

# Structures articulées à guidages flexibles

Simon HENEIN, Stefano BOTTINELLI, Reymond CLAVEL

Institut de Systèmes Robotiques, Département de Microtechnique, EPFL CH-1015 Lausanne

**Mots clefs :** structures flexibles, guidages flexibles, cinématiques parallèles, robotique de haute précision, micro-électroérosion.

**Résumé :** Cet article décrit différents aspects originaux relatifs à la conception des structures articulées à guidages flexibles dédiées aux robots de très haute précision. Il montre tout d'abord quels types de ressorts peuvent être utilisés comme articulations et quels types de liaisons cinématiques constituent ces éléments flexibles. Il décrit également les outils que nous avons mis au point pour dimensionner ces éléments. Il montre ensuite un principe original de conception qui permet de compenser la rigidité naturelle des guidages flexibles. Il discute également de l'utilisation de guidages flexibles redondants visant à augmenter les courses admissibles. Enfin, la mise en application de la méthode de conception que nous avons élaborée est brièvement illustrée au travers d'un exemple de robot parallèle à 3 degrés de liberté utilisé pour réaliser de l'usinage par micro-électroérosion.

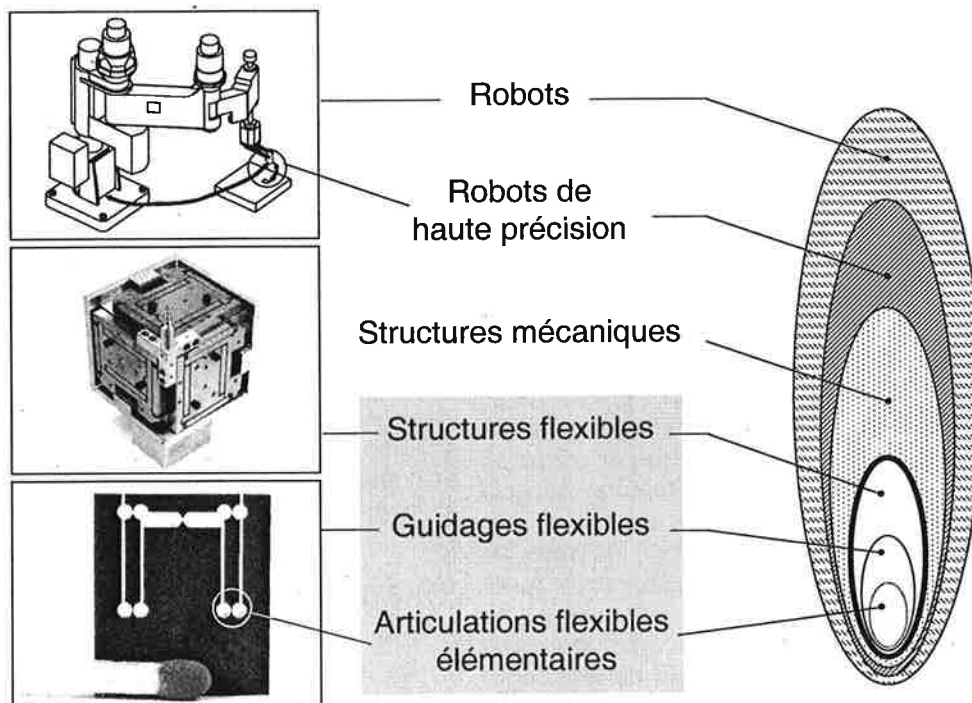


Fig. 1 : Contexte et classification des éléments flexibles

## INTRODUCTION

Depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, la miniaturisation est devenue l'une des tendances les plus marquées de l'évolution technique. Il se trouve en effet qu'elle est un moyen efficace d'augmenter les performances des systèmes techniques. C'est ainsi que les appareils

microtechniques tels que les téléphones mobiles, les stimulateurs cardiaques ou les prothèses auditives par exemple, voient leurs dimensions diminuer rapidement au fil des années. Il en va de même de leurs composants (circuits intégrés, composants opto-électroniques microsystèmes, etc.) qui nécessitent des moyens de production d'une précision sans cesse meilleure pour être fabriqués. Cette tendance s'accroissant, il est indispensable d'adapter les instruments et les

outils qui permettent de percevoir et d'agir à cette nouvelle échelle. Les robots de haute précision constituent l'une des catégories d'outils dont nous désirons améliorer la précision. Les moyens par lesquels ceci peut être réalisé sont nombreux puisque la structure mécanique, les actionneurs, les capteurs et la commande participent conjointement à la performance des tâches.

Cet article traite des structures mécaniques articulées qui constituent l'un des éléments limitants des robots actuels. Résultant d'évolutions apportées aux structures des premiers robots industriels, elles utilisent généralement des guidages lisses ou roulants miniaturisés. Cette approche a aujourd'hui pratiquement atteint ses limites en termes de précision pour des raisons inhérentes au principe physique de guidage, telles que la présence de frottement, la faible rigidité des éléments roulants de petites dimensions et les tolérances de fabrication.

Les guidages flexibles reposent sur le principe physique de l'élasticité de la matière qui ne souffre pas des limites de précision du contact glissant ou roulant entre solides. Ils présentent les avantages d'être exempts de frottement, d'usure et de jeu, de ne pas nécessiter de lubrification et de pouvoir être réalisés de manière monolithique donc très compacte, précise et rigide. Ainsi, ils sont compatibles avec une augmentation de la précision des robots, non pas de quelques pour cent, mais de plusieurs ordres de grandeur.

Les guidages flexibles sont connus depuis plusieurs dizaines d'années et nous avons établi dans une récente publication [1] une méthode de conception des structures articulées à guidages flexibles. Cet article décrit différents aspects originaux relatifs à cette méthode de conception. Il montre tout d'abord quels types de ressorts peuvent être utilisés comme articulations et quels types de liaisons cinématiques constituent ces éléments flexibles. Il décrit également les outils que nous avons mis au point pour dimensionner ces éléments. Il montre ensuite un principe original de conception qui permet de compenser la rigidité naturelle des guidages flexibles. Il discute également de l'utilisation de guidages flexibles redondants visant à augmenter les courses admissibles. Enfin, la mise en application de la méthode de conception est brièvement illustrée au travers d'un exemple de robot parallèle à 3 degrés de liberté (DDL) utilisé pour réaliser de l'usinage par micro-électroérosion.

## CLASSIFICATION DES ELEMENTS FLEXIBLES

Nous avons choisi de classer les éléments flexibles en trois catégories de complexité croissante (Fig. 1) :

**Articulations flexibles élémentaires :** cette catégorie comprend les éléments flexibles les plus simples, tels que les poutres, les barres de torsion ou les membranes. A elles seules, les articulations flexibles élémentaires ne permettent généralement pas de réaliser de liaisons mécaniques à un DDL. Ces articulations n'ont généralement pas d'équivalent proche parmi les liaisons mécaniques standard.

**Guidages flexibles :** les éléments flexibles de cette catégorie sont constitués d'une combinaison d'articulations élémentaires et de segments rigides reliés entre eux. Les guidages flexibles sont les homologues des guidages lisses ou roulants des structures articulées classiques. Ils ont généralement des équivalents proches parmi les liaisons mécaniques standard.

**Structures articulées à guidages flexibles :** les éléments flexibles de cette dernière catégorie, que nous appelons aussi plus simplement *structures flexibles*, sont constitués d'une combinaison de guidages flexibles et de segments rigides. Ces structures sont les homologues des structures articulées classiques. Relativement complexes, elles peuvent avoir un plus grand nombre de DDL (généralement pas plus de 6). Certains segments rigides de ces structures sont conçus pour être entraînés par la force motrice d'actionneurs. L'un des segments constitue la base fixe de la structure et un autre l'organe terminal mobile.

## ARTICULATIONS ELEMENTAIRES

Tout comme les ressorts, les articulations élémentaires peuvent être classées en fonction de leur *état de contrainte* (Fig. 2). Les états de contrainte qui engendrent des **contraintes normales** sont la *traction ou compression simple* (ressorts annulaires, rondelles Belleville), et la *flexion* (bras ou poutres flexibles, ressorts à lames, ressorts spiraux, ressorts hélicoïdaux de torsion). Les états de contrainte qui engendrent des **contraintes tangentielles** sont la *torsion simple* (barres de torsion, ressorts hélicoïdaux de traction ou de compression) et le *cisaillement simple* (cet état de contrainte ne pouvant jamais exister sans un solide entier, il n'existe pas de ressort exploitant exclusivement ce mode de sollicitation).

Mais alors que le rôle des ressorts est de stocker de l'énergie (barillet...), d'exercer des forces (précharges, attaches...), de filtrer des chocs ou des vibrations (suspensions...), ou de mesurer une force (corps d'épreuve, dynamomètres...), celui des articulations est de réaliser une *liaison cinématique*. Cette différence a pour conséquence que seuls peuvent être utilisés des ressorts dont les rigidités *transverses* sont beaucoup plus grandes que les rigidités *naturelles* (mode de sollicitation qui correspond au DDL de l'articulation). Il en résulte pratiquement que, parmi les ressorts, seuls les bras flexibles, les ressorts à lames et les barres de torsion sont utilisables comme articulations.

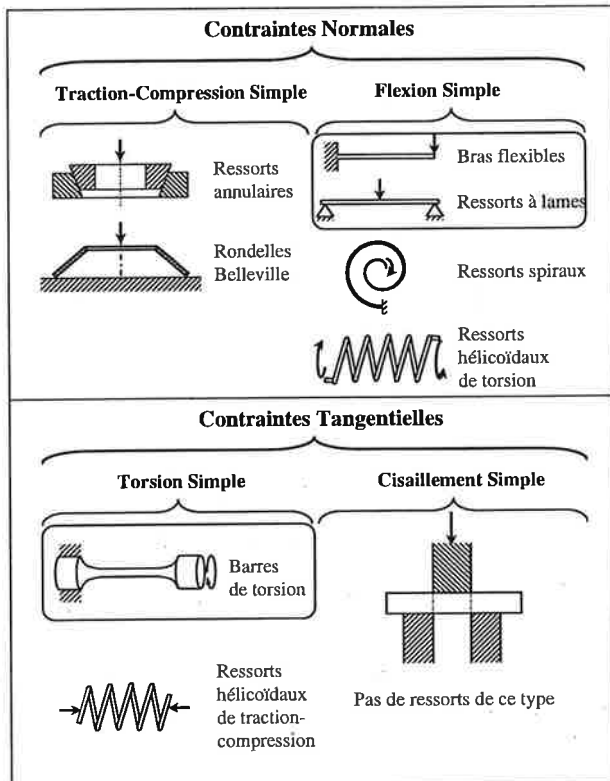


Fig. 2 : Classification des ressorts selon les contraintes qu'ils subissent. Les ressorts encadrés peuvent jouer le rôle d'articulations élémentaires car ils ont des rigidités transverses très supérieures aux rigidités selon leur mode normal de sollicitation. Les autres ressorts ne sont pas utilisables comme articulations flexibles car ils ont un faible rapport de rigidités (Inspiré de [2]).

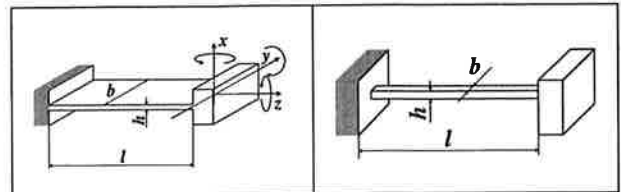


Fig. 3 : La lame et le fil sont deux exemples d'articulations élémentaires. En raison de ses rapports de rigidité, la lame peut être considérée comme une liaison cinématique à 3 DDL (2 rotations et une translation). De même, le fil peut être considéré comme une liaison à 5 DDL (seule la translation correspondant à la traction ou à la compression du fil est bloquée).

### Barre de torsion

La rigidité en torsion des poutres dont la section est ouverte et formée de parois minces ne dépend pratiquement pas de la forme de la section. On peut considérer sans grande erreur que les différents rectangles (dimensions  $h$  et  $b$  avec  $b > 10h$ ) qui composent la section résistent à la torsion indépendamment l'un de l'autre (Fig. 4 & 5).

La rigidité en flexion, quant à elle, dépend grandement de la disposition de ces rectangles. Il est donc possible, par un choix adéquat du profil, d'obtenir un rapport élevé entre les rigidités en flexion et la rigidité en torsion. Ainsi, si elle est conçue de manière à être rigide en flexion, une barre de torsion constitue une liaison à 1 DDL en rotation.

Le rapport de rigidités élevé est obtenu en exploitant d'une part le fait que, de manière générale pour toute poutre élancée, les rigidités en traction-compression, sont beaucoup plus élevées que les rigidités en flexion et en torsion et d'autre part, que si l'élancement des sections droites des poutres est grand (on parle alors de lames), alors le rapport des rigidités autour des deux axes principaux d'inertie de la section droite est grand (Fig. 3).

Hormis les ressorts, il existe d'autres éléments élastiques pouvant faire office d'articulations élémentaires: il s'agit des *membranes* et des *soufflets*. Dans ces éléments, l'état de contrainte est généralement triaxial, ce qui rend leur étude complexe. Ils ne sont pas traités ici.

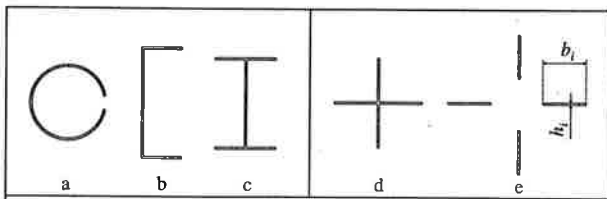


Fig. 4 : Sections ouvertes à parois minces. Des barres de torsion ayant ce type de sections sont plus rigides en flexion qu'en torsion, ce qui permet de réaliser des liaisons à 1 DDL en rotation.

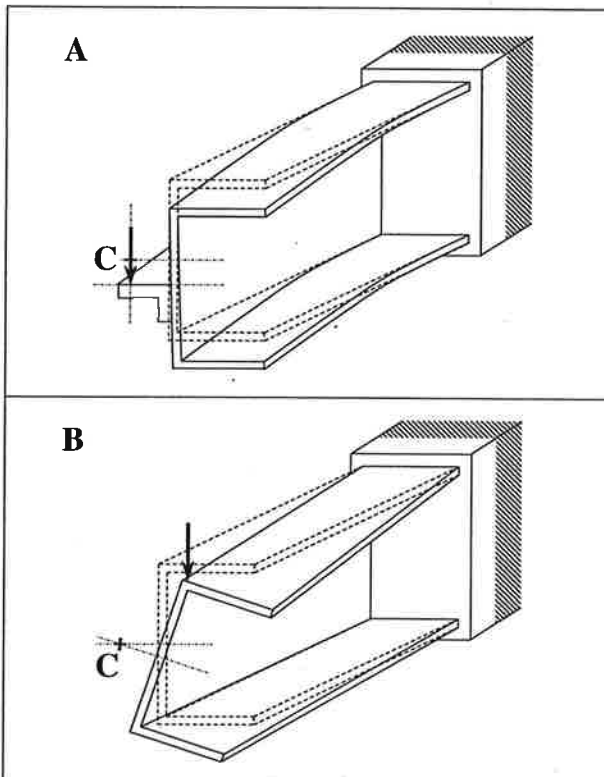


Fig. 5 : L'axe de torsion d'une barre en U est situé à l'extérieur du profil: une force passant par cet axe fléchit la barre sans la tordre (A); une force ne passant pas par cet axe fléchit et tord la barre, faisant pivoter son extrémité approximativement autour du centre de torsion C.

### Col circulaire

Nous dénommons *col circulaire*<sup>1</sup> toute poutre de section rectangulaire et d'épaisseur variable dont le profil décrit deux demi-cercles concaves (Fig.

<sup>1</sup> Remarque relative à la terminologie: la dénomination *col* est attribuable aux auteurs. Ce mot est emprunté à l'anatomie qui l'utilise pour indiquer la partie la plus étroite de certains os : col du fémur, de l'humérus, du péroné. Dans le langage courant, il indique la partie étroite, rétrécie (d'un récipient): col d'une bouteille, d'un vase, d'une cornue, d'un matras. Col d'une tuyère. Il vient du latin *collum* qui signifie cou. La littérature rédigée en anglais nomme ce type d'élément flexible *circular notch hinge*, *circular necked down flexure*, ou *right circular flexure hinge*.

6) et dont le rayon  $r$  des demi-cercles est au moins supérieur à cinq fois l'épaisseur minimale de la poutre:  $r/e > 5$ . Cette condition garantit que le facteur de concentration de contrainte soit voisin de 1, c'est-à-dire que la variation de section soit suffisamment douce pour éviter toute concentration de contrainte au milieu du col [3].

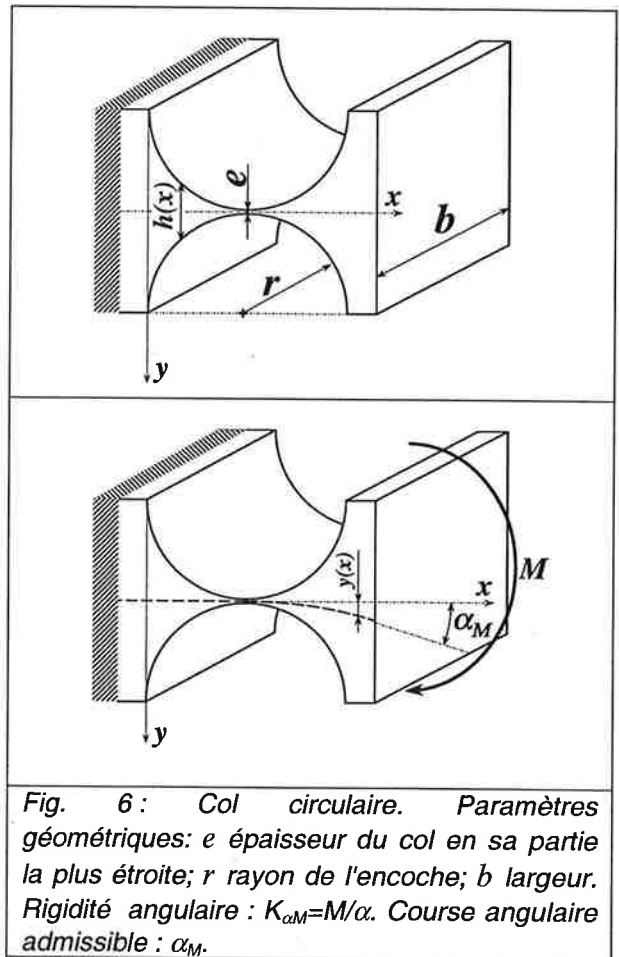


Fig. 6 : Col circulaire. Paramètres géométriques:  $e$  épaisseur du col en sa partie la plus étroite;  $r$  rayon de l'encoche;  $b$  largeur. Rigidité angulaire:  $K_{\alpha M}=M/\alpha$ . Course angulaire admissible:  $\alpha_M$ .

Dans un précédent travail [1], nous avons étudié cette articulation analytiquement par la théorie de la mécanique des structures en la traitant comme une poutre de section variable. Ceci nous a permis de tracer des abaques de dimensionnement tel que celui de la figure 14. Nous avons également établi des formules simplifiées de dimensionnement. Nous avons par exemple montré que la course angulaire du col circulaire est approximativement :

$$\alpha_M \cong \frac{3\pi\sigma_{adm}\sqrt{r}}{4E\sqrt{e}}$$

$\sigma_{adm}$  et  $E$  étant respectivement la contrainte admissible et le module de Young du matériau. Ceci nous a permis d'écrire des lois de

similitudes<sup>2</sup> très utiles pour les phases de conception et de pré-dimensionnement. Nous obtenons pour cet exemple :  $\alpha_M^* = \sigma_{adm}^* / E^*$  ;  
 $\alpha_M^* \cong \sqrt{l/e^*}$  ;  $\alpha_M^* \cong \sqrt{r^*}$ .

### GUIDAGES FLEXIBLES

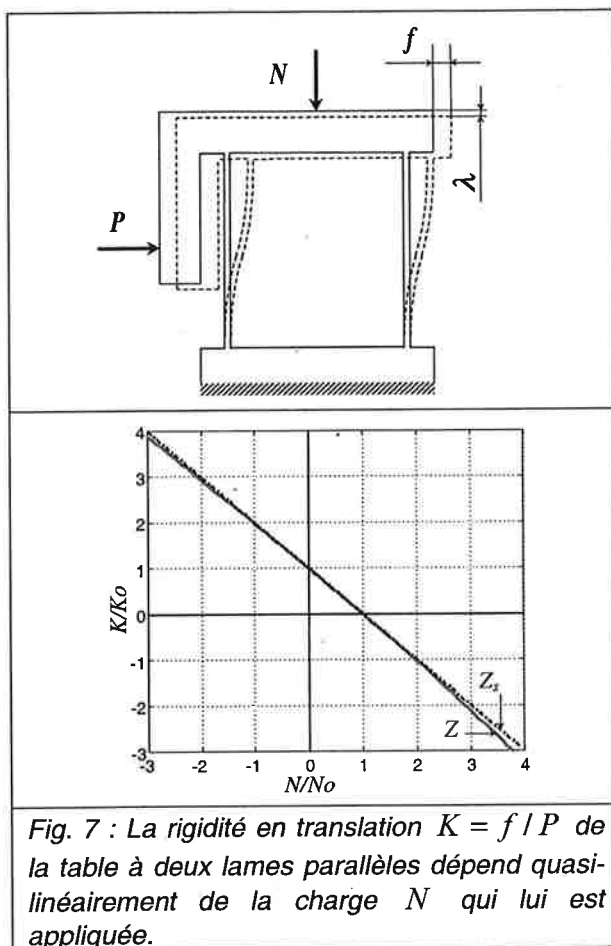


Fig. 7 : La rigidité en translation  $K = f / P$  de la table à deux lames parallèles dépend quasi-linéairement de la charge  $N$  qui lui est appliquée.

La table à deux lames parallèles est certainement le plus commun des guidages flexibles en translation. Nous nous sommes intéressé au comportement de ce guidage lorsque les lames sont sollicitées par une charge  $N$  de traction-compression ( $N$  est compté positivement en compression et négativement en traction). Nous avons montré que sa rigidité en

translation  $K = f / P$  varie quasi-linéairement en fonction de la charge  $N$  qui lui est appliquée (Fig. 7). Pour  $N = 0$ , nous avons  $K_0 = \frac{24EI}{l^3}$ .

Si la charge en compression  $N$  augmente, alors la rigidité  $K$  diminue. Lorsque la charge en compression atteint la valeur  $N_0 = \frac{2\pi^2 EI}{l^2}$ , la rigidité en translation s'annule :  $K = 0$ . Au delà de  $N_0$ , la rigidité devient négative et lorsque la charge atteint  $4N_0$  les lames flambent sous la charge. Nous avons montré que la rigidité varie quasiment linéairement avec la charge, ce qui nous a permis d'établir la formule simplifiée suivante :

$$K \cong K_0 - \frac{K_0}{N_0} N$$

dont l'écart par rapport à la formule déduite rigoureusement de la théorie de la mécanique des structures est inférieur à  $\pm 1.5\%$  sur l'intervalle  $0 \leq N \leq N_0$ .

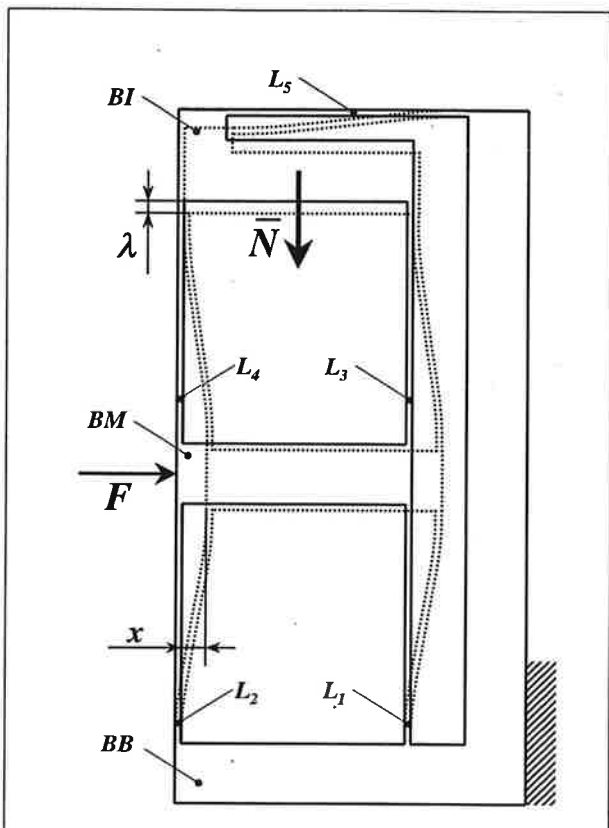
### Guidage à rigidité réglable

Profitant du fait que la rigidité en translation de la table varie avec la charge, nous avons conçu un guidage dont la rigidité est réglable et peut être ramenée à zéro ou être rendue négative. Pour ce faire, il s'agit d'exercer sur le bloc mobile de la table à lames parallèles une force  $N$  voisine de la charge  $N_0$  qui induit une rigidité naturelle nulle. Cette force doit rester constante en intensité et en direction durant le mouvement de la table.

Une manière simple de la produire est de placer, sur le bloc mobile de la table, une masse dont le poids est égal à  $N_0$ . Cette solution présente les inconvénients importants d'avoir une masse mobile importante et de n'être utilisable que si les lames sont en position verticale.

Une autre manière de la produire est d'utiliser la structure de la figure 8 et d'exercer la force non plus sur le bloc mobile BM mais sur le bloc intermédiaire BI dont les mouvements sont d'une amplitude bien plus faible. Cette force peut, par exemple, être le poids d'une masse, la force de rappel d'un ressort (comme sur la photographie), ou la force d'un actionneur électromécanique.

<sup>2</sup> Exemple de loi de similitude et notation: la rigidité angulaire du col circulaire est approximativement proportionnelle à l'épaisseur  $e$  du col élevée à la puissance 2.5. C'est-à-dire que si un col donné, d'une épaisseur  $e$ , a une rigidité angulaire  $K$ , alors un col identique, mais d'épaisseur  $e'$  voisine de  $e$ , aura une rigidité  $K' \cong K(e'/e)^{2.5}$ . Si l'on repère par un astérisque (\*) le quotient des grandeurs homologues, nous avons  $K^* = K'/K$  et  $e^* = e'/e$ . Nous pouvons alors écrire plus simplement:  $K^* = e^{*2.5}$ . C'est cette notation que nous avons adoptée pour indiquer les lois de similitude.



Nous avons réalisé ce guidage à rigidité réglable de manière monolithique en utilisant la lame L5 non seulement pour guider BI, mais également comme ressort de précharge (Fig. 9). Ce principe de compensation de la rigidité permet de diminuer considérablement la rigidité et d'obtenir des caractéristiques force-déformation tout à fait originales présentant par exemple des points où la rigidité tangente est nulle et la force non nulle (Fig. 10). La faible rigidité ainsi que le caractère progressif des caractéristiques font de cette structure un corps d'épreuve idéal pour réaliser un capteur de force de haute précision. Pour ce faire nous avons placé à l'intérieur de la structure un capteur de position optique d'une résolution de  $1\mu\text{m}$  qui mesure le déplacement du bloc mobile.

Cette même approche peut être utilisée pour réaliser des guidages en rotation à rigidité réglable, voire des structures à plusieurs DDL.

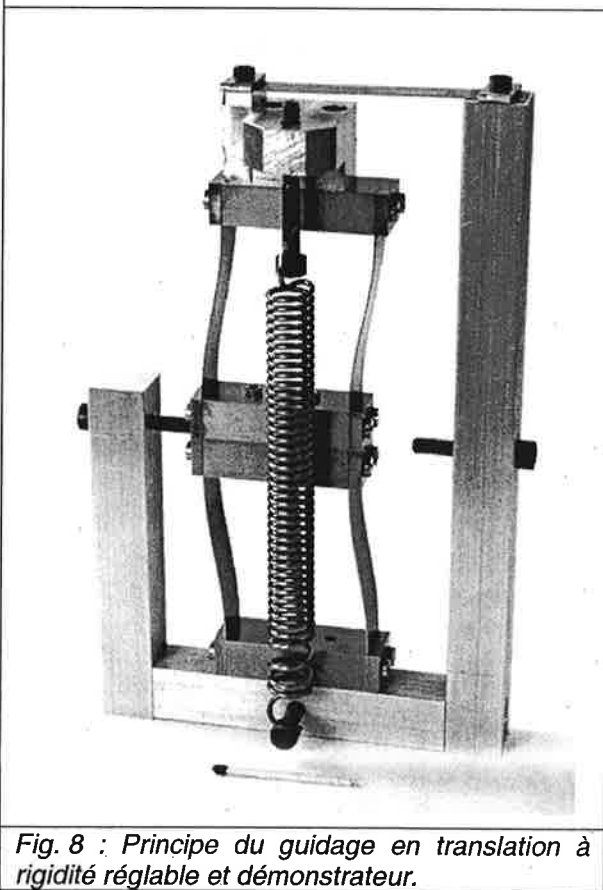


Fig. 8 : Principe du guidage en translation à rigidité réglable et démonstrateur.

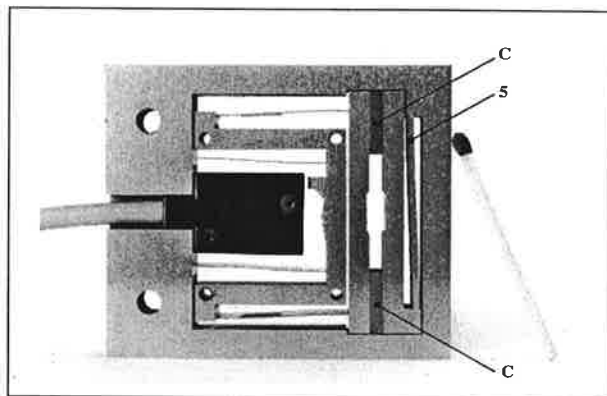


Fig. 9 : Photographie du guidage monolithique à rigidité réglable. Les cales C permettent de régler la force de précharge de la lame 5.

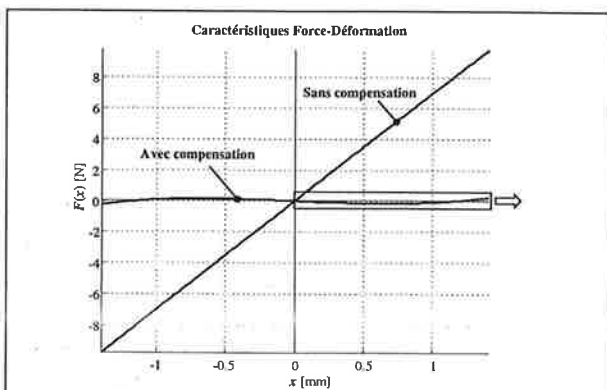


Fig. 10 : Caractéristique force-déformation théorique de la structure monolithique de la figure précédente préchargée de telle sorte que sa rigidité en position nominale soit légèrement négative.

### Guidages flexibles redondants

La faible course des guidages flexibles constitue leur principal inconvénient. Un moyen couramment utilisé pour augmenter cette course est de disposer de manière sérielle deux DDL identiques ce qui permet de :

- doubler la course admissible pour un encombrement pratiquement inchangé et
- éventuellement de compenser les mouvements parasites des guidages (non rectitude des guidages en translation et translation parasite des guidages en rotation).

En revanche, l'un des deux DDL redondants est un DDL interne à la structure pouvant être excité soit par des forces liées à l'accélération des masses lors de mouvements dynamiques, soit par des charges transverses statiques. Ainsi, la présence de ce DDL interne peut

- diminuer les rigidités transverses,
- rendre peu répétable le mouvement du guidage,
- diminuer la course admissible,
- être le siège de vibrations.

Ces inconvénients peuvent être palliés si le DDL interne est couplé au DDL externe par une chaîne cinématique appropriée (ce qui revient à supprimer le DDL interne).

L'exemple le plus courant est la table compensée à huit cols pour laquelle un levier de couplage permet de supprimer le degré de liberté interne (Fig. 11)

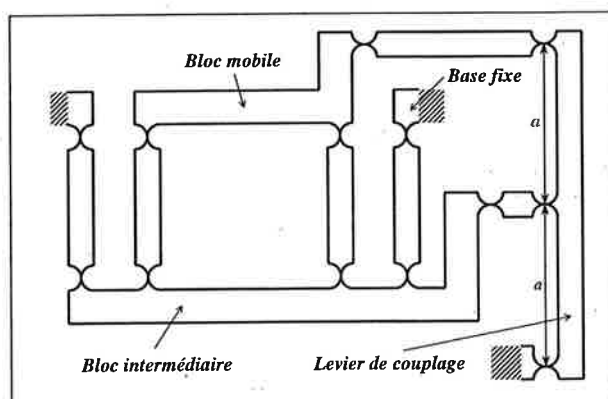


Fig. 11 : Table compensée à huit cols avec levier de couplage.

Selon le même principe, nous avons conçu un guidage en rotation redondant à grande course angulaire ( $\pm 15^\circ$ ) et grande rigidité radiale ( $5.3\text{N}/\mu\text{m}$ ) avec couplage du bloc intermédiaire (Fig. 12) [4].

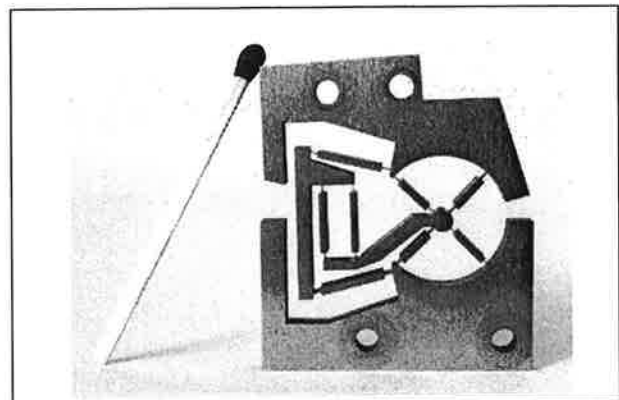


Fig. 12 : Guidage en rotation redondant avec cinématique de couplage.

### STRUCTURE FLEXIBLE : EXEMPLE DU ROBOT DELTA CUBE

Nous avons traduit la cinématique parallèle du robot Delta [5] en une structure flexible analogue (Fig. 13). Ceci nous a permis de réaliser le robot Delta Cube [6] qui est un micromanipulateur à 3 DDL en translation dédié à l'électroérosion de très haute précision. La cinématique parallèle de cette structure lui permet d'être actionnée par trois moteurs fixes, montés sur la base. La cinématique Delta est constituée de trois chaînes cinématiques identiques qui relient l'organe terminal à la base. Chacune de ces chaînes bloque l'un des DDL en rotation de la plateforme<sup>3</sup>.

Le tableau 1 résume les caractéristiques du robot Delta Cube.

Peu de temps après la naissance de l'électroérosion<sup>4</sup> on parle déjà des possibilités qu'offre ce nouveau procédé pour l'usinage direct de petites pièces très précises [9]. Depuis, la précision, la vitesse et l'état de surface des usinages n'ont cessé de s'améliorer et on parle à présent de *micro-électroérosion*. Aujourd'hui la précision et la dynamique des mouvements de l'électrode sont des facteurs limitants de la micro-électroérosion. En effet les machines d'électroérosion étaient initialement conçues pour l'usinage d'outils (moules, poinçons, matrices, etc.) de relativement grandes dimensions. Elles sont par conséquent peu adaptées à l'usinage direct de pièces de petites dimensions et très précises : la machine-outil<sup>5</sup> a des masses

<sup>3</sup> Davies [7] décrit une structure flexible de cinématique voisine utilisée pour l'alignement de composants optiques. Elle comporte des articulations élémentaires de type fil.

<sup>4</sup> Bianchi et Rigal [8] situent la naissance de l'électroérosion en 1943.

<sup>5</sup> La *machine-outil* est la partie de la machine à électroérosion responsable du mouvement relatif entre l'électrode et la pièce.

mobiles importantes qui affectent la précision (déformation sous l'effet du poids propre et mouvement saccadé lié au frottement) et la dynamique des mouvements<sup>6</sup> (forces importantes nécessaires pour la mise en mouvement, et fréquence propres basses). Le robot Delta Cube a pour but de s'affranchir de ces limitations.

## CONCLUSION

L'étude des guidages flexibles par une approche analytique selon la théorie classique de la mécanique des structures, nous a permis d'établir des règles générales de conception et de mettre au point des outils de dimensionnement que nous avons illustrés ici au moyen de quelques exemples inédits.

Le robot Delta Cube illustre la mise en application de notre méthode de conception des structures flexibles et montre que les cinématiques parallèles sont tout particulièrement appropriées à la robotique de haute précision : leurs avantages (rigidité, haute dynamique, actionneurs fixes) sont très intéressants pour la précision et leurs inconvénients (volume de travail limité, singularités, couplage) sont moins gênants qu'en robotique classique.

Bien qu'elles soient connues depuis plusieurs dizaines d'années, les structures flexibles n'ont aujourd'hui encore montré qu'une partie de leurs potentialités. L'essor de la robotique de très haute précision ainsi que les progrès de l'usinage par électroérosion en font une technologie d'avenir, vouée à une utilisation de plus en plus courante.

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Monsieur Jean-Philippe Bacher (ISR-DMT EPFL) qui a participé à la réalisation du robot Delta Cube ainsi que les entreprises Agie S.A. et Heidenhain S.A..

<sup>6</sup> Le réglage fin du processus d'étincelage requiert de pouvoir contrôler en continu le « gap » (distance séparant l'électrode de la pièce). Des recherches récentes [10, 11] semblent montrer que des mouvements très rapides de l'électrode (vibrations de quelques microns d'amplitude et d'une fréquence de quelques centaines de Hertz) améliorent significativement l'évacuation des particules érodées par un effet d'arrosage par brassage. Ceci permet d'augmenter les vitesses d'usinage et d'améliorer l'état des surfaces usinées. Le porte-électrode actif que nous avons réalisé permet de produire à la fois des mouvements ultra-précis de quelques dixièmes de millimètres et des vibrations telles que celles que nous venons de mentionner.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Henein, S. « Conception des structures articulées à guidages flexibles », Thèse N°2194, Département de Microtechnique, EPFL, 2000.
- [2] Duchemin, M. « Ressorts : barres de torsion et stabilisateurs », Techniques de l'Ingénieur B5 II, pp.B5434.1-5434.14, 1985.
- [3] Lu, J. & Lieurade, H.-P. « Concentration de contraintes », Techniques de l'Ingénieur B5 I, pp. B5040.1-B5040.24, 1998.
- [4] Henein, S., Bottinelli, S. & Aymon C. « Pivot flexible à grande course angulaire et à rigidité élevée », Brevet Europe N°98123953.6, 1998.
- [5] Clavel, R. « Dispositif pour le déplacement et le positionnement d'un élément dans l'espace », Brevet Suisse No.672089 A5, 1985.
- [6] Bottinelli, S., Aymon, C., Henein, S. & Clavel, R. « Bewegungsübertragungsvorrichtung (Fine positioning device) », Demande de brevet en cours.
- [7] Davies, P. A. « Positioning mechanism », European Patent EP 0 937 961 A2, 1999.
- [8] Bianchi, L. & Rigal, E. « Usinage par électroérosion », Techniques de l'Ingénieur B7, pp.B7310.1-B7310.23.
- [9] Osenbruggen, C. V. « High precision spark machining », Philips technical review 30(6/7), pp.195-209, 1969.
- [10] Imai Y., Satake, A., Taneda, A. & Kobayashi, K. « Improvement of EDM machining speed by using high frequency response actuator ». International Journal of Electrical Machining (1), pp.21-26, 1996.
- [11] Wolf, A., Ehrfeld, W., Michel, F., Koch, O., Preuss, S., Soutan, H. & Gruber, H. « Application of new actuator and vision control systems for micro-electrodischarge machining », Proc. of SPIE : Intelligent Systems in Design and Manufacturing, Vol 3517, 1998.



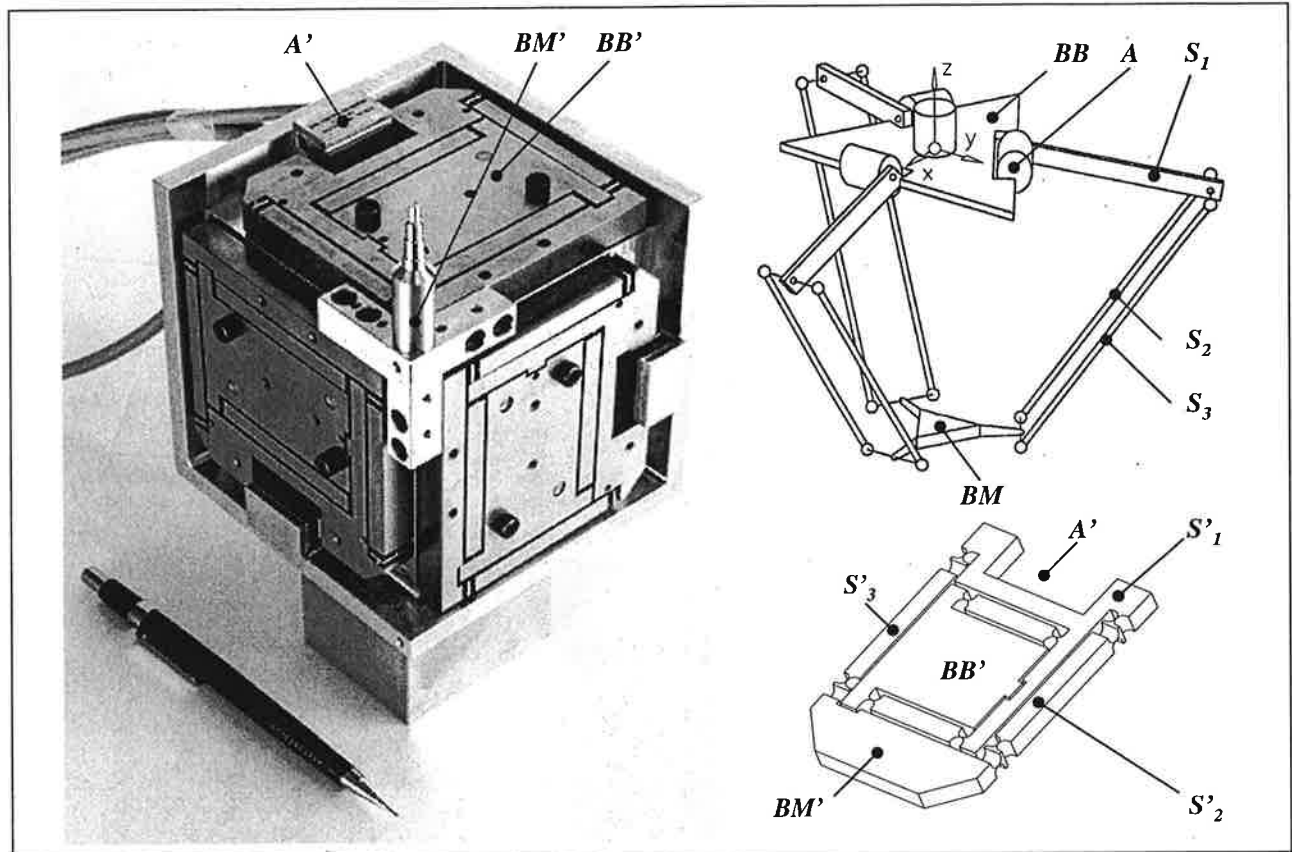


Fig. 13 : Cinématique du robot Delta et structure flexible analogue: bloc de base  $BB \Rightarrow BB'$ ; bloc mobile (ou organe terminal)  $BM \Rightarrow BM'$ ; segments  $S_i \Rightarrow S'_i$ ; actionneurs  $A \Rightarrow A'$ .

Degrés de liberté :

Encombrement :

Courses X Y Z :

Matériau :

Épaisseur des cols :

Actionneurs

Force max. continu/impulsions :

Capteur de position :

Résolution :

3 DDL : X Y Z

110 x 110 x 110 mm<sup>3</sup>

± 1mm

acier X220CrVMo13-4

100µm

électrodynamiques à bobine mobile (Etel SA)

3 N / 10N

règles optiques Heidenhain SA

50 nm

Tab. 1 : Caractéristiques du robot Delta Cube

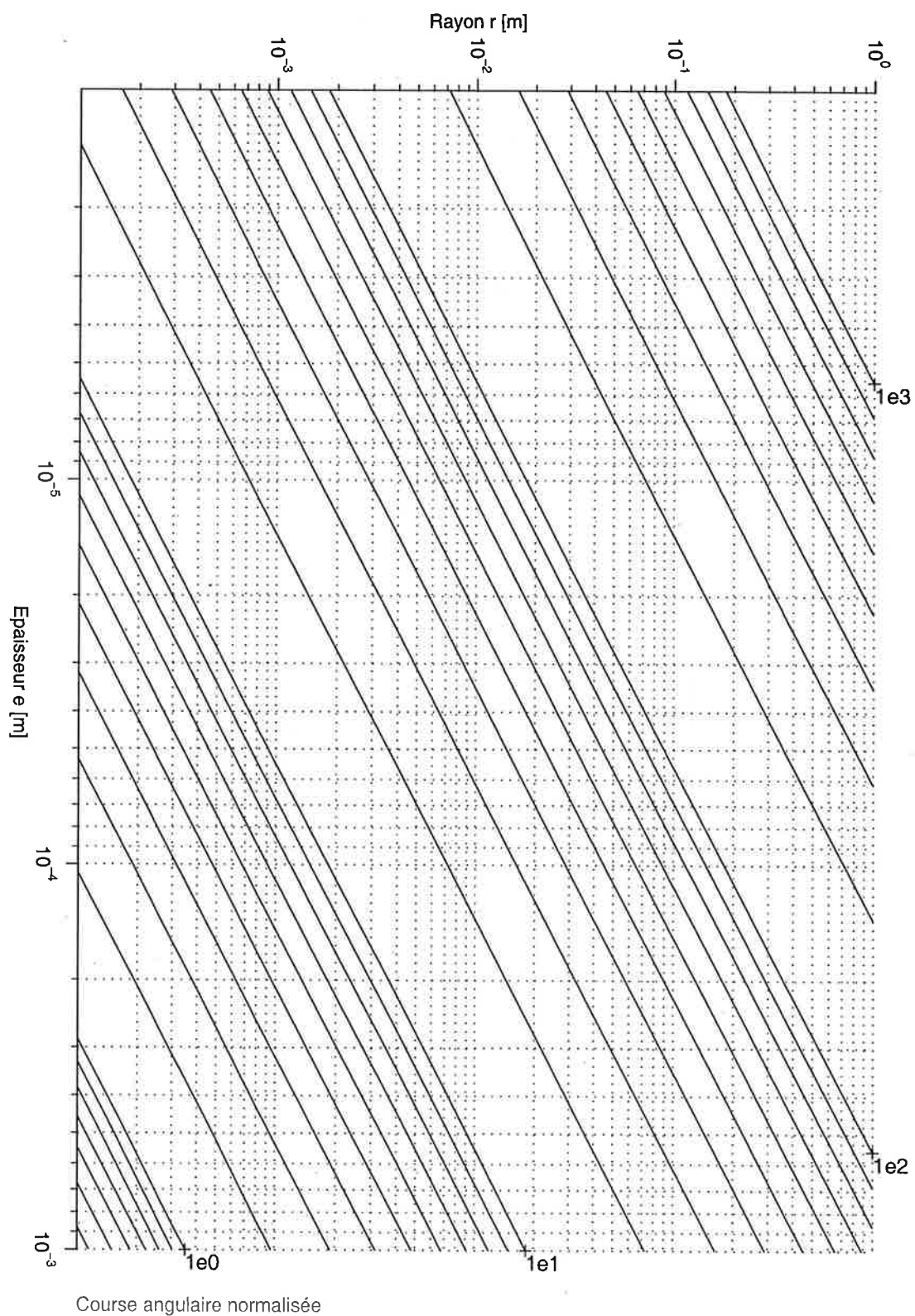


Fig. 14 : Exemple d'abaque de dimensionnement du col circulaire. Cet abaque permet de déterminer la course angulaire normalisée  $\alpha_{Mn}$  [rad] du col circulaire en fonction de ses dimensions  $e$  et  $r$  [m]. Connaissant la contrainte admissible  $\sigma_{adm}$  [Pa] ainsi que le module de Young  $E$  [Pa] du matériaux, la course angulaire  $\alpha_M$  [rad] se calcule ainsi :  $\alpha_M = \alpha_{Mn} \sigma_{adm} / E$ .