

Micro Factory : Concept d'une chaîne d'assemblage miniature, modulaire et propre

Irène Verettas¹, Prof. Dr. Raymond Clavel¹, Dr. Alain Codourey²
¹ Laboratoire de Systèmes Robotiques, EPFL, Station 9, CH-1015 Lausanne
² CSEM, Untere Gründlistrasse 1, CH-6055 Alpnach Dorf

Résumé

La manipulation et l'assemblage de microsystèmes (MEMS) nécessite des robots de haute précision qui doivent fonctionner dans des environnements propres. Beaucoup des systèmes actuels ont un volume important et occupent une grande surface au sol par rapport à la taille des pièces fabriquées. Le but du projet « Micro-Factory » est de démontrer la faisabilité d'une chaîne de production miniature et modulaire et de développer une méthodologie de conception de telles salles blanches miniatures et modulaires pour des microsystèmes. Cette méthodologie permettra de définir rapidement la taille et la configuration de microfactory qui seront optimales pour chaque produit.

1. Introduction

Actuellement la manipulation et le micro assemblage des MEMS sont réalisés en salles blanches qui ont un volume utile de plusieurs centaines de m³. La cause principale de pollution est la présence des personnes qui y travaillent même si elles sont vêtues spécialement. Cette approche est coûteuse pour des petites séries de production (par exemple 100 pièces/h). D'autre part ces robots employés ont une précision limitée et occupent une grande surface de travail.

Ce projet propose un nouveau concept constitué de salles blanches miniatures et modulaires pour l'assemblage de composants MEMS. La taille de chacun de ces modules de salles blanches est de l'ordre de 1 dm³ et il est prévu pour fonctionner dans l'environnement standard d'une entreprise. Notre méthodologie de conception permettra de concevoir rapidement la disposition et la taille de la microfactory nécessaire pour chaque produit en se basant en particulier sur la dimension et le nombre de composants, sur les précisions et les conditions d'environnement nécessaires.

2. Etat de l'art

Le terme « microfactory » a été proposé initialement par le Mechanical Engineering Laboratory (MEL) à Tsukuba, au Japon en 1990 pour désigner leur système miniature d'usinage et assemblage [1]. C'était une usine de très petites dimensions qui comportait une fraiseuse, un micro-tour, une presse et un petit bras de transfert. Ce système était portable avec un encombrement de 625mm x 490mm x 380mm et il était destiné à



Fig. 1: Un exemple d'un mini-environnement propre et modulaire pour l'assemblage des MEMS par MA3-MST/MEMS Technology

des applications qui ne nécessitaient pas un environnement propre.

Beaucoup de compagnies ont réalisé des « mini-environnements » c'est à dire des systèmes qui ont un environnement propre avec des manipulateurs pour le micro-assemblage ou pour stocker des wafers ou des MEMS. Le volume de tels systèmes est de quelques mètres cubes (voir Fig. 1) [2].

Dans notre projet nous proposons un concept innovateur qui combine les deux concepts précédents : La microfactory pour l'assemblage et l'environnement propre. C'est un concept pour des petites à moyennes séries qui nécessitent une grande précision et un environnement propre.

Pour démontrer ce concept nous avons réalisé un prototype qui utilise des palettes standard de 50mm x 50mm. Ce concept est présenté au paragraphe suivant.

3. Microfactory et modularité

La caractéristique principale de la microfactory est la modularité. Dans chacun de ces modules des opérations élémentaires de manipulation et d'assemblage sont réalisées. Puis le sous ensemble ainsi réalisé est transféré vers le module suivant pour la suite des opérations. Chaque module est appelé microbox.

La Fig. 2 illustre le concept de quelques microboxes disposées pour un exemple de produit. Dans cet exemple un système de transfert permet de déplacer les sous-systèmes d'une microbox à la suivante. Ce concept permet d'intégrer différents systèmes d'alimentation des pièces ou des robot de haute précision (par exemple : Delta³[3]).

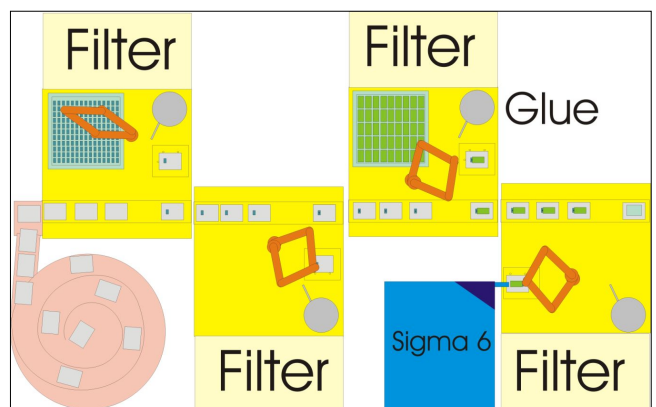


Fig. 2: Concept de la microfactory modulaire

Chaque microbox est dédiée à quelques opérations d'assemblage (collage, insertion, etc.). En cas de besoin de modifications de la ligne de production, il est rapide de remplacer les modules nécessaires par ceux qui exécutent les nouvelles tâches d'assemblage dont nous avons besoin. En cas de panne majeure dans un module son remplacement par un module auxiliaire permettra de faire la réparation sans pour autant arrêter la chaîne de production.

Cet aspect modulaire permet aussi de réaliser des conditions d'environnement différentes pour chaque module. Ainsi nous pourrions avoir un module avec un gaz spécial, un autre avec un environnement propre ou encore sur un module annexe réaliser une opération qui a un fort risque de générer des particules. Dans de tels cas il est nécessaire de séparer l'espace entre deux microboxes. Le transfert des composants entre deux modules avec des conditions d'environnement incompatibles se fera par des palettes transitant par des sas.

Pour supporter notre démarche nous avons réalisé une microbox (Fig. 4 et 6). Cette microbox fera partie d'un microfactory comme montré à la Fig. 3. Dans ce concept c'est le robot qui après avoir exécuté les tâches de manipulation et d'assemblage passe le sous-ensemble réalisé à la microbox voisine pour les opérations suivantes.

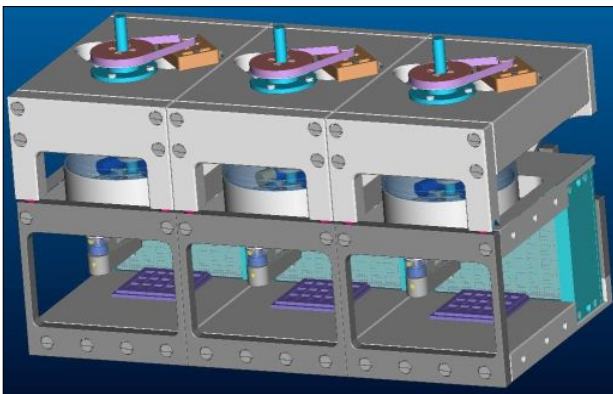


Fig. 3 : Microfactory à trois modules

4. Méthodologie de conception

La méthodologie de conception prend en considération les besoins spécifiques de chaque produit pour ses différentes phases d'assemblage tels que les conditions d'environnement (propreté, humidité, température, pression ou gaz spéciaux comme l'argon, azote et autres) et propose une configuration qui satisfait ces critères.

La taille des composants, le temps de chargement des palettes ainsi que la cadence influencent la taille de chaque microbox. Si par exemple le temps de chargement/déchargement des palettes est important par rapport au temps d'assemblage des composants, il faut augmenter la taille de la palette. Cela implique que le temps de transfert de chaque composant de la palette à la station d'assemblage va aussi augmenter. C'est ainsi qu'il faut trouver la taille optimale de chaque microbox. Si une opération nécessite beaucoup de temps il est envisageable d'utiliser en parallèle plusieurs microboxes qui font la même opération.

5. Parties de la Microbox

La microfactory est un système d'assemblage modulaire composé de modules de salles blanches miniaturisées appelées microboxes. Une microbox (Fig. 4) a un volume de travail d'un décimètre cube et une classe de propreté ISO 5 (classe 100 suivant le Federal Standards 209E). Dans chaque microbox un certain nombre d'opérations de manipulation, assemblage et

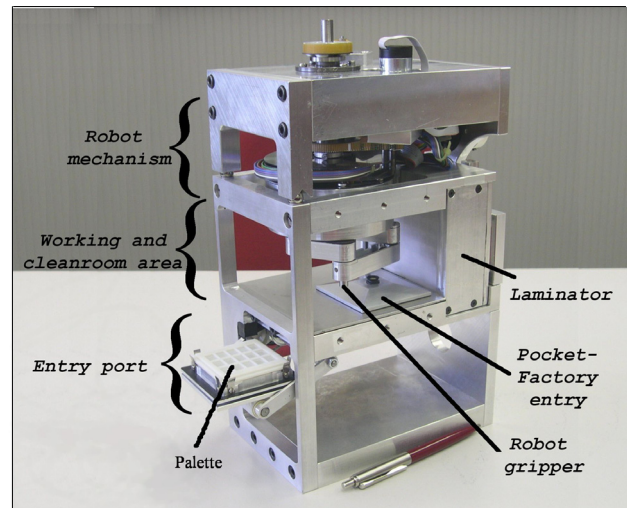


Fig. 4 : La microbox est une partie modulaire de la microfactory

contrôle auront lieu. Le sous-ensemble ainsi réalisé sera transféré à la microbox suivante pour réaliser les opérations suivantes.

Les parties de chaque microbox nécessaires pour assurer la manipulation et l'assemblage des pièces avec la propreté de l'air adéquate sont les suivantes :

- Le système d'entrée pour assurer l'introduction des palettes sans polluer ni l'intérieur de la microbox, ni les composants
- Le robot de manipulation et de transfert des composants dans la microbox; ce robot peut, suivant les cas, effectuer des assemblages
- La zone de travail avec un environnement propre
- Les capteurs pour le contrôle de l'assemblage
- Le système de filtration de l'air équipé avec un système compact pour laminariser le flux d'air

5.1. Sas d'entrée

Un exemple de sas d'entrée a été réalisé pour transférer des palettes de 50mm x 50mm depuis un environnement externe sale vers l'intérieur de la microbox qui est propre [4]. Ce sas qui utilise un système de lavage de certaines parties de la palette avec un flux d'air propre avant son ouverture, permet d'ouvrir le couvercle de la palette sans pour autant polluer les composants transportés. Les figures qui suivent illustrent la procédure.

- Dans la phase d'approche, la palette est posée sur le support supérieur de la palette qui est auto alignant (Fig. 5a).
- Dans la position finale du support de la palette inférieur un petit espace entre la microfactory et le support de la palette supérieur permet le passage de l'air propre qui lave la palette (Fig. 5b). A la fin de cette phase le flux d'air de lavage est arrêté.
- Le robot saisit la porte de la microfactory ainsi que le couvercle de la palette par vacuum. Quand le robot commence à soulever le couvercle, le petit espace entre la microfactory et le support supérieur de la palette se ferme (Fig. 5c).
- A l'étape finale de cette opération, le robot déplace la porte et le couvercle de la palette; les composants se trouvent ainsi dans l'environnement propre de la microfactory (Fig. 5d).

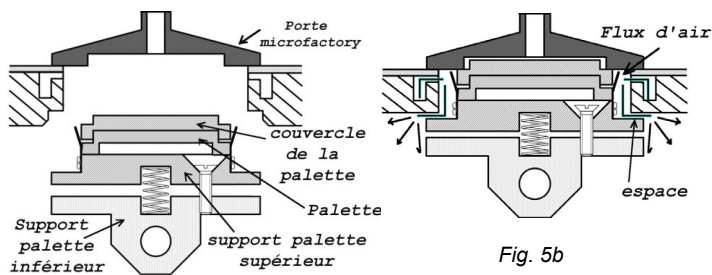


Fig. 5a

Fig. 5b

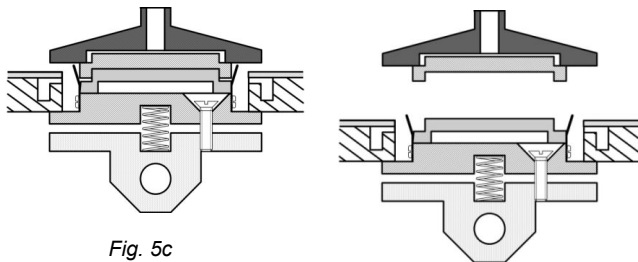


Fig. 5c

Fig. 5d

Fig. 5 : Les étapes de l'entrée d'une palette propre dans la microfactory

5.2. Le Robot

Pour les besoins d'assemblage dans la microfactory, chaque microbox est équipée d'un petit robot type SCARA à 4 degrés de liberté (x, y, z , et Θ_z) comme il est montré à la Fig. 6. Il peut faire des assemblages qui nécessitent peu de précision ou collaborer avec un autre robot de très haute précision. Il est capable aussi de transférer les composants et les sous ensembles d'une microbox à la suivante ou encore d'ouvrir la porte de microfactory. Il est conçu pour travailler dans l'environnement propre de la microbox (classe ISO 5). Son volume de travail est un cylindre de 130mm de diamètre et 20mm de hauteur. L'encombrement total du robot ne dépasse pas les 100x100x200mm. Les moteurs et autres parties du robot susceptibles de générer des particules se trouvent à l'extérieur de la zone propre. Si nécessaire il est possible de le sortir de la microbox pour sa maintenance.

Une interface graphique en Java nous permet de programmer les opérations du robot, de les vérifier à l'aide de la visualisation graphique d'un modèle virtuel, puis de les envoyer au robot pour les exécuter (Fig. 7) [6].

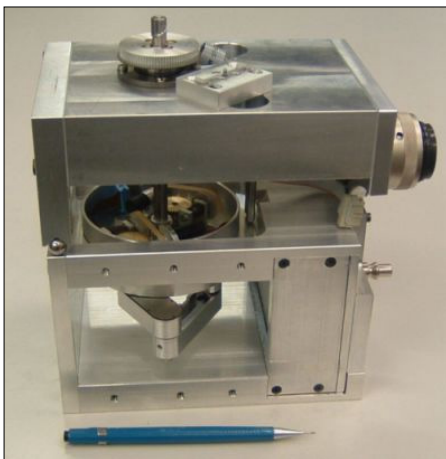


Fig. 6 : Le robot de 4ddl intégré dans la microfactory

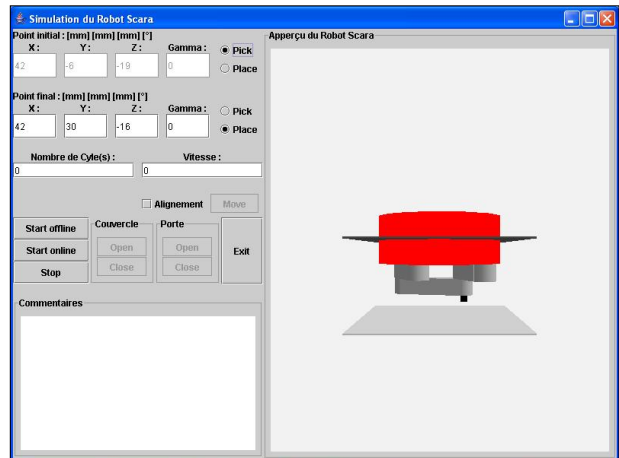


Fig. 7 : Interface pour commander le robot

5.3. Capteurs pour le contrôle du processus

Pour la manipulation et l'assemblage des composants miniatures un système de contrôle est nécessaire. Le système de vision est le plus souvent utilisé. Dans le cas de microfactory la camera devra reconnaître la forme des composants ainsi que d'autres caractéristiques importantes (trous par exemple). Suivant le type de produit la camera pourrait être placée au dessus de la scène d'assemblage ou en dessous.

5.4. Système d'air propre et laminaire

Cette partie est le coeur de notre environnement propre. Le but est de produire un système de filtration très compact qui puisse garantir une classe de propreté ISO 5. Nous allons démontrer pourquoi il n'est pas possible de réaliser un tel système avec un filtre standard utilisé dans des salles blanches appelé HEPA (High Efficiency Particulate Air).

Chaque filtre est caractérisé par la loi de Darcy :

$$\frac{Q_m}{A} = \frac{\Delta P}{\beta \cdot e} \rightarrow Q_m = \frac{A \cdot \Delta P}{\beta \cdot e} \text{ où :}$$

Q_m est le débit d'air,

A est la surface du filtre,

ΔP est la différence de pression avant et après le filtre,

$1/\beta$ est la perméabilité du filtre et

e est l'épaisseur du filtre.

Si la perméabilité d'un filtre est basse, son efficacité de filtration est grande. Les filtres HEPA ont une perméabilité basse. Pour réduire la différence de pression nécessaire pour le filtre, leur surface effective (A) est grande. Ces filtres ont des plis pour diminuer la surface frontale. Ainsi l'encombrement en profondeur du caisson d'un filtre HEPA est en rapport avec la surface effective du filtre plutôt que son épaisseur proprement dit.

Le graphe suivant nous montre la relation entre la différence de pression d'un filtre HEPA H14 et l'épaisseur externe à une vitesse de l'air de 0.45m/s. (mesures données par LogicAir S.A). Cette différence de pression augmente au cours d'utilisation du filtre.

Prenons l'exemple du filtre HEPA et du ventilateur dont nous aurions besoin pour avoir un flux laminaire de 0.5m/s dans un microbox qui a une section de 100mm x 100mm. Cela correspond à un débit de 18m³/h. La pression qu'un ventilateur axial peut fournir pour ce débit est de 130Pa. Cela signifie que notre filtre doit avoir une épaisseur externe d'au moins 70mm. L'encombrement en épaisseur d'un tel ventilateur est typiquement 100mm. Nous pouvons constater que seulement pour le ventilateur et le filtre nous avons besoin de 170mm pour un volume de travail de 100mm x 100mm x 60mm. Nous constatons donc que pour utiliser des filtres HEPA pour ce genre

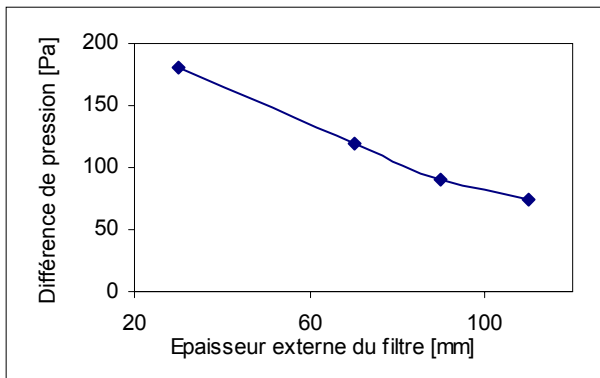


Fig. 8 : Différence de pression d'un filtre HEPA classe H14 à une vitesse de 0.45m/s en fonction de l'épaisseur externe du filtre

d'applications nous avons besoin soit d'énormes ventilateurs qui peuvent nous fournir une grande différence de pression pour des filtres de petite surface (donc petite épaisseur externe), soit des filtres de grande surface effective (donc une grande épaisseur externe) avec de plus petits ventilateurs. Dans les deux cas le système de ventilation et de filtrage sera plus grand que le volume de travail.

Dans notre projet nous avons décidé d'utiliser de l'air comprimé et les filtres appropriées. La pression de l'air sortant du filtre est plus importante (environ 0.5bar). Il est possible d'utiliser de l'air comprimé du réseau de l'entreprise. Les tests réalisés confirment que l'utilisation des pré-filtres et filtres assure la propreté de l'air sortant même si celui-ci contient des particules d'huile.

Le volume de travail étant très petit, le temps nécessaire pour établir le niveau de propreté de l'environnement est très court comme nous pouvons le voir à la Fig. 9. Cette figure représente 3 mesures successives de l'air; le temps commence à l'enclenchement de l'air. Chaque mesure dure 80sec et nous avons représenté le nombre de particules détectées classées par leur taille. Après la deuxième mesure notre appareil ne mesure plus de particules. Ainsi le temps de mise en condition de notre salle blanche est de moins de 2 minutes.

Nombre de particules en fct du temps

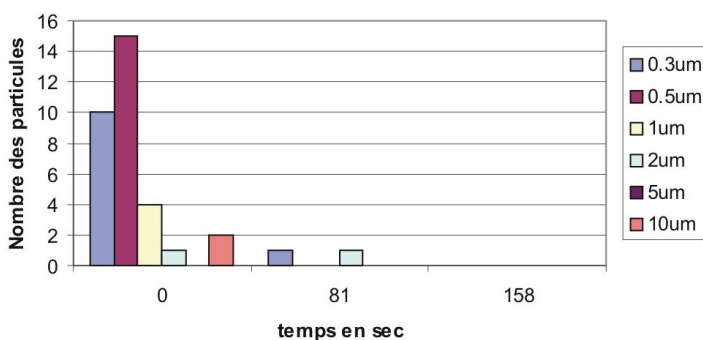


Fig. 9 : Nombre des particules classées par taille, en fonction du temps

L'air comprimé et filtré passe au travers d'un laminateur de 20mm d'épaisseur et devient laminaire. La Fig. 10 montre la répartition de la vitesse de l'air mesuré à une distance de 5mm du laminateur. L'air entre au laminateur à l'aide d'un tuyau de 10mm de diamètre, connecté au centre de celui-ci. La pression de l'air entrant est de 0.3bar. Nous remarquons que la répartition de la vitesse est homogène. La vitesse moyenne est de 0.4m/s et l'écart type de 0.0045 m/s.

La simulation du flux d'air qui passe à travers le laminateur nous permettra de diminuer encore la taille de ce dernier tout en augmentant encore l'homogénéité du flux.

Pour laminariser le flux l'utilisation des grilles avec des trous de différents diamètres est à l'étude. Ces grilles auront beaucoup de petits trous au centre et peu de trous plus grands à la périphérie.

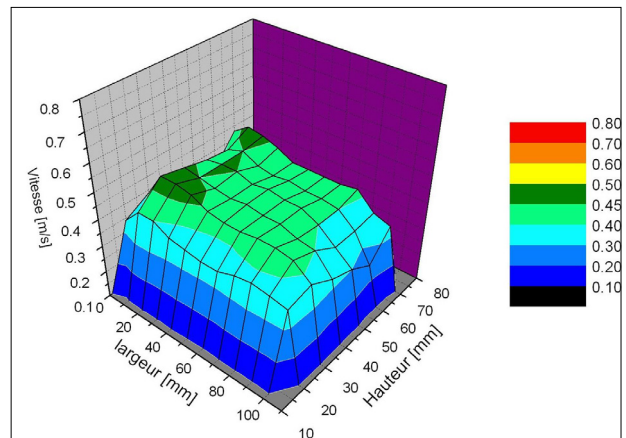


Fig. 10 : La vitesse de l'air mesurée à 5mm du laminateur



Fig. 11 : Visualisation du flux laminaire à l'intérieur de la microbox

Dans un environnement propre il est essentiel d'avoir un flux laminaire pour éviter que les turbulences amènent des particules à une région sensible. Pour visualiser la laminarité du flux nous avons utilisé la méthode décrite dans [5] :

Devant le laminateur nous tendons un fil de fer sur lequel nous avons appliqué de l'huile. Lorsqu'un courant électrique passe dans le fil, l'huile est brûlée générant une fumée bien visible qui est entraînée par le flux d'air. Pour assurer une bonne visibilité des résultats nous éclairons la fumée à l'aide d'un faisceau laser plan et horizontal. La Fig. 11 nous montre une image caractéristique de ces mesures lorsque le flux est laminaire.

6. Conclusion

La microfactory est un nouveau concept de production qui combine des salles blanches miniatures et des petites stations d'assemblage. Elle est composée de stations d'assemblage modulaires qui sont appelées microboxes. Chaque microbox contient un petit robot et éventuellement un ou plusieurs robots de haute précision. Un sas associé à chaque microbox permet d'introduire des palettes de 50mm x 50mm en respectant les conditions de propreté.

Un prototype d'une microbox a déjà été réalisé. De tests de propreté de l'air dans la microbox montrent que le temps

nécessaire pour établir un environnement propre de classe ISO 5 est inférieur à 2 minutes.

Une méthodologie de conception aidera à concevoir la configuration optimale pour chaque produit en fonction de la taille du produit, des conditions spéciales d'environnement, du temps de chargement/déchargement des palettes ainsi que de la taille des palettes.

7. Remerciements

Ce travail est une collaboration entre l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) et le Centre Suisse d'Electronique et Microtechnique (CSEM) qui financent ce projet et que nous remercions.

8. Références

- [1] T. Kitahara, K. Ashida, M. Tanaka, Y. Ishikawa, N. Nakazawa, "Microfactory and Microlathe", International Workshop on Microfactories, Tsukuba, Japan, p. 1-8, 7-9 November 1998
- [2] <http://www.emtechnologies.nl/mst/index.html>
- [3] Jean-Philippe Bacher, Stefano Bottinelli, Jean-Marc Breguet, Reymond Clavel, "Delta³ : a New Ultra-high Precision Micro-robot", Journal Européen des Systèmes Automatisés, Hermes, N°9, vol36, pages 1263-1275, 2002
- [4] Yves Girardin, Diploma Work, LSRO, EPFL, 2005
- [5] J. Schliesser, D. Limperich, "Experiences with thermal effects in minienvironments and methods for obtaining an optimized airflow pattern" Institute of Environmental Sciences- Proceedings, Annual Technical Meeting, 1996, Pages 436-441
- [6] J. Werlen, « Demonstrateur de la pocket factory », Travail de semestre d'été, LSRO, EPFL, 2005

