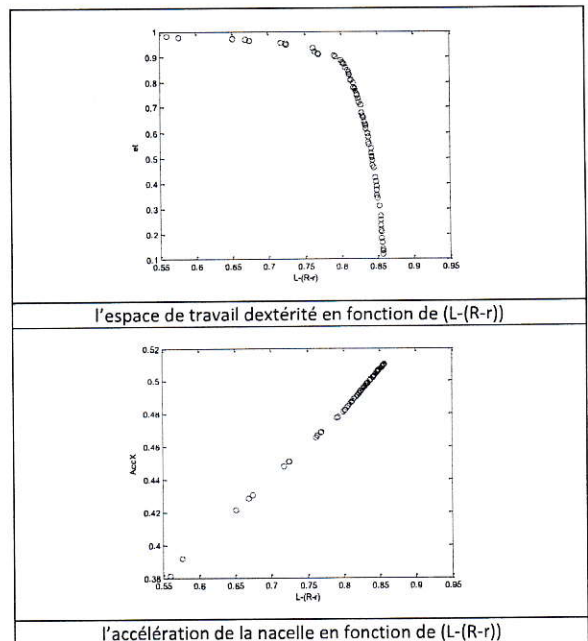
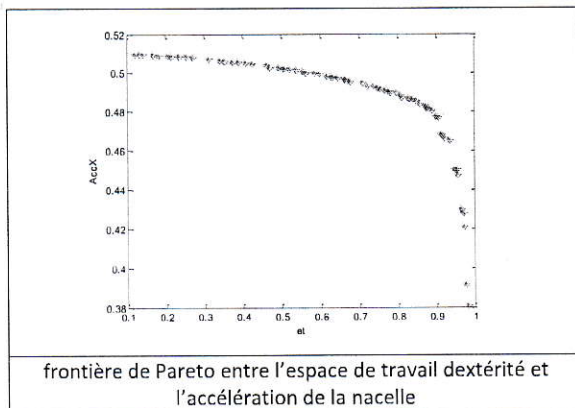


Fig. 4 Résultat graphique par NSGA-II

Nous avons résumé les résultats obtenues dans (TABLE.III) qui représente quelques valeurs de meilleures solutions des fonctions objectifs (e_t et \ddot{x}) et les variables (R, r, L). Ce résultat est un choix d'une solution parmi les résultats représentés dans la frontière de Pareto.

TABLE III
Fonctions objectives optimisés et les paramètres géométriques

e_t	\ddot{x}	L-(R-r)	L	R	r	R-r
98%	0,381	0,561	1,061	0,700	0,200	0,500
97%	0,428	0,669	1,169	0,700	0,200	0,500
96%	0,430	0,674	1,174	0,700	0,200	0,500
95%	0,451	0,726	1,226	0,700	0,200	0,500
93%	0,465	0,762	1,262	0,700	0,200	0,500
92%	0,466	0,765	1,265	0,700	0,200	0,500
91%	0,469	0,770	1,270	0,700	0,200	0,500
90%	0,478	0,793	1,293	0,700	0,200	0,500
89%	0,481	0,800	1,300	0,700	0,200	0,500
88%	0,482	0,802	1,300	0,698	0,200	0,498
87%	0,483	0,805	1,300	0,695	0,200	0,495
85%	0,486	0,810	1,300	0,695	0,205	0,490
84%	0,487	0,811	1,300	0,698	0,209	0,489
83%	0,487	0,813	1,300	0,700	0,213	0,487
81%	0,489	0,815	1,300	0,700	0,215	0,485
80%	0,490	0,818	1,300	0,697	0,215	0,482
78%	0,491	0,819	1,300	0,695	0,215	0,481
77%	0,491	0,820	1,300	0,680	0,200	0,480
75%	0,492	0,823	1,300	0,677	0,200	0,477
74%	0,493	0,825	1,300	0,675	0,200	0,475
72%	0,494	0,825	1,300	0,675	0,200	0,475
71%	0,495	0,828	1,300	0,675	0,203	0,472
68%	0,496	0,829	1,300	0,675	0,204	0,471
67%	0,496	0,830	1,300	0,674	0,204	0,470
66%	0,497	0,832	1,300	0,700	0,232	0,468
64%	0,498	0,833	1,300	0,700	0,233	0,467
63%	0,498	0,834	1,300	0,699	0,233	0,466
62%	0,499	0,835	1,300	0,698	0,233	0,465
60%	0,500	0,837	1,300	0,696	0,233	0,463
58%	0,500	0,838	1,300	0,700	0,237	0,462
56%	0,500	0,838	1,300	0,700	0,237	0,462
55%	0,501	0,839	1,300	0,700	0,239	0,461

54%	0,502	0,841	1,300	0,700	0,241	0,459
52%	0,502	0,841	1,300	0,700	0,241	0,459
51%	0,503	0,843	1,300	0,679	0,222	0,457
50%	0,503	0,843	1,300	0,678	0,220	0,457
50%	0,503	0,843	1,300	0,678	0,220	0,457
49%	0,503	0,843	1,300	0,678	0,221	0,457
49%	0,503	0,843	1,300	0,678	0,221	0,457
47%	0,503	0,843	1,300	0,679	0,223	0,457
46%	0,504	0,846	1,300	0,678	0,223	0,454
42%	0,505	0,847	1,300	0,676	0,223	0,453
41%	0,505	0,848	1,300	0,700	0,248	0,452
39%	0,506	0,849	1,300	0,700	0,248	0,451
37%	0,506	0,849	1,300	0,700	0,249	0,451
35%	0,506	0,850	1,300	0,700	0,249	0,450
34%	0,507	0,850	1,300	0,697	0,247	0,450
31%	0,508	0,853	1,300	0,700	0,253	0,447
27%	0,509	0,854	1,300	0,674	0,228	0,446
25%	0,509	0,855	1,300	0,674	0,228	0,445
23%	0,509	0,855	1,300	0,674	0,229	0,445
21%	0,509	0,855	1,300	0,674	0,229	0,445
18%	0,509	0,855	1,300	0,672	0,227	0,445
17%	0,510	0,856	1,300	0,673	0,229	0,444
14%	0,510	0,857	1,300	0,672	0,229	0,443
13%	0,510	0,857	1,300	0,672	0,229	0,443
12%	0,510	0,857	1,300	0,672	0,229	0,443

Nous pouvons choisir les valeurs de fonctions objectives optimisées $e_t = 98\%$ et $\ddot{x} = 0.381$ pour un grand espace de travail dextérité avec les paramètres géométriques suivants :

R	r	L
0,7	0,2	1,06

➤ Représentation de l'espace de travail

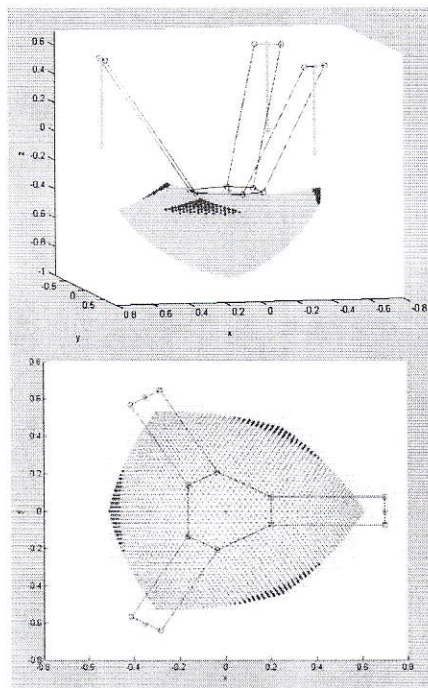


Fig. 5 Espace de travail de robot Delta (R=0.7 ; r=0.2 ; L=1.06)

- Points en vert : $\text{Cond}(J) \leq \text{Cond}J_{\max}$
- Points en rouge : $\text{Cond}(J) > \text{Cond}J_{\max}$

Ou nous pouvons choisir les valeurs de fonctions objectives optimisées $e_t = 12\%$ et $\ddot{x} = 0.510$ pour une grande

valeur d'accélération avec un petit espace de travail dextérité avec les paramètres géométriques suivants :

R	r	L
0.67	0.23	1.3

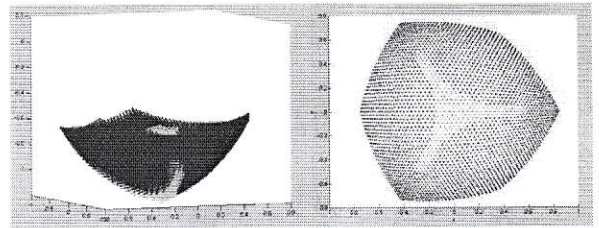


Fig. 6 Espace de travail de robot Delta (R=0.67 ; r=0.23 ; L=1.3)

- Points en vert : $\text{Cond}(J) \leq \text{Cond}J_{\max}$
- Points en rouge : $\text{Cond}(J) > \text{Cond}J_{\max}$

V. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons présenté une méthodologie de conception dimensionnelle des robots parallèles, fondée sur une approche d'optimisation multi-objectif des différents critères de performance, tels que la rigidité, les performances cinématiques et dynamiques, ainsi que l'espace de travail dextérité à l'aide des algorithmes génétiques. Pour sa résolution (Approche de la résolution), nous avons choisi l'algorithme génétique NSGA - II.

L'approche proposée permet de déterminer une bonne approximation de la compromission (front de Pareto) entre les différents critères de performances qui sont parfois antagonistes, avec leurs vecteurs associés de paramètres géométriques optimisés, ce qui est très difficile à obtenir avec les méthodes classiques, qui ne peuvent pas prendre en compte tous ces critères simultanément. Le front de Pareto obtenu regroupe les meilleures solutions, notre choix de la solution est fait selon d'avoir un grand espace de travail dextérité, qui se traduit par le vecteur de paramètres géométriques [R=0.7 ; r=0.2 ; L=1.06].

Les travaux de futurs concernent l'application de cette méthode à des structures plus complexes.

REFERENCES

- [1] R. Clavel, "DELTA, a fast robot with parallel geometry," in *18. International Symposium on Industrial Robots*, 1988, pp. 91-100.
- [2] F. Pierrot, C. Reynaud, and A. Fournier, "DELTA: a simple and efficient parallel robot," *Robotica*, vol. 8, pp. 105-109, 1990.
- [3] A. Codourey, "Dynamic modelling and mass matrix evaluation of the DELTA parallel robot for axes decoupling control," in *Intelligent Robots and Systems' 96, IROS 96, Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on*, 1996, pp. 1211-1218.
- [4] M.-O. Demaurex, "The Delta robot within the industry," in *Parallel Kinematic Machines*, ed: Springer, 1999, pp. 395-399.
- [5] F. Holy and K. Steiner, "Machining system with movable tool head," ed: Google Patents, 2000.
- [6] F. Launay and C. Fioroni, "Modeling and Preliminary Design Issues of a 3-axis Parallel Machine-Tool."
- [7] J.-P. Merlet, *Parallel robots* vol. 74: Springer, 2001.
- [8] E. F. Fichter, D. R. Kerr, and J. Rees-Jones, "The Gough-Stewart platform parallel manipulator: A retrospective appreciation," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 223, pp. 243-281, 2009.
- [9] R. Kelaiaia, O. Company, and A. Zaatri, "Multiobjective optimization

- of a linear Delta parallel robot," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 50, pp. 159-178, 2012.
- [10] X.-J. Liu, J. Wang, K.-K. Oh, and J. Kim, "A New Approach to the Design of a DELTA Robot with a Desired Workspace," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 39, pp. 209-225, 2004.
- [11] O. Company, "Machines-outils rapides rapides à structure parallèle. Méthodologie de conception, applications et nouveaux concepts," 2000.
- [12] A. Kosinska, M. Galicki, and K. Kedzior, "Determination of parameters of 3-dof spatial orientation manipulators for a specified workspace," *Robotica*, vol. 21, pp. 179-183, 2003.
- [13] E. Ottaviano and M. Ceccarelli, "Optimal design of CaPaMan (Cassino Parallel Manipulator) with a specified orientation workspace," *Robotica*, vol. 20, pp. 159-166, 2002.
- [14] R. E. Stamper, L.-W. Tsai, and G. C. Walsh, "Optimization of a three DOF translational platform for well-conditioned workspace," in *Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on*, 1997, pp. 3250-3255.