Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 126 (2000)
Heft: 11

Artikel: Un microscope sonde les poussières martiennes
Autor: Staufer, Urs / Gautsch, Sébastien
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-81502

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 17.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Dr Urs Staufer, Sébastien Gautsch,
physiciens, Institut de microtechnique de
l'Université de Neuchâtel, CP 3, 2007 Neuchâtel

Un **microscope** sonde les poussières martiennes

Un consortium suisse, du nom de *FAMARS*, a réalisé en moins d'un an et demi un microscope à effet de force destiné à effectuer des mesures sur la planète rouge. Cet appareil robuste répond aux conditions extrêmes de l'environnement martien. Les principaux protagonistes de cette expérience sont l'Institut de microtechnique de l'Université de Neuchâtel, coordinateur et superviseur de l'opération pour la Suisse, le Centre Suisse d'électronique et microtechnique, l'Institut de physique de l'Université de Bâle, ainsi que la société *Nanosurf SA*, un fournisseur suisse de microscopes dont la présence industrielle dans un tel projet étonne lorsque l'on sait que plusieurs entreprises américaines proposent des produits semblables. Le *Jet Propulsion Laboratory*, à Pasadena (Etats-Unis), maître d'œuvre du projet, et l'Institut Paul Scherrer, à Villigen, ont également apporté leur soutien technique.

La volonté politique et scientifique de doter la Suisse d'une recherche de pointe dans les nanotechnologies, l'expérience acquise dans le cadre d'un précédent programme européen et du programme prioritaire de la Confédération, MINAST, ont fortement contribué à l'obtention d'un tel contrat. L'accord de coopération fut établi entre la NASA et le Conseil des Ecoles polytechniques, ce dernier finançant la contribution suisse à travers le programme MINAST.

Originellement inscrit dans le cadre global de la mission «Mars Surveyor 2001» - une opération que l'échec des deux dernières missions américaines a repoussée à 2003 -, ce volet de recherche est plus spécialement rattaché au projet d'«évaluation de la compatibilité environnementale de Mars» (projet MECA). L'objectif est de caractériser les poussières et le sol martiens, afin d'identifier les interactions indésirables et nuisibles pour l'explorateur humain et les systèmes embarqués. Pour détecter par exemple les éventuels risques induits par la présence d'eau apportée par l'homme, pour répondre à des questions telles que la taille, la forme, la dureté des particules à la surface de Mars, ainsi que pour évaluer leur adhésion, leur abrasion et leur comportement électrostatique, un laboratoire complet a été élaboré, de la taille d'une boîte à chaussures, complété par un bras de robot incorporé au véhicule qui collectera des échantillons. Ce laboratoire contient quelques outils d'analyse chimique et optique, ainsi que le microscope à effet de force du groupe *FAMARS*, dont la tâche sera de mesurer la taille, la forme, la distribution et la texture des particules - vraisemblablement du SiO_2 - en deçà de la résolution du microscope optique, qui est limitée à huit micromètres. Ces résultats serviront notamment à définir les filtres à particules et les matériaux de protection nécessaires à un vol habité.

Mars: des conditions extrêmes

Les péripéties du voyage interplanétaire et les conditions météorologiques sur Mars sont les principales difficultés auxquelles les instruments scientifiques seront confrontés. Le consortium *FAMARS* a donc réalisé un microscope à effet de force *AFM* particulièrement performant , capable de résister aux conditions extrêmes du voyage, estimé à neuf mois, et d'assurer une période de service fixée à cent jours. L'effort principal a porté sur la réduction des masses, la miniaturisation de tout l'appareillage et le développement d'un schéma de fonctionnement autonome. Le microscope complet (voir encadré) comporte un scanner, partie mobile qui balaie la surface de l'échantillon à analyser (fig. 1), et les logiciels de pilotage développés par *Nanosurf SA*. La partie active, destinée à sonder la matière, est composée de micro-lames vibrantes, mises au point, fabriquées et assemblées par l'Institut de microtechnique de Neuchâtel. Quant au CSEM, il est responsable des pointes en diamant, qui, au bout de chaque deuxième lame, «palpent à distance» la surface soumise à examen, tandis que l'Université de Bâle réalise les cartes électroniques pour les servo-contrôleurs. Une fois conçus et produits, ces différents éléments ont été soumis à des procédures de validation extrêmement exigeantes.

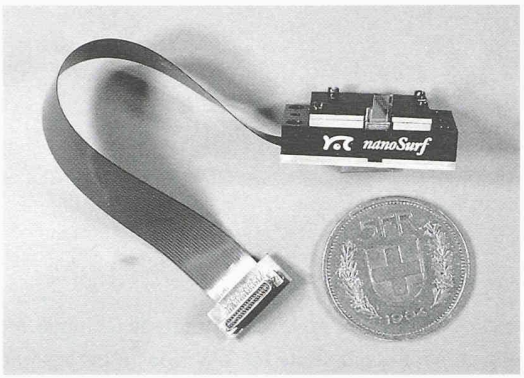
Les vibrations

Au Centre suisse d'électronique et microtechnique à Neuchâtel, à l'Université de Berne et chez *Contraves Space* à Zurich, la simulation des «conditions de stockage», principalement de nature vibratoire, a reproduit les situations du

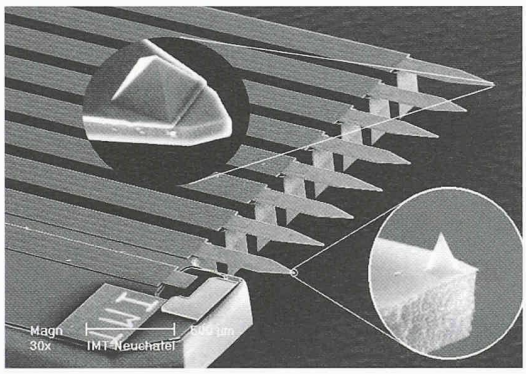
Fig. 1 : Le scanner développé par Nanosurf SA, *avec une des puces de l'Institut de microtechnique de l'Université de Neuchâtel (photo* FAMARS*)*

Fig.2 : Le microsystème pourvu de pointes en diamant et en silicium. (Photo FAMARS*)*

1



2



lancement et de l'«a-mars-age». Les vibrations couvrent un spectre allant de 20 Hz à 20 kHz avec une densité montant jusqu'à 0,1 g^2/Hz. Des tests de choc ont également été effectués pour simuler la séparation de la sonde de sa plate-forme de croisière. Celle-ci est produite par une violente explosion qui entraînera des accélérations pouvant atteindre deux mille fois l'accélération de la pesanteur terrestre à 2 kHz!

Les accélérations

A partie de ces spécifications de «stockage» et pour éviter d'offrir une prise trop importante aux accélérations attendues, la masse des parties les plus fragiles, en raison de leur caractère critique, doit être réduite au maximum. Les leviers fléchissants du microscope à effet de force sont micro-usinés dans du silicium (fig. 2). Etant donné qu'ils sont capables de détecter des structures avec une résolution de l'ordre du nanomètre , on pourrait imaginer qu'ils représentent le talon d'Achille du microscope; en réalité, vu leur dimension réduite (600 microns de long, 160 microns de large, 8 microns d'épaisseur) et donc leur faible masse, ces structures supportent des chocs s'élevant à 9000 g!

Les risques d'ionisation

La masse totale du scanner, dont le rôle est de balayer la surface de l'échantillon à analyser au moyen d'un microsystème *AFM* en silicium, a été réduite à 15 grammes, ce qui est extrêmement peu pour un instrument destiné à couvrir une surface de 50 par 50 microns avec une résolution de l'ordre du nanomètre. Cette performance est d'autant plus remarquable, qu'une nouvelle technique de balayage s'appuyant sur un mouvement électromagnétique à faible voltage (+/-12V) a été mise au point. Les microscopes *AFM* commerciaux sont d'habitude équipés d'un tube piézo-électrique pour effectuer le balayage, ce qui nécessite des tensions élevées (plusieurs centaines de volts) pour obtenir un déplacement du même ordre de grandeur. Or sur Mars, où la pression est mille fois inférieure à celle de la terre, un potentiel élevé peut générer une ionisation du gaz carbonique présent dans l'atmosphère et détruire les circuits électroniques. Cette innovation technique a donc été indispensable à la réalisation du projet.

Les radiations

Durant les mesures sur Mars, les composants électroniques seront exposés à de fortes radiations. Des ions hautement énergétiques peuvent soit corrompre les données enregistrées («single event upsets», *SEU*) soit, dans les cas plus graves, créer un court-circuit entre l'alimentation et la «mise à terre» du micro-système («single event latch-ups», *SEL*). Un courant très élevé passe alors à travers la puce et détruit le composant. Pour éviter qu'un *SEU* ne modifie l'information stockée dans un registre, chaque bit d'information est sauvegardé dans trois registres différents reliés à une cellule de vote. Le seul signal pris en compte est celui donné par la cellule de vote qui élimine les événements minoritaires. En procédant ainsi, le risque d'information corrompue se réduit d'un facteur mille à dix mille. Afin de protéger les circuits intégrés des *SEL*, on a choisi des composants tolérant les radiations pour autant qu'ils soient disponibles. Et pour ménager tous les autres composants, l'alimentation est surveillée en permanence et interrompue instantanément si le courant excède une valeur limite. Cette interruption provoque une remise à l'état initial et enclenche à nouveau les mesures.

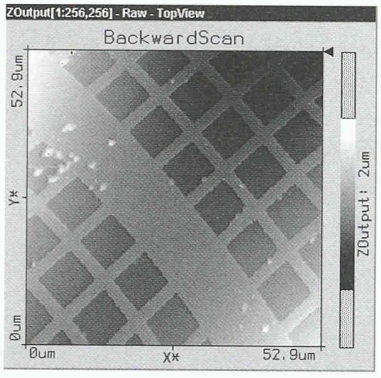
La température

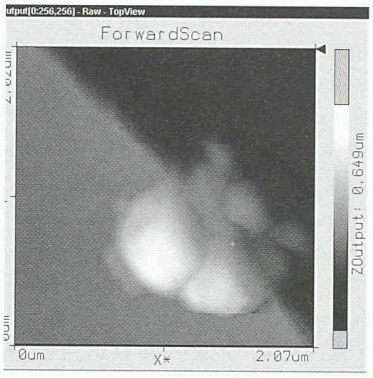
Les mesures *AFM* seront effectuées durant le jour martien, qui voit la température fluctuer entre - 40 °C et 0 °C. En collaboration avec le CSEM à Neuchâtel et le *Jet Propulsion Laboratory* (*JPL*) aux États-Unis, le fonctionnement du microscope a donc été testé dans cette plage de températures.

La nécessaire autonomie

De par sa sensibilité à une pluralité de paramètres, un microscope à effet de force fait normalement l'objet d'une surveillance et de réglages réguliers assurés par un opérateur. Or la transmission entre Mars et la Terre prend quelque huit minutes et seules deux fenêtres de communication directe sont possibles par jour, si bien qu'aucune interaction immédiate avec l'instrument n'est envisageable. Cette restriction établit des contraintes spécifiques pour le protocole de mesures qui contrôle l'appareil et la nécessité de programmes

Fig 3 et 4 : Deux images prises avec le microscope à effet de force : échantillon de calibrage avec une grille de 10 microns et vue rapprochée sur une particule (IMT)





d'opération autonomes. La résistance aux vibrations, ainsi que la reproductibilité des valeurs paramétriques qui caractérisent l'instrument développé ont permis de configurer ces dernières de manière à garantir une image de qualité satisfaisante (fig. 3 et 4), dans une large gamme de températures et de pressions, en l'absence d'intervention humaine. Des erreurs standard, apparues lors des tests approfondis auxquels l'instrument a été soumis, ont dicté les restaurations automatiques implémentées dans le programme qui gère le microscope.

Conclusion

Le déroulement du prochain vol vers Mars n'est pas encore complètement arrêté. Etant donné qu'une fenêtre de départ ne se présente que tous les deux ans, le vol est actuellement reporté à 2003. Des modifications importantes destinées à renforcer la robustesse du système de communication du véhicule spatial, notamment la masse supplémentaire des instruments de test (sorte de «flight recorder» ou boîte noire), sont à prévoir, qui auront un impact défavorable sur la charge utile transportable. Pour le moment, le «rover», le véhicule autonome prévu, en pâtit, mais les autres expériences sont encore «à bord». Des nouvelles à ce sujet devraient tomber prochainement.

Cette expérience avec la *Nasa* nous a confrontés à la gestion d'un projet très complexe à réaliser dans un court laps de temps (une année et demie), tout en nous exposant à des contraintes et spécificités nouvelles, propres aux missions spatiales ou planétaires, telle la protection des composants électroniques par exemple. Sur le plan technique, nous avons pu mieux comprendre le comportement du microsystème *AFM* et ses interactions avec les différents éléments mécaniques de l'instrument. Nous avons travaillé à la fabrication des éléments mécaniques et micro-mécaniques pour des applications à basse température. Un point délicat fut constitué par le montage des pointes en diamant et leur ajustage ainsi que par la programmation et la simulation de composants logiques de haute complexité (FPGA). Nous espérons que cette expérience pourra être exploitée dans d'autres projets et qu'elle nous permettra dorénavant de travailler avec l'ESA. La société *Nanosurf* bénéficie, quant à elle, de retombées immédiates. Les résultats des tests peuvent être pris directement en considération pour ses produits standard et ce projet lui apporte une grande notoriété.

FONCTIONNEMENT D'UN MICROSCOPE À EFFET DE FORCE

Dans son principe, le microscope à effet de force (*AFM, Atomic Force Microscope*) fonctionne comme les vieux tourne-disques: une pointe est fixée à l'extrémité libre d'une lame très souple (aussi appelée cantilever ou levier) dont l'autre extrémité est rigidement fixée et cette pointe balaye la surface à examiner à une distance extrêmement faible. Les forces agissant entre les atomes du spécimen et de la pointe provoquent une très légère flexion de la lame, ce qui fait varier les contraintes mécaniques à son extrémité fixe.

De tels changements peuvent facilement être mesurés par un capteur de force, par exemple une piézo-résistance. Un servo-contrôleur, agissant perpendiculairement au sens de balayage, assure le maintien d'une force constante, si bien que la distance entre pointe et spécimen demeure toujours identique. La représentation graphique du signal émis par le servo-contrôleur en fonction de la position de la pointe produit des profils parallèles qui sont intégrés sous forme d'une image topographique du spécimen.

Une autre méthode consiste à faire vibrer la lame à sa fréquence de résonance. Si l'on avance alors la pointe vers l'échantillon, cette fréquence se modifie en fonction du gradient de la force entre la pointe et la surface de l'échantillon. Au lieu de se régler sur une constante de déflexion, le servo-contrôleur a cette fois pour but de tenir cette nouvelle fréquence de résonance constante. Cette seconde méthode a l'avantage de garder la pointe à proximité de l'échantillon pendant un très court laps de temps. Ainsi, les particules de poussières à analyser sur Mars se trouveront moins déplacées par l'extrémité de la pointe et n'influenceront pas la qualité de l'image.