

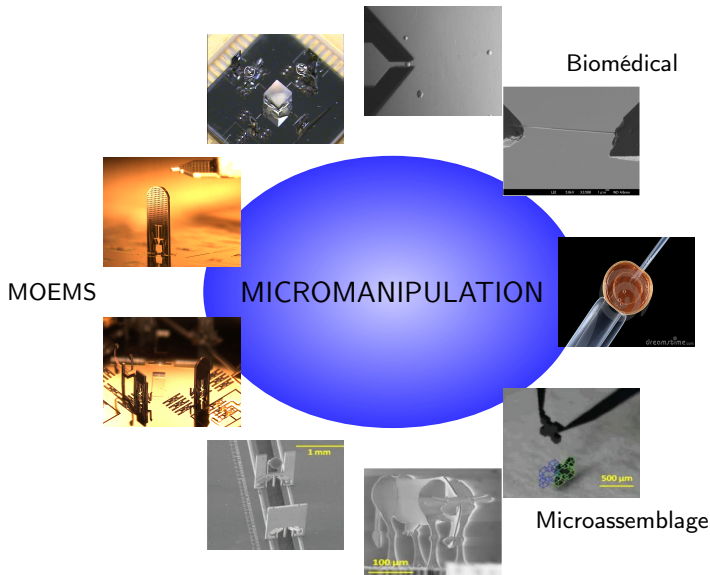
Conception, fabrication et commande d'un microrobot numérique planaire, non-redondant et en technologie MEMS

Encadrement : Yassine Haddab, Philippe Lutz

Vincent Chalvet

08 Mars 2013

Besoins en micromanipulation

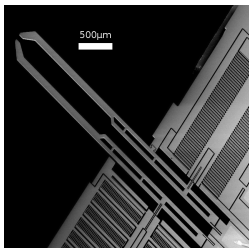


Outils de micromanipulation

Préhenseurs



[Femto-st]



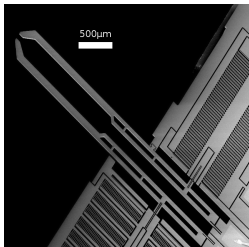
[FemtoTools]

Outils de micromanipulation

Préhenseurs

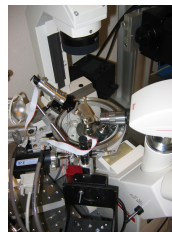


[FEMTO-ST]



[FEMTOTools]

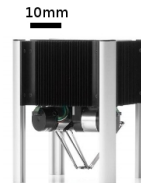
Microrobots porteurs



[FEMTO-ST]



[Kleindiek]



[Asyrii]

Défauts des microrobots porteurs

Miniaturisation
d'architectures robotiques
traditionnelles

- friction, jeu mécanique, lubrification, ...
- ↘ précision

Défauts des microrobots porteurs

Miniaturisation
d'architectures robotiques
traditionnelles

- friction, jeu mécanique, lubrification, ...
- ↘ précision

Matériaux actifs

- petites résolutions
- non-linéaire / non-stationnaire
- commande complexes

Défauts des microrobots porteurs

Miniaturisation
d'architectures robotiques
traditionnelles

- friction, jeu mécanique, lubrification, ...
- ↘ précision

Matériaux actifs

- petites résolutions
- non-linéaire / non-stationnaire
- commande complexes

Nombreux capteurs

- onéreux
- encombrants

Sommaire

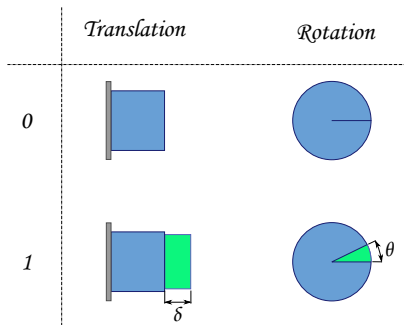
- ① La robotique numérique
- ② Le DiMiBot
- ③ Dimensionnement
- ④ Microfabrication et caractérisation
- ⑤ Planification de trajectoire
- ⑥ Conclusion et perspectives

Sommaire

- ① La robotique numérique
- ② Le DiMiBot
- ③ Dimensionnement
- ④ Microfabrication et caractérisation
- ⑤ Planification de trajectoire
- ⑥ Conclusion et perspectives

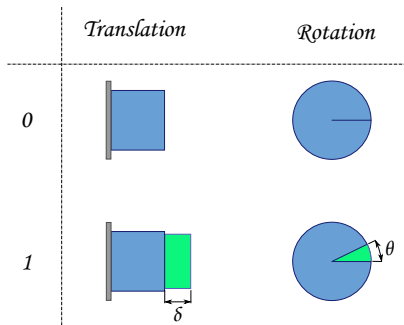
Nouveau paradigme

Actionneur binaire

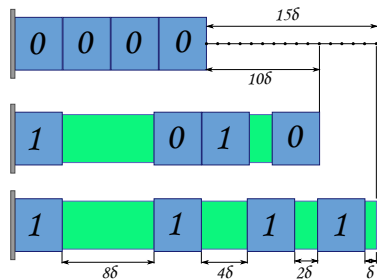


Nouveau paradigme

Actionneur binaire

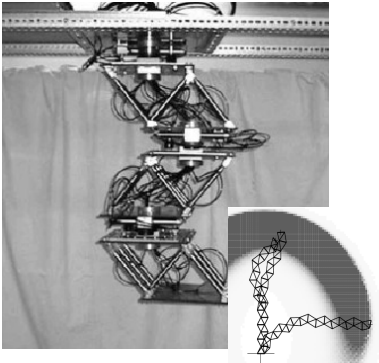


Robot numérique



Robots numériques existants

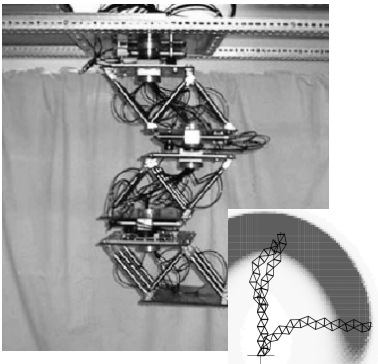
VGT : *Variable Geometry Truss*



[Chirikjian_94]

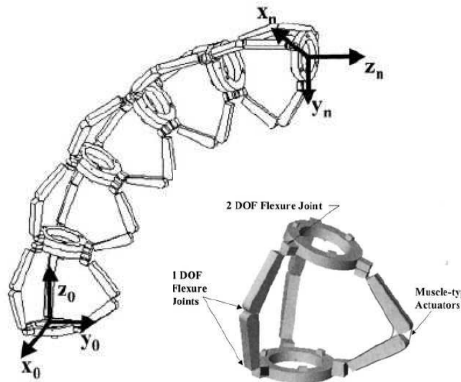
Robots numériques existants

VGT : *Variable Geometry Truss*



[Chirikjian_94]

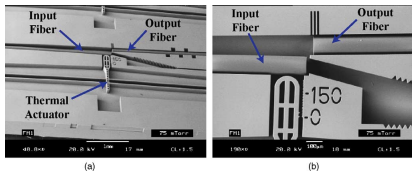
BRAID : *Binary Robotic Articulated Intelligent Device*



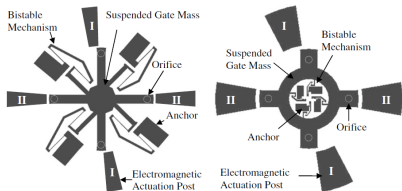
[Sujan_01]

Approches binaires à l'échelle micro

Actionneurs binaires



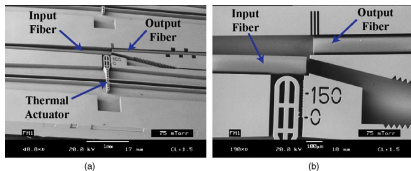
[Cochran_05]



[Luharuka_08]

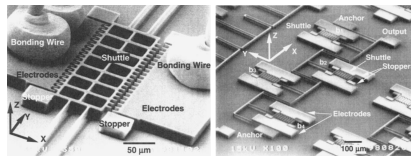
Approches binaires à l'échelle micro

Actionneurs binaires

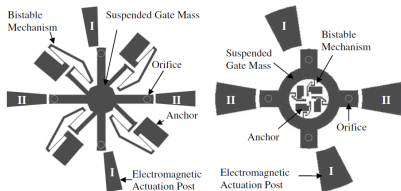


[Cochran_05]

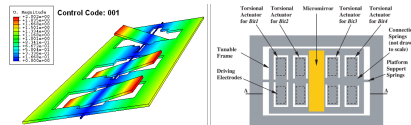
CNA mécaniques



[Toshiyoshi_99]

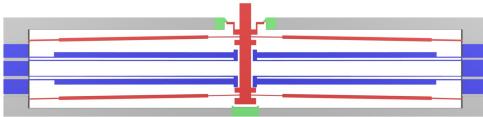


[Luharuka_08]

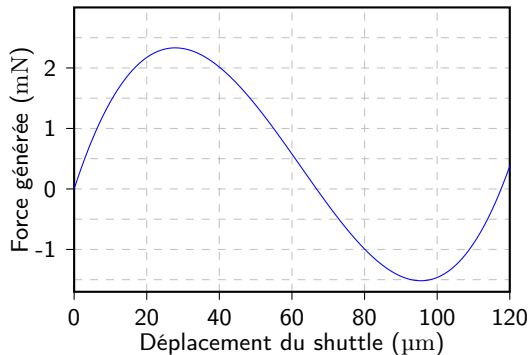
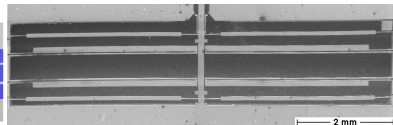
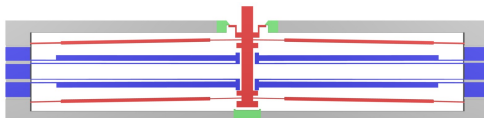


[Zhou_04]

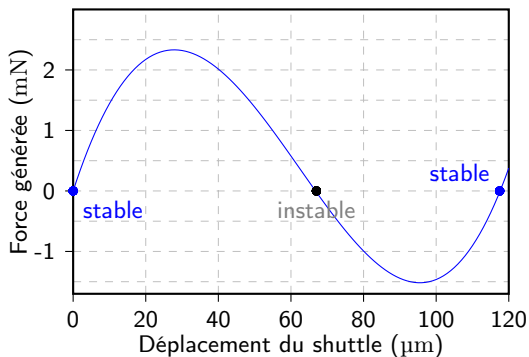
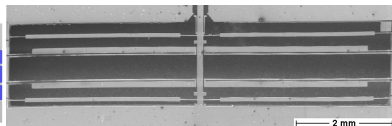
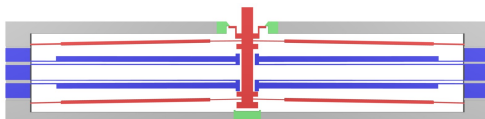
Le Module Bistable



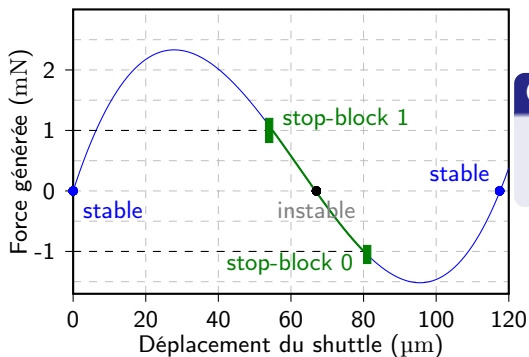
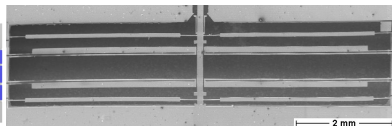
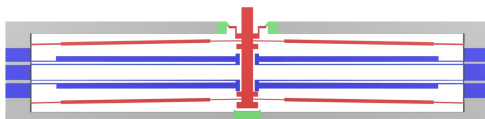
Le Module Bistable



Le Module Bistable



Le Module Bistable



Caractéristiques

- déplacement $\Delta = 25 \mu\text{m}$
- force de blocage = 1 mN

Sommaire

- 1 La robotique numérique
- 2 Le DiMiBot**
- 3 Dimensionnement
- 4 Microfabrication et caractérisation
- 5 Planification de trajectoire
- 6 Conclusion et perspectives

Cahier des charges

Architecture robotique

- commande en boucle ouverte
- indépendance au bruit
- petite dimension du microrobot
- structure monolithique
- modélisation simple du robot

Cahier des charges

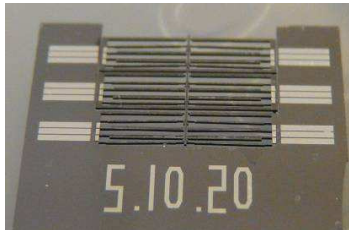
Architecture robotique

- commande en boucle ouverte
- indépendance au bruit
- petite dimension du microrobot
- structure monolithique
- modélisation simple du robot

Espace de travail généré

- discret planaire, de forme carrée
- distribution équidistante des positions atteignables
- résolution de positionnement sub-micrométrique
- bonnes performances de stabilité, robustesse et répétabilité

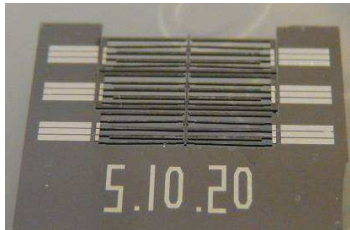
Cinématique choisie



Cinématique sérielles
fortement problématique

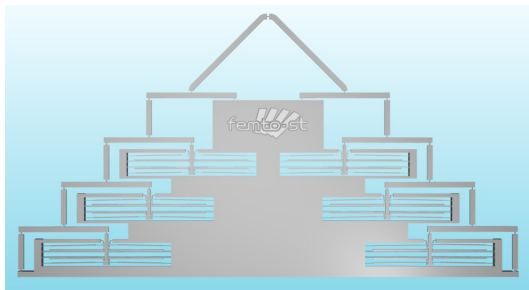
- poids
- fils d'alimentation

Cinématique choisie

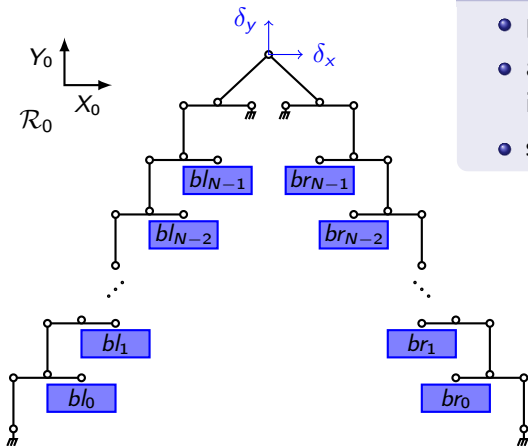


Cinématique sérielles
fortement problématique

- poids
- fils d'alimentation



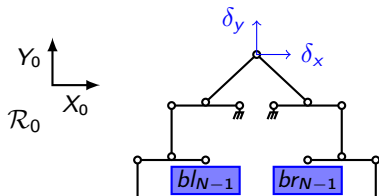
Modèle géométrique direct



Hypothèses

- poutres parfaitement rigides
- articulations parfaites (centre instantané de rotation fixe)
- simplification des petits angles

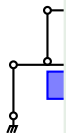
Modèle géométrique direct



Hypothèses

- poutres parfaitement rigides
- articulations parfaites (centre instantané de rotation fixe)
- simplification des petits angles

MGD généralisé

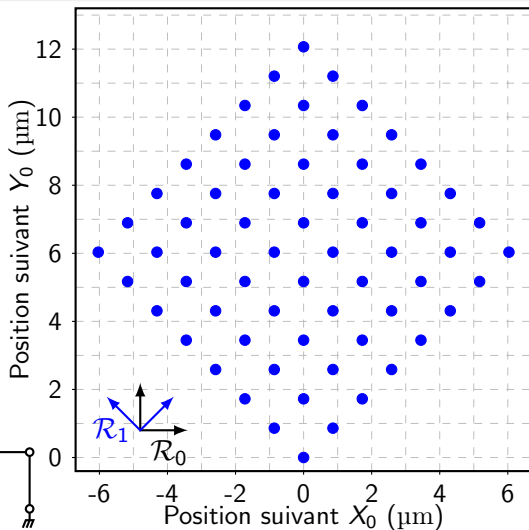
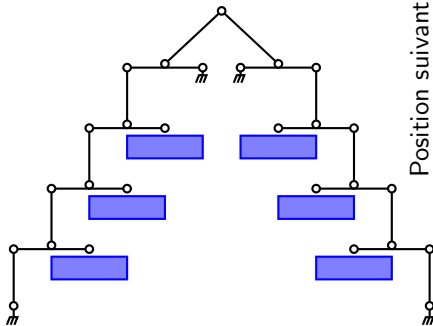


$$\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} 1 & \dots & \left(\frac{1}{2}\right)^{N-1} & -1 & \dots & -\left(\frac{1}{2}\right)^{N-1} \\ 1 & \dots & \left(\frac{1}{2}\right)^{N-1} & 1 & \dots & \left(\frac{1}{2}\right)^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} bl_{N-1} \\ \vdots \\ bl_0 \\ br_{N-1} \\ \vdots \\ br_0 \end{bmatrix}$$

Espace de travail atteignable

Espace de travail

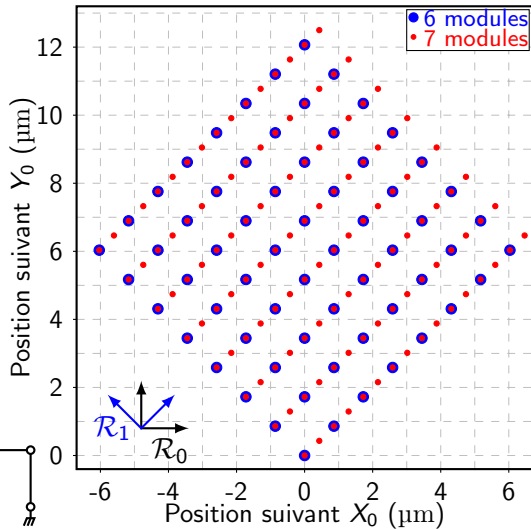
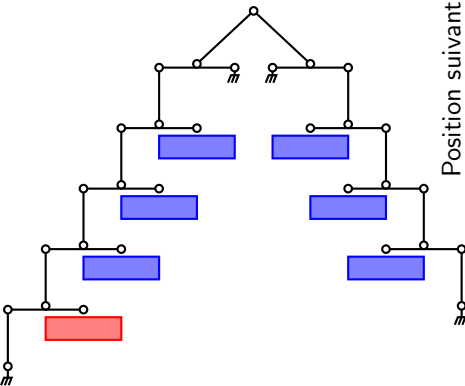
- 64 positions discrètes
- carré $8,5 \mu\text{m}$
- résolution $1,22 \mu\text{m}$



Espace de travail atteignable

Espace de travail

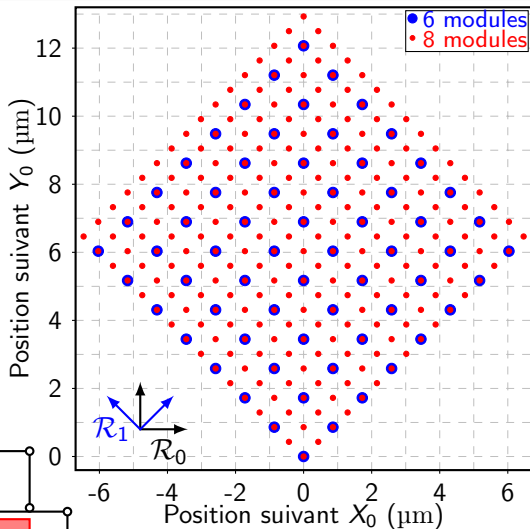
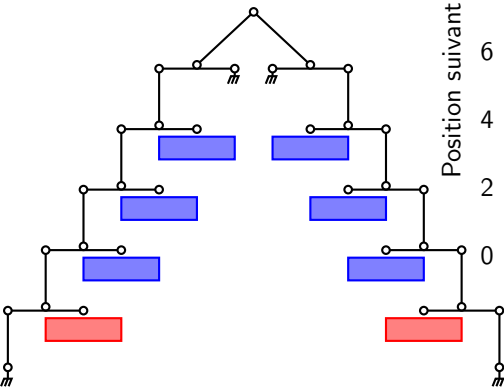
- 128 positions discrètes



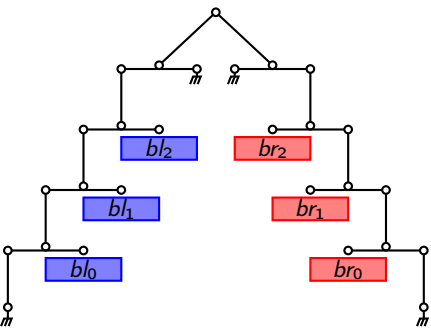
Espace de travail atteignable

Espace de travail

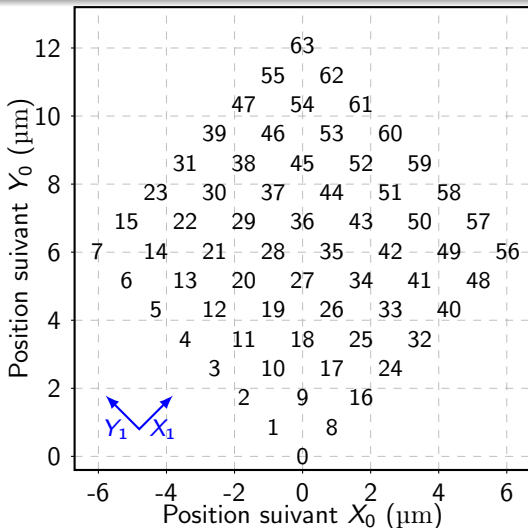
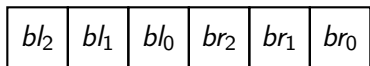
- 256 positions discrètes
- carré $9,1 \mu\text{m}$
- résolution 610 nm



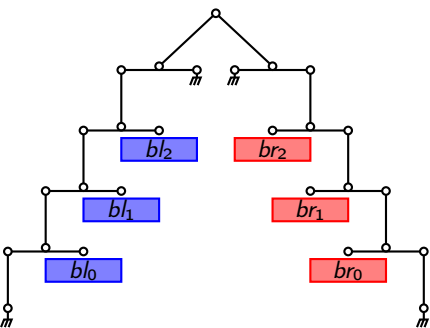
Mots binaires



Mot Binaire



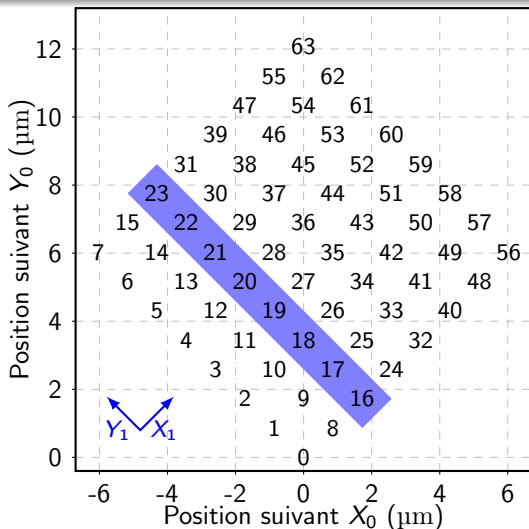
Mots binaires



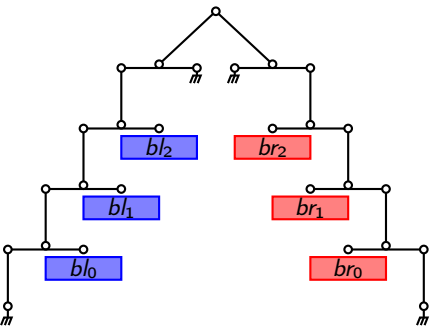
Mot Binaire

0	1	0	br_2	br_1	br_0
---	---	---	--------	--------	--------

rangée 2 suivant X_1



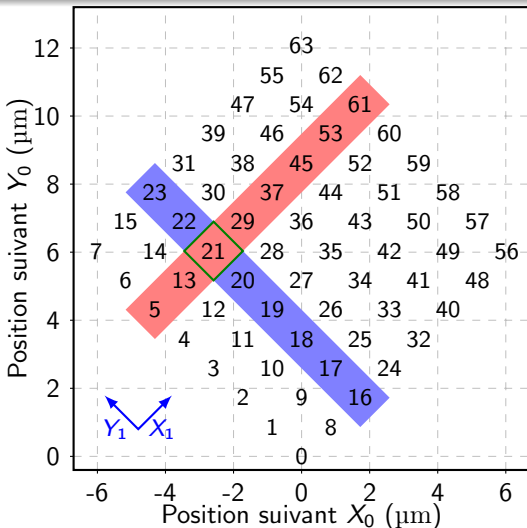
Mots binaires



Mot Binaire

0	1	0	1	0	1
---	---	---	---	---	---

rangée 5 suivant Y_1



Modèle Géométrique inverse

Seul paramètre nécessaire : résolution de l'espace de travail.

MGI

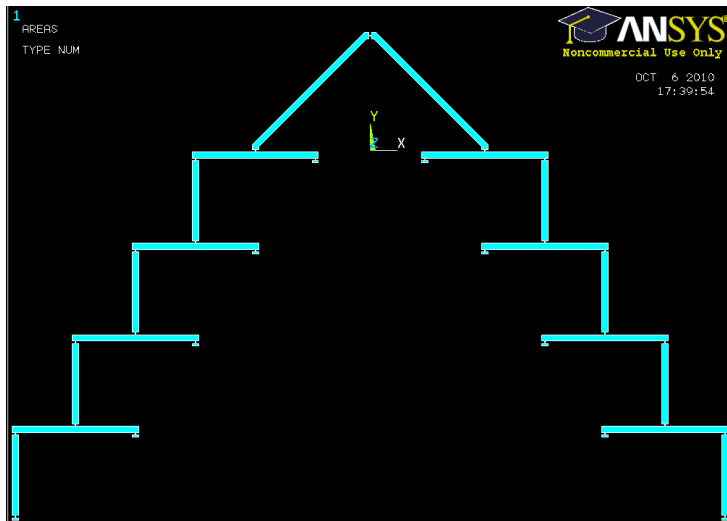
$$\begin{cases} bl_i = \left(\left(\left\lfloor \frac{x_d}{r_x} \right\rfloor \& 2^i \right) \neg = 0 \right) \\ br_j = \left(\left(\left\lfloor \frac{y_d}{r_y} \right\rfloor \& 2^j \right) \neg = 0 \right) \end{cases}$$

- $\lfloor \cdot \rfloor$: fonction arrondi (entier le plus proche)
- x_d, y_d : coordonnées dans le repère \mathcal{R}_1 de la position désirée
- r_x, r_y : résolutions de l'espace de travail dans les directions X_1 et Y_1 respectivement
- $\neg =$: test booléen de différence

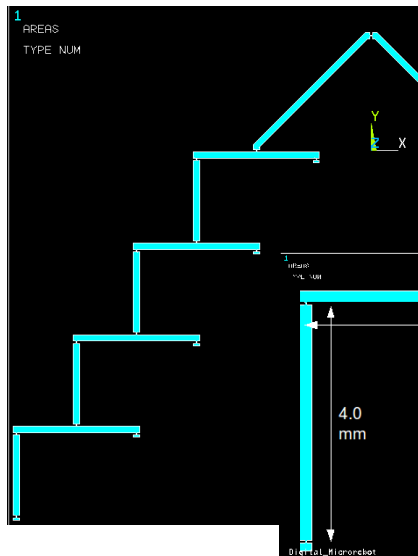
Sommaire

- ① La robotique numérique
- ② Le DiMiBot
- ③ Dimensionnement**
- ④ Microfabrication et caractérisation
- ⑤ Planification de trajectoire
- ⑥ Conclusion et perspectives

Paramètres

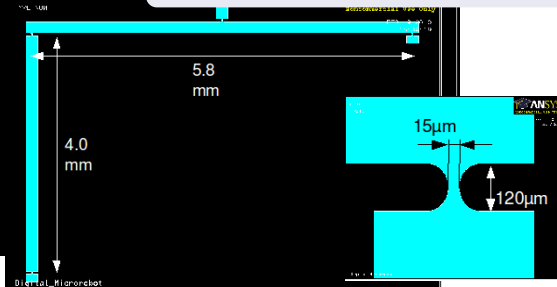


Paramètres

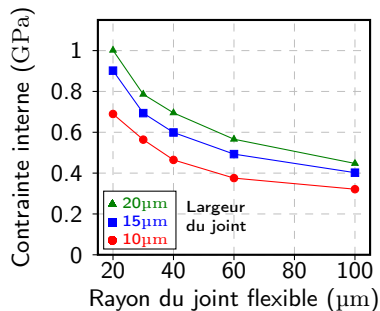
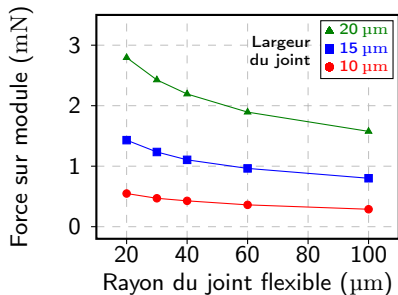


Paramètres à dimensionner

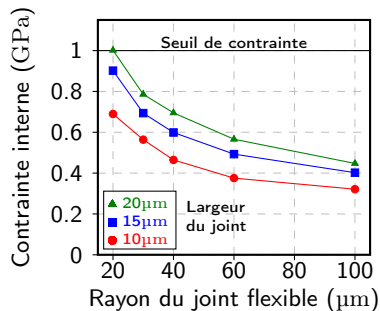
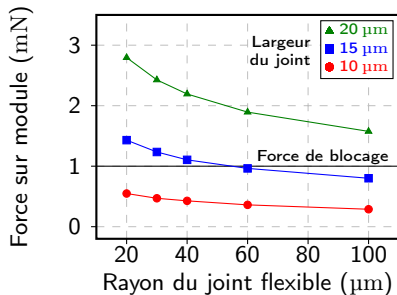
- épaisseur de la structure $100\ \mu\text{m}$
- longueur des différentes poutres
- largeur des poutres
- dimensions des joints flexibles
 - largeur
 - rayon



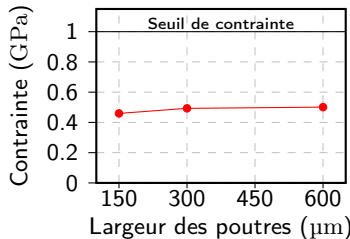
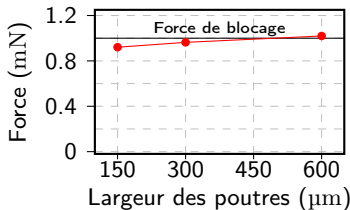
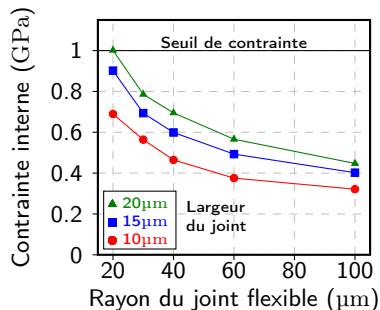
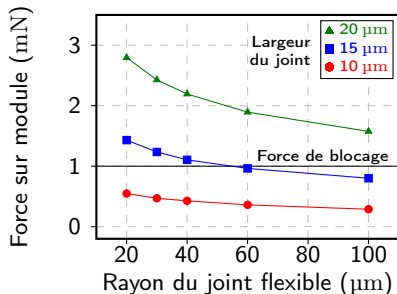
Force et contrainte



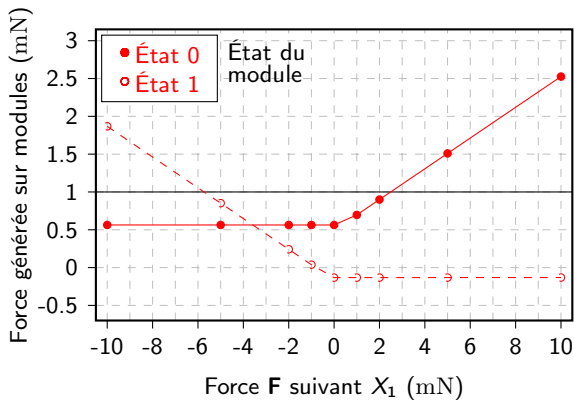
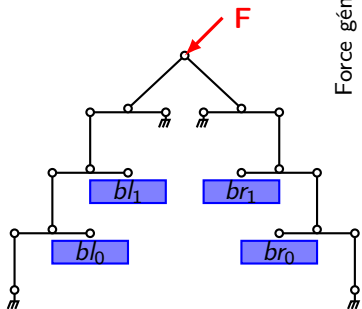
Force et contrainte



Force et contrainte



Force extérieure



Sommaire

- ① La robotique numérique
- ② Le DiMiBot
- ③ Dimensionnement
- ④ Microfabrication et caractérisation**
- ⑤ Planification de trajectoire
- ⑥ Conclusion et perspectives

Process de microfabrication

Masque A



Wafer SOI

- 100 μm device layer
- 1 μm oxyde
- 300 μm handle layer

■ Si ■ SiO₂ ■ Al ■ résine

Process de microfabrication

Masque A



Dépot d'aluminium



Si



SiO₂



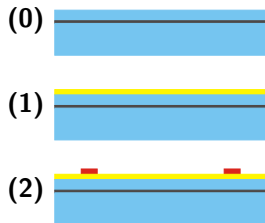
Al



résine

Process de microfabrication

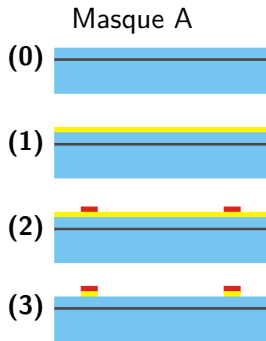
Masque A



Photolithographie



Process de microfabrication

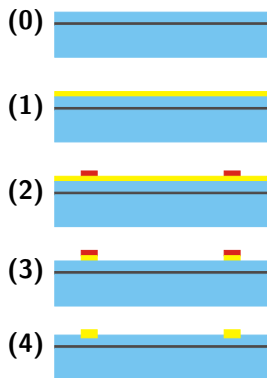


Gravure



Process de microfabrication

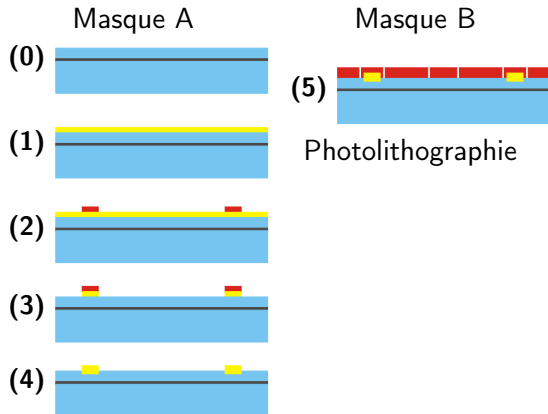
Masque A



Contact ohmique 1h à
450°C



Process de microfabrication



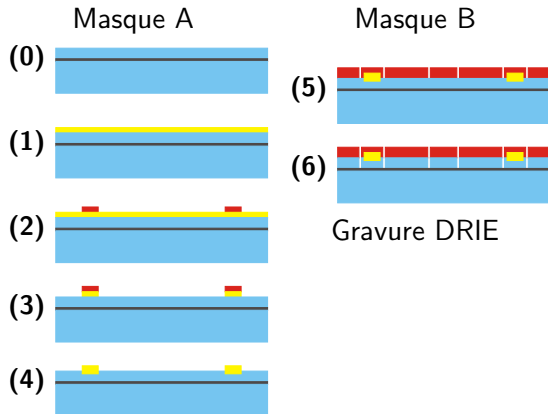
Si

SiO₂

Al

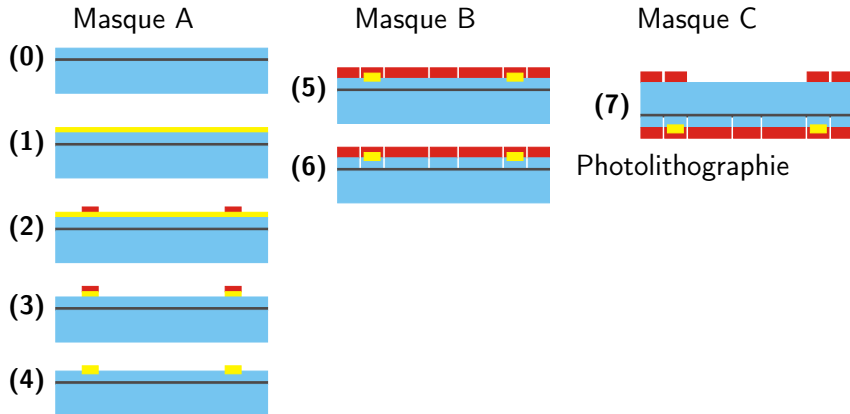
résine

Process de microfabrication



Si SiO₂ Al résine

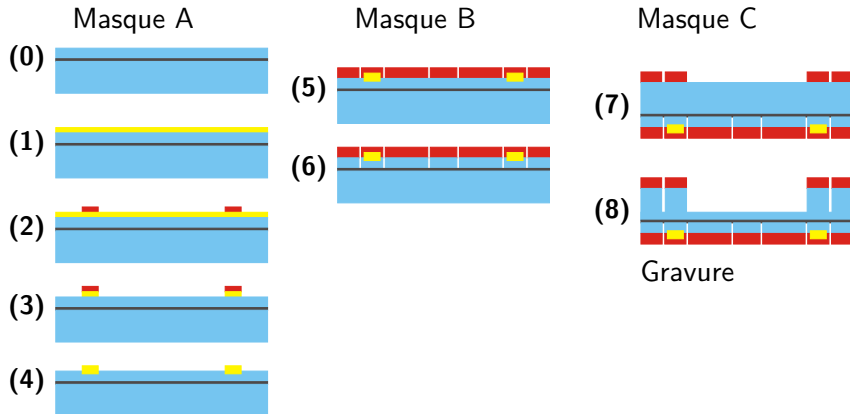
Process de microfabrication



Photolithographie

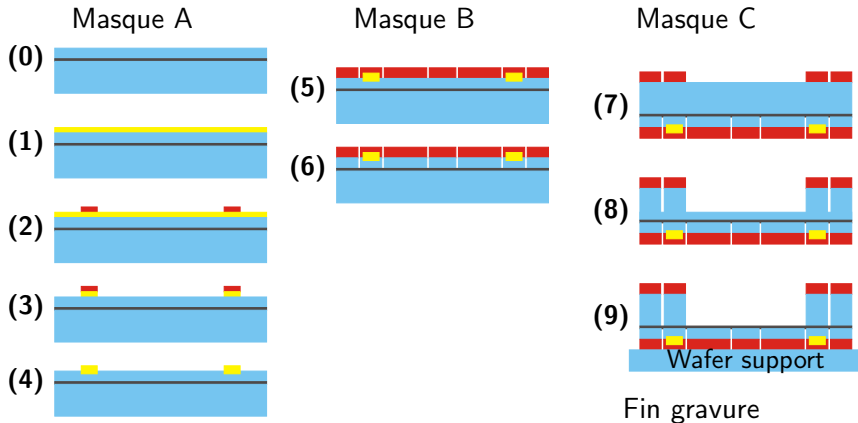
Si
 SiO_2
 Al
 résine

Process de microfabrication



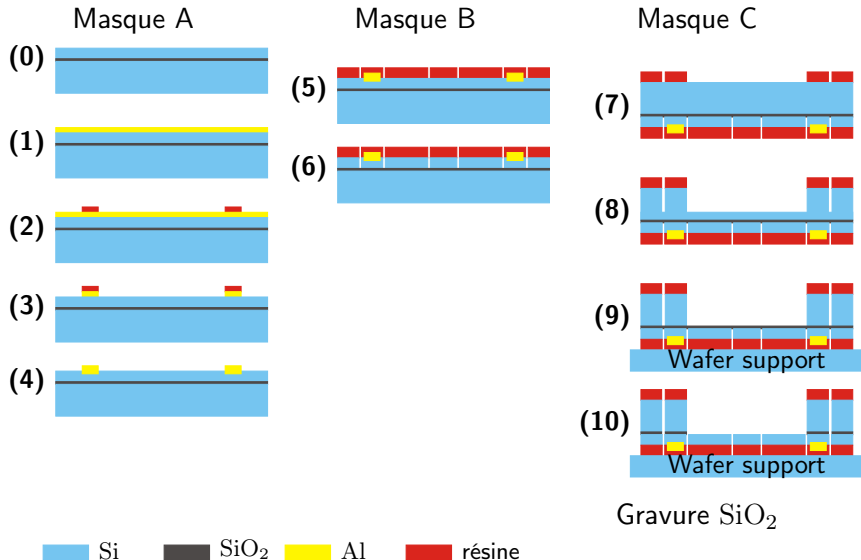
Si
 SiO₂
 Al
 résine

Process de microfabrication

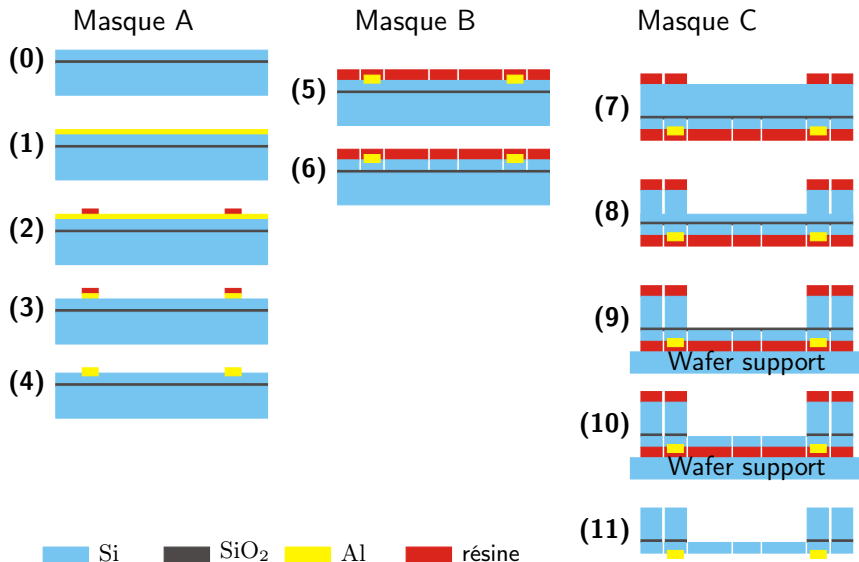


Si
 SiO_2
 Al
 résine

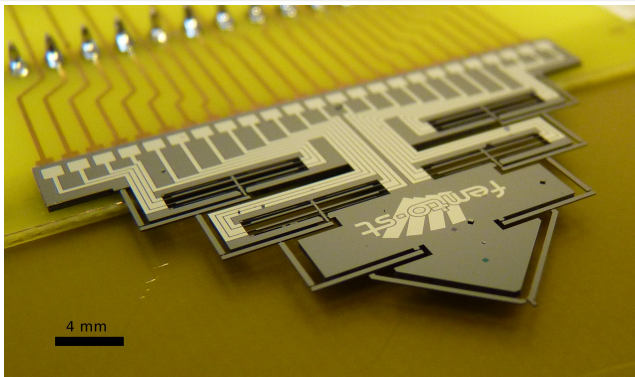
Process de microfabrication



Process de microfabrication



Premier prototype



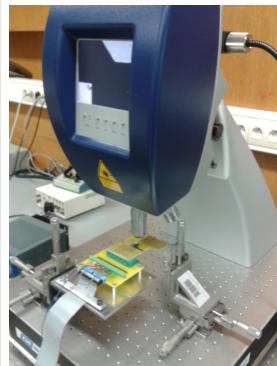
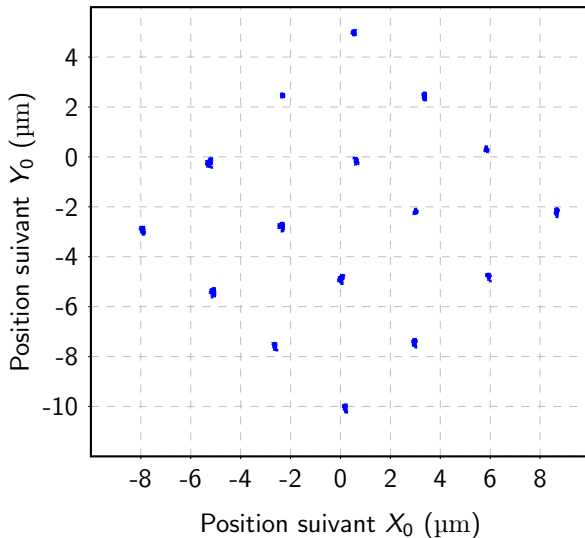
DiMiBot à 4 modules

largeur : 36 mm

hauteur : 24 mm

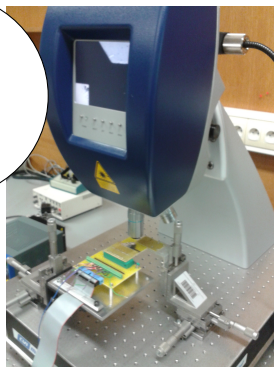
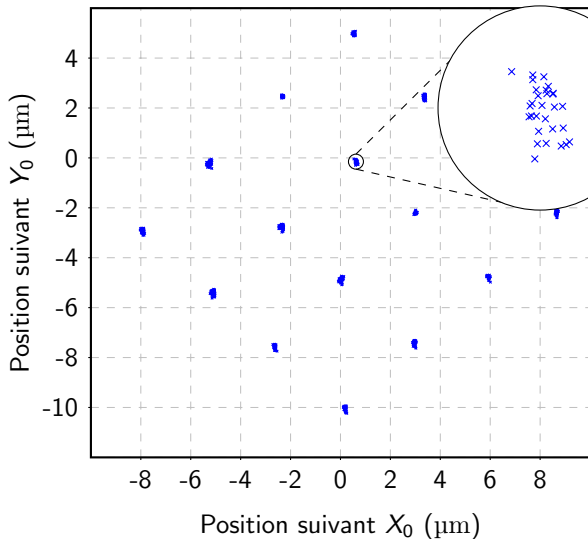
épaisseur : 400 μm

Espace de travail atteignable



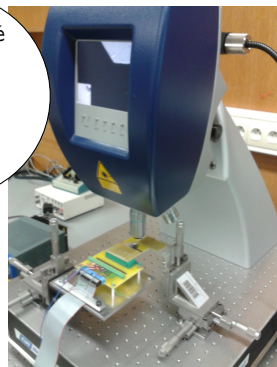
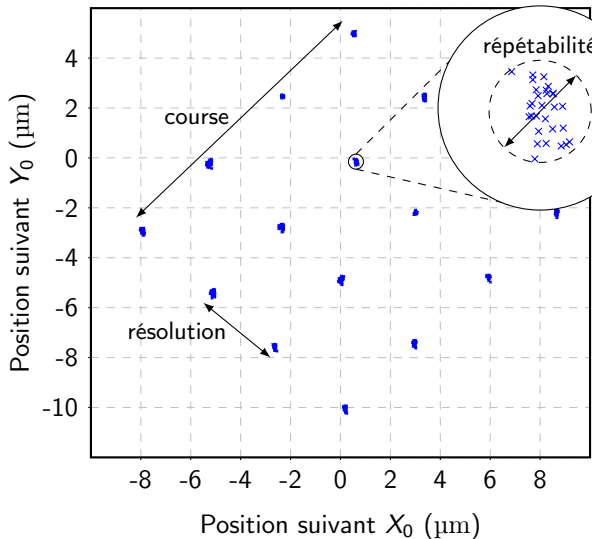
[Polytec MSA-500]

Espace de travail atteignable



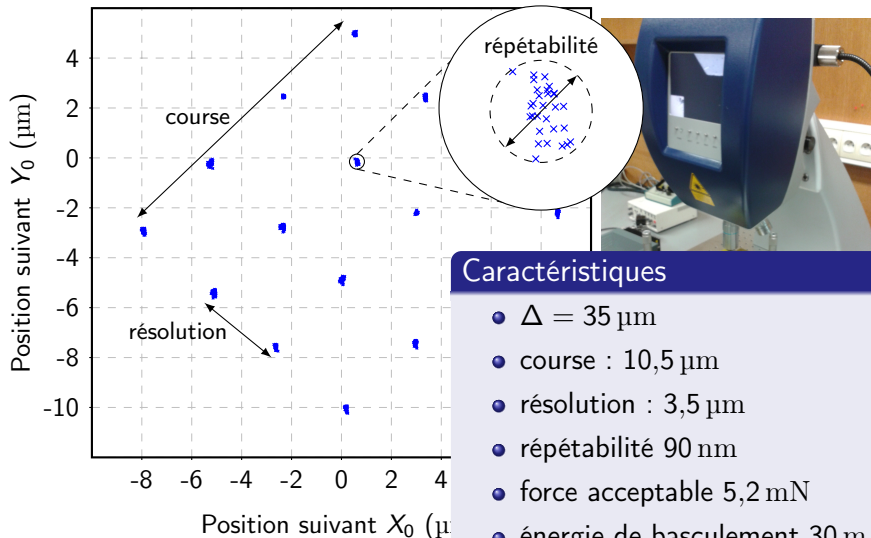
[Polytec MSA-500]

Espace de travail atteignable



[Polytec MSA-500]

Espace de travail atteignable



Sommaire

- 1 La robotique numérique
- 2 Le DiMiBot
- 3 Dimensionnement
- 4 Microfabrication et caractérisation
- 5 Planification de trajectoire**
- 6 Conclusion et perspectives

Commande du DiMiBot

Volonté :

- contrôle précis de la trajectoire empruntée par l'organe terminal

Commande du DiMiBot

Volonté :

- contrôle précis de la trajectoire empruntée par l'organe terminal

Solution :

- basculement d'un seul module à la fois

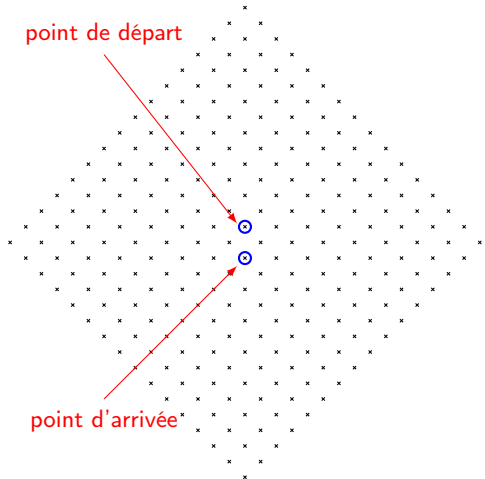
Commande du DiMiBot

Volonté :

- contrôle précis de la trajectoire empruntée par l'organe terminal

Solution :

- basculement d'un seul module à la fois



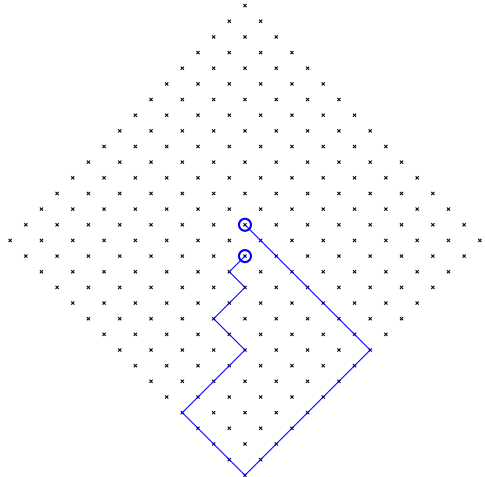
Commande du DiMiBot

Volonté :

- contrôle précis de la trajectoire empruntée par l'organe terminal

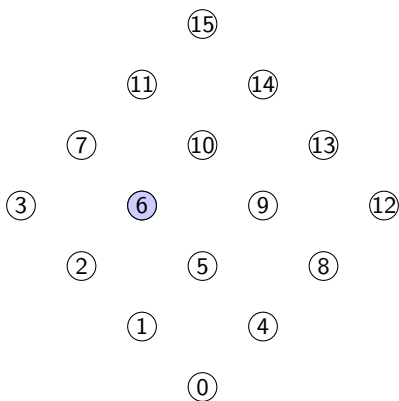
Solution :

- basculement d'un seul module à la fois



Théorie des graphes

DiMiBot à 4 modules



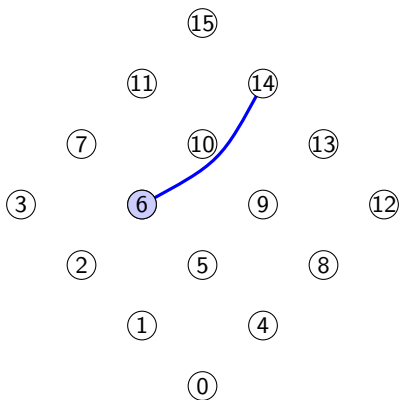
Mot Binaire

bl_1 bl_0 br_1 br_0

nœud 6 0 1 1 0

Théorie des graphes

DiMiBot à 4 modules



Mot Binaire

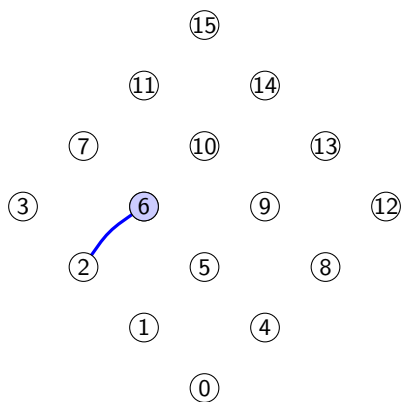
bl_1 bl_0 br_1 br_0

nœud 6 0 1 1 0

nœud 14 1 1 1 0

Théorie des graphes

DiMiBot à 4 modules



Mot Binaire

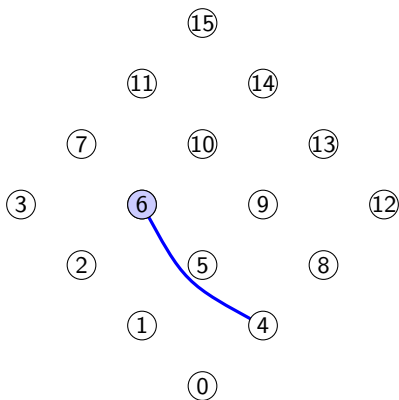
bl_1 bl_0 br_1 br_0

nœud 6 0 1 1 0

nœud 2 0 0 1 0

Théorie des graphes

DiMiBot à 4 modules



Mot Binaire

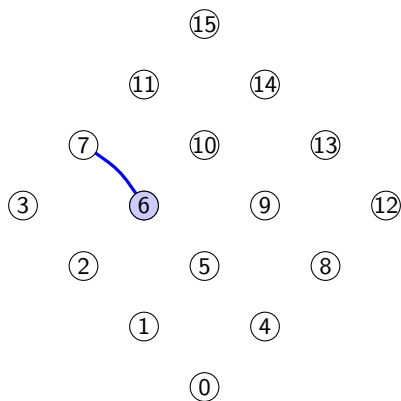
bl_1 bl_0 br_1 br_0

nœud 6 0 1 1 0

nœud 4 0 1 0 0

Théorie des graphes

DiMiBot à 4 modules



Mot Binaire

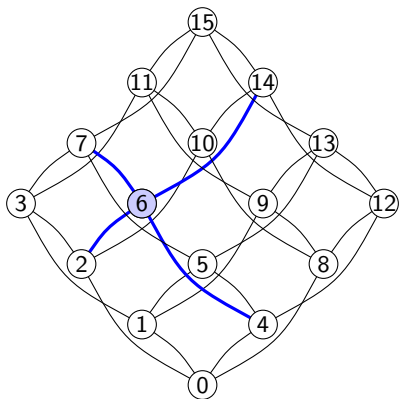
bl_1 bl_0 br_1 br_0

nœud 6 0 1 1 0

nœud 7 0 1 1 1

Théorie des graphes

DiMiBot à 4 modules



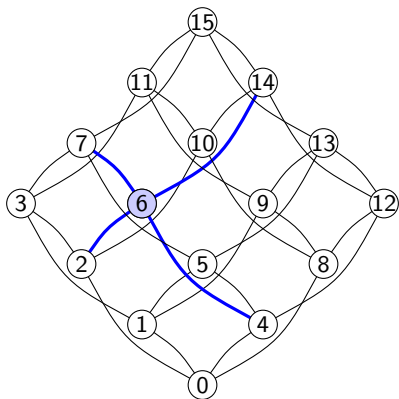
Mot Binaire

bl_1 bl_0 br_1 br_0

nœud 6 0 1 1 0

Théorie des graphes

DiMiBot à 4 modules



Mot Binaire

bl_1 bl_0 br_1 br_0

nœud 6 0 1 1 0

Choix d'une fonction de coût

- nombre de basculement
- distance parcourue ($= 2^i$ pour les modules bl_i et br_i)

Matrice d'adjacence

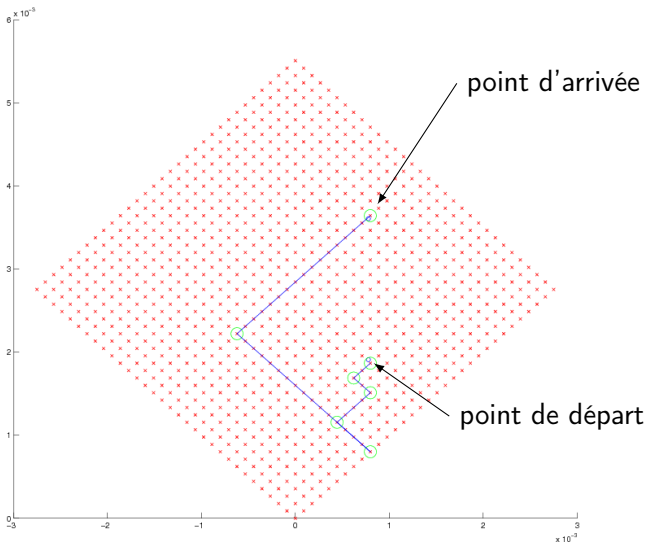
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	1	2	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	2	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
2	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0
3	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0
5	0	1	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0
6	0	0	1	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0
7	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
8	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0
9	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	1	0	0
10	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	1	0
11	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	1
12	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2	0
13	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	2
14	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	2	0	0	1
15	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	2	1	0

Matrice d'adjacence

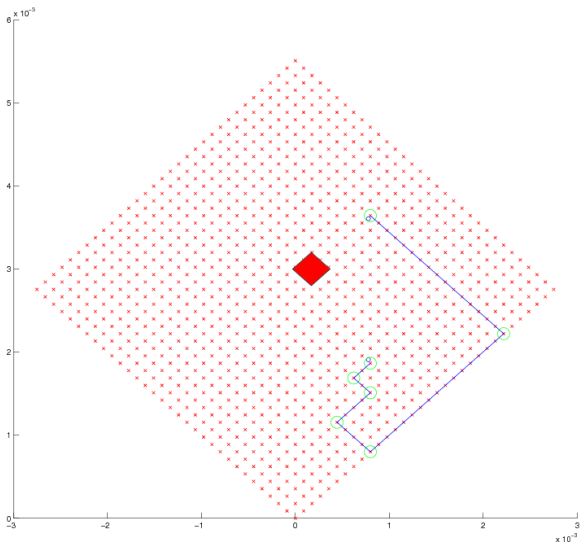
Calcul récursif de la matrice d'adjacence

0	0													
0	0													
1	1													
2	2													
3	0													
4	1													
5	0													
6	0													
7	0													
8	2													
9	0													
10	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0
11	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0
12	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	1	2
13	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	1	0
14	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	2	0
15	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	2

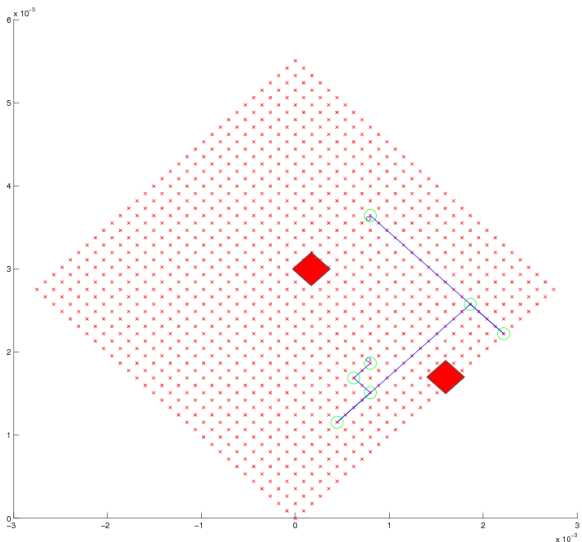
Algorithme de Dijkstra



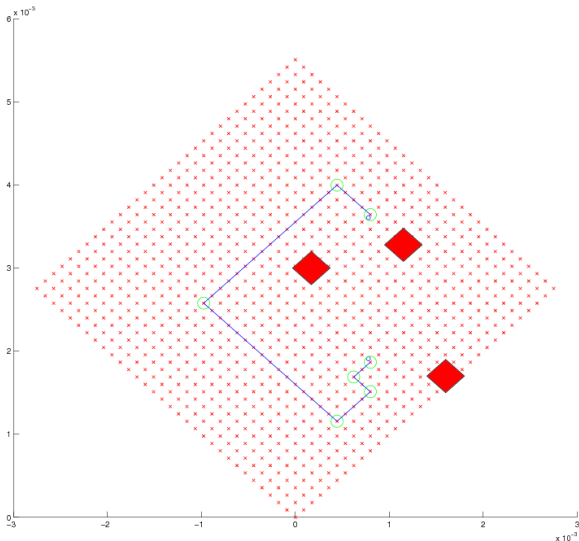
Algorithme de Dijkstra



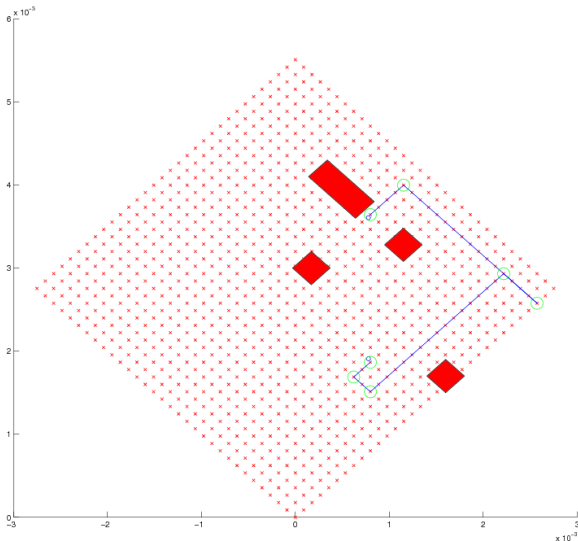
Algorithme de Dijkstra



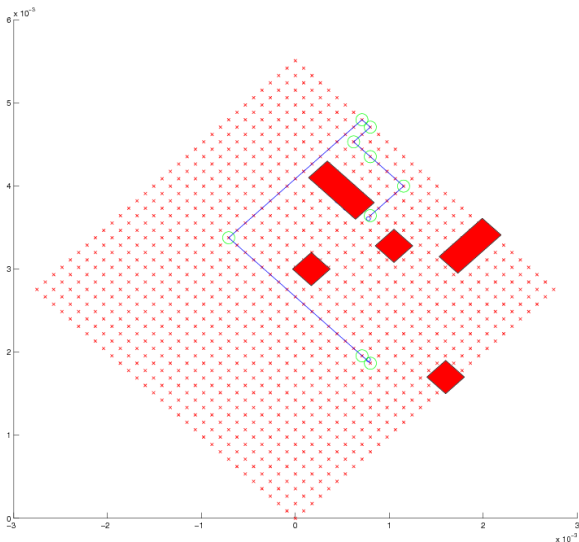
Algorithme de Dijkstra



Algorithme de Dijkstra



Algorithme de Dijkstra



Amélioration de l'algorithme

Algorithme A*

- amélioration de l'algorithme de Dijkstra
- utilisation d'une heuristique
- orienter les recherches du chemin optimal

Amélioration de l'algorithme

Algorithme A*

- amélioration de l'algorithme de Dijkstra
- utilisation d'une heuristique
- orienter les recherches du chemin optimal

Inconvénients de la matrice d'adjacence

- très consommatrice en mémoire (matrice carrée de taille 2^{2N})
- Recherche d'adjacents de complexité algorithmique $\mathcal{O}(2^N)$

Graphe hyper-cubique

0
1
3
2

Graphe hyper-cubique

0	0	2	10	8
1	1	3	11	9
3	5	7	15	13
2	4	6	14	12

Graphe hyper-cubique

0
1
3
2

0	2	10	8
1	3	11	9
5	7	15	13
4	6	14	12

0	2	18	16
1	3	19	17
9	11	27	25
8	10	26	24

Graphe hyper-cubique

0
1
3
2

0	2	10	8
1	3	11	9
5	7	15	13
4	6	14	12

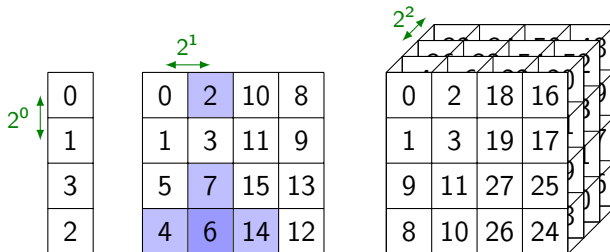
0	2	18	16
1	3	19	17
9	11	27	25
8	10	26	24

calcul itératif du graphe

$$G_0 = 0$$

$$G_i = \text{concat}(i, G_{i-1}, G_{i-1} + 2^{i-1}, G_{i-1} + 2^{i-1} + 2^{N+i-1}, G_{i-1} + 2^{N+i-1})$$

Graphe hyper-cubique



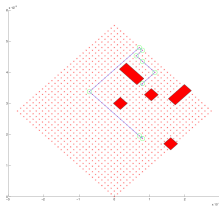
calcul itératif du graphe

$$G_0 = 0$$

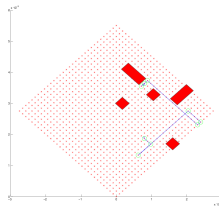
$$G_i = \text{concat}(i, G_{i-1}, G_{i-1} + 2^{i-1}, G_{i-1} + 2^{i-1} + 2^{N+i-1}, G_{i-1} + 2^{N+i-1})$$

Comparaison des algorithmes

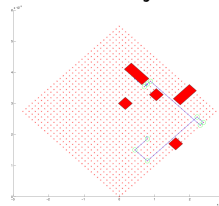
Dijkstra



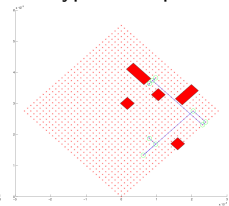
Dijkstra bidirectionnel



A* matrice d'adjacence

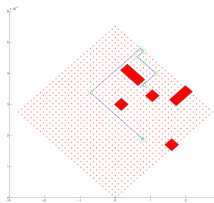
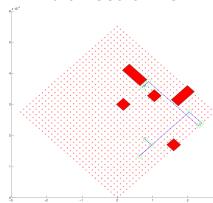
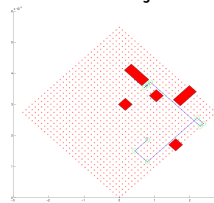
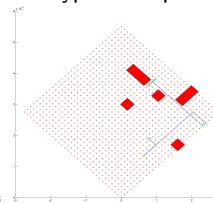


A* graphe hyper-cubique



Comparaison des algorithmes

Dijkstra

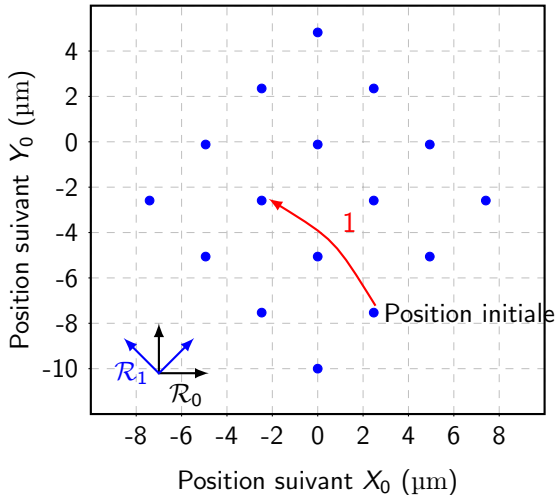
Dijkstra
bidirectionnelA*
matrice d'adjacenceA* graphe
hyper-cubique

10	24,8s	9,07s	0,15s	0,24s
12	1120s	300s	1,17s	0,94s
14	-	-	-	1,37s
16	-	-	-	4,21s
18	-	-	-	41,8s
20	-	-	-	193,5s

[- : limite de mémoire]

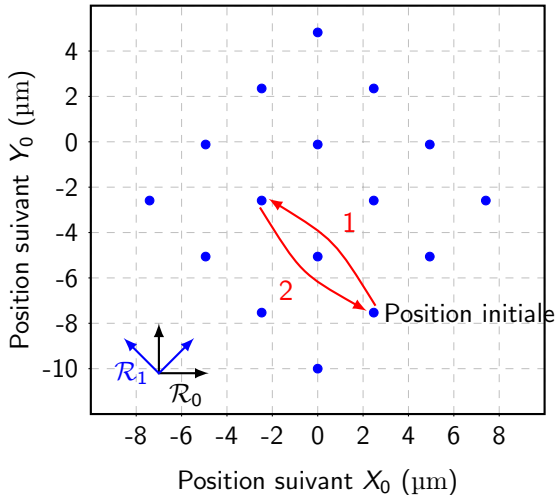
(sous linux, processeur Intel Core 2 Duo à 3,00GHz)

Micromanipulation



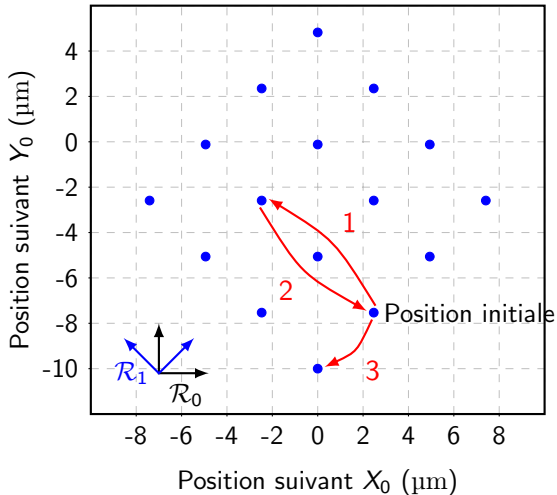
Position	Mot binaire ($bl_1bl_0br_1br_0$)
initiale	0100 0110

Micromanipulation



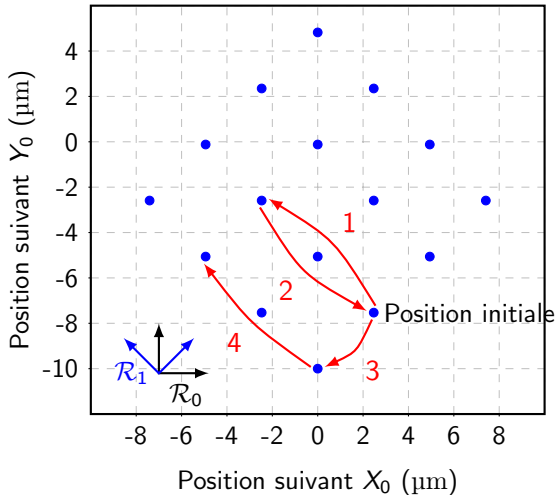
Position	Mot binaire ($bl_1bl_0br_1br_0$)
initiale	0100
	0110
	0100

Micromanipulation



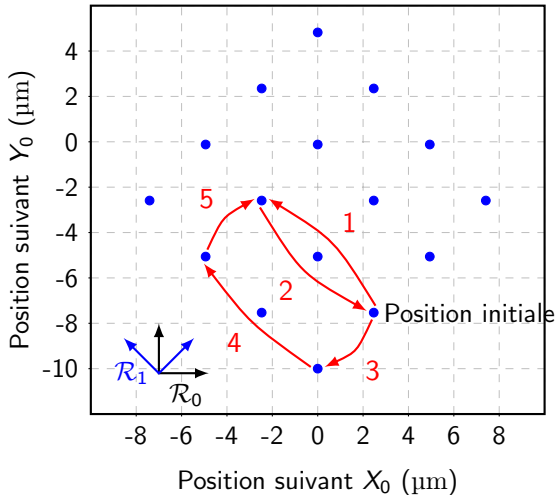
Position	Mot binaire ($bl_1bl_0br_1br_0$)
initiale	0100
	0110
	0100
	0000

Micromanipulation



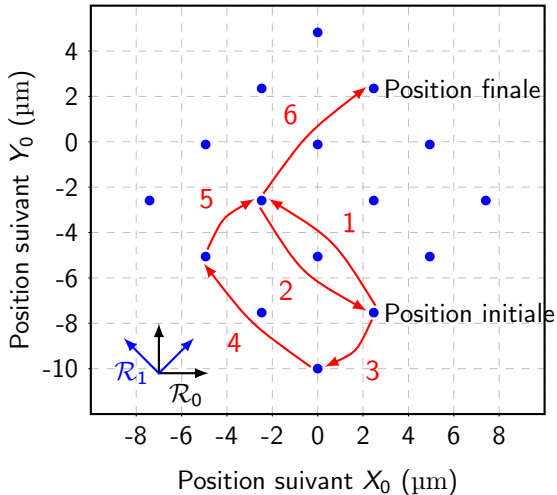
Position	Mot binaire ($bl_1bl_0br_1br_0$)
initiale	0100
	0110
	0100
	0000
	0010

Micromanipulation



Position	Mot binaire ($bl_1bl_0br_1br_0$)
initiale	0100
	0110
	0100
	0000
	0010
	0110

Micromanipulation



Position	Mot binaire ($bl_1bl_0br_1br_0$)
initiale	0100 0110 0100 0000 0010 0110
finale	1110

Sommaire

- ① La robotique numérique
- ② Le DiMiBot
- ③ Dimensionnement
- ④ Microfabrication et caractérisation
- ⑤ Planification de trajectoire
- ⑥ Conclusion et perspectives

Conclusion

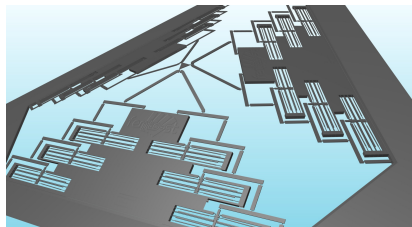
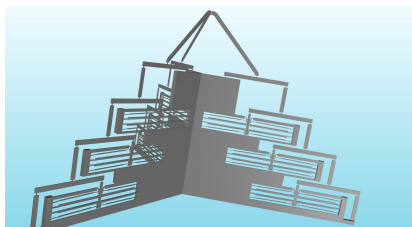
- Conception d'une architecture originale
- Mise en évidence de modélisations géométriques direct et inverse
- Analyse de dimensionnement des différents éléments de l'architecture robotique
- Fabrication du premier microrobot numérique
- Validation expérimentale du concept de microrobot numérique
 - utilisation en milieu confiné – MEB
- Commande et planification de trajectoire du microrobot

Perspectives

- utilisation du premier prototype pour manipulation au sein d'un TEM
- actionnement à distance (par laser), faible consommation énergétique

Perspectives

- utilisation du premier prototype pour manipulation au sein d'un TEM
- actionnement à distance (par laser), faible consommation énergétique
- Nouvelles architectures tridimensionnelles



- Journaux internationaux à comité de lecture

[1] - **V. Chalvet**, Y. Haddab and P. Lutz, *A microfabricated planar digital microrobot for precise positioning based on bistable modules*, IEEE Transactions on Robotics, Accepté le 11 Janvier 2013 , DOI : 10.1109/TRO.2013.2240174.

[2] - **V. Chalvet**, Y. Haddab, and P. Lutz , *Control and trajectory planing of a non-redundant digital microrobot*, article en cours d'écriture.

- Conférence internationale avec actes et à comité de lecture

[3] - **V. Chalvet**, A. Zarzycki, Y. Haddab and P. Lutz, *Digital microrobotics based on bistable modules : design of a non-redundant digital micropositioning robot*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, ZH, May 2011, pp. 3628-3633.

- Chapitres de livres

[4] - Y. Haddab, **V. Chalvet**, Q. Chen and P. Lutz, *Digital Microrobotics using MEMS technology in Advanced Mechatronics and MEMS Devices*, Springer, ISBN 978-1-4419-9984-9, August 2012.

[5] - Y. Haddab, **V. Chalvet**, and M. Rakotondrabe , *Approches de commande en boucle ouverte our les micro-manipulateurs flexibles à base de matériaux actifs*, Hermes, en cours de soumission.

- Brevet

[6] - **V. Chalvet**, Y. Haddab A. Zarzycki and P. Lutz, *Micro-robot, procédé de commande, procédé de simulation et programmes d'ordinateur associés*, WO/2012/104546 - Déposé en Février 2011, étendu à l'international en Janvier 2012.

MERCI DE VOTRE ATTENTION !



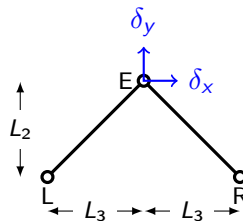
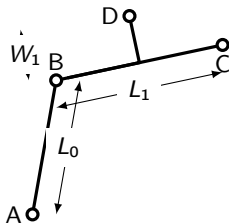
Liste des slides

- ① Avant-propos
1, 2, 3
- ① La robotique numérique
6, 7, 8, 9
- ② Le DiMiBot
11, 12, 13, 14, 15, 16
- ③ Dimensionnement
18, 19, 20
- ④ Microfabrication et caractérisation
22, 23, 24
- ⑤ Planification de trajectoire
26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33
- ⑥ Conclusion et perspectives
35, 36, 37

Annexes

- MGD
- Caméra thermique
- FEA
- Analyse modale
- Comparaison des algorithmes

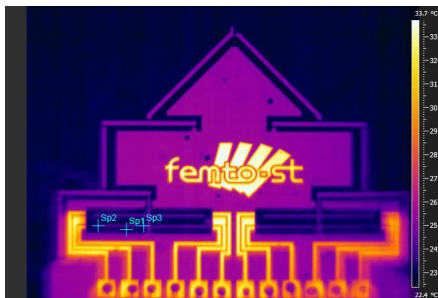
Modèle géométrique direct



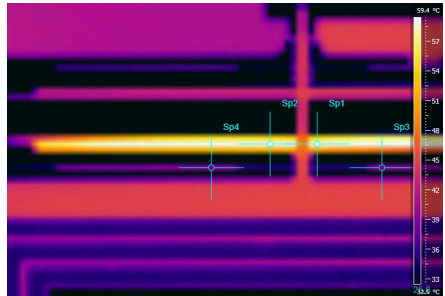
MGD généralisé

$$\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{\Delta}{4} \begin{pmatrix} W_1 & L_2 \\ L_1 & 2L_3 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{L_3}{L_2} \end{bmatrix}}_K \begin{bmatrix} 1 & \dots & \left(\frac{1}{2}\right)^{N-1} & -1 & \dots & -\left(\frac{1}{2}\right)^{N-1} \\ 1 & \dots & \left(\frac{1}{2}\right)^{N-1} & 1 & \dots & \left(\frac{1}{2}\right)^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} bl_{N-1} \\ \vdots \\ bl_0 \\ br_{N-1} \\ \vdots \\ br_0 \end{bmatrix}$$

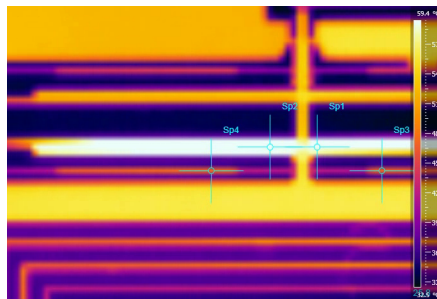
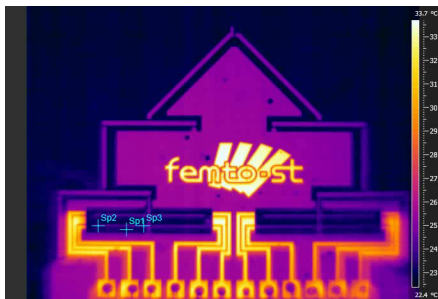
Caméra thermique



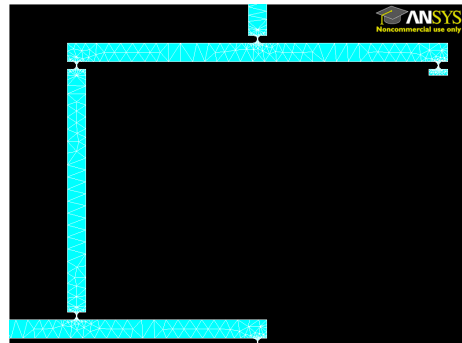
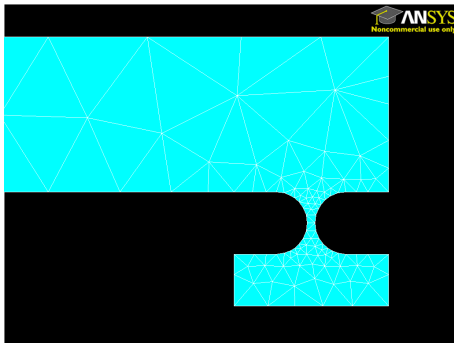
Caméra thermique



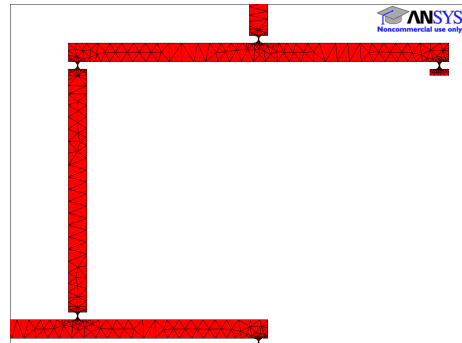
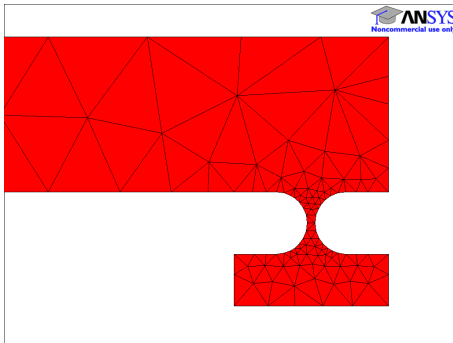
Caméra thermique



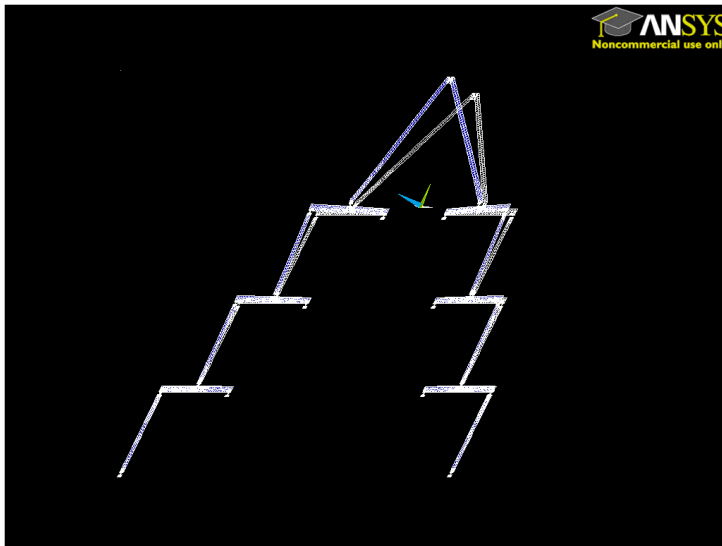
FEA



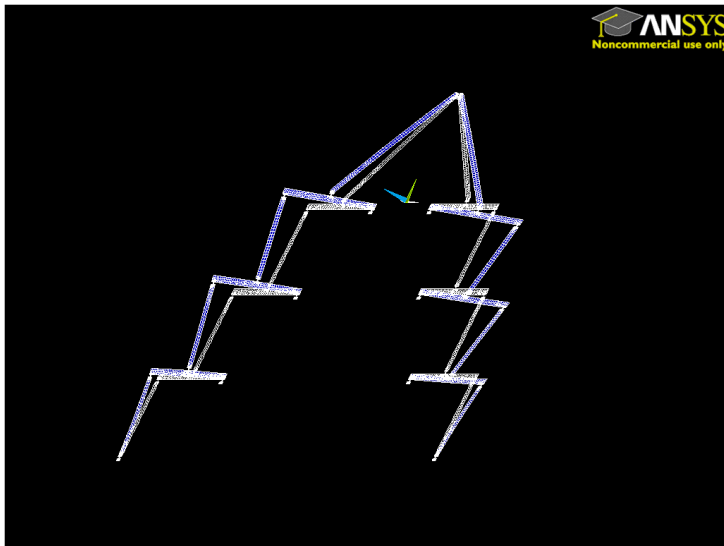
FEA



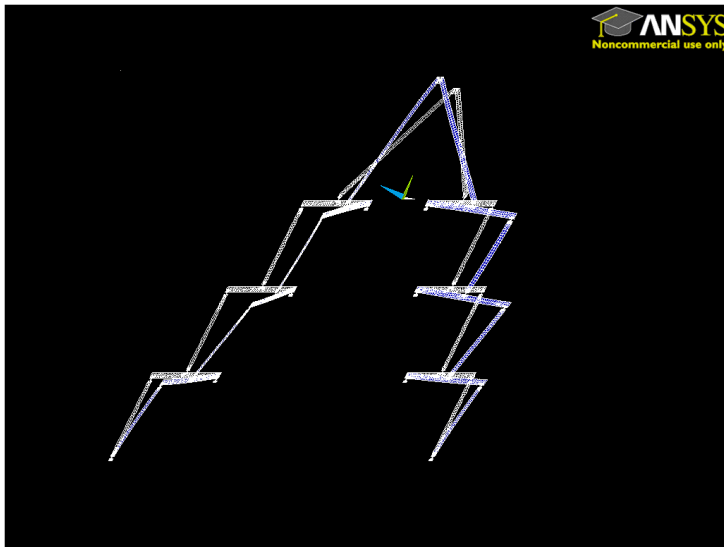
Analyse modale



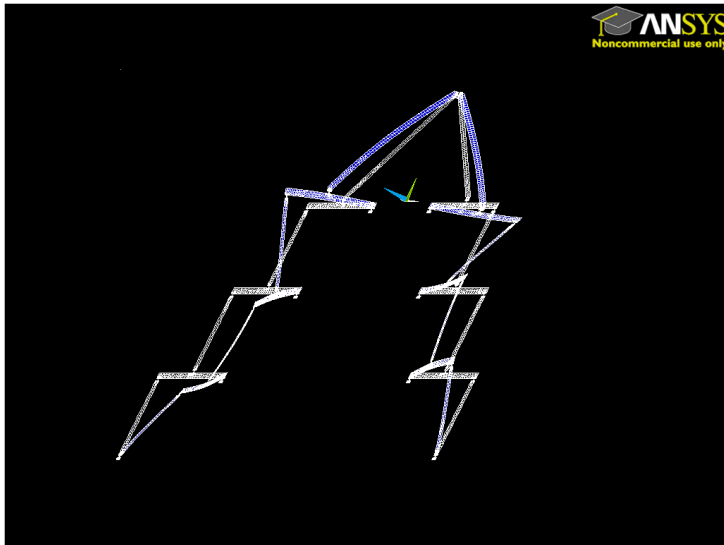
Analyse modale



Analyse modale

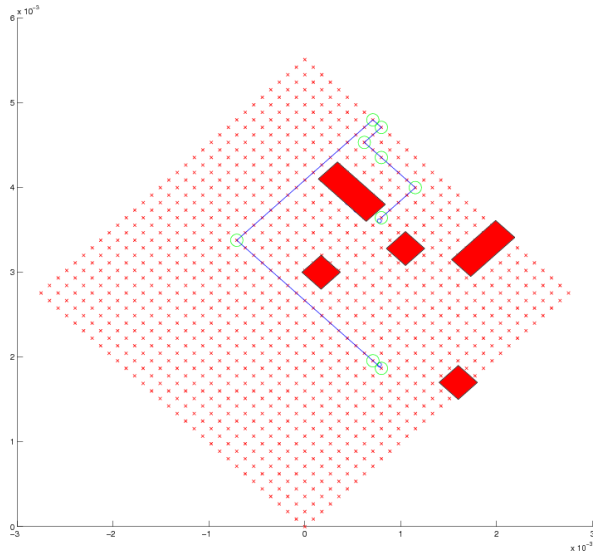


Analyse modale



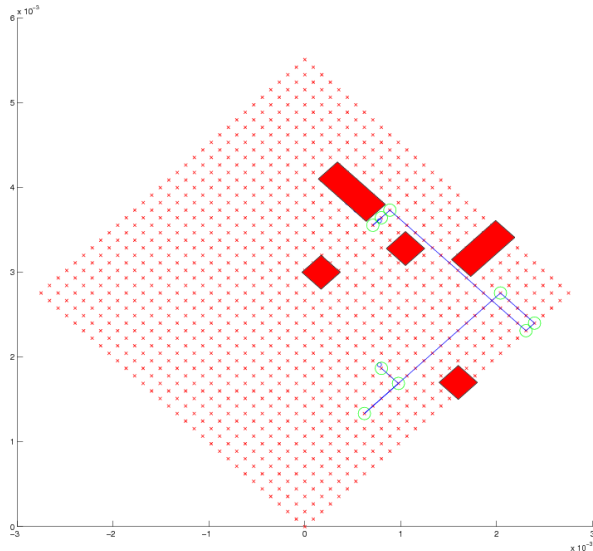
Comparaison des algorithmes

Dijkstra



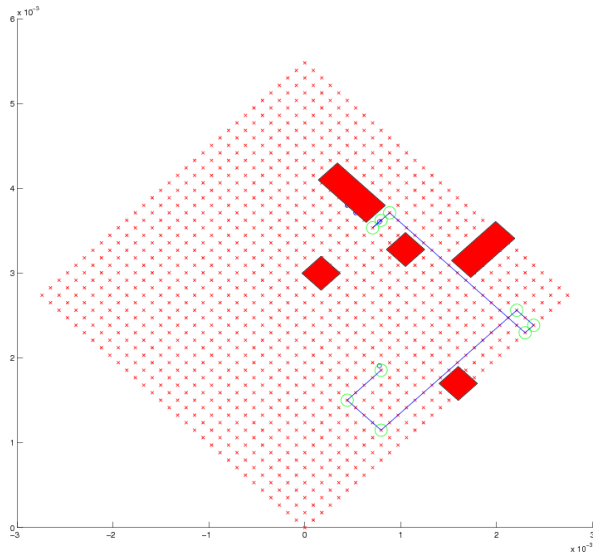
Comparaison des algorithmes

Dijkstra bidirectionnel



Comparaison des algorithmes

A^* matrice d'adjacence



Comparaison des algorithmes

A* graphe hyper-cubique

