

Venus tout droit du pays des Lilliputiens, les M.O.E.M.S. vont envahir l'espace.

Véronique Rochus, Université de Liège,
Pierre Rochus, Centre Spatial de Liège

Résumé: Cet article qui a fait l'objet d'une communication lors de la journée « MEMS, quelles compétences pour quels secteurs en Wallonie ? », organisée par le Prof. Michel Wautelet, Materia Nova, Université de Mons-Hainaut, présente les potentialités de l'utilisation des Micro-Systèmes Opto-Electro-Mécaniques, (MOEMS en anglais) pour les applications spatiales et pour les instruments scientifiques spatiaux plus particulièrement.

Que sont ces MEMS et MOEMS Liliputiens ?

Les Microsystèmes Opto-Electro-Mécaniques (MOEMS en jargon anglais) sont des systèmes de la taille du micron, qui comprennent à la fois des micro-senseurs (incluant éventuellement des fonctions optiques) et des micro-actionneurs; ils ont donc à la fois la possibilité de percevoir l'état du système et de son environnement, et de réagir à des modifications de cet environnement, à l'aide d'un micro-circuit de contrôle. Ces systèmes peuvent comprendre en plus de la micro-électronique conventionnelle, des structures intégrant des mécanismes, des antennes pour l'échange d'informations et parfois de la puissance, des systèmes de commande, des micro-systèmes de puissance, des micro-relais et des micro-systèmes de traitement du signal. Les MEMS comprennent donc des mécanismes mis en mouvement de façon contrôlable. La figure 1. résume les principes de base des MEMS tandis que la figure 2 donne la définition complémentaire pour les MOEMS.

Journée d'information sur les MEMS, Casteau (Mons), 26 janvier 2001

Centre Spatial de Liège
Université de Liège

Quelques rappels sur les MEMS

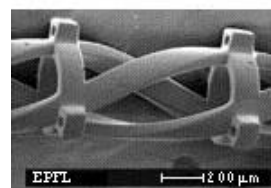
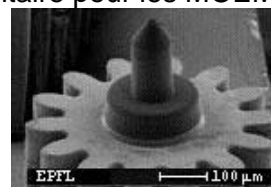
Méthodes de fabrication de la microélectronique:

- Micro-usinage en volume
- Micro-usinage en surface

- Structure Masse Ressort
- Structure bimorphe
- Mécanisme de déplacement pas à pas en translation ou en rotation

• Mécanisme actionné par une force d'origine contrôlée électriquement

- * thermique
- * électrostatique
- * magnétique
- * piézo-électrique, magnéto-striction, photo-striction, ...



Rappels sur les MEMS

Journée d'information sur les MEMS, Casteau (Mons), 26 janvier 2001

Centre Spatial de Liège
Université de Liège

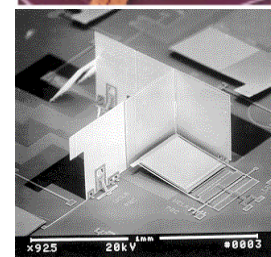
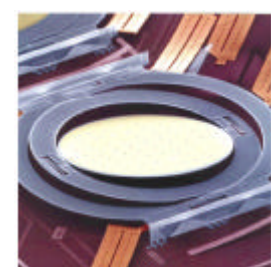
Rappels sur les MOEMS

- Utilisation de MEMS
- + éventuellement éléments optiques: surfaces optiques, lentilles, filtres, fibres, coatings, optique diffractive ou intégrée, sources optiques, détecteurs optiques, ...

pour modifier d'un faisceau optique

- profil ou direction
- intensité
- phase ou front d'onde

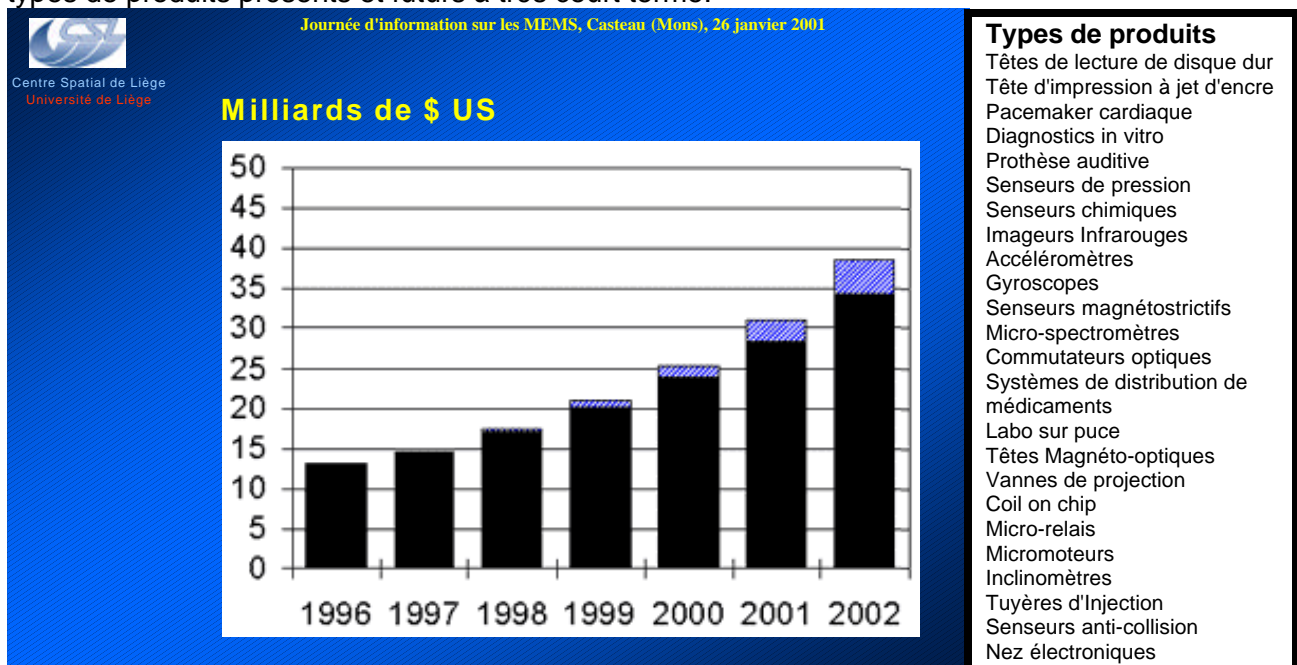
- en déplaçant un objet (miroir)
- en induisant une contrainte mécanique ayant un effet optique (biréfringence)
- en variant la température conduisant à un effet optique (n)



Définition des MOEMS

Applications terrestres

Au départ, des curiosités de laboratoire ou des "solutions à la recherche de problèmes, mieux résolus par les méthodes classiques", les MEMS sont devenus des composants commerciaux, "solution idéale, plus élégante ou unique au problème posé"; cette évolution a été accentuée par des investissements importants, Européens (100 millions d'ECU par an) et gouvernementaux (les plus importants ont lieu en Allemagne, en Suisse, en France et en Flandre) et par de pressions fortes du marché. Ces incitants financiers Européens et gouvernementaux se sont focalisés en Europe, sur des applications terrestres. Ainsi sans le savoir, nous sommes déjà envahis par ces micro-puces mécaniques qui sont déjà présentes dans les secteurs industriels comme l'automobile, les communications, le médical, l'informatique; il y en a des centaines dans nos voitures, dans nos imprimantes à jet d'encre, dans nos ordinateurs, Ces MEMS sont distribués en différents points pour faire de la surveillance de l'intégrité (health monitoring) de structures civiles ou aéronautiques: mesure de pression, de paramètres structuraux (contraintes de traction de cisaillement, déformations, température, formation de glace, dommages de fatigue, corrosion, détection par ondes de Lamb (dommage d'impact, délaminage, décollement, corrosion). Ils pourraient être utilisés pour la surveillance en permanence de notre environnement. L'état des lieux pour les applications terrestres se résume le mieux à l'aide du tableau présentant les chiffres d'affaire prévisibles et les types de produits présents et futurs à très court terme.



Les atouts des MOEMS pour le secteur spatial

Les MOEMS offrent la possibilité de réaliser en grandes quantités, des systèmes petits, légers, fiables, intelligents, consommant peu d'énergie, à prix réduit par la quantité, en réduisant le nombre de composants, en éliminant des étapes d'assemblages manuels et de contrôles. Leur faible coût permet leur utilisation en redondance; ils sont robustes à cause de leur petite taille; leurs fréquences propres, inversement proportionnelles à la taille, donc plus élevées, les rendent plus insensibles aux perturbations vibratoires; ils permettent des assemblages compacts, précis et stables; ils sont moins sensibles aux variations de températures et ont des temps de réponse plus courts (Exemple : un micro Fabry-Perot travaillant à 1 MHz) grâce à l'inertie réduite. Il se fait que c'est la solution miracle tant recherchée par les concepteurs de systèmes spatiaux, c'est la solution à laquelle ils ont toujours rêvé, sans oser l'imaginer. Pour mieux comprendre les problèmes auxquels sont confrontés ces ingénieurs du spatial, imaginez que votre ordinateur ou votre frigo soit habituellement soumis aux conditions suivantes :


- Les frais de livraison à domicile s'élèvent à des prix de 250.000 à 1.000.000 de FB, le kilogramme.
- Le camion de transport n'a pas d'amortisseurs et passe par des routes très accidentées, donnant lieu à de nombreuses vibrations et à de nombreux chocs

- Le produit est balancé d'un coup de pied du camion et reçoit de votre part, ses premières instructions par télémétrie tandis que le camion, hors d'état de fonctionnement, est mis à la ferraille.
- Le produit fonctionne sur des piles solaires le jour et sur des batteries rechargeables la nuit.
- Le produit doit résister à des niveaux de rayonnement qui sont de 4 à 7 ordres de grandeur plus importants que ce que vous avez l'habitude d'affronter.
- Le produit doit fonctionner sous vide, à des températures parfois extrêmes, pendant 3 à 15 ans sans entretien ni maintenance.

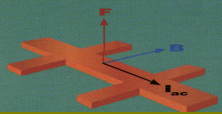
Dans ces conditions, il n'est pas étonnant d'apprendre que ces satellites commerciaux spatiaux coûtent de l'ordre de 2 MFB, le kilogramme sans compter des coûts similaires pour le « camion livreur » (le lanceur). Il me semble clair que le secteur spatial commercial et scientifique utilisera un jour, ces MOEMS non seulement dans ses lanceurs et ses satellites pour du contrôle ou même la simple connaissance de l'environnement mais aussi dans tout le segment sol comprenant contrôle et poursuite de satellites et dissémination des données, et favorisera même un jour des développements spécifiques au spatial. Si un industriel spatial peut, en employant des MEMS, réduire de quelques kilogrammes la masse d'un vaisseau spatial, peut-être pourra-t-il justifier une fabrication de fonderie spéciale à faible volume de composants spécialisés à l'activité spatiale. La technologie MEMS pourrait également permettre le développement des utilisations commerciales de l'espace, par la prolifération de transmetteurs miniaturisés au sol, munis de senseurs. Les MEMS couplés à la génération actuelle d'électronique digitale et de circuits de télécommunication pourraient être utilisés pour des applications de télémessure distribuée: par exemple des transmetteurs de la taille d'un poing ou même moins, pourraient envoyer des informations sur l'environnement, comme la température, la pression atmosphérique locale, l'humidité, ... directement vers les satellites.

Journée d'information sur les MEMS, Casteau (Mons), 26 janvier 2001

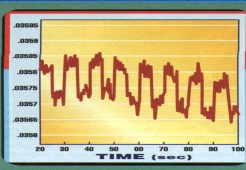
MOEMS utilisé comme magnétomètre



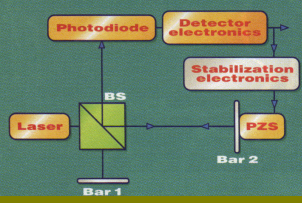
Centre Spatial de Liège
Université de Liège



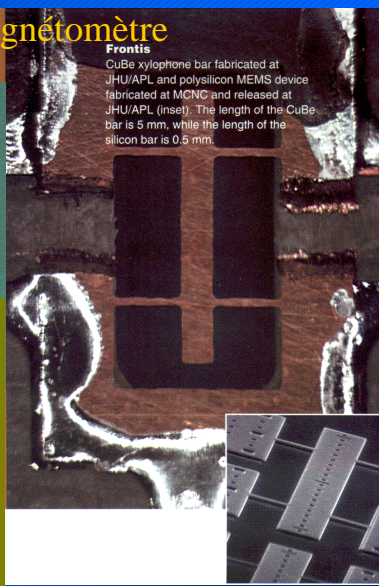
L'élément actif du magnétomètre est une barre conductrice avec des bras supports aux nœuds du mode de vibration fondamental. La force de Lorentz F est proportionnelle au produit du champ magnétique B et de l'amplitude du courant I dans la barre



Réponse temporelle du magnétomètre à un signal modulé de 20 nT.



Un interféromètre de Michelson pour le magnétomètre à barre de xylophone utilise une lame dichroïque (BS), qui dirige la lumière vers deux barres xylophone. La barre 2 est montée sur un étage piezoélectrique (PZS) qui est utilisé pour la stabilisation active du chemin optique dans l'interféromètre

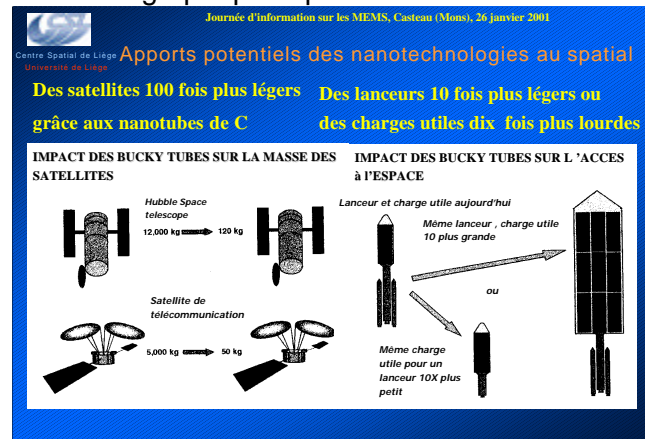
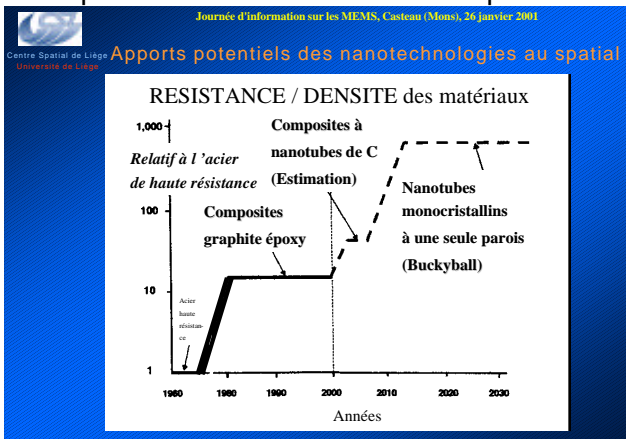


Frontis
CuBe xylophone bar fabricated at JHU/APL and polysilicon MEMS device fabricated at MCNC and released at JHU/APL (inset). The length of the CuBe bar is 5 mm, while the length of the silicon bar is 0.5 mm.

Besoins de l'activité spatiale ?

L'objectif à moyen et long terme de toutes les agences spatiales est de réduire les coûts et délais, sans réduire les performances et ainsi permettre d'accroître les applications commerciales. Pour la première fois en 1999, le volume des activités spatiales commerciales aux Etats-Unis, a dépassé celui des activités spatiales (bien entendu pas militaires) supportées par le gouvernement américain. Pour reprendre un exemple plus proche de nous, le niveau des impôts et redevances payés par la Société Européenne des Satellites au gouvernement luxembourgeois est comparable au budget de la contribution belge à l'Agence Spatiale Européenne. Mais d'autres applications commerciales potentielles (comme par exemple l'exploitation de la micro-gravité, le tourisme, ... et d'autres qu'on n'imagine pas maintenant), nécessiteront pour naître et se développer, une ou des percées technologiques comme par exemple, des matériaux structuraux nouveaux (des matériaux composites à nanotubes de carbone, buckytubes de grande longueur). Ces nouveaux matériaux

nano-composites présentent une gamme variée de propriétés physiques intéressantes et contrôlées. Ils peuvent être ferroélectriques, supraconducteurs, diélectriques, magnétiques, optiquement actifs, etc., ou simplement posséder une très haute résistance à la rupture ou un indice de réfraction élevé. Ces matériaux à nano-structure faciliteront la réalisation de filtres, capteurs, catalyseurs spécifiques et une large variété de d'applications en électronique. La Nanotechnologie est de grande importance pour les applications spatiales, spécialement parce qu'elle procure des accroissements significatifs dans les performances techniques comme résistance mécanique et densité, qui à long terme, permettront de réduire la masse des satellites et lanceurs, et d'augmenter les capacités des lanceurs comme représentés sur les deux graphiques qui suivent.



La Nanotechnologie jouera un rôle fondamental dans la science des matériaux, le siècle prochain.

Mission de l'industrie spatiale

La mission de l'industrie spatiale est de fabriquer des automates, qui recueillent des informations et les transmettent vers des stations placées au sol. Par conséquent, l'opto-électronique et l'informatique sont des éléments essentiels du spatial. Or, l'électronique, et surtout celle qui touche les circuits logiques, subit depuis 1985, une amélioration exponentielle : les performances des composants et des systèmes sont multipliées par dix en quatre ans. Aucune activité industrielle n'a connu un tel développement, sauf peut-être le secteur des chemins de fer à ses débuts. Ce progrès est financé par le développement des ordinateurs et le "marché grand public", et non plus, comme auparavant, par le "militaire" et le "spatial". On peut imaginer le même développement pour les MOEMS. On doit par conséquent raisonnablement s'attendre à ce que les microsystèmes, qui sont l'extension naturelle des composants électroniques, après avoir envahi nos systèmes au sol, envahissent un jour nos satellites. L'existence de ces composants super-intégrés entraîneront des conséquences diverses et conduiront à des nouveaux concepts au niveau satellite, charge utile et plateforme:


- On peut déjà prédire l'intégration en quantité de ces microsystèmes (capteurs interrogeables à distance, sans fil) pour multiplier à l'infini les points de mesure au sol, lors des essais de qualification, sans interférer ni modifier la réponse de la structure.
- L'intégration de composants plus légers, plus petits, plus intelligents, consommant moins, (ASIM Application Specific Integrated Micro-instruments) ne peut que s'accroître quand on constate que le nombre de composants photoniques qualifiés « spatial » (photodiodes, APDs, LEDs, IREDs, LDs, VSCELs, opto-coupleurs, CCD's) est en déjà croissance continue. Cette tendance se confirmera pour des micro-senseurs (accéléromètres, gyroscopes, sondes de température et de pression, magnétomètres, des détecteurs infra-rouges non refroidis), des micro-batteries (On peut montrer que la miniaturisation des batteries ne peut se poursuivre dans la voie chimique mais par des micro-machines thermodynamiques), des antennes, des détecteurs à effet tunnel. Des microsystèmes qualifiés « spatial » (capteurs et actionneurs) seraient également introduits en nombre, pour le contrôle de l'environnement spatial, pour la surveillance de l'état de santé de la structure et pour que le système "réagisse" en temps utile. En attendant une utilisation plus intensive de l'espace, on ne pourra cependant pas justifier économiquement des développements spécifiques pour le spatial; l'alternative qui restera longtemps l'option préférée dans beaucoup de cas, sera d'exploiter les technologies disponibles sur le marché, après une sélection et des tests de qualification. A court terme, l'activité spatiale principale consistera donc à réaliser le conditionnement spécifique et la qualification spatiale.

- Les Micro/Nano-technologies qui pourraient rapidement être présentes dans tous les sous-systèmes des plate-formes (« Service Modules ») de satellites, sont les systèmes de contrôle d'attitude et d'orbite (micro-senseurs, micro-roues à inertie), les systèmes de propulsion (micro-propulseurs) et de l'électronique basée sur des ASIC's dédiés
- On peut imaginer aussi des charges utiles de plus en plus compactes, rendues possibles par les développements technologiques notamment en micro-électronique et en micro-systèmes ; par contre certains composants ou sous-systèmes comme l'optique, les antennes ou les radiateurs de refroidissement ne peuvent pas être réduits indéfiniment, même si des développements technologiques sont apportés, car ces éléments sont limités par la physique au premier ordre, non sujette à des améliorations technologiques, comme la limite de diffraction, le bruit photonique, la limite de Nyquist, la limite de transfert radiatif (loi de Planck). Ces contraintes sont incontournables par des développements technologiques.
- Cependant, même pour des composants dimensionnés par la physique, des améliorations en matériaux et en techniques d'assemblage peuvent cependant changer les concepts et permettre par exemple de réaliser de grandes ouvertures optiques pour des petits satellites, en utilisant des technologies déployables ou gonflables.
- De nouveaux concepts d'instruments scientifiques qu'on ne pouvait concevoir avant l'existence des MOEMS, devront naître; ainsi des études de faisabilité sont déjà en cours à l'Agence Spatiale Européenne pour les missions spatiales futures et pour le successeur à la NASA, du Hubble Space Telescope (HST), le New Generation Space Telescope (NGST) pour lequel l'utilisation de MOEMS sous forme de micro-miroirs ou de micro-fentes permettrait de combiner deux instruments scientifiques en un seul d'un nouveau type : deux types de spectrographes en un seul spectrographe à fentes variables d'Hadamard.

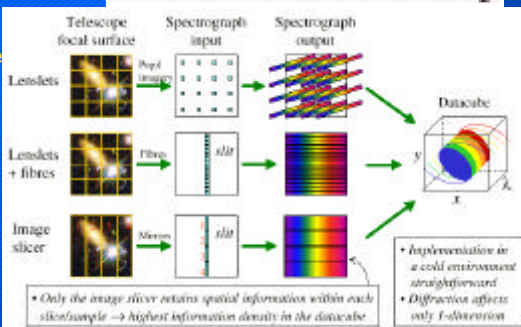
Journée d'information sur les MEMS, Casteau (Mons), 26 janvier 2001

Spectrographe (NIR) à champs intégrés du NGST
Solution « classique »

Centre Spatial de Liège
Université de Liège



- Les technologies «classiques» envisagées pour les spectrographes à champs intégrés sont :
 - des fibres optiques uniquement,
 - un réseau de micro-lentilles seulement,
 - des fibres optiques couplées à un réseau de micro-lentilles,
 - un image slicer
- ou d'autres concepts possibles comme
 - spectromètre à transformée de Fourier
 - spectromètre de Fabry-Perot
- Les fibres optiques couplées à un réseau de micro-lentilles et l'image slicer sont les deux concepts préférés pour le NGST.



Telescope focal surface Spectrograph input Spectrograph output

Lenslets Fibers Image slicer

• Only the image slicer retains spatial information within each slice/sample → highest information density in the datacube

• Implementation in a cold environment straightforward

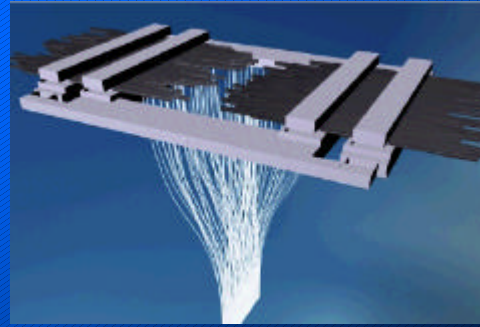
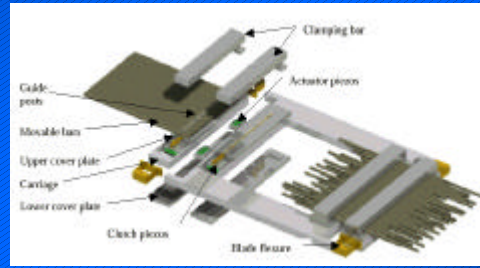
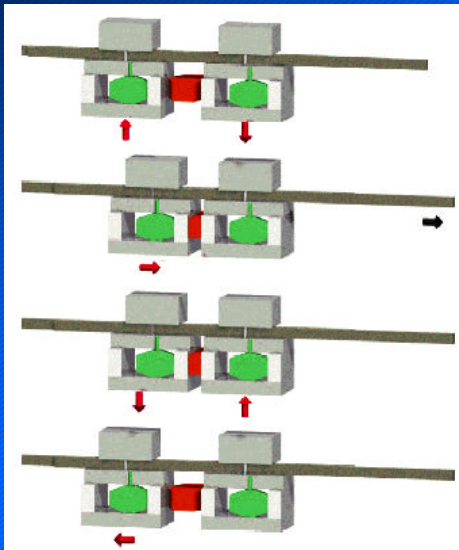
• Diffraction affects only FWHM



Centre Spatial de Liège
Université de Liège

Journée d'information sur les MEMS, Casteau (Mons), 26 janvier 2001

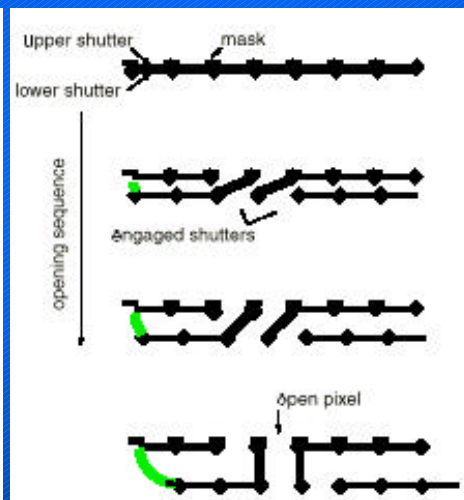
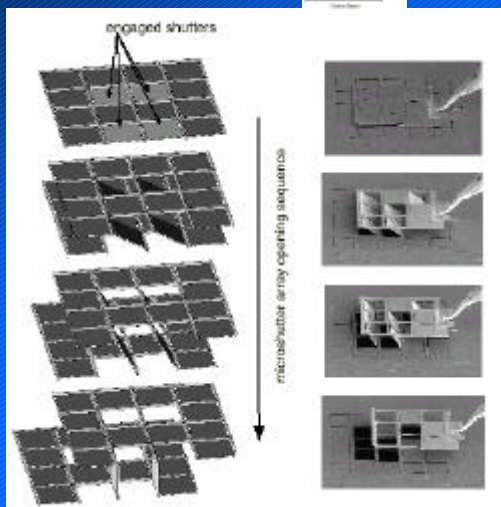
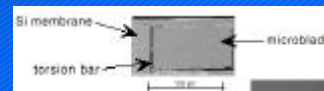
Solution « classique » pour le masque de fente du Spectrographe multi-objet



Centre Spatial de Liège
Université de Liège

Journée d'information sur les MEMS, Casteau (Mons), 26 janvier 2001

Solution MOEMS μobturateur pour le SMO

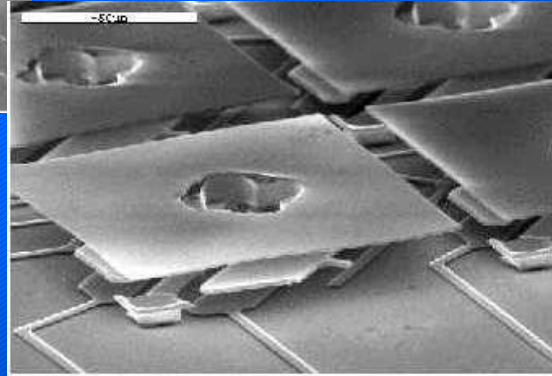
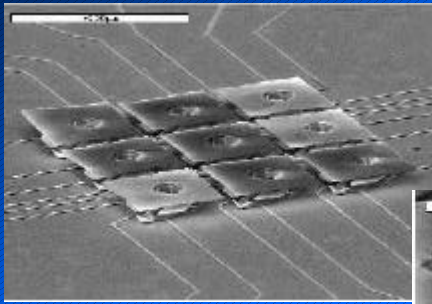




Centre Spatial de Liège
Université de Liège

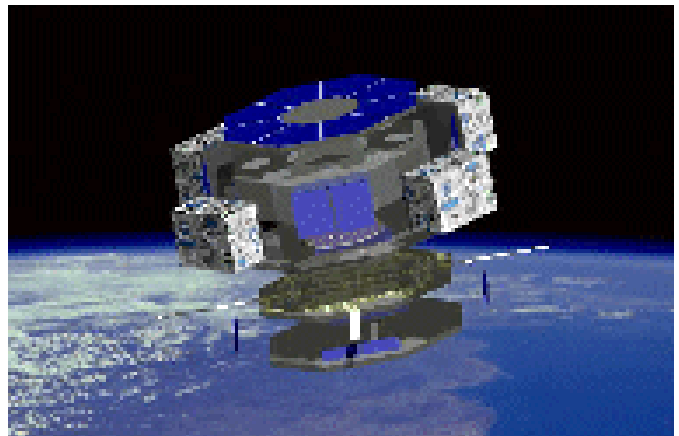
Journée d'information sur les MEMS, Casteau (Mons), 26 janvier 2001

Solution µmiroir pour le SMO



- De nouveaux concepts de missions, en particulier celui de *constellations*, pour des applications commerciales ou scientifiques d'étude de la Terre ou d'une planète: Une constellation est un ensemble de satellites identiques, placés sur des orbites de même altitude, mais d'inclinaison et de phasages différents, et remplissant tous la même fonction, à partir de positions différentes comme par exemple actuellement les constellations GPS pour le positionnement et la navigation.

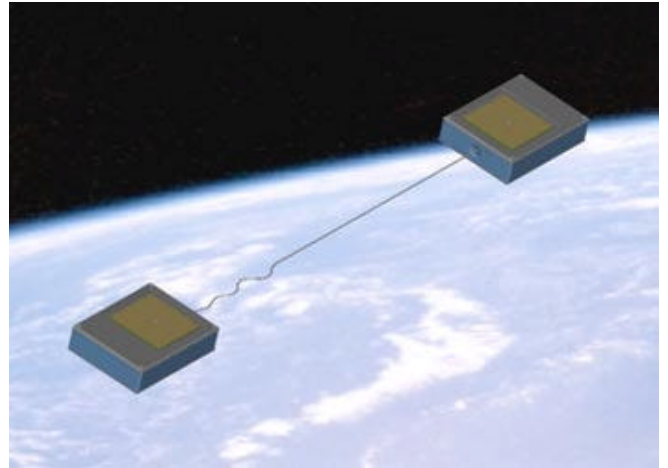
La Constellation pionnière de microsatellites appelée « Trailblazer mission » comprend trois satellites miniatures pour tester de nouvelles technologies spatiales dont des MOEMS. Ils sont de la taille d'un gros gâteau d'anniversaire, (octogone de 400 mm de diamètre et de 200 mm de hauteur), ayant la masse d'un PC de bureau, suffisamment intelligents pour voler en formation autonome autour de la Terre



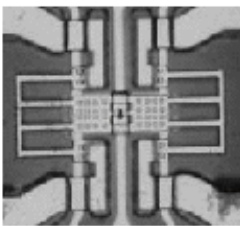
- L'objectif final est de réduire considérablement les tailles, masses et coûts relatifs des missions tout en augmentant les retombées scientifiques et imaginer et concevoir des missions futures, en constellations de satellites légers (environ 20 kg), fortement miniaturisés et autonomes. Des constellation de plus de 100 satellites autour de la Terre, pourraient par exemple contrôler les effets de l'activité solaire qui influencent notamment les systèmes de puissance électrique et de communications. La miniaturisation permet d'imaginer dès aujourd'hui le passage au microsatellite dont la masse va de 10 à 100 kg et l'on peut prévoir des constellations de microsatellites ou même des nouvelles générations de nanosatellites (1 à 10 kg), de picosatellites (0.1 à 1 kg), femtosatellites (< 0.1 kg) bien que l'ESA mentionne une limite raisonnable à 1 litre pour des raisons de dissipation thermique de la puissance minimale générée. L'exemple suivant montre deux pico-satellites liés (tethered satellites) communiquant entre eux par radio micro-puissance. Le lien les maintient à distance pour les liaisons croisées mais en plus, le lien contient de fins torons de fils d'or qui facilitent la poursuite radar. A l'avenir, on imagine utiliser des liens fibres optiques pour les communications et d'autres configurations de constellations en essaim pour lesquelles cette expérience sera utile.



Des picosatellites de moins de 250 grammes sont comparés à une tasse .
(The Aerospace Corp.)



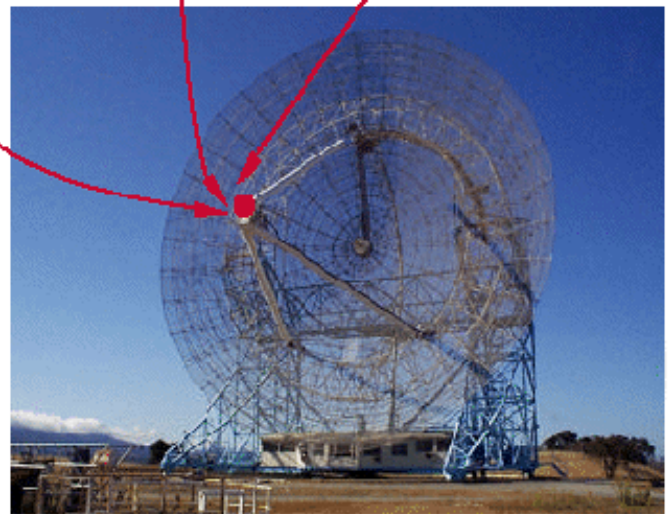
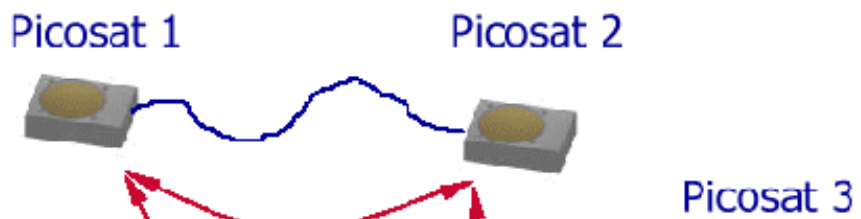
Picosats



MEMS RF switch
(Rockwell)



Pico Satellite
(Aerospace Corp)



- Le concept actuel de satellite, comme véritable *individu* possesseur de fonctions propres qui lui permettent de vivre et de survivre (*alimentation, contrôle d'attitude, radiocommunications, etc.*) disparaîtra pour une réduction de cette personnalité, par la distribution de certaines des fonctions à des constellations. Ainsi les télémessures seront envoyées à une constellation de satellites de communication remplissant le rôle de relais, comme le fait déjà le réseau TDRSS (*Tracking and Data Relay Satellite System*) pour la navette spatiale. Bientôt, plusieurs récepteurs GPS placés à bord d'un satellite permettront de connaître son attitude et de calculer directement les données nécessaires à son orientation. On peut donc prévoir la disparition future des senseurs d'horizon et des centrales à inertie dont la fonction sera assurée par un système extérieur.
- Les missions les mieux adaptées aujourd'hui pour recevoir les micro-technologies sont de petits satellites de télécommunications en orbite basse (LEO). Les missions de services et de satellites liés à un autre « normal » se trouvent également en bonne position; ces derniers ne nécessitent pas de propulsion ni de sous-systèmes de communication. Les missions de surveillance de l'environnement de la Terre sont de bons candidats pour la micro-technologie, principalement du

point de vue de la miniaturisation des instruments. Le CNES va lancer prochainement (mi-2001) DEMETER, un projet de micro-satellite « basse altitude », dont l'objectif principal est l'étude des signaux électromagnétiques engendrés par des événements sismiques ou volcaniques. Il s'agira de la première mission de la filière micro-satellite du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales). Ce genre de mission de détection de catastrophes (inondations, feux de forêts, pollutions, tremblements de Terre, ...) nécessite un essaim de satellites pour limiter les temps de réaction (« Agir et voir rapidement les effets de l'action »).

- Des satellites sur puce, micro-satellites tout silicium ! Le silicium par exemple peut être utilisé comme matériau multi-fonction : comme structure, substrat électronique, substrat de MEMS, bouclier radiatif, système de contrôle thermique, et matériau optique. Par une conception adéquate, il pourrait jouer toutes ces fonctions à la fois.
- L'exploration et l'exploitation des ressources non accessibles par les autres technologies comme par exemple le spectre électromagnétique dans les environs du Terahertz. Parmi les 6 investissements supplémentaires de développements technologiques, recommandés par le National Research Council, à la NASA parce que insuffisamment financées par la NASA ou d'autres sources de financement, on retrouve les systèmes micro-électromécaniques, dédiés au spatial, pour lesquels les recommandations suivantes sont faites :
 1. Réaliser des investissements suffisants pour les technologies à intégrer dans les plateformes (bus), qui ne seront pas développées par d'autres organisations, pour profiter au maximum de systèmes spatiaux miniaturisés.
 2. Développer des «charges utiles» de missions uniques NASA, qui (contrairement à des systèmes comme des accéléromètres miniatures) ne sont pas susceptibles d'être rendues disponibles par d'autres activités commerciales
 3. Trouver des solutions aux problèmes spécifiques aux missions spatiales, comme par exemple survivre dans un environnement unique (radiations et vide), réaliser des faibles lots de pièces et contrôler des formations distribuées de petits satellites.

Freins à l'utilisation spatiale des MOEMS

Il faut reconnaître quelques désavantages ou quelques freins à l'utilisation des MOEMS, qui demanderont notamment des comportements nouveaux :

- ◆ **Nouvelle façon de concevoir les systèmes et nouveaux outils de conception plus performants.** Les outils de conception de structures classiques (Samcef, Nastran, Ansys, Abacus, etc.) ne sont plus adaptés à la simulation (analyse et conception assistées par ordinateur) des micro-systèmes. En effet, les hypothèses du comportement physique faites à notre échelle ne sont pas applicables à celles des MEMS. Des phénomènes qui peuvent habituellement être pris en compte de manière découplée (thermique, mécanique, effet électrostatique, etc.) ne le sont plus dans le domaine du micron. Il faut prendre en compte le problème complet et considérer des couplages forts. Ce qui entraîne de lourds bouleversements (souvent insurmontables) dans le noyau des architectures des codes de calcul habituels. En réponse à cela, Igor Klapka, Ingénieur de Recherche du Service du Professeur Michel Gérardin de l'Université de Liège, et son équipe développent depuis 9 ans, avec le soutien de la Région Wallonne, un outil d'aide à la simulation industrielle de phénomènes couplés complexes. Baptisé **Oofelie** (Object Oriented Finite Element Led by Interactive Executer), cette librairie est construite sur base des dernières technologies en matière de génie logiciel. Elle permet le développement de modèles non linéaires fortement couplés, difficilement envisageables jusqu'alors. Outre des modèles vibro-acoustiques, de dynamique des mécanismes, de mise à forme (emboutissage), de coulée continue (changement de phase) et d'actuateurs piézo-électriques, l'équipe se consacre au comportement électrodynamique à grands déplacements de micro systèmes, avec la collaboration de la société Memscap. Nul doute que les prochains modèles prendront forme de business plans.
- ◆ **Changement de culture** à adopter pour accepter les nouveaux concepts de mission et de charges utiles, et ainsi exploiter à fond les avantages des MOEMS.
- ◆ **Changement de fabrication** : la fabrication en faibles lots, de composants spécifiques spatiaux, demandera peut-être le développement de nouvelles technologies moins chères pour concevoir, produire et tester.

- ◆ Leur **fiabilité** sous rayonnement reste encore à démontrer. A côté des dégâts habituels à craindre, le phénomène de charge électrique dans le plasma spatial ou par radiation-déposition, peut conduire à des forces électrostatiques intenses, amener les parties en mouvement en contact et risquer des problèmes de collage ou soudage à froid.
- ◆ **Problèmes d'interfaçage** pour l'intégration actuelle des premiers MEMS, dans les systèmes conventionnels: Connecteurs et voltage (Bus standard 28 V <---> 3 V MEMS).
- ◆ **Softwares de bord** plus complexes devant traiter plus de données.
- ◆ **Durée de vie**: basses T pour certaines applications (NGST) nécessitant de nombreux cycles de fonctionnement, importance des forces de surfaces (frottement, ...), choix plus limité dans les matériaux
- ◆ **Coûts du conditionnement et de l'interconnection plus élevés**, différents des semi-conducteurs car l'interaction avec l'environnement est nécessaire.
- ◆ **Caractérisation des matériaux et systèmes et nouveaux phénomènes** à l'échelle du micron : développement d'une nouvelle philosophie d'assurance produit, de qualification à l'environnement spatial et de testabilité des MOEMS : nouveaux moyens sol de tests (OGSE, MGSE)
- ◆ **Nouvelle façon de concevoir un satellite**. Concept de « satellite tout Si », satellite sur puce.

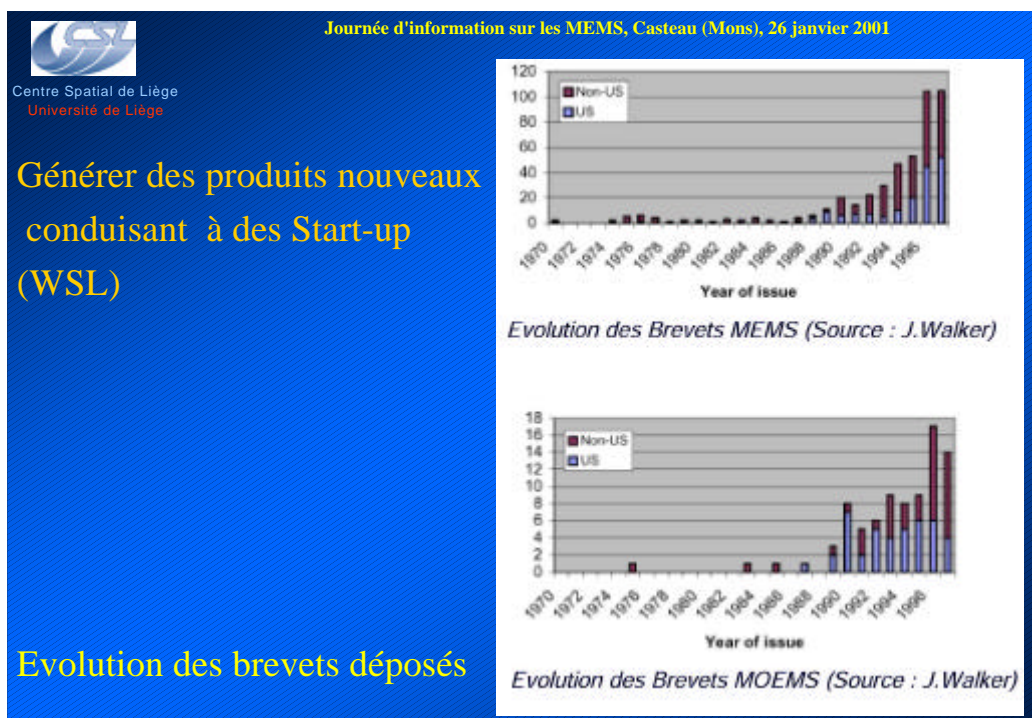
Rôles du Centre Spatial de Liège dans l'activité MEMS / MOEMS

Les prédictions dans ce domaine étant chaotiques, il serait plus prudent de commencer par dire que les activités MOEMS qui pourraient impliquer le plus le Centre Spatial de Liège, ne sont pas encore bien identifiées aujourd'hui mais les plus intéressantes sont peut-être celles auxquelles on ne songe pas encore actuellement.

- ◆ Le département Ingénierie du CSL est déjà actif dans le domaine des MEMS "terrestres" puisque ce département a parmi ses activités, des activités conduites par Luc Renson, qui concernent les structures intelligentes, des senseurs divers (fibres de Bragg, ...), la propulsion ionique, la puissance à bord et le contrôle de l'intégrité de structures aéronautiques. En coproduction avec l'Association pour la Recherche Avancée en Micro-électronique et Intégration de Système (ARAMIS), le CSL a réalisé le premier micro-système wallon (capteur de position) en 1990. Le Centre Spatial de Liège et ARAMIS développent et réalisent un micro-système de mesure qui intégrera dans son ensemble et sous forme miniaturisée, les diverses fonctions nécessaires à la mesure de contraintes, au traitement de ces mesures et à l'émission de celles-ci vers une centrale d'acquisition grâce à la liaison RF (sans fil).
- ◆ C.S.L. en tant que Centre de Test Coordonné par l'Agence Spatiale Européenne pourrait commencer par utiliser des MOEMS "terrestres" (notamment celui défini au paragraphe précédent) en les intégrant dans les moyens de tests au sol pour multiplier à volonté et au besoin, le nombre de points de mesures pour les tests thermiques et dynamiques. On peut même imaginer instrumenter les charges utiles spatiales de ces micro-capteurs alimentables en puissance par ondes radiofréquences et interrogeables à distance. Leur faible masse, leur faible encombrement et l'absence de connexions à réaliser en dernière minute, quant tout est assemblé, dans un environnement qui doit rester propre et le fait qu'il ne faille pas démonter pour les enlever (c'est d'ailleurs interdit pour un modèle de vol), sont des atouts nouveaux pour leur utilisation. S'ils ne sont pas qualifiés "spatial", ils seront simplement présents dans l'espace sans être utilisés, leur faible masse ne gênant en rien le bon fonctionnement dans l'espace, si des précautions ont été prises pour limiter le dégazage potentiel. Si ces micro-capteurs sont par contre qualifiés "spatial", ils pourraient également être utilisés dans l'espace et par conséquent s'ils sont présents, ils seront testés au sol et le CSL devra être préparé à les tester.
- ◆ Il semble clair qu'actuellement, les besoins du spatial ne sont pas suffisants pour justifier les coûts d'investissements dans des MOEMS à application spatiale spécifique, il faudra donc prendre des MOEMS terrestres et les qualifier "spatial". Dans ce cas-ci, il y aura exceptionnellement transfert de technologies de secteurs terrestres au secteur spatial. Avec ses moyens de tests, le Centre Spatial de Liège doit jouer un rôle dans la qualification spatiale de MOEMS.
- ◆ Le Centre Spatial de Liège comme Centre d'excellence en Optique, développe et utilise depuis des années, des méthodes optiques, interférométriques ou autres, pour mesurer avec précision des déformations ou des formes absolues par rapport à une référence (optique), de composants optiques, de structures spatiales dans un environnement spatial ou de structures

aéronautiques,. Les méthodes utilisées sont entre autres: interférométrie dans le visible, dans l'I.R., projection de franges, Moiré, interférométrie holographique, interférométrie à longueur d'onde variable. Parmi ces méthodes, certaines pourraient être adaptées et utilisées pour tester des MOEMS en cours de fabrication ou après tests de qualification

- ◆ Un aspect fortement négligé dans le domaine des MOEMS et qui ne peut l'être dans le domaine spatial est l'aspect "assurance qualité et fiabilité"; CSL avec son expérience spatiale de près de 40 ans, peut y jouer un rôle.
- ◆ Le Centre Spatial de Liège développe des instruments scientifiques spatiaux pour l'ASE, la NASA et pour le CNES et doit se préparer à concevoir, réaliser et tester des instruments intégrant des MOEMS, soit pour rendre les instrument plus compacts soit tout simplement pour arriver à atteindre les objectifs demandés. Il nous restera donc en plus à maîtriser les nouveaux outils de conception tel que OOFELIE car la conception et la vérification opto-électro-mécanique d'un concept MEMS sont différentes de celles d'un objet macroscopique (effets d'échelle notamment) et cette conception doit être plus proche que jamais des méthodes de fabrication choisies.
- ◆ Le Centre Spatial de Liège contribue (sur ses fonds propres !) à l'enseignement des sciences et techniques spatiales, à l'Université de Liège. Ainsi, comme travaux pratiques et travaux de fin d'études, on pourrait imaginer de faire travailler les étudiants ingénieurs sur des projets de micro-satellites comme c'est le cas aux USA et ailleurs en Europe (petites missions comme TUBSAT (Allemagne), SNAP-1 (Angleterre), NANOSAT (Espagne), TEAMSAT (Technology, science and Education experiments Added to **Maqsat**) (ESA).
- ◆ Enfin depuis 3 ans, le CSL a un rôle à caractère plus socio-économique, celui de développer de produits nouveaux pouvant conduire à des spin-off, qui pour la majorité pourront être maternées par WSL (Wallonia Space Logistics). Le domaine des MOEMS est un domaine très bouillonnant où on retrouve un peu l'esprit de l'époque de la ruée vers l'or. Le chiffre d'affaire annuel attendu (à 5 ans): 5 à 10 Milliards de \$ et le nombre de brevets introduits expliquent sans doute que 10.000 scientifiques dans 600 Universités, Laboratoires de recherche, Grosses entreprises et Petites start-up y travaillent. Pourquoi pas CSL ?



Références

1. EUROPEAN APPLICATIONS OF MICRO / NANO TECHNOLOGIES TO SPACE; ESA OVERVIEW; **Antonio Martinez de Aragón** ; European Space Agency ; Industrial Matters and Technology Programmes Directorate; ESTEC / IMT-THH; Micro-Mechanics Europe, Uppsala, Sweden, Sept. 3-5,2000.
2. <http://www.nexus-emsto.com/nexus.com>
3. <http://www.europractice.com>

4. ESA, Preparing for the Future, vol.8, no, 1, 2 and 3 (March, June, September 1998).
5. Concepts for Micro/Nanotechnologies in Space Systems", INTA Madrid. ESTEC, Feb 1999
6. Guiding Concepts for Microsatellites, DLR Köln, ESTEC, April 2000
7. "Multipurpose Free-Flying Microcamera", Institut für Raumfahrttechnik, TU Berlin ESTEC, Feb.99