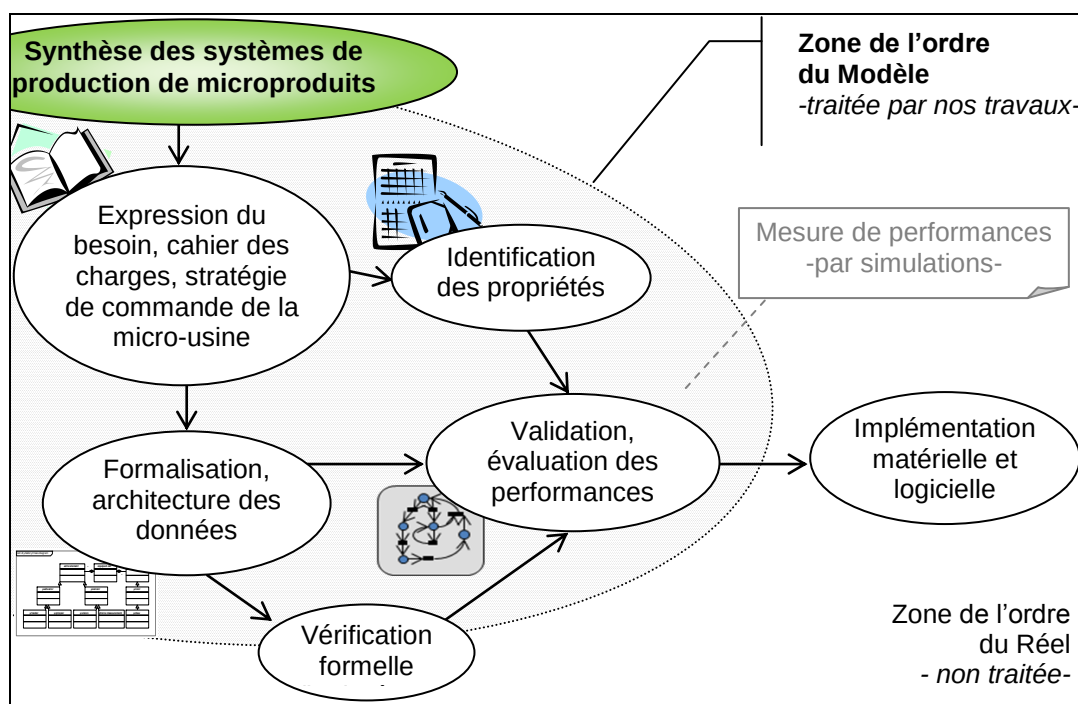


Vers une micro-usine automatique et modulaire

- Introduction -

Ce chapitre situe le contexte scientifique et technologique de la problématique que nous nous sommes fixée (fig 2.1). Nous allons tout d'abord définir la notion de microproduit (§ 2.1). Ensuite, nous détaillerons l'ensemble des spécificités relatives à la manipulation dans le micromonde (§ 2.2) ainsi que celles inhérentes à un système de production dédié (§ 2.3). Nous serons alors en mesure de présenter le contexte d'automatisation (§ 2.4) puis de nous orienter vers une synthèse à travers un microsystème modulaire de production automatisée (§ 2.4.2.5). Enfin, nous terminerons ce chapitre par la définition du besoin à travers la présentation de la problématique intrinsèque et essentielle à une telle micro-usine, la problématique du système d'information (§ 2.6).



2.1 - Méthodologie de travail, étape de présentation de l'état de l'art du micromonde

2.1 Microproduit

Un microproduit se caractérise tout d'abord par son enveloppe dimensionnelle dont la taille de ses largeur, hauteur et profondeur est comprise entre un micromètre et un millimètre. Ainsi, son volume minimum est de l'ordre du micromètre cube alors qu'au maximum, il vaut un millimètre cube. Notons au passage qu'il existe donc un facteur 10^9 , soit un milliard entre ces deux volumes. Un tel microproduit remplit une -voire plusieurs- fonction mécanique, électrique, optique, fluide ou encore chimique et biologique. A ce titre, il arrive qu'il soit obtenu par l'agrégation de ce que l'on convient d'appeler des microcomposants, voire parfois des micro-sous-assemblages.

La conception d'un microproduit à partir de plusieurs microcomposants est, à l'heure actuelle, généralement imposée par la provenance de différentes technologies. A titre d'exemple, la production à partir de « wafer » permet d'obtenir des microcomposants de géométries planes, fins, qui, par assemblage, permettent d'obtenir à leur tour des micro-objets spatiaux que l'on appelle alors « en deux dimensions et demi ».

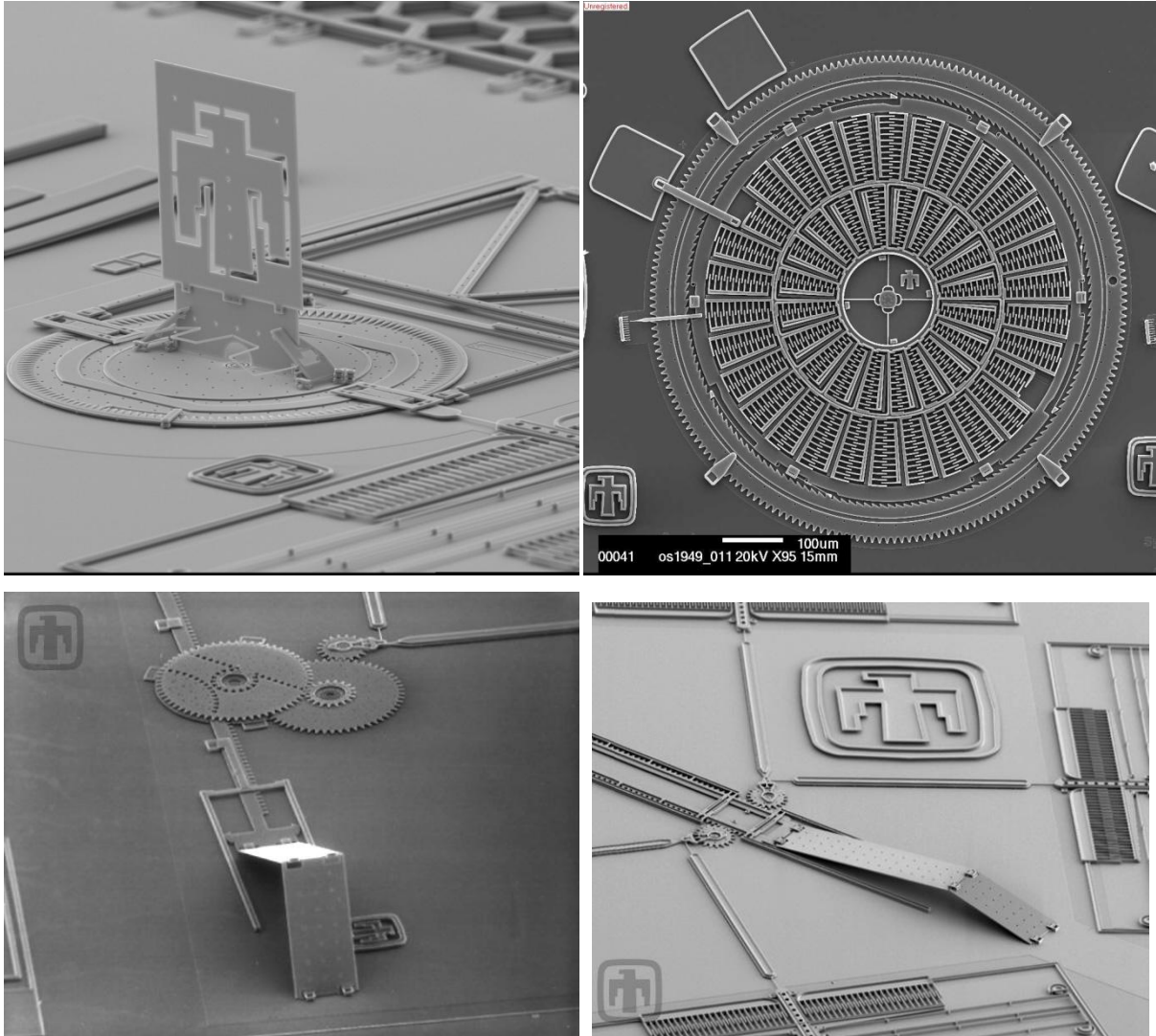
Cependant, l'indispensable opération d'assemblage, pourtant aisément concevable à échelle humaine, requiert une réelle aptitude à la micromanipulation dès que l'on passe à l'échelle microscopique nécessite obligatoirement une assistance pour agir et capter des informations.

De tels microsystèmes sont communément appelés des « MEMS » ou « MOEMS », par la communauté scientifique du domaine : MEMS pour Micro-Electro-Mechanical-Systems, MOEMS pour Micro-Opto-Electro-Mechanical-Systems.

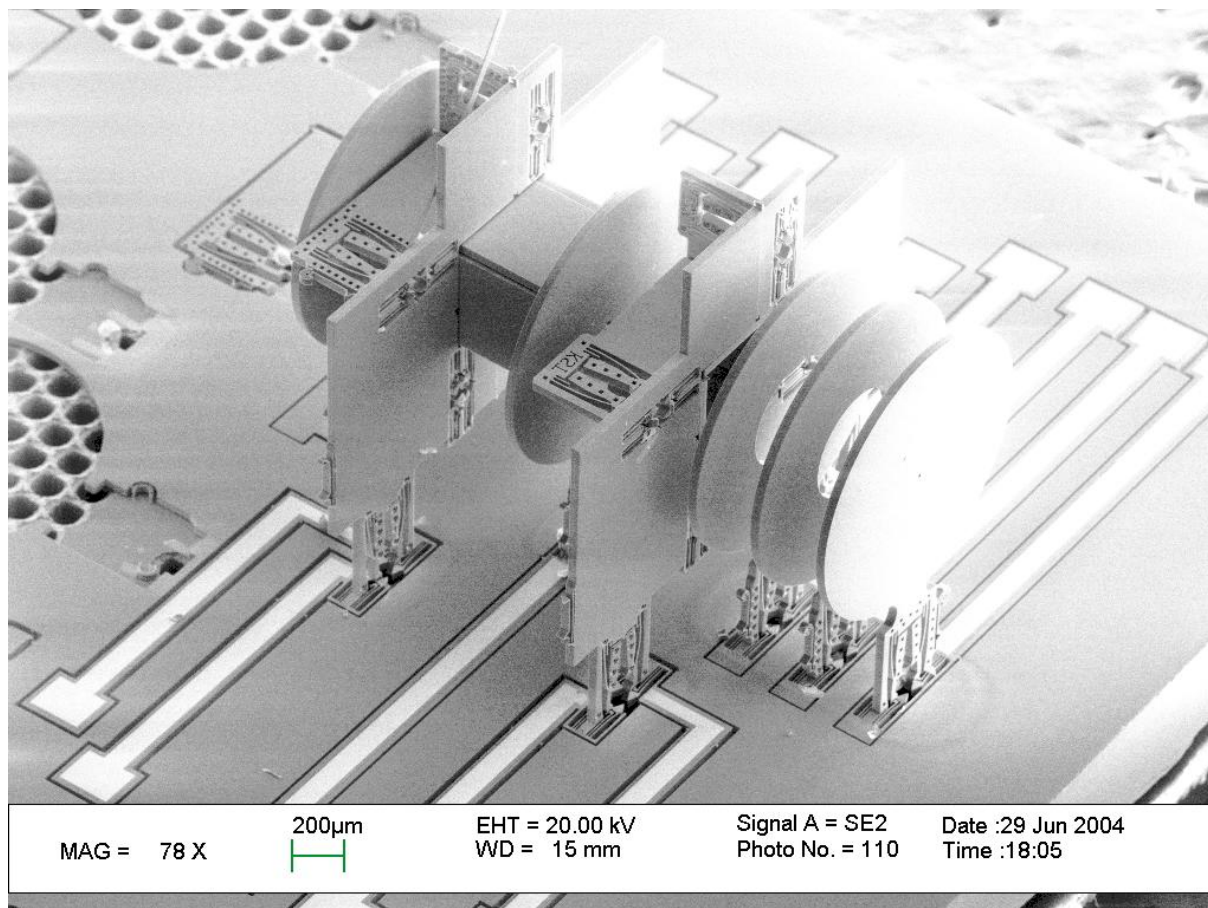
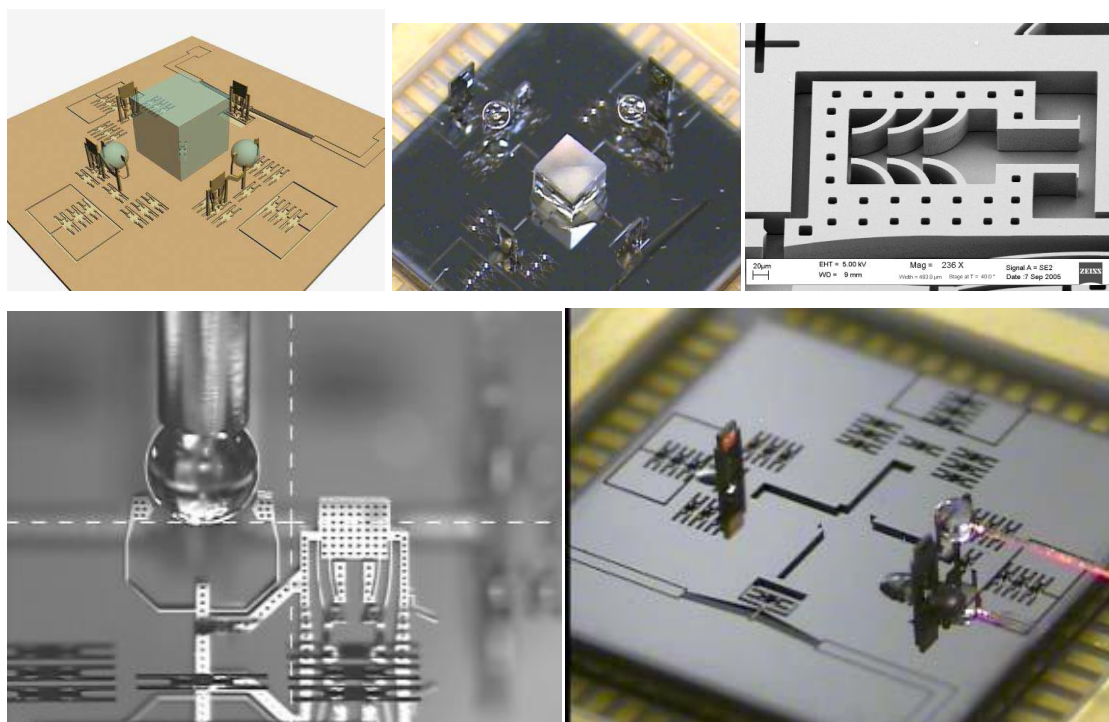
Une extension à l'échelle de taille inférieure amène la communauté scientifique à découvrir un nouveau champ technologique, celui des NEMS - pour Nano-Electro-Mechanical-Systems -. Deux champs spécifiques sont également à rapprocher des MEMS : les « BioMEMS » s'intéressent aux MEMS qui interagissent avec le monde biologique du vivant, animal ou végétal, et la microfluidique consiste à mettre en œuvre des MEMS qui conditionnent des liquides -également transposables à des gaz via quelques évolutions- [[Bay05](#), [Com05](#)].

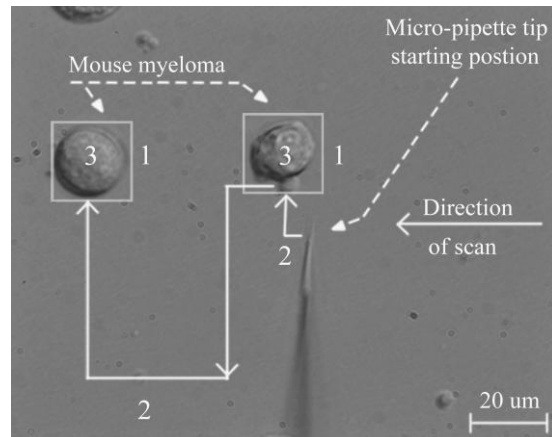
En ce qui concerne les MEMS, de nombreux travaux permettent de mesurer des caractéristiques des actuels microproduits. Les microcomposants provenant

éventuellement de différentes technologies ou de technologies planes obtenues par strates font appels à diverses solutions d'assemblage leur assurant des liaisons à amplitude de déplacement finie, sans jeu, grâce à d'importantes déformations ou à une solidarisation par collage.



2.2 - Exemples de MOEMS : motorisations, engrenages et miroirs microscopiques [[San](#)]

2.3 - Assemblage MEMS 3D produit par Zyvex Co [[Hol06](#)]2.4 – Exemple de MOEMS 2 ½ D : microspectromètre [[Pop09](#)]



2.5 - Exemple de micromanipulation biologique [Sak07]

La figure précédente montre un cliché pris au microscope montrant les chemins souhaités pour l'algorithme de mise en mouvement d'une micropipette de micro-injection dans un myélome de souris - mesurant approximativement 20 μm de diamètre -. [Sak07]

Une taille aussi réduite, en regard des objets qui côtoient habituellement au quotidien l'espèce humaine, fait intervenir des efforts d'origine surfacique très largement négligeables pour les objets de plus grande taille. A contrario, les efforts d'origine volumique, intervenant en temps normal sur les objets de taille habituelle pour les humains, sont très largement réduits au sein du micromonde. Une telle inversion des proportions nécessite de nouvelles connaissances et un réel apprentissage pour le commun de nos concitoyens amené à intervenir lors de la fabrication de tels microproduits.



2.6 - Sonde d'endoscopie - diam. ext. 2,8 mm - [Oga98]

La sonde d'endoscopie est l'un des premiers produits ayant servi de support au développement du concept de micro-usine. Notons qu'un tel système représente une dimension importante dans le contexte du micromonde, qu'il est à considérer en marge de notre domaine puisqu'ayant plutôt sa place dans la catégorie des mini-produits.

2.2 Spécificités de la manipulation dans le micromonde

L'importance du facteur d'échelle est une des clefs de l'appropriation du micromonde par l'être humain qui n'y est naturellement pas préparé.

Le facteur d'échelle est un ratio qui se définit sur une unique dimension lorsqu'on agrandit ou réduit un objet, si bien que pour une surface, par principe bi-dimensionnelle, l'intervention du ratio apparaît au carré, et, pour un volume forcément en trois dimensions, c'est au cube qu'agit le facteur d'échelle.

Prenons, par exemple, un chat adulte de taille moyenne. Ce félin, long d'environ une cinquantaine de centimètres et large d'une dizaine, pèse en moyenne cinq kilogrammes. Nous pouvons estimer à vingt cinq dm² la surface de sa peau (ndr : vingt cinq dm² de douceur de fourrure !).

Tout d'abord, grossissons le cinq fois dans toutes les directions. Nous obtenons alors un « bestiau » long de deux mètres cinquante, large de plus de cinquante centimètres, pesant cent-vingt-cinq fois plus que notre matou, soit la maudite masse de six cent vingt-cinq kilogrammes pour une superficie de fourrure seulement vingt-cinq fois plus importante, de six cent vingt-cinq dm².

Ensuite, rétrécissons notre mammifère d'un facteur d'échelle de cinq. La longueur de cette nouvelle « bestiole » sera bien entendu cinq fois plus petite, à savoir une dizaine de centimètres de long pour deux petits centimètres de large, alors que sa masse est réduite d'un facteur cent vingt-cinq ; il atteint juste quarante grammes pour une surface de peau de un dm².

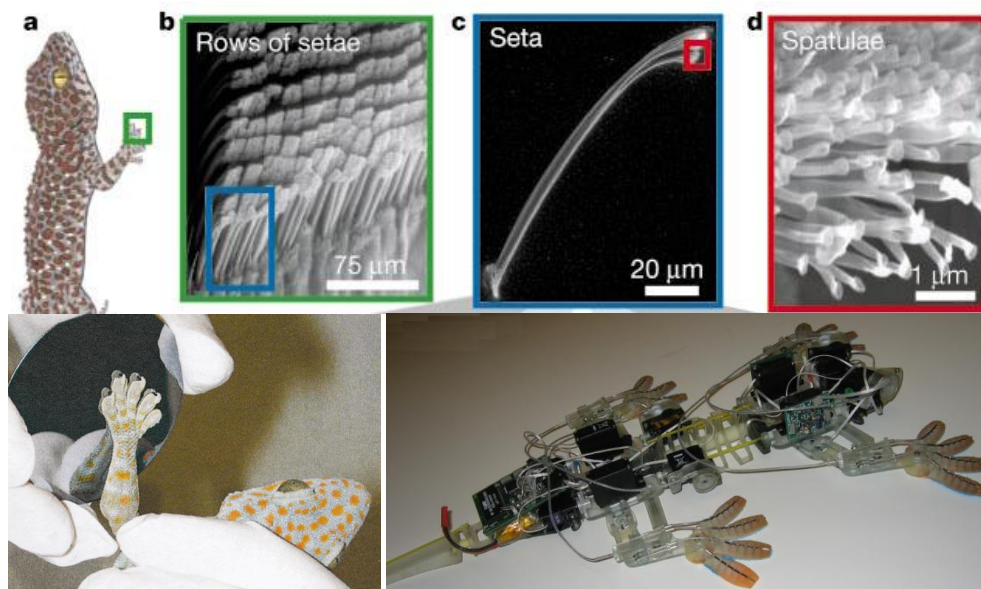
A travers ces trois mammifères, le minou, le bon vieux nounours polaire menacé par notre réchauffement malgré son record de poids à plus de 1100 kg, et le sympathique lémurien, ou encore l'écureuil voire la chauve-souris - ou pourquoi pas... l'incroyable gecko -, nous ne pouvons que constater l'impact énorme de la relation de variation du volume par la surface. Alors que ce ratio est cinq fois plus important pour l'ours que pour le chat, il l'est cinq fois moins pour la chauve-souris que pour ce même chat.

En conséquence, alors que l'ours polaire est massif, lourd et utilise son poids pour faire céder la glace et ainsi écraser puis dévorer les phoques surpris en plein repos, le chat compte quant à lui sur sa vitesse et son agilité pour tromper les petits rongeurs. Et notre bestiole, qu'elle soit lémurien - tel le colugo -, écureuil - tel l'écureuil volant de la famille des Pteromyinae -, ou chauve-souris - de l'ordre des

chiroptères -, a développé d'énormes aptitudes à se déplacer dans le fluide environnant, ce fluide gazeux : l'air... - ce formidable et juste mélange vital composé entre autre de 21% de di-oxygène, de 78 % d'azote, de moins de 1% d'argon et juste ce qu'il faut de CO₂, moins de 0,04 %... juste ce qu'il faut pour l'instant, mais c'est un autre débat ! -.

Cette évolution du ratio de variation du volume par la surface a permis à notre bestiole de chasser les insectes et surtout de se déplacer voire de fuir par les airs soit en « vol plané » pour les lémurins, écureuils ou autres geckos, soit encore en « vol actif » pour les belles chauve-souris capables de vaincre la pesanteur en l'air, mais finalement incapables de se mouvoir sur leurs pattes, tellement la nature a parié sur leur légèreté, si ce n'est en rampant lentement ce qui leur confère une extrême vulnérabilité.

Si nous avons introduit ici le gecko qui est un reptile et non pas un mammifère, c'est pour une autre de ses prouesses dans le micromonde : la présence de ses « spatulæ » (sur ses « setæ », eux-même sur ses « lamellæ») qui exploitent les forces surfaciques de Van der Waals et lui autorisent l'ascension de surfaces lisses [[Aut00](#), [Aut02](#)]. De telles prouesses sont prises en exemple par le domaine de la robotique bio-inspirée [[San08](#)].



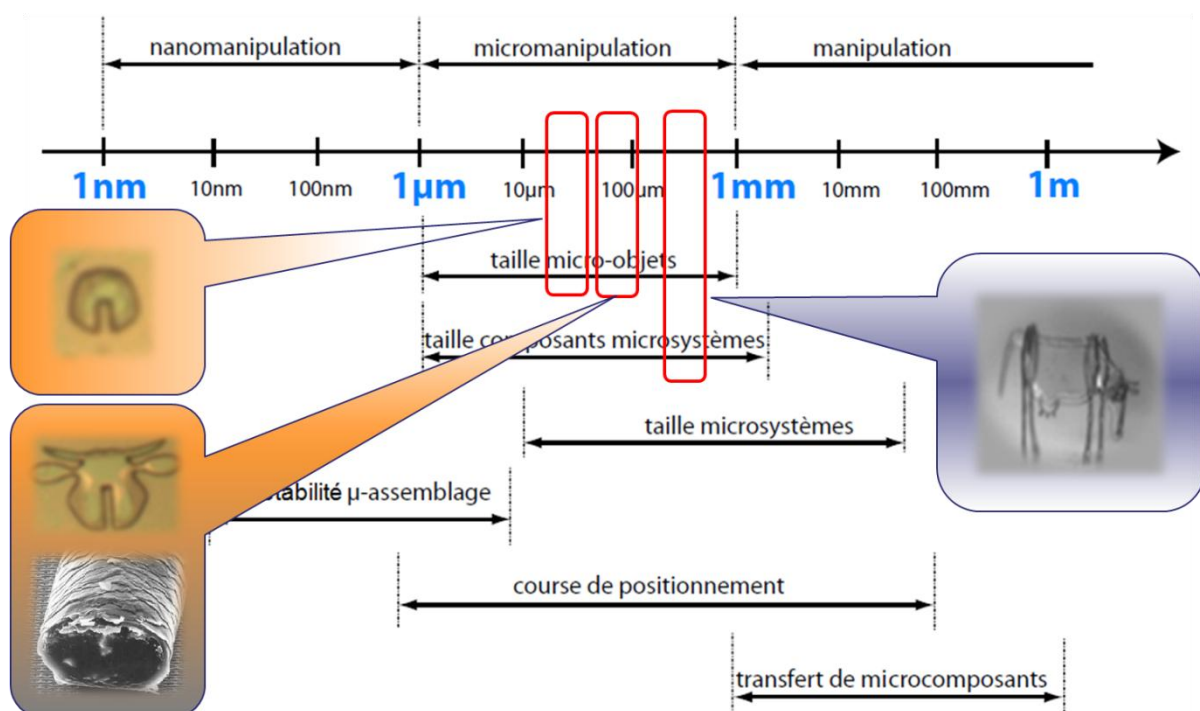
2.7 – Le Gecko [[Aut00](#), [Aut02](#)] et son sosie robotique adhérent à une surface « lisse » [[San08](#)]

L'évidence ainsi décrite de l'évolution de l'action du volume - de la masse - ou de la surface, en fonction de l'échelle à laquelle on se situe, a d'autant plus d'importance avec les objets de taille micrométrique à millimétrique que le facteur d'échelle est de cent à cent mille fois plus petit que celui considéré pour notre respectable chauve-

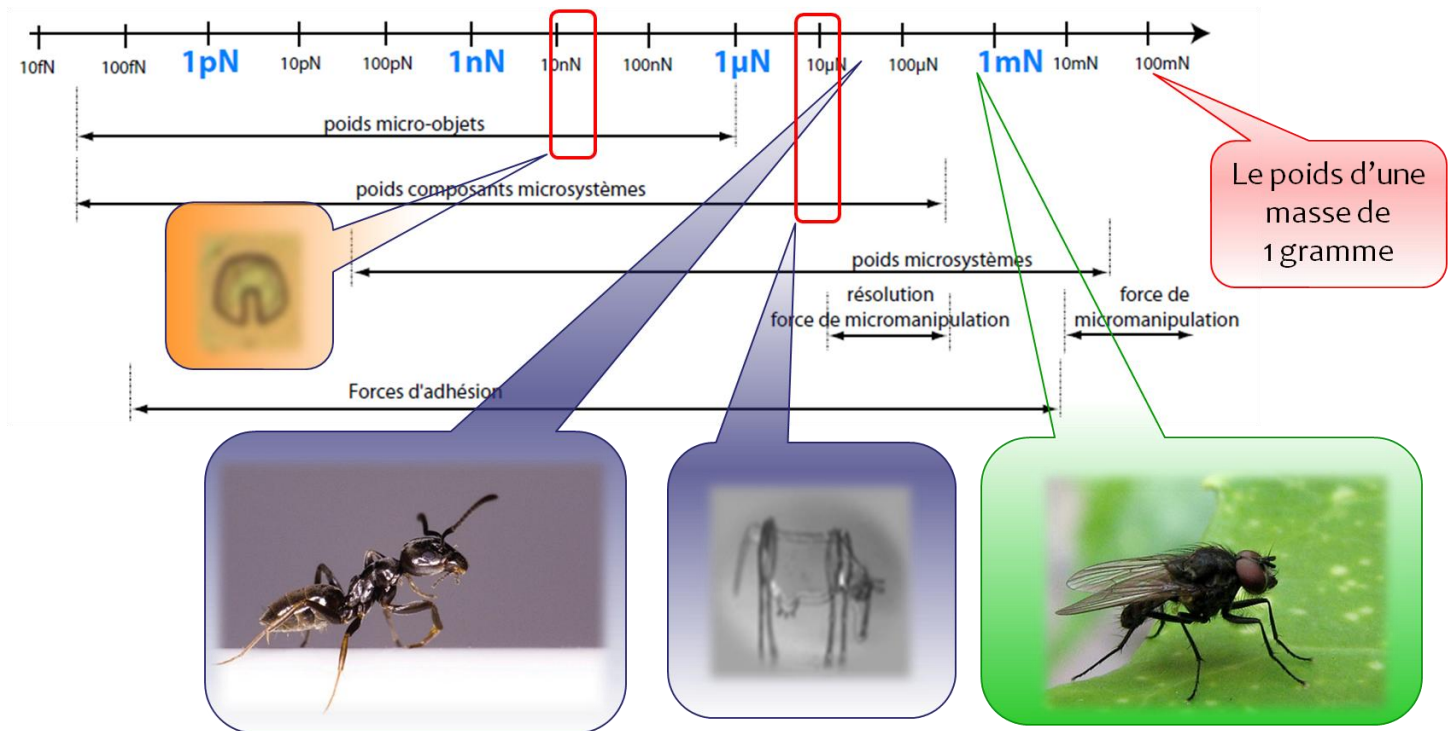
souris et son acolyte de gecko. Et, par conséquent, en tant qu'humain - de gabarit intermédiaire entre celui du chat et de l'ours polaire -, notre expérience à ces échelles est inexistante et nécessite un apprentissage et le développement de savoir-faire spécifiques, de techniques et de technologies propres, dédiées.

Dès lors, la diffusion de la technologie adaptée au micromonde requiert impérativement une assistance à la mise en œuvre des scénarii de production, à la réalisation d'opérations et tout simplement à la manipulation. Et pour cause, les limites sensorielles directes d'un corps humain ne permettent pas d'acquérir les informations nécessaires pour mener par la suite une micro-action : la perception visuelle directe et l'aptitude tactile directe ne permettent ni de sentir ni détecter des irrégularités inférieures à 50 μm . Concernant les actions musculaires directes telles que les oscillations - sortes de micro-spasmes - et tremblements dont sont victimes les mains de l'opérateur, elles ne permettent pas une dextérité manuelle suffisante, la précision maximale pouvant être obtenue étant estimée à 100 μm .

Les figures 2.8 et 2.9 permettent une appropriation des ordres de grandeurs des plages de dimensions et de forces caractéristiques du micromonde [Rak06]. Nous situons sur ces figures des microcomposants et un microproduit démonstratif qui seront exploités dans la suite du manuscrit ; il s'agit de l'assemblage d'une microvache dont nous voyons les composants formant le museau et la tête (de la taille d'un cheveu).

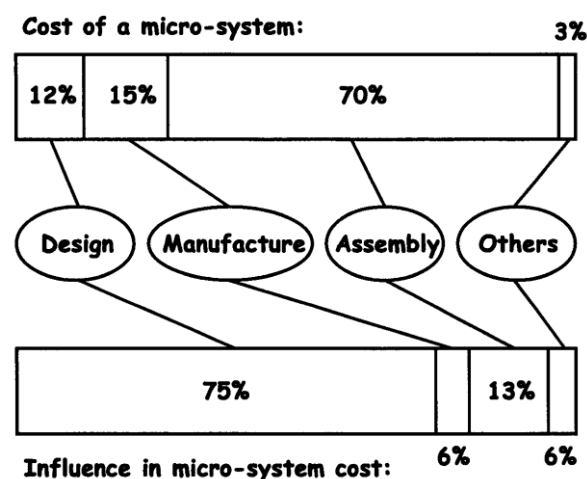


2.8 – Synthèse des ordres de grandeur des dimensions relatives au micromonde [Rak06]



2.9 – Synthèse des ordres de grandeur des forces relatives au micromonde [Rak06]

En 2000, les travaux de l'EPFL [Ben00] ont mis en évidence l'importance de l'impact de la conception - « design » - d'un microproduit sur son coût d'assemblage. Cette relation est maintenant connue des microtechniciens sous l'acronyme DFμA pour la contraction de « Design For Micro-Assembly ».



2.10 - Importance relative des coûts en Design For Micro-Assembly [Ben00]

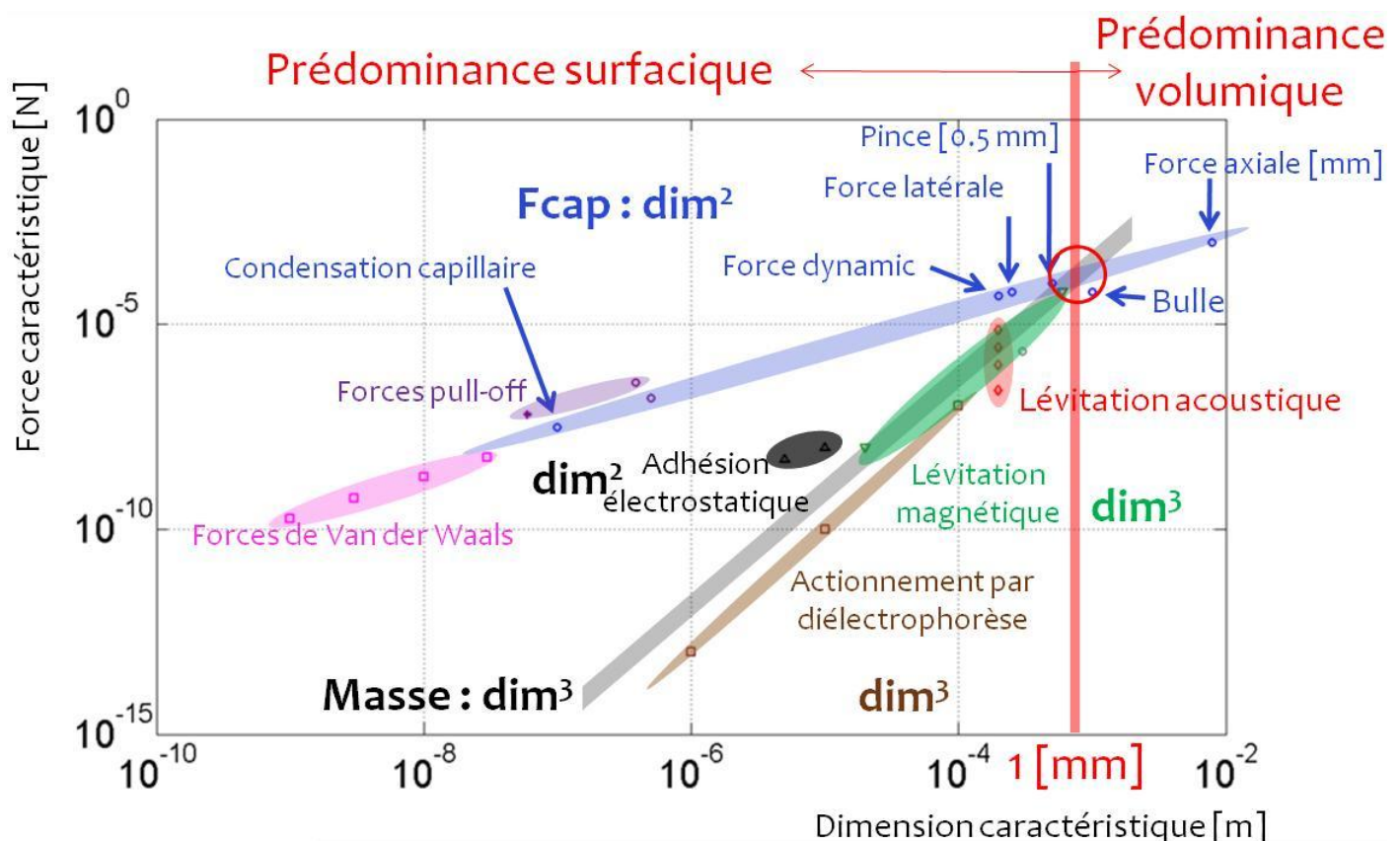
La thèse présentée également par l'EPFL en 2008 par Mélanie Dafflon [Daf08] est une référence quant à la présentation des efforts intervenant en micromanipulation –

nous aurons l'occasion d'y revenir pour l'étape de simulation, § 4.1.3 -. En regard des forces volumiques, on y relève l'effective prépondérance des forces surfaciques dites de Van des Waals, de capillarité, électrostatiques, hydrodynamiques.

Nos confrères belges de l'ULB contribuent également fortement à la modélisation des efforts surfaciques prépondérants dans la micromanipulation [Cha07, LamP03] ou la conception de vannes de microfluidique [Len08, Len09]. La figure de synthèse, tirée de la soutenance des travaux d'HDR de Pierre Lambert, permet une vue globale des travaux et des ordres de grandeurs associés [LamP10].

L'identification de ces efforts représente une première difficulté qui s'efface avec la mesure des efforts en présence. Une plateforme spécifique de mesure de ces micro et nano-forces a été récemment développée au sein de femto-st AS2M [Che09].

Les travaux de Mickaël Paris [Par08] menés dans notre laboratoire sur la problématique d'alimentation d'une micro-usine en microcomposants, démontrent, quant à eux, la possibilité d'obtenir malgré tout un déplacement par friction et inertie.



2.11 – Synthèse des expérimentations menées dans le micromonde [LamP10]

2.3 Système de production dédié au micromonde

Un système de production adapté aux microproduits doit principalement disposer d'une aptitude à la productivité, nécessitant une disponibilité importante, un volume de production conséquent et une grande fiabilité.

Un système de production dédié au micromonde a pour finalité la mise en œuvre d'une production à partir d'un petit volume de pièces prototypes, et jusqu'à sa fiabilisation, une robustesse du procédé adapté à une série beaucoup plus grande.

Prenons comme exemple le milieu de l'horlogerie mécanique : l'existant fait état d'assemblage manuel ou partiellement automatisé sur certains composants standardisés. Ces interventions manuelles nombreuses pour l'assemblage d'un mécanisme complet requièrent savoir-faire et disponibilité qui justifient en grande partie la situation de ces mécanismes dans le domaine du luxe.

A contrario, la microélectronique, à l'image des composants intégrés ou des cartes électroniques de type circuits imprimés - dont les séries de production sont généralement très grandes -, est principalement dotée de lignes d'assemblage dédiées et peu enclins à accueillir de nouvelles technologies pour l'essai d'une petite série de prototypes.

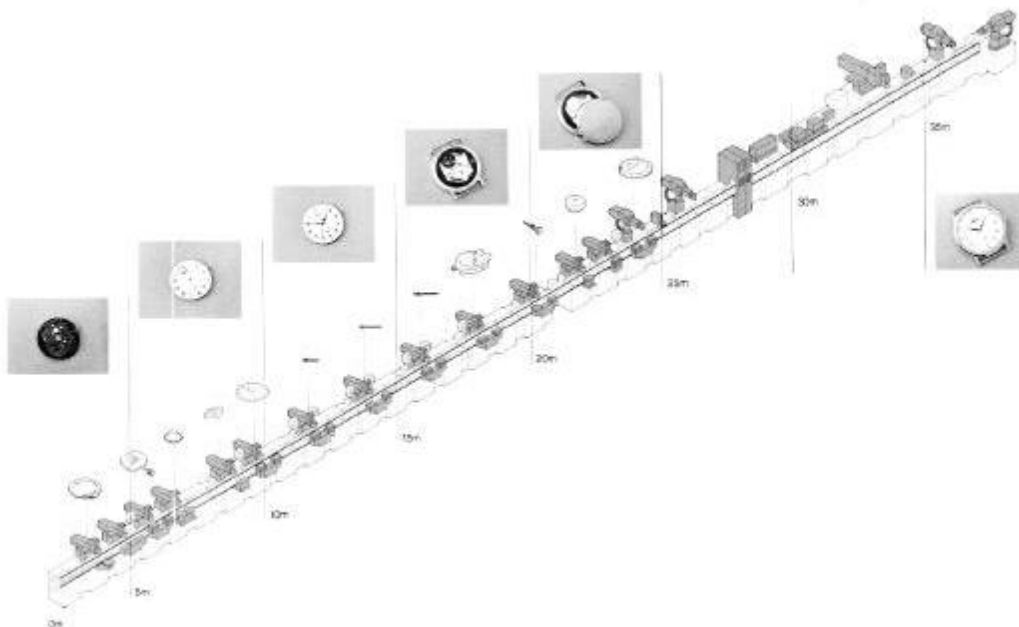
Compte-tenu du contexte actuel, national et mondial, où l'énergie est au cœur de l'équilibre économique et à l'origine d'une importante lutte d'influence, nous devons plus que jamais développer des techniques à faible consommation. En effet, d'une part, le baril de pétrole atteint périodiquement des valeurs jusque-là jamais vues, et d'autre part, la pollution engendrée par la combustion des énergies fossiles remet en cause l'équilibre planétaire qu'il soit climatique et biologique, mais également à fort impact sanitaire et social dans les pays les plus pauvres.

Par ailleurs, la signature du « pacte écologique » de M. Nicolas Hulot par des millions de Français oriente principalement le débat énergétique vers une consommation raisonnée et une réduction des gaspillages pour limiter au plus juste la production d'énergie.

A ce titre, le concept de système de production dédié au micromonde que nous proposons est en phase avec le besoin exprimé par l'actuelle conjoncture. Du point

de vue purement énergétique, l'adaptation du système de production à la taille du produit permet une réelle diminution de l'impact de ces nouvelles technologies en terme de pollution, réduction du gaspillage : la consommation énergétique d'un robot industriel classique de « pick and place » n'est-elle pas sans commune mesure avec celle utilisant une technologie piezo ou AMF ? Certes les amplitudes de déplacements sont généralement moindres, mais justement bien suffisantes pour une application d'ordre microscopique. La consommation énergétique principale d'un robot industriel traditionnel est imputable aux actionneurs qui accélèrent et décélèrent les masses importantes de sa propre structure en regard des composants manipulés, donc à la partie opérative. Dans une cellule de production micro, la consommation d'énergie est équilibrée entre la partie commande et celle opérative, voire inversée - ...du moins pour l'instant encore -.

Actuellement, l'industrie du petit s'appuie sur une production de masse pour laquelle les lignes de production sont dédiées, souvent longues et énergivores. La ligne illustrée par la figure 2.12 mesure 40 m et chaque bras robotisé pèse 250 kg.



2.12 - Exemple de ligne de production pour l'assemblage de mécanismes de montres [[Ata02](#)]

A l'opposé, lorsque la série requiert une faible quantité de produits, la manipulation et l'assemblage font appel à un opérateur humain dont la compétence métier est indispensable. C'est par exemple le cas dans l'industrie de l'horlogerie de luxe.



2.13 - Exemple de dextérité horlogère pour manipulation-assemblage -arc Jurassien-

Diverses technologies de manipulation ont vu le jour ces dernières années. Elles permettent des mobilités sur un ou plusieurs axes en série ou en parallèle, tout en assurant une grande précision dans le positionnement et la résolution de ce dernier.



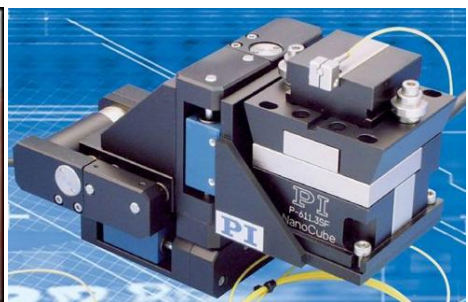
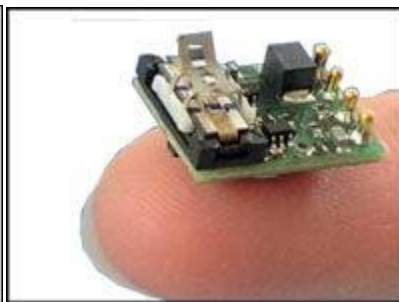
2.14 - Exemple de banc de positionnement à 13 ddl, SmartAct GmbH

Le système de chez SmartAct [\[Sma\]](#) illustré sur la figure 2.14 forme une station de faibles dimensions - $80 \times 80 \times 32.5 \text{ mm}^3$ -, assez légère - 200 g - ayant un volume de travail relativement important - $12 \times 12 \times 12 \text{ mm}^3$ - et une résolution sub-nanométrique.

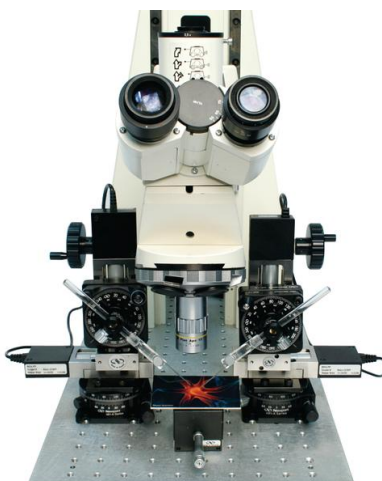
Trois autres constructeurs se partagent le marché du micro-actionnement : Kleindiek (Fig. 2.15), Physik Instrumente (Fig. 2.16) et Newport Corporation (Fig. 2.17).



2.15 - Exemple de microrobot, Kleindiek [\[Nan\]](#)



2.16 – Hexapode, mini-actionneur et tables, PI - Physik Instrumente – [\[PI\]](#)



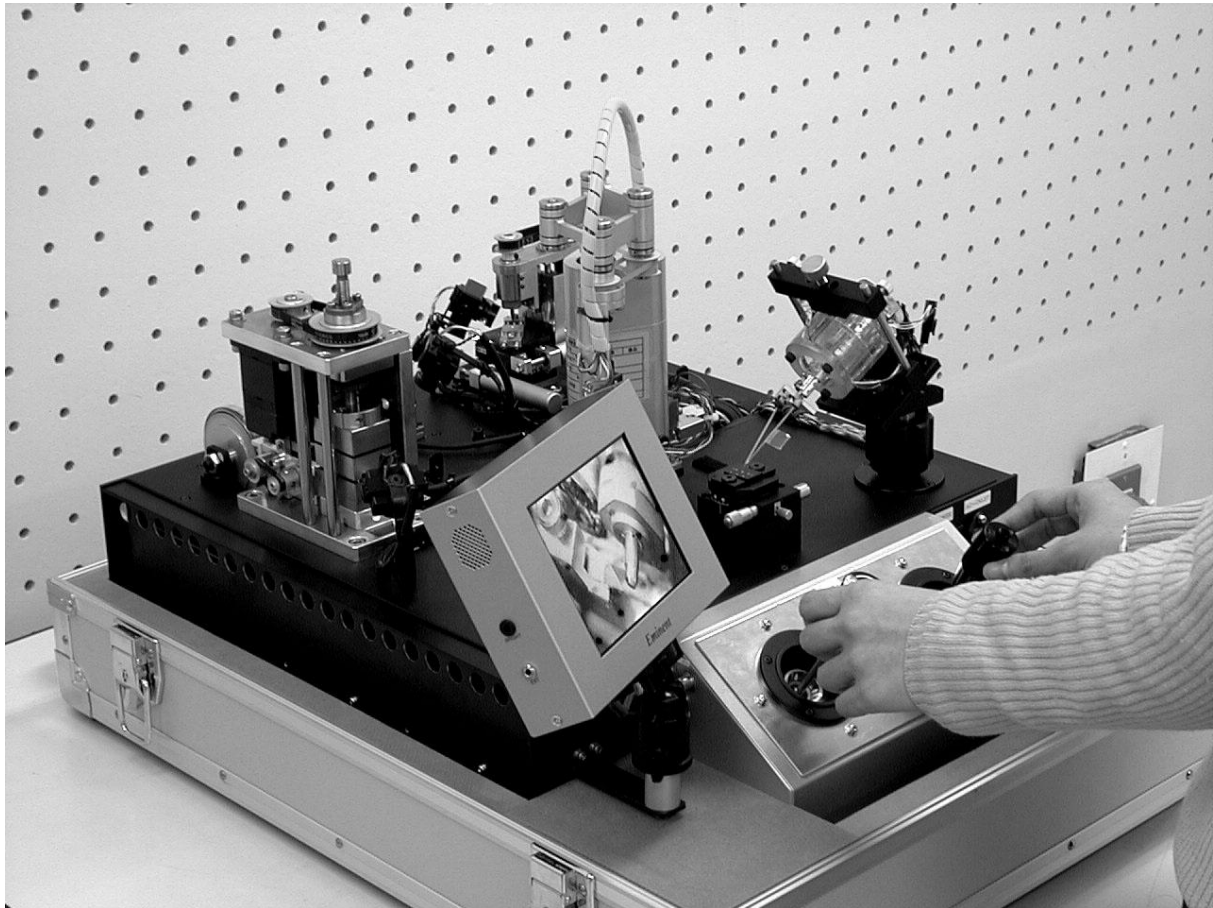
2.17 – Equipement de micromanipulation motorisée et table XY, Newport Corporation

A l'image des salles blanches, l'environnement nécessite d'être contrôlé, régulé en permanence afin d'éviter toute perturbation susceptible de se propager. Qu'il s'agisse de poussières, de vibrations, de charges électrostatiques ou de variation du taux d'humidité, la production de microproduits requiert - à l'heure actuelle - certaines précautions indispensables pour réussir toute micromanipulation et pour s'assurer d'être en présence d'opérations reproductibles.

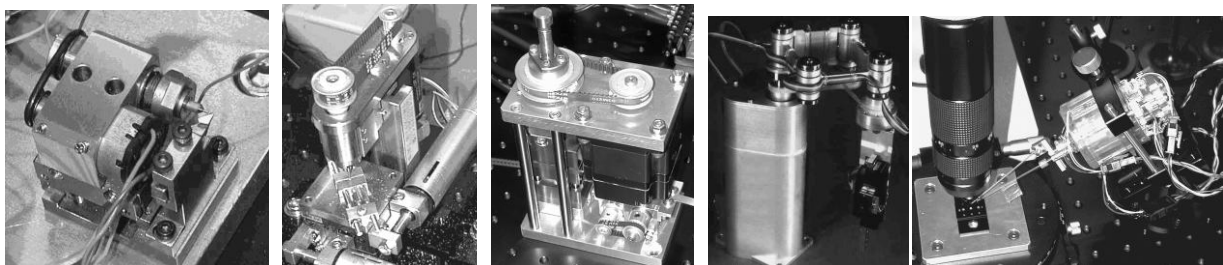
Historiquement, ce sont les chercheurs Japonais du MEL - Mechanical Engineering Laboratory - qui ont travaillé les premiers, dans les années 1990, à la réalisation d'un système de production miniaturisé. Un démonstrateur permettant la fabrication de miniroulement à billes a assuré une reconnaissance internationale au sein de la communauté scientifique. Ces premiers travaux ont initié le cahier des charges d'une micro-usine dont les grandes lignes sont toujours d'actualité : un faible encombrement et une portabilité, une faible consommation énergétique et une aptitude à la reconfiguration des moyens de production.

Les premières machines étaient en réalité des miniaturisations des habituels moyens de production. Elles permettaient la réalisation de pièces de taille millimétrique ou légèrement submillimétrique. Ainsi, le microtour présenté en 1996 [Kit98], la micro-usine en mallette [Tan01], la station « centre d'usinage à commande numérique » [Oka02] sont des systèmes télé-opérés inspirés des technologies utilisées à l'échelle méso*.

* nous adoptons le terme « méso » pour définir les dimensions de l'ordre du mètre. N'étant ni dans les dimensions plus petites, ni dans les grandes dimensions en regard de la référence métrique et des habituels préfixes (ndr : déca, hecto, kilo, déci, centi, milli, micro), ce terme qui signifie « milieu » est adapté pour définir tout ce qui va du décimètre (voire centimètre) au décamètre.

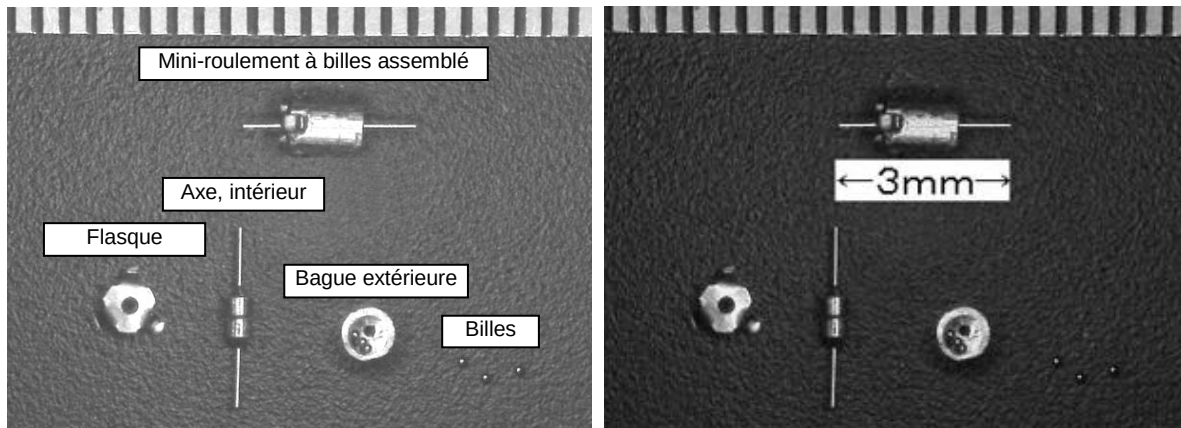


2.18 - Usine miniaturisée en mallette [\[Tan01\]](#)

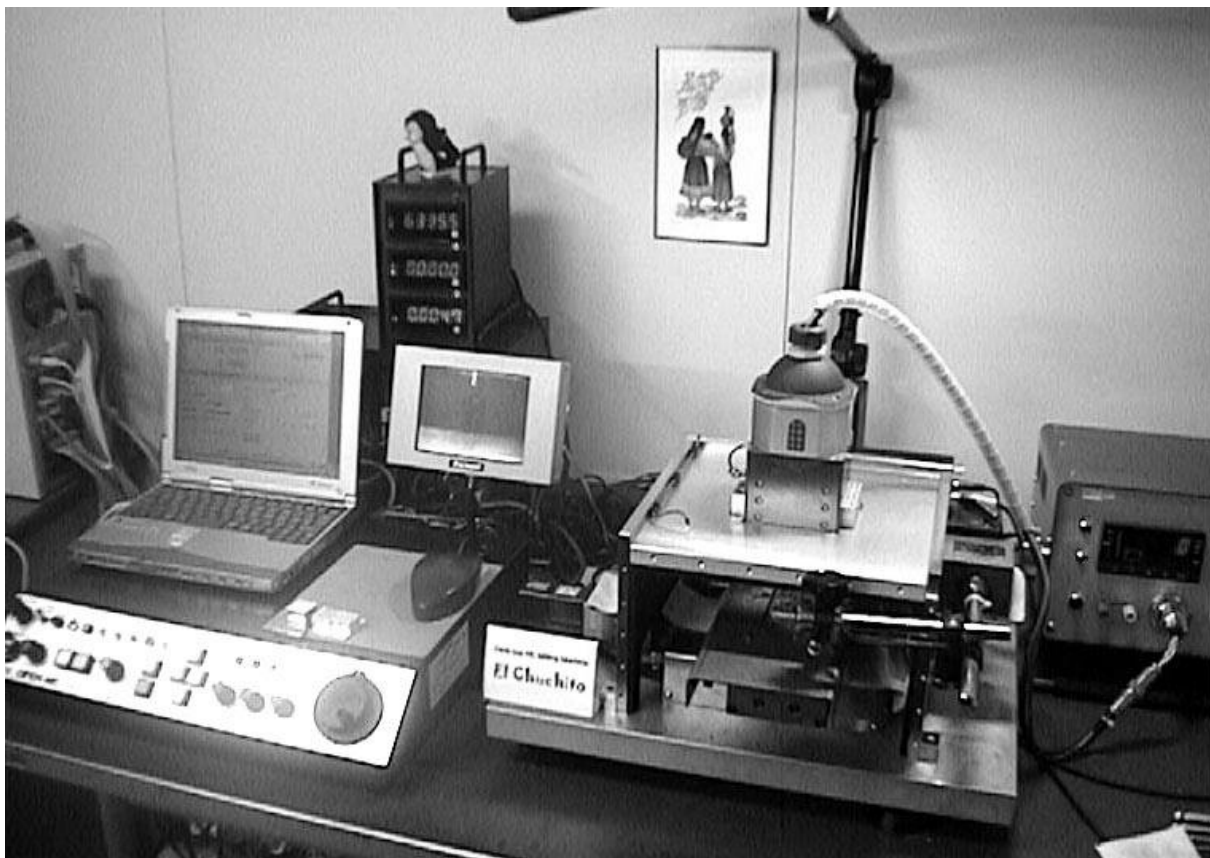


2.19 - Vues des postes miniaturisés [\[Tan01\]](#)

Le système de production de Tanaka est constitué de machines conventionnelles disposant de quatre postes de travail - trois postes de micro-usinage avec microtour, microfraiseuse et micropresse, et un poste de micro-assemblage dont le préhenseur est équipé d'une micropince -, ainsi qu'un système de transfert, trois mini caméras CCD, deux joysticks de télépilotage. La finalité de ce démonstrateur était de réaliser l'assemblage du mini-roulement à billes suivant - diamètre extérieur : 900 μm , longueur : 3 mm - :

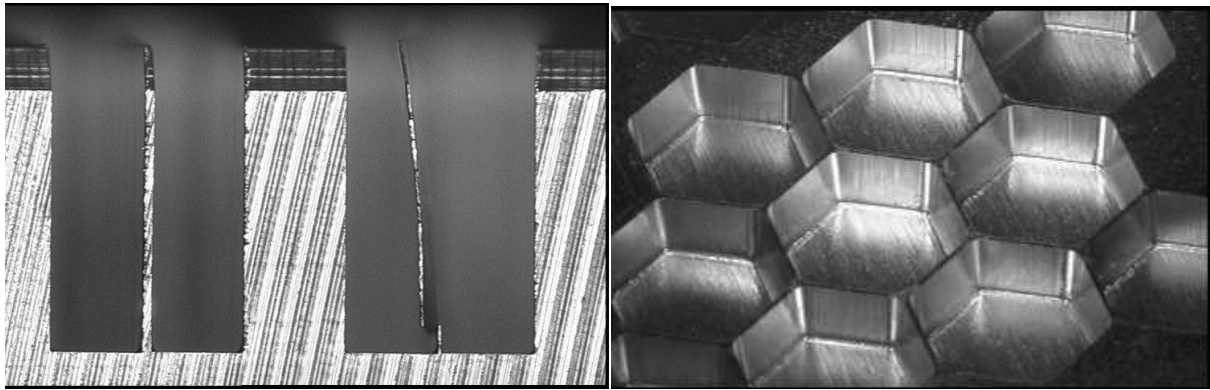


2.20 - Mini-roulement à billes fabriqué par l'usine miniature [Tan01]



2.21 - Centre miniaturisé d'usinage de voiles minces [Oka02]

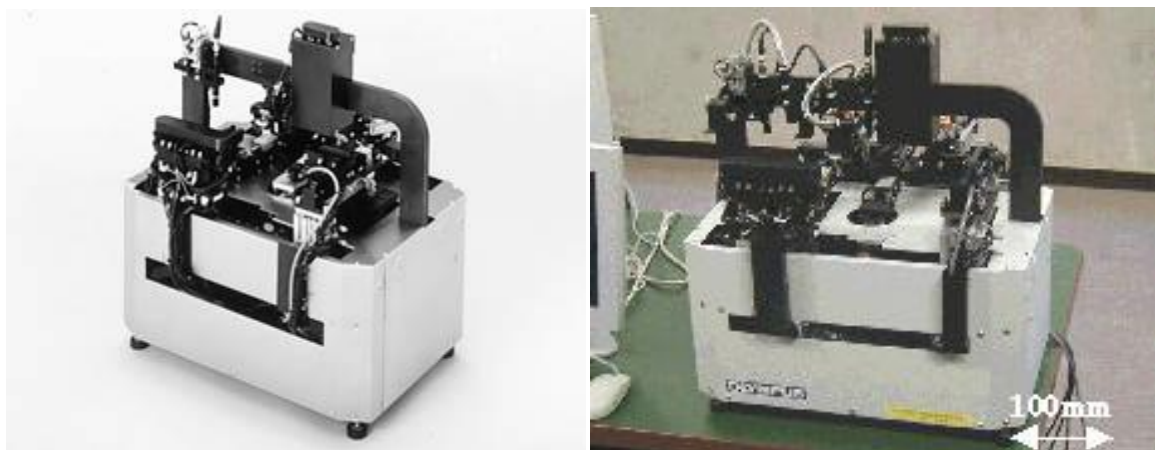
Le mini centre d'usinage développé par Yuichi Okazaki (Fig. 2.21) permet la réalisation d'usinage de voiles minces - épaisseur 50 et 20 μm , hauteur 2 mm -, et en nid d'abeilles - de pas 4 mm, profondeur 2 mm - (illustrés par la Fig. 2.22 en coupe).



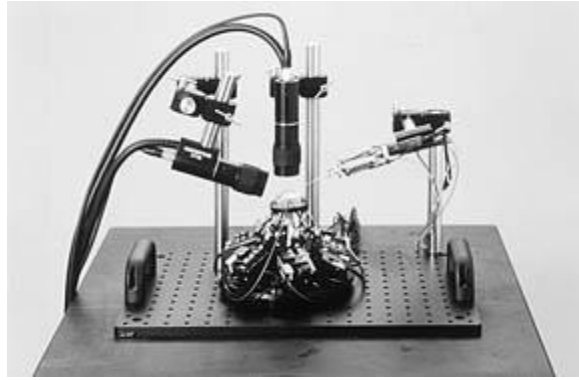
2.22 - Exemple d'usinages minces : épaisseur 50 et 20 μm x hauteur 2 mm, et nid d'abeilles de pas 4 mm x profondeur 2 mm

Nous pouvons également citer les remarquables travaux de la DTU Technical University of Denmark [[Bis04](#)] qui a exploré le micro-usinage avec des outils de 200 μm de diamètre, ainsi que ceux de Laurent Guyout en micro fraisage d'aciers inoxydables 316L par du carbure de Tungstène [[Guy09](#)].

Des travaux initiés en 1991 par la société Olympus et Haruo Ogawa [[Oga98](#)] ont permis, en 1999, la présentation d'une micro-usine [[Oly99](#)] avec, d'une part, un système d'assemblage de microproduits d'optique pour endoscopes, et d'autre part, une plate-forme de micromanipulation téléopérée :

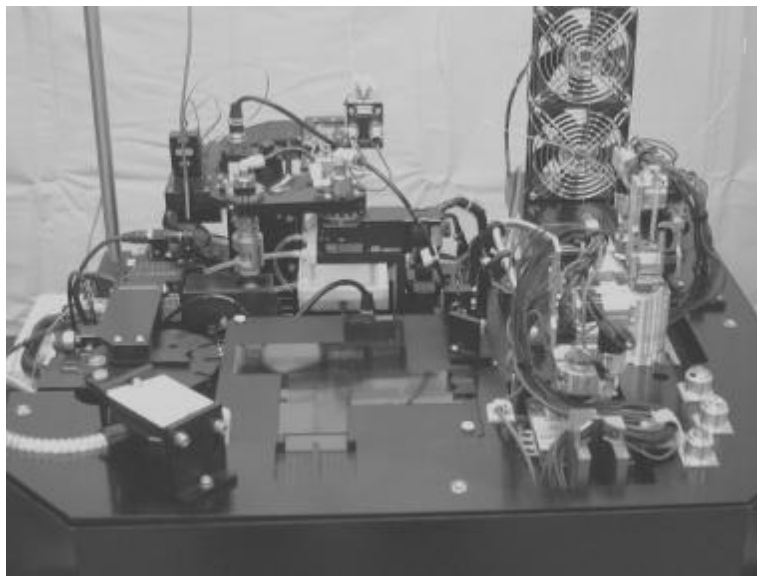


2.23 - Système d'assemblage de micro-produits optiques [[Oga98](#)]



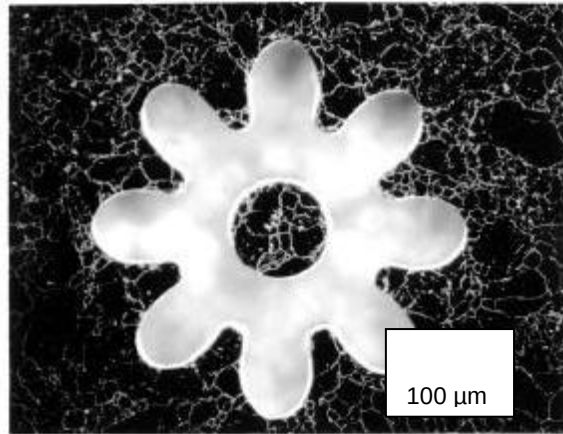
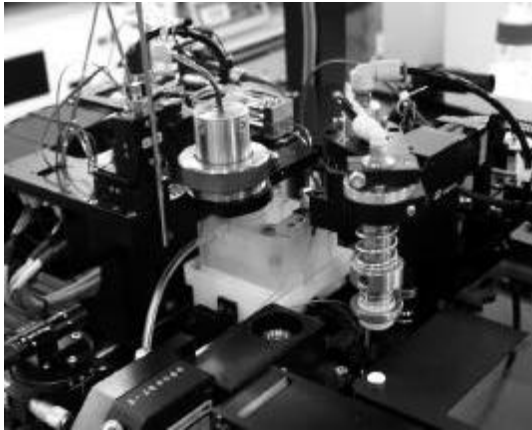
2.24 - Système de téléopération - projet Nedo-Olympus [Oly99] -

Le projet national japonais du MITI [Ata02] a vu naître en 2002 une illustration d'une micro-usine permettant la mise en œuvre d'opérations de transformation par assemblage, convoyage, pompage de solution, reconnaissance d'environnement, système de préhension et adhésif.



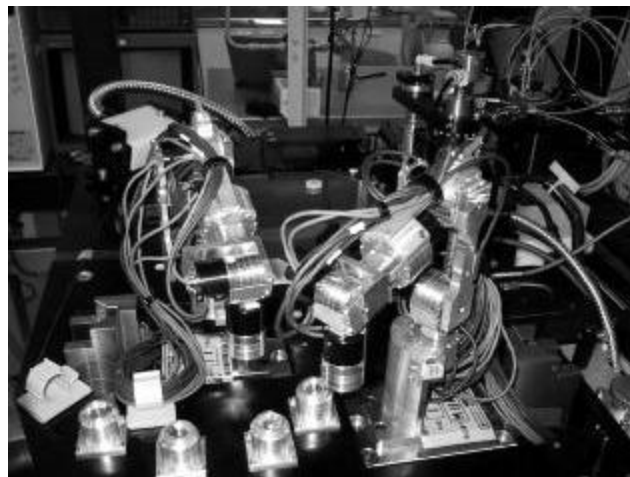
2.25 - Micro-usine expérimentale MITI [Ata02]

Cette unité de production met en œuvre une machine dite « électrochimique » de réalisation des pièces - ici des roues dentées - qui utilise, d'après la description qu'il en a été faite, un principe d'électroérosion.



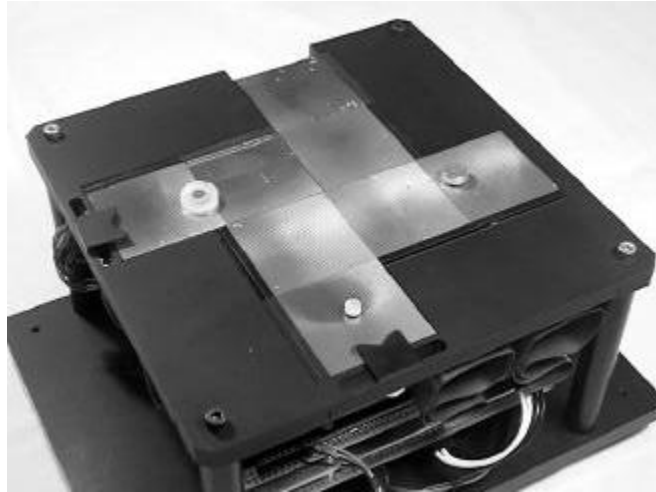
2.26 - Mini-machine électrochimique et empreinte du pignon obtenu - MITI -

Deux bras robotisés sériels miniatures ayant chacun sept degrés de liberté et une précision de positionnement de 40 μm sont assistés d'un micro-servo-actionneur précis au demi-micromètre.



2.27 - Deux bras de micropositionnement de l'unité de traitement - MITI -

L'unité de convoyage permet la mobilité en deux dimensions de masses maximales de un gramme disposées sur des palettes, à une vitesse de dix millimètres par seconde grâce à une matrice de 12800 actionneurs électromagnétiques - 40x40x8 -.



2.28 - Unité de convoyage inter-postes - MITI -

En 2000, le concept de micro-usine a fortement progressé grâce aux travaux collaboratifs d'un consortium d'industriels japonais initié et appelé DTF - pour DeskTop Factory [\[DTF\]](#) -. Des modules standardisés assurent chacun une tâche précise - fabrication, assemblage - et sont aptes à gérer individuellement leur mini-environnement propre. La production se fait en ligne pour une gamme plutôt orientée vers les micro-produits.

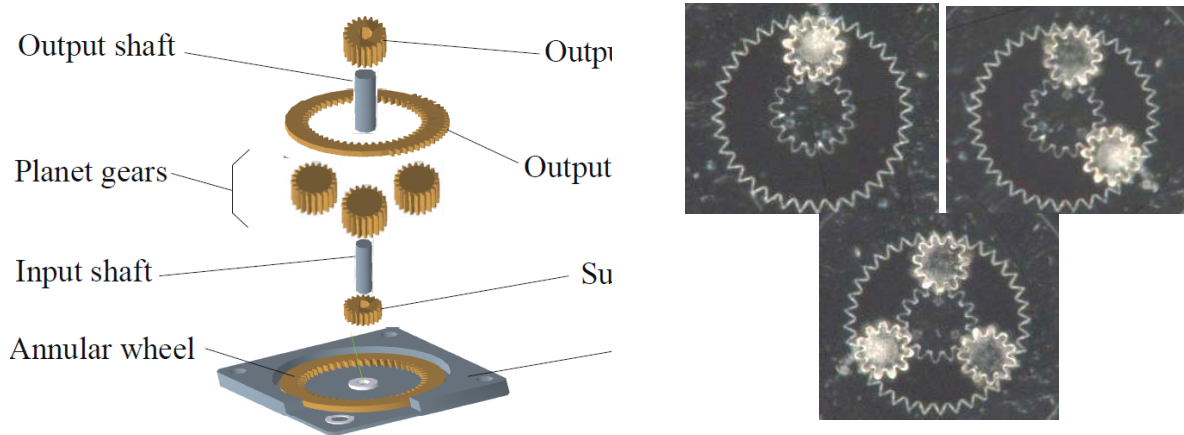


2.29 - Vue de la mini-usine du consortium japonais DeskTopFactory [\[DTF\]](#)

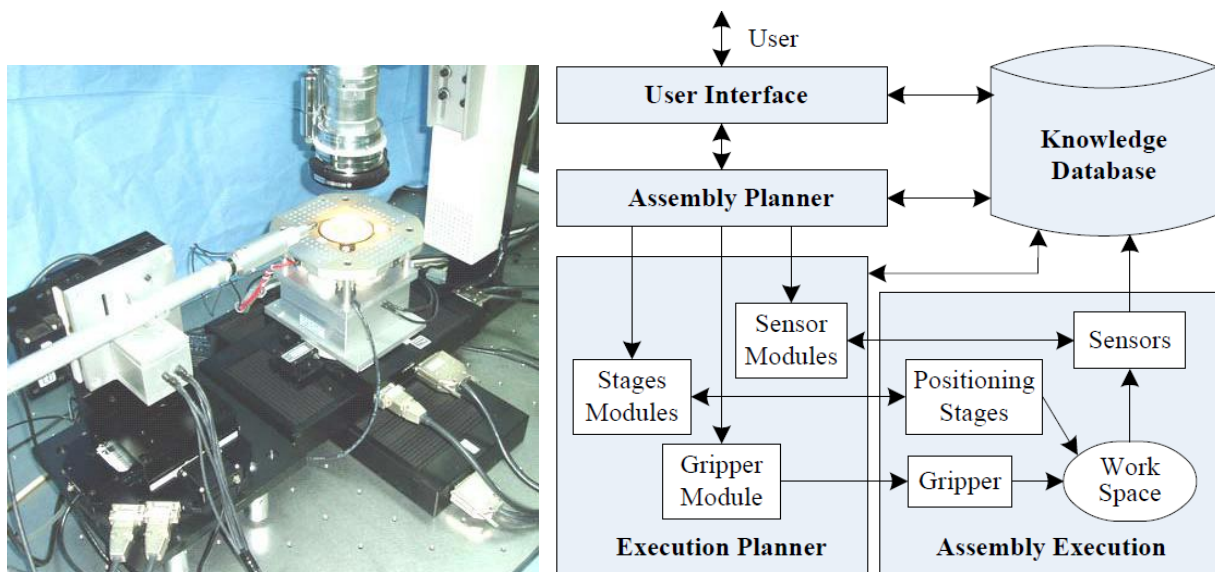
2.4 Contexte d'automatisation

Actuellement, pour le prototypage, la télé-opération est très utilisée dans le micromonde à partir de « Stations » équipées d'une interface homme-machine évoluée et permettant à l'opérateur l'accès à un maximum d'information ; l'ergonomie est travaillée mais réservée à des spécialistes. De tels équipements nécessitent qu'un opérateur supervise les manipulations mais ne sont pas adaptés à la mise en production de grandes séries. Pour ces raisons, nous avons transposé au micromonde la notion de « cellule de production » usuellement mise en œuvre à l'échelle méso. Une **cellule** transforme, traite le microcomposant et lui ajoute de la valeur, mais surtout la notion de cellule au sein du micromonde permet à terme une **assistance semi-automatique**, voire **intégralement automatique**. Cette assistance à l'opérateur doit rendre possible la réutilisation d'anciennes méthodes, leurs évolutions, puis l'élaboration de nouvelles méthodes. Pour cela il faut que la notion de cellule consacre une part importante à l'intelligence et à la gestion de sa base de connaissances, véritable archivage actif des savoir-faire micro dans le but d'enrichir les compétences d'ordonnancement.

La Chine est également présente sur le secteur de l'assemblage automatisé de micro-composants. En 2005 [[Sun05](#), [Xie05](#)], l'Institut de Robotique de Harbin démontre la faisabilité de l'assemblage automatisé d'un micro-train d'engrenages épicycloïdal dont les diamètres des roues et pignons dentés sont compris entre 400 μm et 2000 μm . Pour ce faire, la cellule de production utilise un système de positionnement d'approche à six degrés de liberté en cascade avec un second système de précision à cinq degrés de liberté, enfin une micropince piézoélectrique permet la saisie des microcomposants. Par ailleurs, le retour d'information s'obtient grâce à deux microscopes, une caméra CCD et un capteur mesurant l'effort de manipulation.



2.30 – Engrenage microscopique à train épicycloïdal plan, Harbin - Chine [Xie05]



2.31 - Vue de la cellule de Harbin, Chine et son principe d'architecture de pilotage [Sun05]

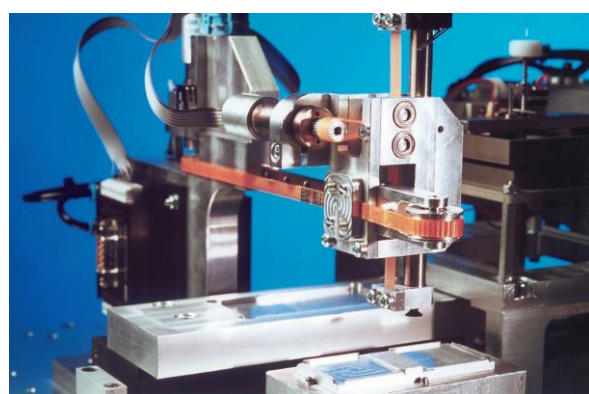
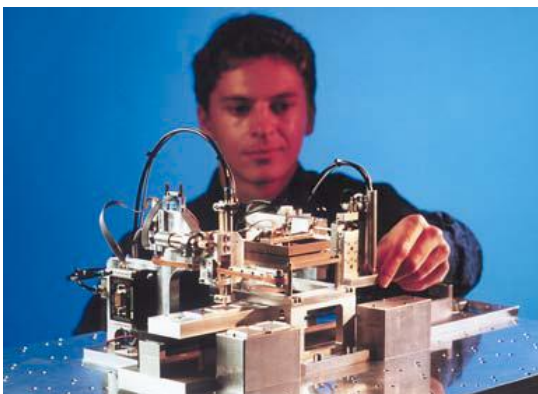
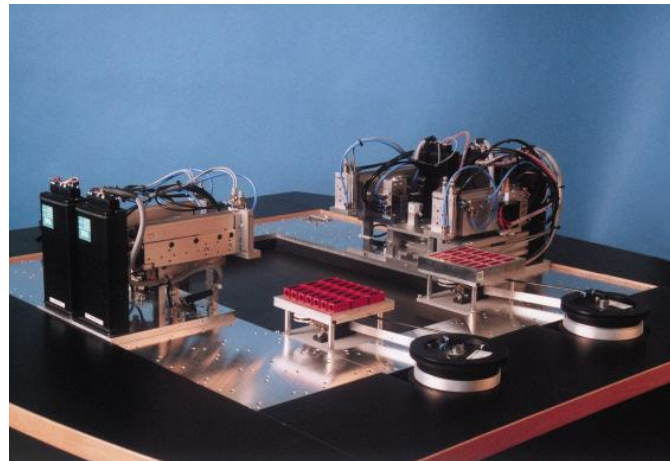
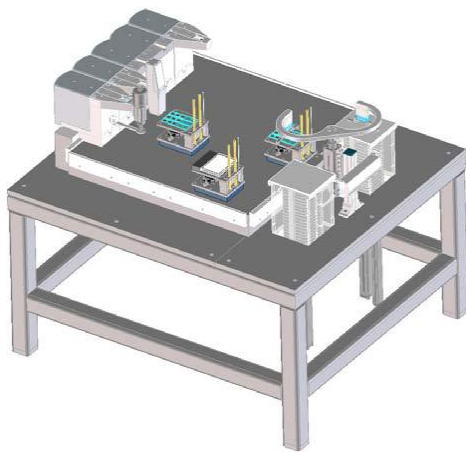
Une description sommaire de l'architecture du logiciel de pilotage fait apparaître trois modules principaux - IHM, planification des tâches d'assemblage, et planification de l'exécution de l'assemblage -. Il est intéressant d'observer la présence d'une base de données des connaissances en phase avec notre description conceptuelle initiale [Des04].

Après ce tour d'horizon asiatique, les avancées réalisées en Europe sont également remarquables :

En Allemagne, [GauT01, GauT03, GauT04] le Fraunhofer Institute IPA collabore avec LAT, Suhl AG, Festo, Z-Laser, CONGEN Biotechnologie GmbH au sein du projet « MiniProd » (Fig. 2.32) et propose une ébauche de micro-usine flexible - par une modularité sur un support - et reconfigurable, appelée AMMS, pour Advanced

Modular Micro-Production System. Elle se compose d'une table plate-forme standardisée sur laquelle des stations d'assemblage peuvent être implantées. Chaque connexion permet l'alimentation en énergie - électrique, azote, air comprimé ou vide -. Un système de convoyage à deux degrés de liberté assure le transfert entre les stations. La précision de positionnement atteinte est de 20 µm.

Une interface informatisée permet de concevoir virtuellement cette chaîne d'assemblage et de la tester avant sa réalisation. La commande est composée d'un contrôleur par station relié en réseau avec ses congénères et supervisé par un ordinateur principal. En 2007, les travaux se poursuivent sur l'AMMS avec une proposition de modélisation objet des systèmes reconfigurables [Ben07].



2.32 - Vues du projet allemand « MiniProd - Advanced Modular Micro-Production System »

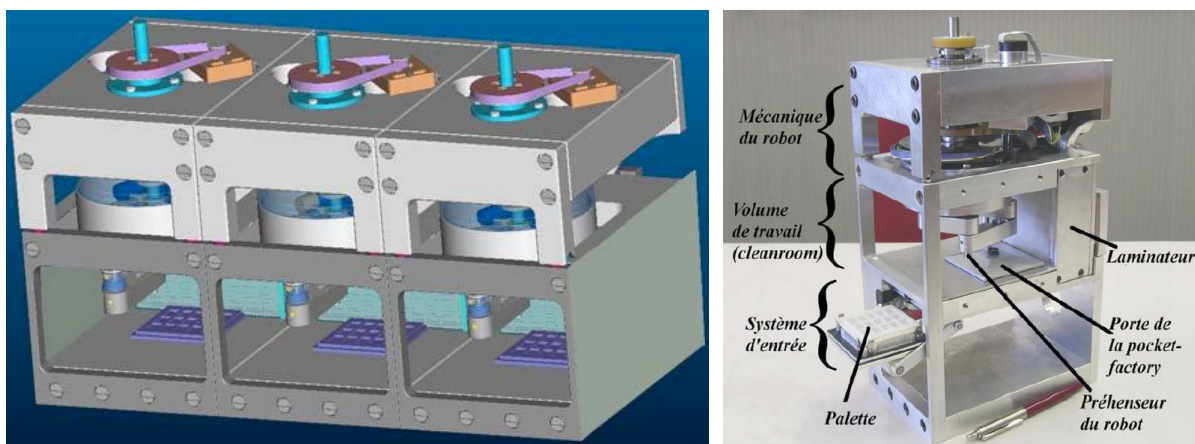
En Suisse, le CSEM - Centre Suisse d'Électronique et de Microtechnique - et le Laboratoire de Systèmes Robotiques de l'EPFL collaborent pour concevoir une micro-usine modulaire appelée « Pocket Factory » [Ver06].

La principale spécificité des modules concerne l'implantation locale d'un « mini-environnement » avec un système de filtration et homogénéisation de l'air qui le

diffuse alors sous un flux laminaire et en fait une « mini-salle-blanche » couvrant directement le volume de travail.

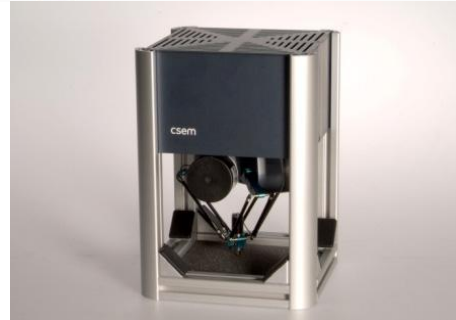
Un tel module est appelé « microbox ». En plus du traitement de l'air, chaque microbox dispose d'un sas d'entrée-sortie des palettes d'alimentation en microcomposants, d'un robot manipulateur, d'une machine spécialisée - pour sertir, coller, souder, laver, etc - et d'un système de vision.

Notons que le sas a été développé pour ne pas introduire de contaminants, et le robot manipulateur permet le transfert des microcomposants entre la palette et la machine spécialisée.

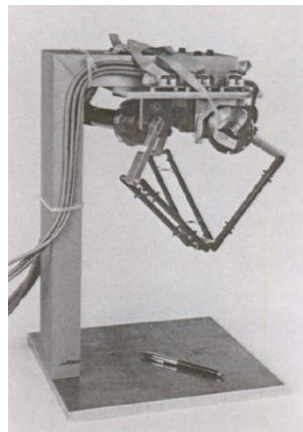


2.33 - Vues des projets suisses de "Microbox" et "Pocket Factory"

En Suisse toujours, le CSEM a développé un robot parallèle miniature appelé « Pocket Delta » dont les dimensions – $12 \times 12 \times 24 \text{ cm}^3$ - et la précision - $5 \mu\text{m}$ de répétabilité - permettent son usage dans un contexte de micro-usine flexible [Glo07] (Fig. 2.34). « A tout seigneur, tout honneur », nous ne pouvons omettre d'indiquer que ces travaux succèdent à ceux du Pr. Clavel [Cla91] (Fig. 2.35).



2.34 - Vue du microrobot suisse "Pocket Delta" et exemples d'implantation

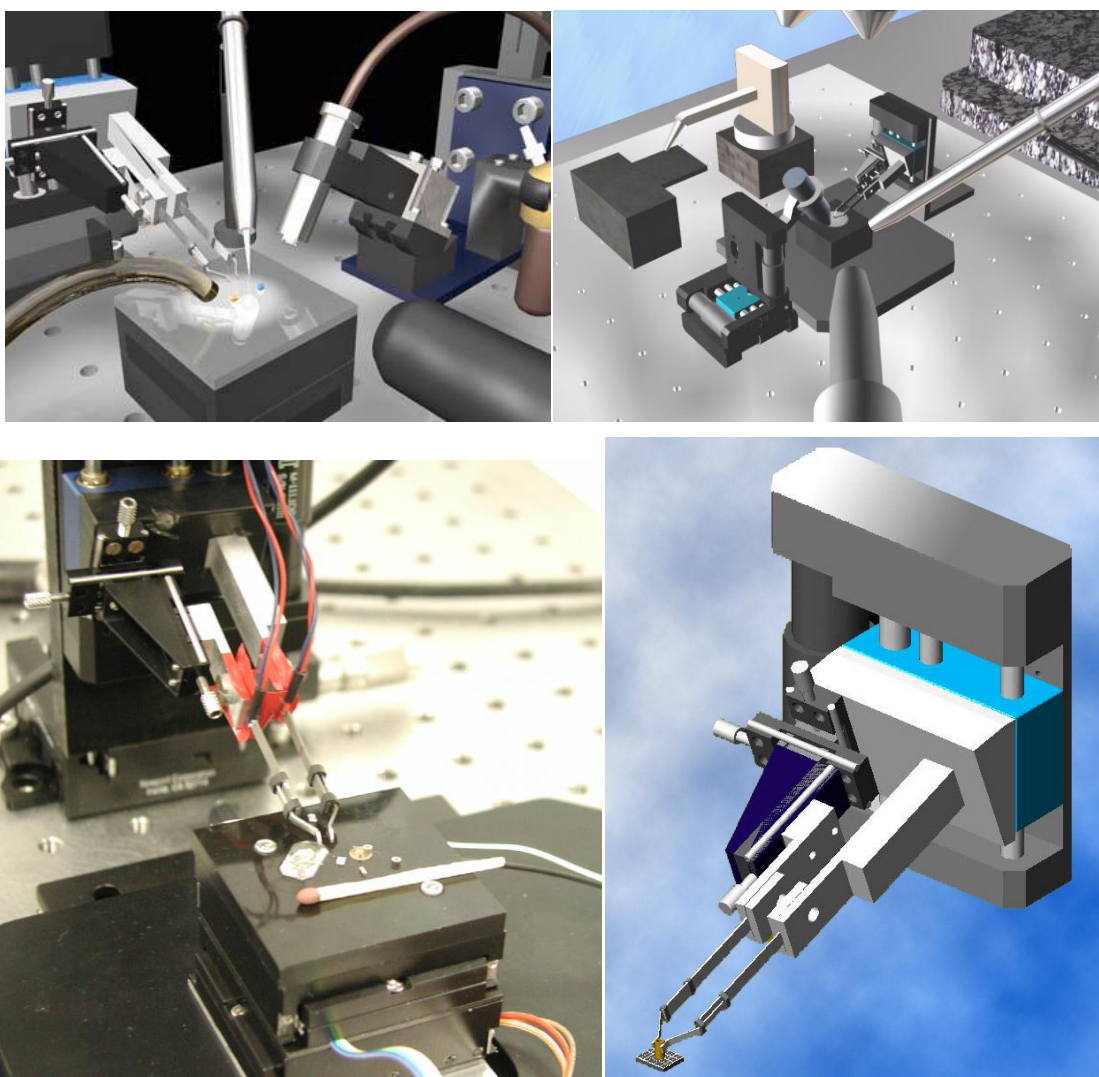


2.35 - Vue d'un robot parallèle delta du Pr. Clavel - EPFL -

En Finlande, les travaux de recherche sont également axés sur le contrôle de l'environnement des stations de micromanipulation [[Cor02](#), [Zho01](#)]. Ce sont les paramètres de température et d'humidité qui sont observés et maîtrisés (Fig. 2.36 et 2.37).



2.36 - Vue d'ensemble de la plateforme finlandaise de micro-assemblage et son environnement contrôlé en température et humidité



2.37 - Vues simulées et réelles de la plate-forme finlandaise de micro-assemblage [Zho01]

A l'université de Tampere, le projet appelé TOMI - Towards Mini and Micro Assembly Factories - est mené afin de parvenir à l'assemblage d'un réducteur à engrenages.



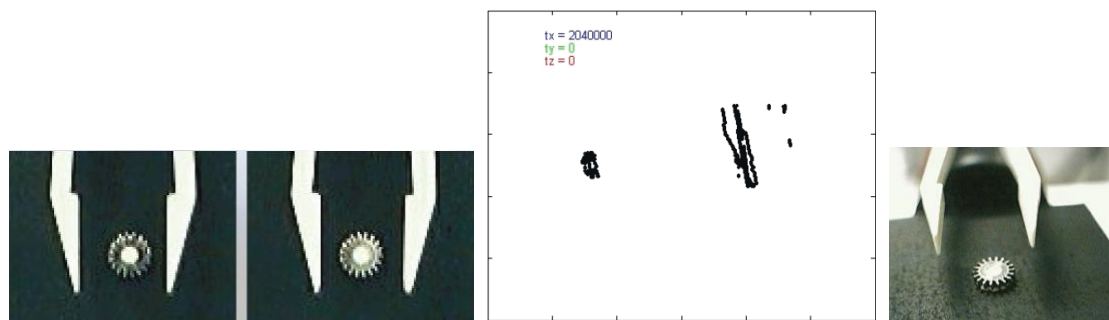
2.38 - Vue du projet finlandais « TOMI » - Towards Mini and Micro Assembly Factories -

Nous pouvons également témoigner de l'importante présence d'activité de production scientifique dans le domaine du micro en France.

A l'Institut Femto-st, le département AS2M implanté à Besançon, au sein duquel ont été menés les travaux ici présentés, a entrepris un travail de fond sur cette thématique. Le domaine de la vision a été exploré avec des travaux de « transfert trifocal » : reconstruction d'une vue virtuelle d'une scène de micro-manipulation (Fig. 2.39 et 2.40), permettant ainsi l'accès à un point de vue jusqu'alors impossible à obtenir dans la réalité compte-tenu de l'étroitesse de l'environnement de travail en regard des objectifs et zooms optiques à utiliser [\[BerJ07\]](#).

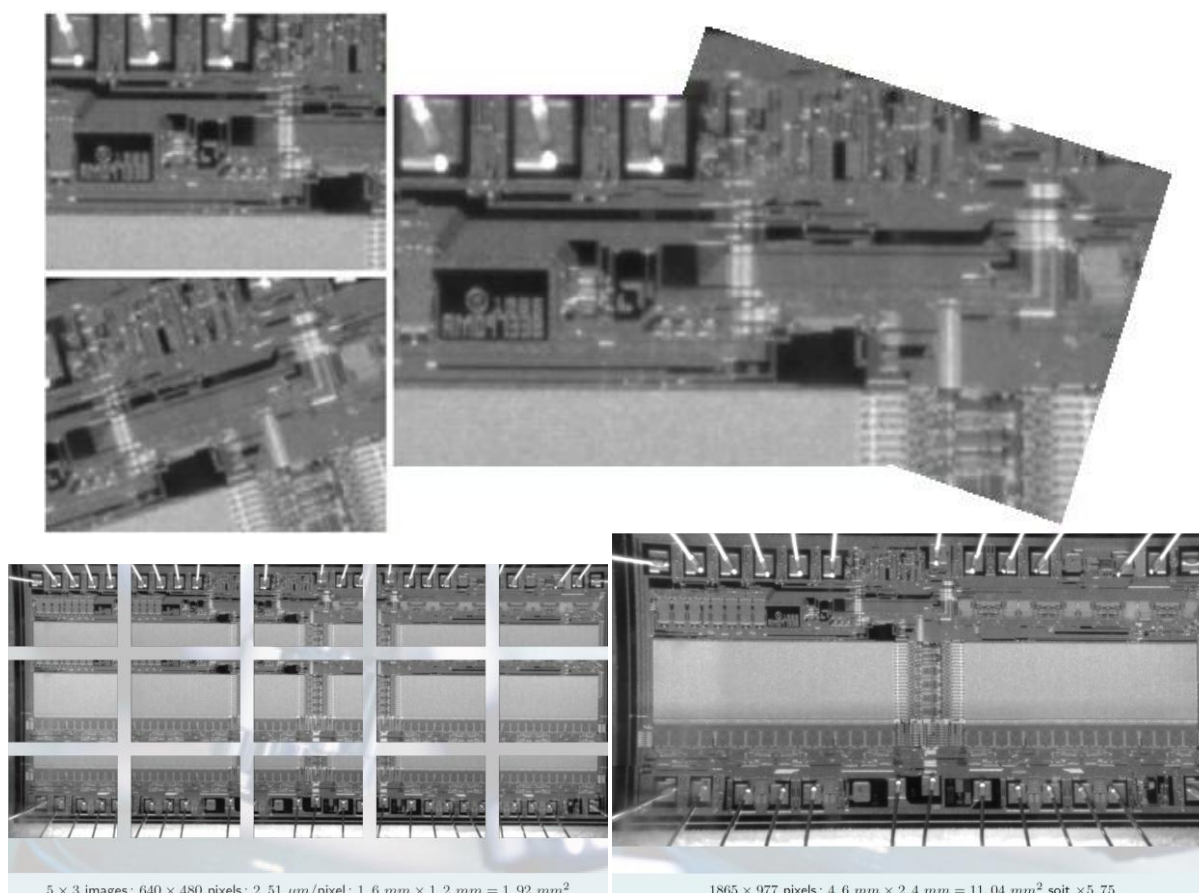


2.39 - Principe d'une construction de vue virtuelle par transfert trifocal

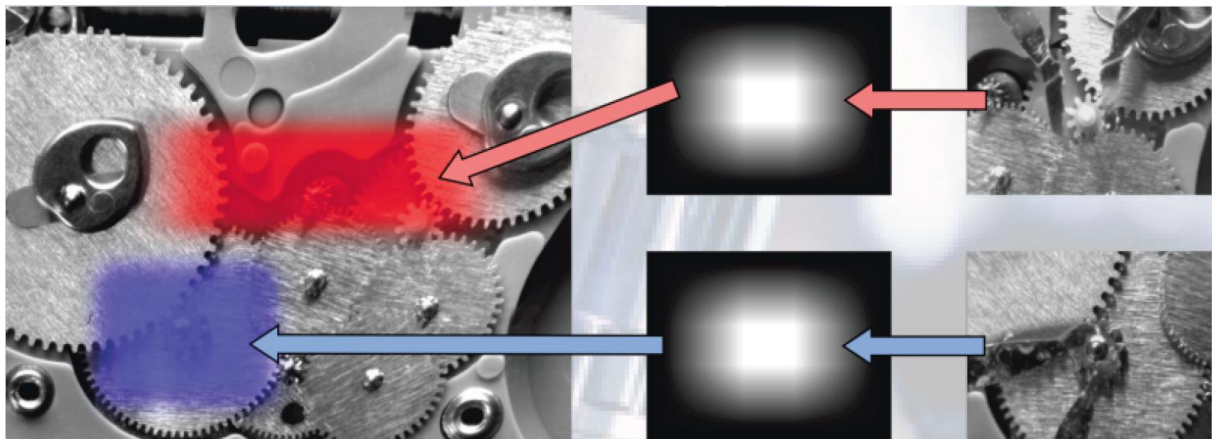


2.40 - Exemple d'application du transfert trifocal à la micro-manipulation

Afin d'élargir le champ visuel de l'opérateur tout en gardant une résolution suffisante de la zone de travail, des travaux ont également été menés sur la « construction de mosaïques » (Fig. 2.41 et 2.42). Nous pouvons déjà observer l'importance des données vidéo (et/ou photo) dont les flux seront à gérer et les traitements automatiques à assurer par le système d'information. La complexité n'est pas particulièrement dans le stockage car les actuelles bases de données savent prendre en charge de gros volumes, mais dans les débits élevés d'information qui impliquent des technologies particulières. Récemment, Intel a présenté le Light Peak [\[Int\]](#) : une technologie de transfert de données utilisant la fibre optique et offrant des débits théoriques de 10 à 100 Gbit/s.

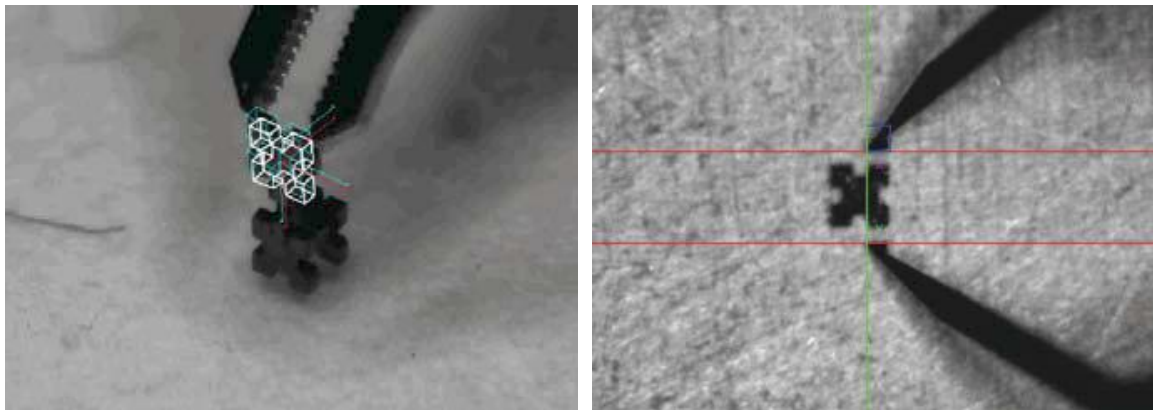


2.41 - Exemples de construction d'une grande image par mosaïques



2.42 - Exemple d'application d'une construction dynamique de mosaïque à la micromanipulation

D'importants progrès ont été réalisés pour la calibration (Fig. 2.43) en vue d'asservir visuellement la micromanipulation et le micro-assemblage spatial de microcomposants de dimensions $400 \times 400 \times 100 \mu\text{m}^3$ et permettre leur mise en œuvre automatique [Tam08a, Tam08b, Tam09a]. Ces avancées technologiques nous servent de base d'étude pour la dernière partie de notre travail.

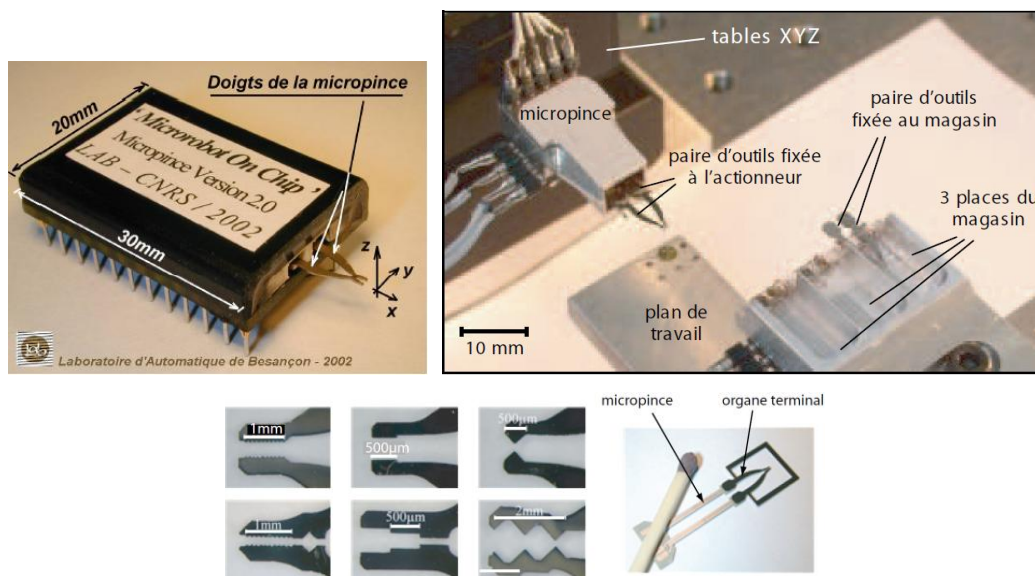


2.43 - Calibration visuelle et micromanipulation automatique asservie visuellement

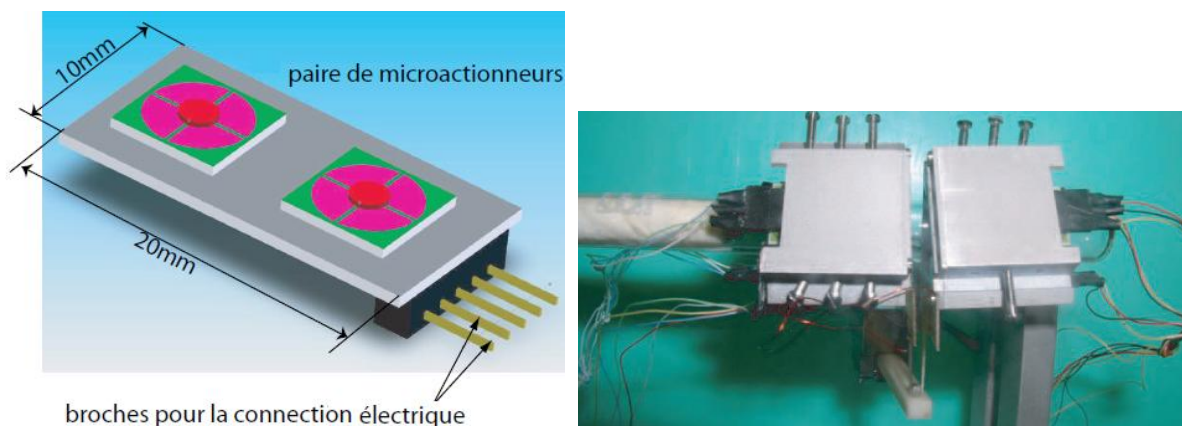
De multiples développements relatifs à l'actionnement ont également été menés ces dernières années au département AS2M à travers par exemple :

- une micropince - MMOC - à organes terminaux interchangeables [Clé05, Agn03] (Fig. 2.44),
- un « TRING module » : actionneur à deux mobilités, de type liaison pivot glissant contrôlée à partir de micro-actionnements piézoélectriques stick-slip [Bre98, Rak06] (Fig. 2.45),

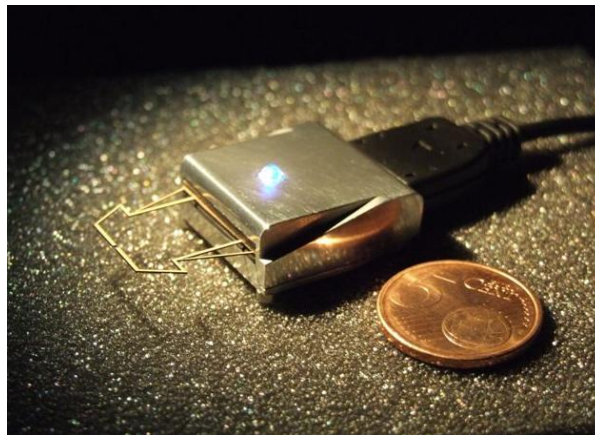
- la conception et commande de systèmes mécatroniques en treillis flexibles à actionnement piézoélectrique intégré [Gro09] (Fig. 2.46),
- l'étude de la commande des Alliages à Mémoire de Forme Magnétiques [GauJY07] (Fig. 2.47),
- un système piézoélectrique d'alimentation en composants de petites tailles pour micro-usine d'assemblage de haute précision [Par08] (Fig. 2.48),
- la faisabilité et la réalisation d'un micropréhenseur à glace immergé [LoW08] (Fig. 2.49),
- une plateforme de mesure de micro et nano forces par flottaison magnétique [Che09] (Fig. 2.50).



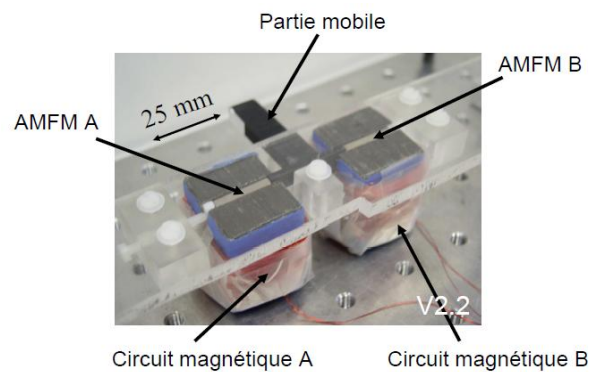
2.44 - Vues de la micropince "MMOC" [Clé05, Agn03] et ses organes terminaux "SiFit" [Agn09]



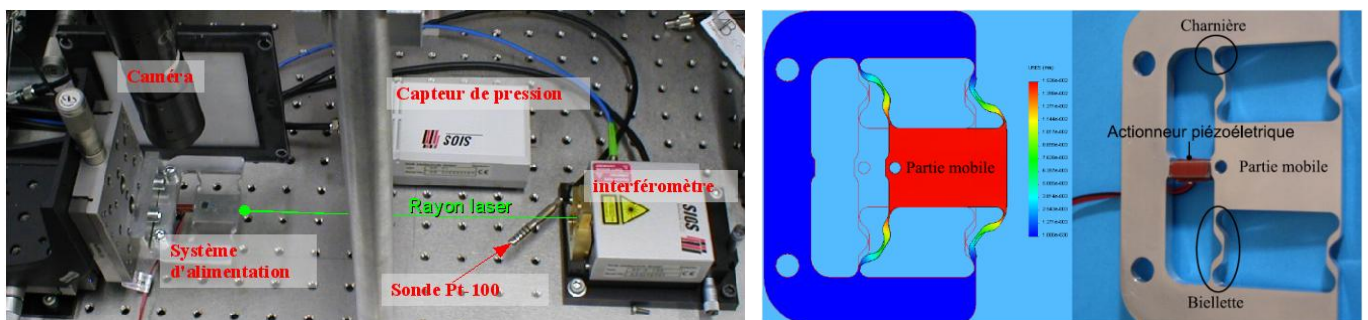
2.45 - Vue d'actionneurs piezo [Bre98] et leur mise en oeuvre dans le "tring module" [Rak06]



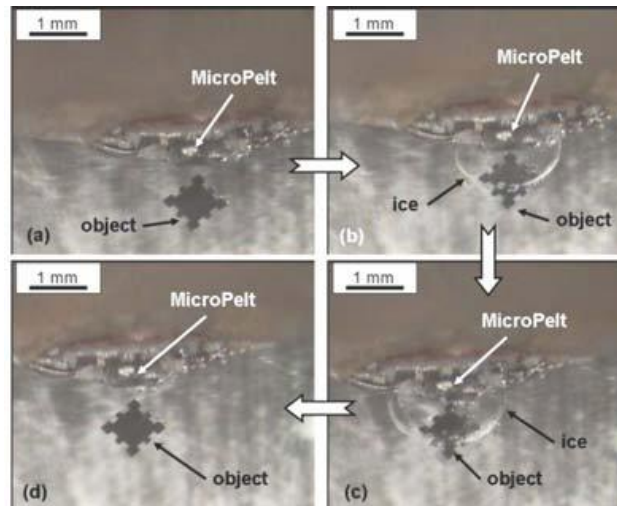
2.46 - Vue d'une micro-pince piezo à capteurs intégrés [Gro09]



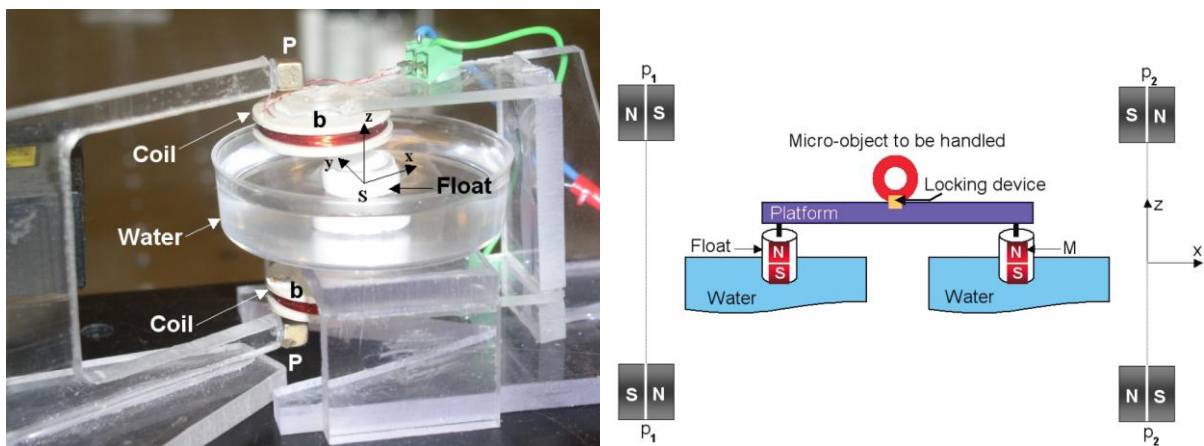
2.47 - Vue d'un microactionneur à AMFM - Alliage à Mémoire de Forme Magnétique - [GauJY07]



2.48 - Vue d'un mécanisme flexible et piézoélectrique de convoyage [Par08]

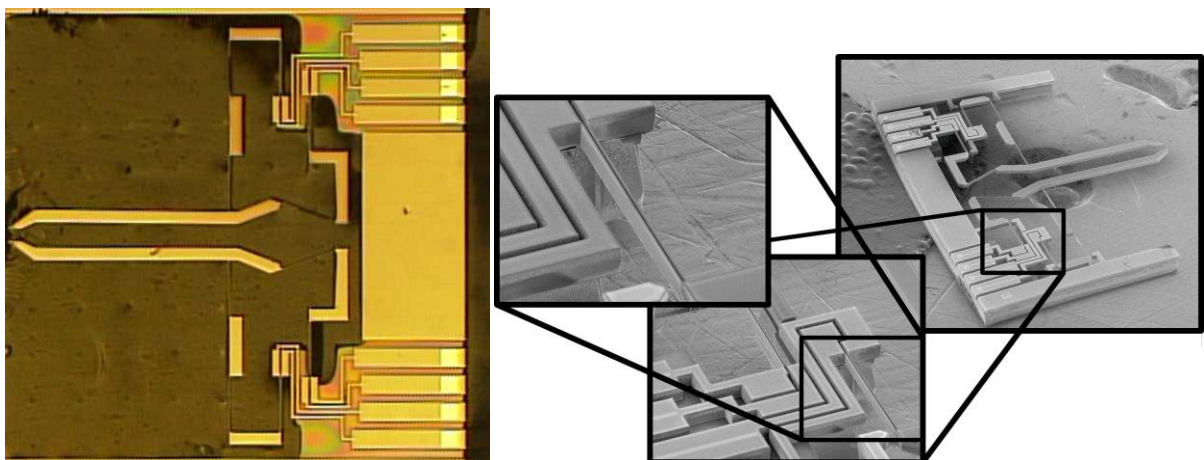


2.49 - Vue d'un micro-gripper à glace [LoW08]



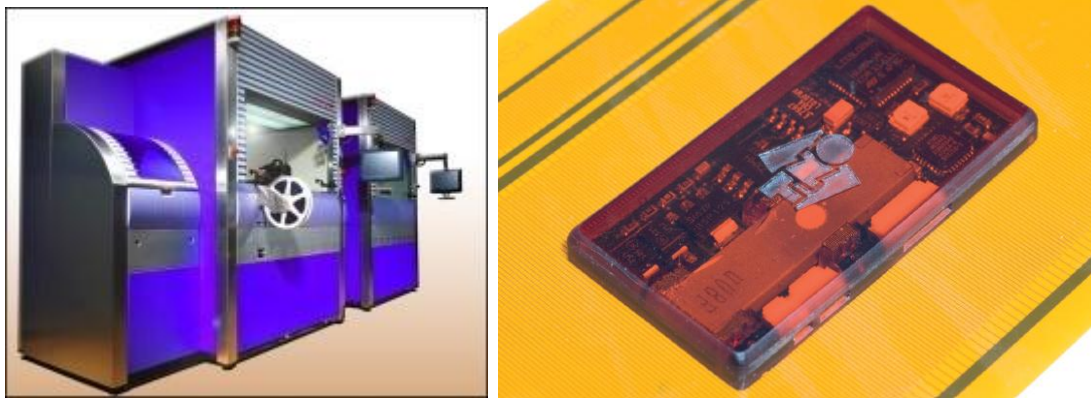
2.50 - Vue d'un capteur de force à flottaison magnétique [Che09].

Une collaboration Américano-Suisse a permis en 2005 la publication d'une micropince dont chaque doigt est sur un mécanisme flexible, à cinq barres, bi-actionné thermiquement par micro-bi-lames (Fig 2.51).



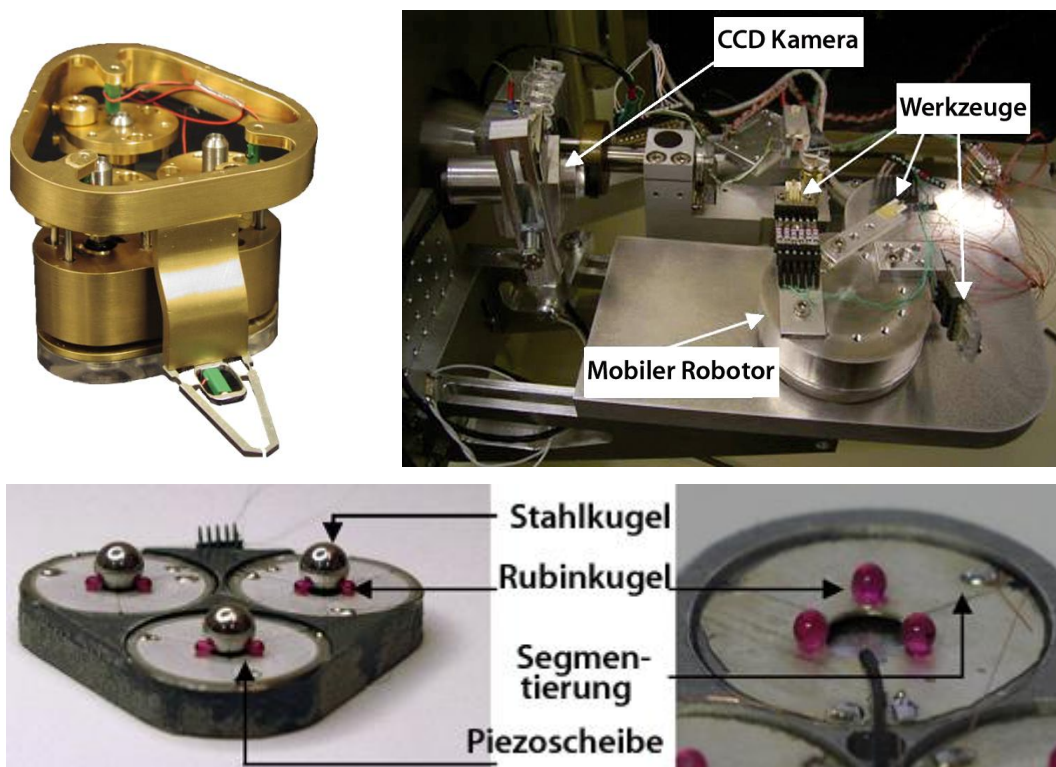
2.51 - Exemple de micropince à 4 ddl, par mécanisme 5 barres bi-actionné, publication USA-Suisse - B.Nelson - [Gre05]

Au Pays-Bas, la machine MA3MST de TNO (Fig. 2.52) avait pour finalité de localiser, pour chaque module de fabrication, un environnement de type salle blanche - classe 100 - puis de stocker le microproduit dans une capsule hermétique garantissant l'absence de contamination. Cependant, le volume et la masse de chaque « module » ne sont pas vraiment en phase avec notre approche et nos travaux.



2.52 - Vue du projet hollandais MA3MST de TNO à environnement localement contrôlé et sa capsule hermétique

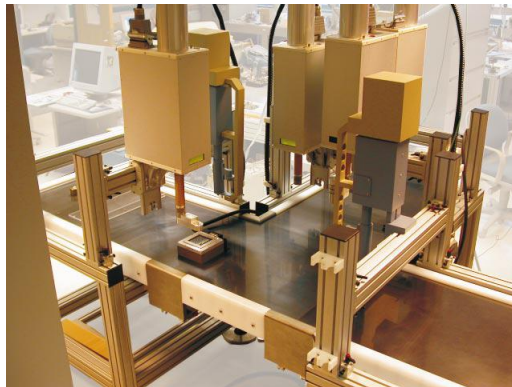
Un des précurseurs dans l'appropriation industrielle du micro-mode est Sergej Fatikow qui a prospecté à travers de nombreux travaux au cours de la décennie 1990 ; en 2000, il a publié un ouvrage de synthèse sur les micro-robots et le micro-assemblage de l'époque [Fat00] (Fig. 2.53).



2.53 – Aperçu des travaux actuels du Pr Fatikow

Enfin, outre-Atlantique, les USA sont également présents sur le créneau des micro-technologies.

Des travaux entrepris depuis 1996 ont permis à une équipe de l'Université de Carnegie Mellon la mise en œuvre d'une architecture de mini-usine appelée AAA pour « Agile Assembly Architecture » [Hol06] (Fig. 2.54). Ces recherches ont abouti à l'obtention d'un système de « Pick and Place » assisté par vision.



2.54 - Projet américain de mini-usine de "pick and place" assisté par vision, issu du projet "Agile Assembly Architecture"

L'Université d'Arlington au Texas ajoute, elle aussi, une pierre à l'édifice micro à travers le projet $\mu 3$ de construction d'une micro-usine d'assemblage de MOEMS et MEMS (Fig. 2.55 et 2.61).



2.55 - Projet américain de micro-usine "μ3 Microfactory Cleanroom " à ARRI Texas

2.5 Vers un microsysteme de production automatisée

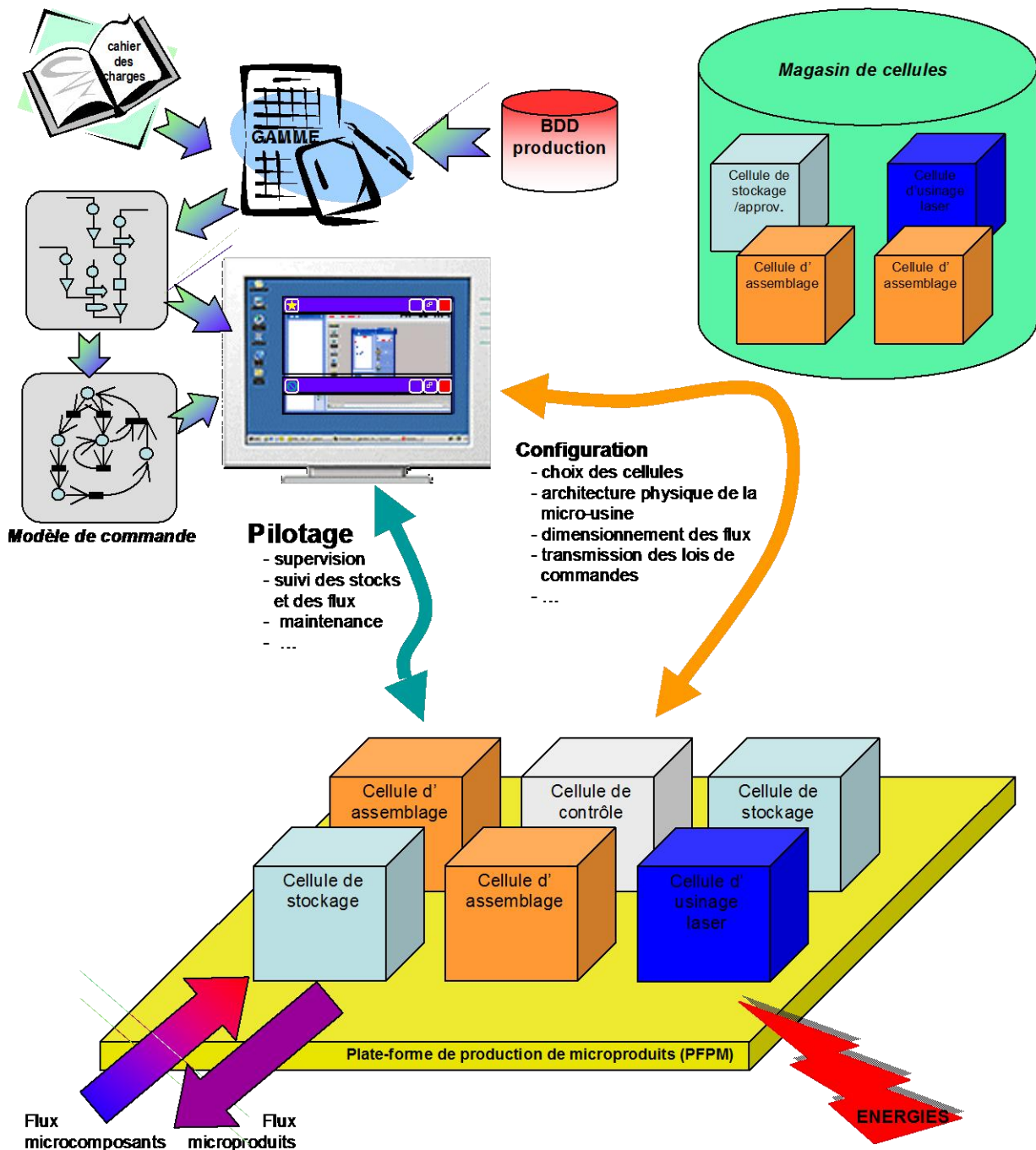
- Synthèse -

L'automatisation du système de production flexible dédié au micromonde a conduit au concept de « micro-usine » (Fig. 2.56, 2.57). L'état de l'art dans l'environnement scientifique de nos travaux est conséquent, il se justifie par la situation centrale de notre intervention. Le concept de micro-usine tel que nous le concevons se trouve à la convergence de toutes les technologies de terrain résultant des travaux de recherche des deux dernières décennies. Le recensement des multiples avancées technologiques et des récentes connaissances fondamentales nous amène à promouvoir une micro-usine possédant les propriétés suivantes :

- **Reconfigurabilité**, pour permettre l'évolution en cours de production d'une série de microproduit, [[Has03](#), [Kor99](#), [Meh00](#)]
- **Réorganisabilité**, pour permettre un changement de microproduit au sein d'une même micro-usine,
- **Evolutivité**, pour accueillir de nouvelles technologies - implique une certaine modularité ainsi qu'une pérennité du concept -,
- **Acquisition de connaissances**, pour enrichir les bases de données et assurer une efficacité croissante,
- **Génération de nouveaux savoir-faire**, pour répondre à de nouveaux besoins techniques en étant force de proposition,
- **Productivité**, pour une optimisation temporelle et financière,
- **Qualité**, pour assurer une traçabilité des micro-produits et des opérations subies,
- **Flexibilité**, pour produire en petites à moyennes quantités.

A chacune de ces propriétés et pour chaque constituant de la micro-usine, des critères d'évaluation du concept sont établis [§ 3.5].

La micro-usine doit gérer des flux matériels - de microcomposants, micro-sous-assemblages, et microproduits -, des flux d'informations et d'indispensables flux d'énergie... aussi infimes soient-ils, à terme.



2.56 - Présentation de la structure du concept de micro-usine

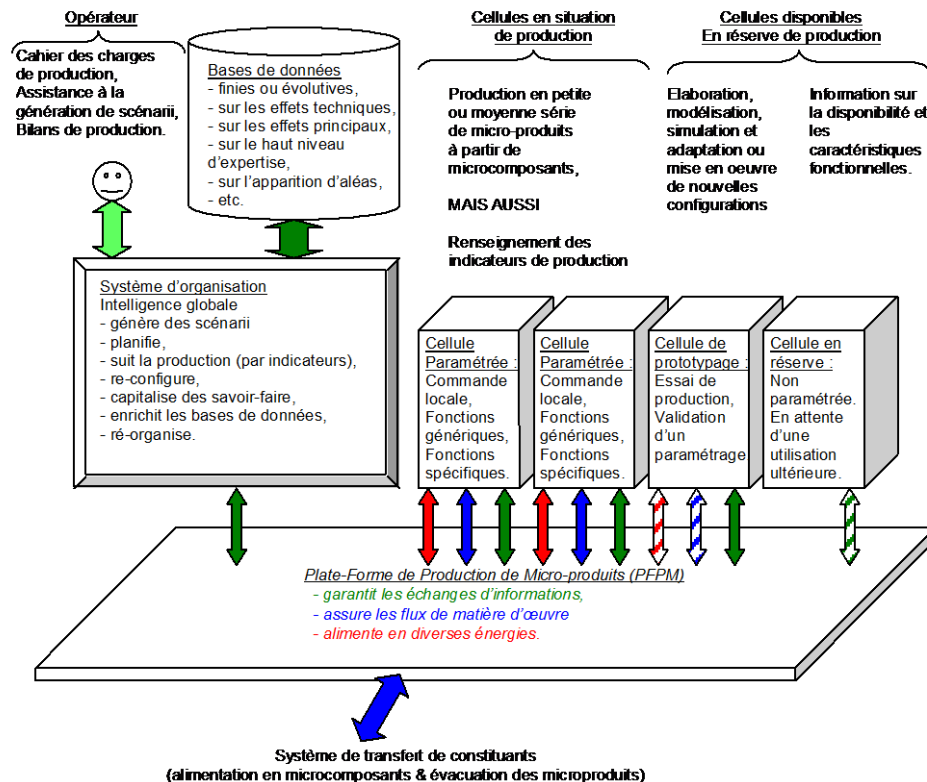
Les informations échangées concernent des mesures, des connaissances, des décisions et des ordres. Les connaissances en entrée de l'organe décisionnel proviennent de mesures et de multiples savoir-faire. Les mesures sont issues de capteurs et microcapteurs implantés au cœur des cellules de production. Les ordres sont à destination des micro-actionneurs lesquels sont constitués d'éléments actifs au sein des cellules.

Les décisions sont, quant à elles, prises par l'opérateur secondé par un organe décisionnel que l'on appelle le « système d'organisation ».

Les cellules, qu'elles soient en phase d'expérimentation ou de production, sont accueillies par une « plate-forme de production de micro-produit » - cette dernière est nommée PFPM pour simplifier la lecture -. La PFPM remplit de multiples fonctionnalités.

En premier lieu, elle permet le positionnement relatif des cellules, qui consiste à mettre et à maintenir en position grâce à une interface mécanique à standardiser. Bien qu'a priori fixes dans le temps, ces positionnements relatifs peuvent être amenés à évoluer de sorte à observer une certaine migration des cellules durant la phase d'ajustement du scénario de production – ordonnancement technique -, ceci pour respecter les propriétés de réorganisabilité voire de reconfigurabilité. En évolution à la traditionnelle représentation linéaire d'une ligne de production du mésomonde, la PFPM est à même d'accueillir une répartition surfacique ou même volumique des cellules. L'implantation surfacique peut s'appuyer sur une structure plane ou sur des structures à la géométrie plus complexe ; sphérique, conique, cylindrique, tétraédrique, cubique, etc. Il en va de même pour des implantations éventuellement volumiques au sein d'un parallélépipède, d'une sphère, d'un cylindre, d'une pyramide, d'un cône, etc. La technologie des circuits souples permet dorénavant d'envisager de telles implantations [\[Par\]](#).

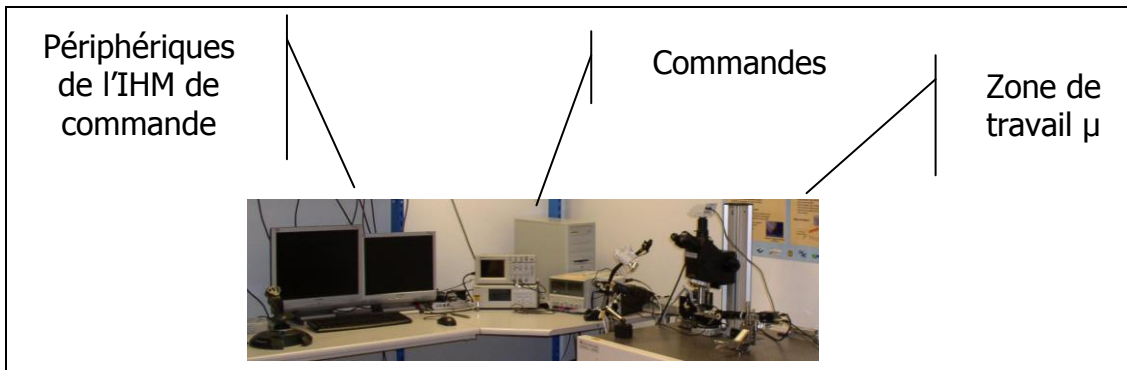
Ensuite, la PFPM permet la mise en place de trois types de liaisons entre les divers acteurs de la micro-usine. Premièrement, elle gère les flux de microcomposants : leurs transferts inter-cellules, l'approvisionnement en matière première et l'« expédition » des microproduits fabriqués. Deuxièmement, elle permet l'alimentation énergétique des cellules parce que toute intervention de manipulation ou d'assemblage, même micro, requiert un certain travail. Troisièmement, la PFPM supporte les échanges d'informations en provenance et à destination des cellules.



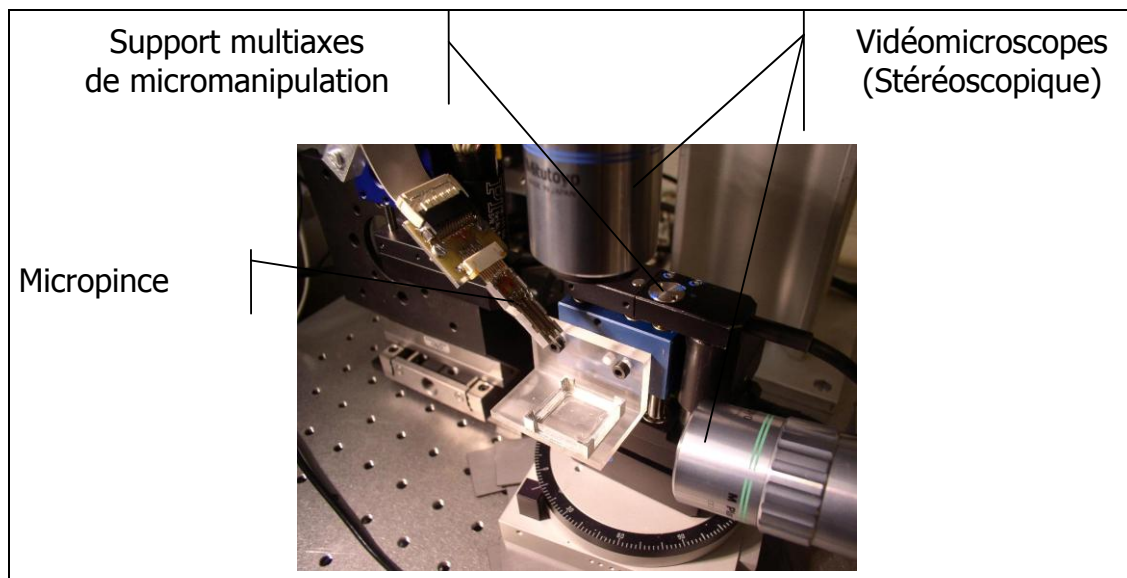
2.57 - Proposition de description des constituants d'une micro-usine

La flexibilité spécifique d'un tel concept lui assure une pérennité temporelle qui n'est possible qu'avec un certain niveau d'intelligence. Ce dernier est nécessaire à un pilotage évolutif et à une bonne conduite de l'ensemble des systèmes de production. Cet ensemble sera constitué de la future flotte de micro-usines puisque nous comptons sur une collaboration de toutes les micro-usines lorsqu'elles seront en service.

Mais dans un premier temps, ces micro systèmes de production se doivent d'être téléopérés et requièrent une IHM adaptée. Nous voyons sur les figures suivantes (Fig. 2.58, 2.59, 2.60, 2.61) à quoi ressemblent actuellement de telles interfaces et cet aspect sera détaillé dans la suite du document [§ 3.4.3].



2.58 - Vue d'ensemble de la station de téléopération du projet PRONOMIA



2.59 - Détail de la zone de travail de la station du projet PRONOMIA



2.60 - Vue d'artiste du concept de micro-usine télé-opérée [Oga98]



2.61 – Micro-usine “ $\mu 3$ ” de micro-assemblage, à ARRI’s Texas [[Pop09](#)] et son IHM haptique

En réponse à un tel cahier des charges pour ces systèmes de production de microproduits, la modularité matérielle quasi-évidente doit s’accompagner d’un système d’information apte à l’accepter. Nous allons maintenant préciser la problématique de ce système d’information inhérent à la micro-usine.

2.6 Problématique du système d'information : (le « besoin »)

Souvent remplacé à l'usage par l'acronyme SI, le Système d'Information regroupe l'organisation d'un ensemble de ressources destinées à l'acquisition, à la structuration, au stockage, à la communication, à l'échange et au contrôle de données au sein d'une entreprise. Cette finalité est généralement obtenue par l'intermédiaire de diverses ressources en matériels, en logiciels et en hommes. Si le SI permet globalement la communication des données dans l'organisation de l'entreprise, il existe dans l'industrie deux catégories de Systèmes d'Information : le SI support de la gestion, et le SI support des opérations de production. C'est, dans un premier temps, cette seconde catégorie qui nous intéresse pour la micro-usine. Ce système d'information dédié au support des opérations de la micro-usine est, par ailleurs, l'unique porte d'accès au micromonde pour l'opérateur, que ce soit pour y agir ou pour effectuer des mesures.

Les échanges d'informations au cœur des cellules se font au minimum entre et avec les capteurs et actionneurs, et en cas de décentralisation d'une commande au sein des cellules, avec cette commande localement déportée.

Classiquement, une machine spéciale ou une ligne de production comporte un système de commande principal, central, souvent regroupé dans l'appellation « partie commande ». Mais pour un système complexe, ayant recours à de nombreux organes nécessitant un pilotage fin, généralement numérique, tels les bras articulés de robots industriels, il est choisi de déporter localement une partie commande spécifique à cet ensemble multi-actionneurs, à travers sa propre armoire de contrôle. D'une manière générale, la commande peut potentiellement être distribuée localement, tout en disposant d'un système central de supervision. Dans une telle configuration, la commande est dite « mixte » puisqu'elle s'appuie à la fois sur une distribution hétérarchique locale et sur une structure hiérarchique centrale.

Ainsi, nous pouvons nous interroger sur l'architecture la mieux adaptée au contexte de micro-usine modulaire.

En effet, au-delà d'un objectif basique d'automatisation de la production, les spécificités de notre concept de micro systèmes de production sont fixées par les caractères évolutif et intelligent, mais aussi collaboratif, qui assurent une pérennité du concept. Il est nécessaire de disposer d'une capitalisation de connaissances qu'il

faut être en mesure de fournir lors des campagnes d'expérimentations prospectives et qu'il faut ensuite mettre à contribution pour décider des campagnes suivantes. Cette logique dans l'approche s'apparente à une sorte de rétro-ingénierie appliquée à la production de microproduits, mais aussi à la conception des microproduits elle-même [Rou04]. A ce titre, il est implicite de disposer d'un accès à la configuration d'une cellule et de pouvoir, si nécessaire, intervenir sur son organisation ou plus généralement sur l'organisation complète de la micro-usine. De tels atouts sont les clefs de la performance du point de vue de la production industrielle de microproduits.

2.7 Conclusion

Dans ce second chapitre, nous avons présenté les caractéristiques des microproduits, qu'ils soient MEMS ou MOEMS ou encore des cellules biologiques manipulées. Les efforts surfaciques prépondérants dans le micromonde ainsi que l'influence du facteur d'échelle sont deux paramètres déterminants de la micromanipulation, d'où une tendance à concevoir des microproduits DFμA - Design For Micro Assembly -.

A travers le monde entier, des équipes de scientifiques se penchent sur le problème de la production dédiée à la dimension micrométrique. Pour des raisons d'économies financières et énergétiques, il est indispensable de parvenir à un degré de production automatique, voire, dans un premier temps, de semi-automatisation accompagnée d'une assistance à l'opérateur de plus en plus efficace.

La communauté travaille autant à comprendre le micromonde du point de vue des microcomposants manipulés et assemblés, que du point de vue des stations téléopérées et cellules automatiques équipées d'actionneurs et capteurs indispensables à l'accessibilité de cette échelle.

Face aux productions attendues de microproduits diversifiés, parfois en petites ou moyennes séries, il s'agit de proposer un micro système de production modulaire apte à la reconfiguration et à la réorganisation de sa plate-forme et de ses cellules. Cette micro-usine requiert un système d'information adapté.