

Une histoire de l'accélérométrie...

De CACTUS à MICROSCOPE

Le lancement en avril 2016 du satellite MICROSCOPE met à nouveau en lumière le savoir-faire mondialement reconnu de l'ONERA (Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales) dans la mise au point et l'exploitation d'accéléromètres de très hautes précisions. Ces accéléromètres ont également fait les heures de gloire des missions CHAMP, GRACE, et GOCE pour la mesure du champ de gravité de la Terre à très haute résolution spatiale, ainsi que ses variations temporelles. C'est une histoire qui a commencé au cours des années 1970, et dont nous retraçons ici les grandes lignes.

Les mesures accélérométriques et la technologie associée trouvent en France leur origine dans le besoin de l'ONERA dans les années 1960 de suspendre les maquettes en soufflerie. La solution retenue avait été la suspension électromagnétique, qui s'est révélée être un progrès énorme par rapport à l'utilisation de fils ou barres pour accrocher les maquettes, et qui perturbait les écoulements. La différence avec les satellites d'aujourd'hui est le niveau de la pesanteur, et ce n'est pas la suspension qui est le moyen de mesure ; le point commun est le besoin de la mesure des forces de surface, d'origine non gravitationnelle.



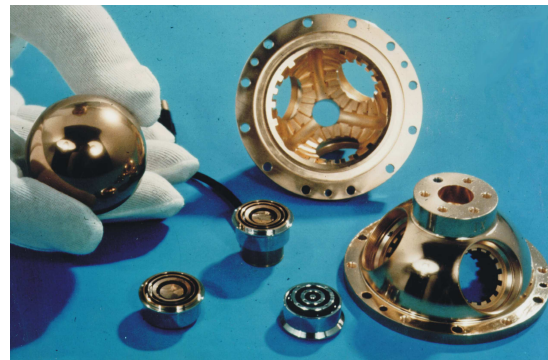
Les débuts de l'accélérométrie spatiale sont à chercher dans les souffleries de l'ONERA. © ONERA

Le satellite CASTOR

Un accéléromètre *spatial* mesure la force électrostatique à appliquer à une bille de composition bien choisie pour la maintenir dans une position d'équilibre, à l'aide d'une électronique d'asservissement : s'il faut appliquer une charge, cette bille étant isolée des forces non gravitationnelles, c'est que le satellite subit des forces qui s'appliquent à sa surface : l'accélérométrie était née, ouvrant la voie à une nouvelle méthode de mesure des forces caractérisant l'environnement dans lequel évoluent les satellites.

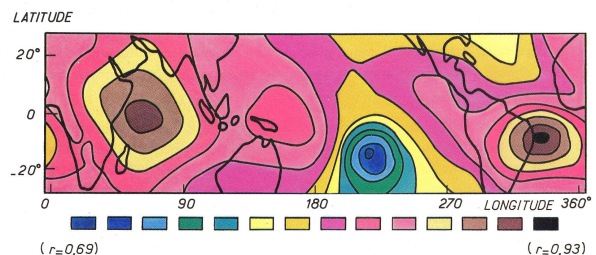
Le premier Capteur Accélérométrique Triaxial Ultra Sensible, acronyme de CACTUS, a volé entre 1975 et 1979 à bord du satellite CASTOR, alors qu'il était prévu de ne faire durer cette première expérience que six mois. Avec

une masse d'épreuve formée de 500 g de platine-rhodium, un intervalle entre la bille et la cage de 85 μm , une plage de fonctionnement de 10 μm et un déplacement observé de 1 μm , CACTUS permettait de mesurer des accélérations entre 10^{-4} et 10^{-8} m.s^{-2} . Le satellite évoluait sur une orbite 270 – 1300 km, inclinée de 30° sur l'équateur : il était attendu d'avoir accès aux variations de la densité atmosphérique au moins pour les altitudes inférieures à 400 kilomètres dans les régions tropicales.



Le premier accéléromètre CACTUS : un travail d'orfèvre.
© ONERA

La mission a été un succès au-delà de ces espérances, puisque les variations de la pression de radiation solaire en fonction de la distance de la Terre au Soleil sont apparues mesurables, responsables d'une accélération d'environ 3.10^{-8} m.s^{-2} avec des variations d'environ 7% sur une année. Des accélérations encore plus petites, au niveau de quelques 10^{-10} m.s^{-2} ont même pu être évaluées : elles caractérisaient alors l'émission infrarouge de la Terre, en permettant même de distinguer les valeurs moyennes au-dessus des océans ou des continents.



Une des premières cartes de variation de la densité atmosphérique. © OCA

La décennie de la gravimétrie spatiale

Les missions CHAMP (lancement juillet 2000), GRACE (lancement mars 2002, toujours en activité en 2016), et GOCE (lancement mars 2009) ont révolutionné la détermination depuis l'espace du champ de gravité de la Terre, en mettant même en évidence des variations temporelles caractérisant de grands transferts de masse. A l'heure actuelle, toutes les structures dans le champ de gravité de la Terre de quelques centaines de kilomètres de longueur d'onde spatiale au moins ont été révélées par gravimétrie spatiale. Des trajectoires d'altitudes suffisamment basses ont été judicieusement choisies pour être sensibles aux perturbations orbitales générées par des distributions régionales de masse. A ces altitudes basses, le freinage atmosphérique est cependant très fort, et il n'est pas possible d'utiliser des modèles pour prédire de manière uniforme dans le temps et l'espace la valeur suffisamment précise de la densité atmosphérique. A des fins d'orbitographie, ces modèles (ainsi que ceux décrivant les autres forces comme les pressions de radiation) sont désormais remplacés, pour ces missions, par des mesures directes de la résultante des forces de surface, grâce aux accéléromètres installés à bord.

Le satellite CHAMP a ainsi été équipé d'un seul accéléromètre, destiné à mesurer les accélérations non gravitationnelles, et a ainsi révélé les potentialités de la technologie. A bord de la mission GRACE, ce sont deux accéléromètres qui ont été installés, permettant d'avoir accès pour la première fois à une mesure du gradient de gravité, avec une base d'environ 250 kilomètres. Cette mission a permis, également pour la première fois, de déterminer des variations temporelles dans le champ de gravité. Sur le satellite GOCE, sachant qu'en plus des forces de surface l'accéléromètre mesure la différence de gravité entre le centre de masse du satellite et le zéro de l'instrument, ce ne sont pas moins de 6 accéléromètres que l'on trouve disposés de manière judicieuse : ils donnent ainsi accès au gradient de gravité dans les trois directions d'espace. Cela a permis de construire un modèle de champ de gravité de la Terre avec la résolution spatiale la plus fine à ce jour.

La mission MICROSCOPE

Le principe de MICROSCOPE est assez proche de celui GOCE, sauf que l'on ne considère pas les mêmes mesures comme étant du bruit ou du signal.

Le principe fondamental de la dynamique dit que « force = masse x accélération » (il s'agit en fait d'une loi d'évolution de la quantité de mouvement) ; la loi de la gravitation universelle dit d'autre part que la force générée par l'attraction gravitationnelle de deux masses ponctuelles est proportionnelle au produit des masses et inversement proportionnelle au carré de leur distance. On peut ainsi montrer facilement que le mouvement d'un corps sous l'influence de forces gravitationnelles est indépendant de la masse du corps en mouvement : c'est l'universalité de la chute libre (en l'absence de forces non gravitationnelles, bien évidemment).

Mais pour arriver à cette affirmation, on a supposé implicitement que les deux masses évoquées ci-dessus sont égales, alors que formellement il faut distinguer la masse « grave » de la masse « inerte ». La mission MICROSCOPE va vérifier dans l'espace ce « principe d'équivalence », à un niveau de précision jusque là inégalé. Nous n'exposerons pas ici les différences entre le principe dit *faible* et le principe dit *fort* (pour lequel la télémétrie laser sur la Lune constitue actuellement la meilleure vérification expérimentale) ; nous retiendrons simplement que les meilleures vérifications actuelles se situent au niveau de 10^{-13} , et que MICROSCOPE permettra une vérification au niveau de 10^{-15} . Une violation de ce principe à ce niveau contribuerait à fixer les limites de validité de la théorie de la Relativité générale.



Vue d'artiste du satellite GOCE © ESA

Une approche multidisciplinaire

L'aventure de l'accélérométrie est avant tout une aventure technologique, initiée à des fins d'astronautique ; plusieurs ordres de grandeur ont été franchis dans la précision des réalisations depuis ses balbutiements. En parallèle, les interprétations des mesures, faites par approximations successives au fur et à mesure où l'on mesurait des accélérations de plus en plus faibles, permettaient de mettre en évidence des phénomènes physiques de plus en plus complexes.

Aujourd'hui, l'accélérométrie donne accès à plusieurs domaines liés à la dynamique orbitale, et qui sont très fréquemment interdépendants : les théories de la gravitation (l'accéléromètre mesurant l'attraction gravitationnelle de masses proches), la gravimétrie spatiale (pour la détermination du champ de gravité ou les forces de surface comme le freinage atmosphérique), la climatologie (en donnant pour une part accès au bilan radiatif de la Terre).

Combien d'ordres de grandeur à encore gagner dans les prochaines années pour la précision des mesures ?

Ce document fait partie de la Lettre d'Information de juin 2016 de l'IMCCE. Il est inspiré d'un séminaire "Temps-Espace" qui a été donné par Anne-Marie Mainguy et Bernard Foulon de l'ONERA le 1er février 2016.

Voir <http://www.imcce.fr> pour l'accès aux archives et la gestion des abonnements.