



50^e ANNIVERSAIRE DE L'INSTITUT D'AÉRONOMIE SPATIALE DE BELGIQUE: AÉRONOMIE PLANÉTAIRE

A.C. Vandaele, F. Daerden, N. Matshvili,
C. Muller, E. Neefs, V. Wilquet
Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique

L'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique est impliqué dans l'étude des planètes et en particulier de leur atmosphère depuis de nombreuses années. Principalement tourné vers les planètes telluriques Mars et Vénus, l'institut porte cependant un intérêt aux atmosphères d'autres planètes ou corps célestes, comme celle de Titan, de Jupiter et de ses satellites, ou encore des comètes.

L'étude des atmosphères de planètes telluriques, c'est-à-dire formées dans des conditions très similaires à celles qu'a connu la Terre, est un élément vital pour la compréhension du passé et du futur de notre système climatique. En effet, seule une analyse détaillée de la circulation atmosphérique existant sur d'autres planètes, des forces qui en sont responsables, de phénomènes ou processus tels que les précipitations, les tempêtes, les éclairs, la photochimie, .. tout autant de phénomènes qui se produisent aussi sur d'autres planètes, pourra conduire à une compréhension globale et intégrée des sciences atmosphériques, comme la dynamique ou la météorologie... et par là, à une meilleure compréhension de ces phénomènes sur Terre.

Le Système Solaire possède quatre planètes telluriques, Mercure, Vénus, la Terre et Mars. Lors de sa formation, il y en avait sans aucun doute beaucoup plus

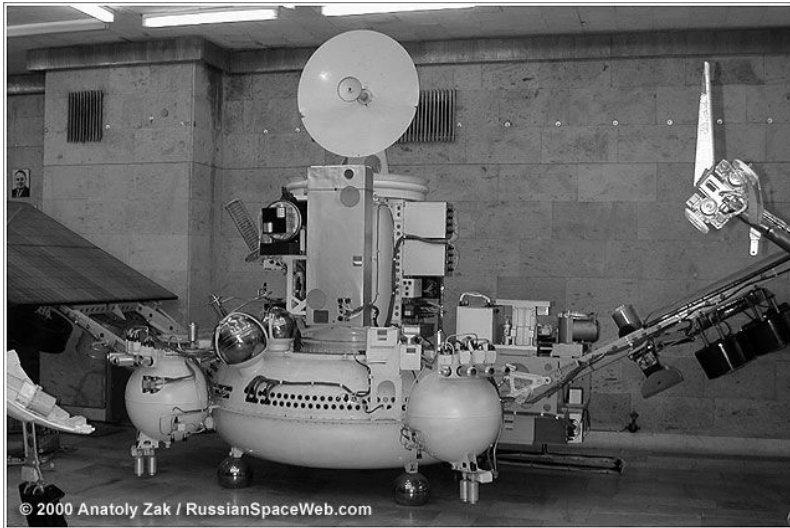
(planétésimaux) mais ils se sont agglomérés pour former de plus gros corps ou ont été détruits par les quatre entités finalement créées. Seule la Terre possède une hydrosphère active. Les planètes telluriques sont constituées principalement de combinaisons d'hydrogène, d'hélium et d'eau existant dans différents états. Elles ont toutes à peu près la même structure interne : un cœur central métallique, principalement du fer, entouré d'un manteau de silicates. Toutes ces planètes possèdent aujourd'hui ce qu'on appelle des atmosphères secondaires – atmosphères créées par le dégazage de la surface, le volcanisme, les impacts cométaires, etc, contrairement aux planètes géantes qui possèdent toujours leur atmosphère d'origine, celle capturée directement de la nébuleuse planétaire. Mars et Vénus sont très similaires à la Terre sous de nombreux aspects. Cependant leurs différences peuvent nous en apprendre beaucoup plus. Mars a perdu sa magnétosphère il y a environ 4 milliards d'années, si bien que le vent solaire interagit directement avec l'ionosphère martienne, arrachant de la matière aux couches extérieures de sorte que l'atmosphère de Mars reste très ténue. Cette atmosphère est constituée de 95% de dioxyde de carbone, 3% d'azote et 1,6% d'argon, plus des traces d'oxygène et d'eau. L'atmosphère de Mars contient énormément de poussières en suspension, qui lui donnent cette couleur jaune-

brun clair. L'atmosphère de Vénus est très différente de celle de la Terre : elle est plus dense et s'étend jusqu'à de plus hautes altitudes. Des observations radio de la planète réalisées en 1958 ont indiqué des températures très élevées, proches de 600K, qui ont été confirmées lors des survols de la planète par la sonde Mariner II en 1962. Ces hautes températures n'ont pu être expliquées à cette époque. Lentement, l'idée que les aérosols jouaient un rôle prépondérant, a fait son chemin : c'est ainsi que le concept d'effet de serre a vu le jour.

L'intérêt de l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique pour les missions spatiales a débuté à sa création dans les années 60. L'IASB a pris part activement à de nombreuses missions vers Mars (Phobos, Mars Express) et Vénus (Venus Express) et a soutenu l'analyse des résultats recueillis par l'atterrisseur Phoenix de la NASA. Aujourd'hui l'IASB prépare un nouvel instrument, NOMAD, qui sera à bord de la future mission de l'ESA vers Mars, ExoMars, qui sera lancée en 2016.

Les premières missions vers Mars

Après le succès de la mission Viking de la NASA en 1976, L'IASB a montré un intérêt très vif pour la planète Mars. La mission Viking avait été conçue



La mission Phobos

pour rechercher des processus liés à la présence de vie sur la planète rouge. A la place, elle mit en évidence l'existence d'une chimie très différente de celle que nous connaissions sur Terre. A cette époque, l'ESA entama une étude pour une mission vers Mars appelée Kepler qui effectuerait un inventaire de la composition chimique de l'atmosphère martienne. L'IASB proposa une contribution nationale sous forme d'un instrument sensible dans les domaines UV, visible et IR, conçu pour observer le limbe de l'atmosphère. Cet instrument ne dépassa jamais le stade de l'étude préliminaire mais le concept fut prouvé et présenté et discuté à de nombreuses conférences de l'ESA. Finalement l'ESA arrêta de financer le projet Kepler sans cependant émettre une décision claire de mettre fin au projet. Le concept de l'instrument fut cependant repris par les scientifiques de l'ancien « Service d'Aéronomie » du CNRS (Paris, France) qui, en collaboration avec des collègues Russes de l'Institut de Recherche Spatiale (IKI) de Moscou, conçurent un instrument similaire pour la mission russe Phobos.

La mission Phobos était une mission très sophistiquée destinée à

l'étude de Mars et de son satellite Phobos. Basée sur l'utilisation de deux satellites, Phobos devait effectuer des mesures *in situ* de Phobos et des observations à distance des deux corps. L'IASB fut invité à participer au projet, quand, en 1987, une délégation russe rendit visite à Bruxelles. L'IASB participa ainsi à la caractérisation et à la phase de tests du nouvel instrument appelé AUGUSTE. AUGUSTE devait effectuer des observations en occultation solaire de l'atmosphère de Mars, depuis le domaine UV jusqu'à l'IR. Trois modèles de vol furent construits à l'IKI dont un fut transmis à l'IASB pour les tests. Un de ces tests consista à observer le rayonnement solaire depuis l'Observatoire du Pic du Midi en France.

Les deux satellites Phobos furent lancés en 1988 et 1989. Malheureusement, un seul arriva jusqu'à Mars. De plus, il ne put remplir que partiellement sa mission. L'instrument AUGUSTE réussit à effectuer un certain nombre d'observations qui permirent de mesurer les quantités de vapeur d'eau et d'ozone dans l'atmosphère de Mars et d'étudier la structure des nuages de glace et de poussières. En 1993, des chercheurs de l'IASB et de

l'IKI publièrent une première « tentative d'identification du formaldéhyde dans l'atmosphère martienne » [1]. En effet, deux structures d'absorption furent observées dans certains spectres enregistrés par l'instrument. Ceci eut un impact non-négligeable sur la photochimie telle qu'elle était connue à l'époque : en effet le formaldéhyde est un produit de l'oxydation du méthane, qui est souvent considéré comme un signe de l'existence (actuelle ou passée) de la vie. Cependant une ré-analyse récente de ces spectres [2] a montré que les structures observées seraient sans doute des artefacts instrumentaux. D'autre part, des observations récentes effectuées dans cette région spectrale [3,4] ont suggéré que ces structures seraient dues à des bandes d'absorption très faibles du CO₂.

Le succès partiel de la mission et de l'instrument AUGUSTE fit que l'équipe belgo-russo-française proposa un nouvel instrument basé sur le même concept, SPICAM (Spectroscopy for Investigation of Characteristics of the Atmosphere of Mars), pour la mission suivante, Mars-96. Malheureusement cette mission fut victime d'une défaillance de son lanceur. Suite à un problème lors de la mise à feu du quatrième étage de la fusée, la sonde n'a pu quitter l'orbite terrestre et s'est désintégrée dans les couches hautes de l'atmosphère plongeant ensuite dans l'océan Pacifique. Cette mission très ambitieuse, avec une sonde spatiale de plus de 6 tonnes, soit le plus gros engin jamais lancé vers Mars, embarquait plus de 500 kg de matériel scientifique. Elle devait mener une quarantaine d'expériences, préparées par une vingtaine de pays dont onze européennes et deux américaines. Une partie de la mission devait se dérouler en orbite, l'autre au sol avec deux

petites stations automatiques et deux pénétrateurs qui devaient s'enfoncer dans le sol martien. Mars 96 aurait dû atteindre Mars en septembre 1997, soit 10 mois après son lancement.

Faisant fi de cet échec, l'ESA mit sur pied, en un temps record la mission suivante, Mars Express, et l'instrument SPICAM y fut à nouveau proposé.

Mars Express

Mars Express est la première mission européenne vers la planète rouge. En fait il s'agit même de la première mission planétaire de l'ESA. Elle doit son nom à la rapidité mise en œuvre pour la réaliser, un temps record comparé aux missions spatiales habituelles. Mars Express était constituée d'un orbiteur avec 7 instruments à bord et d'un élément à déployer, Beagle-2. Celui-ci fut perdu lors de son atterrissage, mais la mission de l'orbiteur fut, et est encore, un véritable succès. Mars Express fut lancé à partir de Baïkonour au Kazakhstan grâce à une fusée Soyouz-Fregat le 2 juin 2003. Suite à ses nombreuses découvertes et à son profil de mission très flexible, la mission a été reconduite plusieurs fois. En fait, en 2013, la communauté scientifique a fêté son 10e anniversaire.

L'IASB a été impliqué dans la mission Mars Express par sa participation à la conception et à la construction de l'instrument SPICAM hérité de la mission Mars-96. Cet instrument est constitué de deux canaux sensibles dans les domaines UV et IR respectivement. Pour différencier les deux missions, on utilise souvent l'appellation SPICAM-Light pour celui à bord de Mars Express. Ce nom fut choisi suite à une optimisation du *design* ayant conduit à une réduction drastique de la masse de l'instrument.



L'instrument SPICAM-Light

L'IASB a travaillé en étroite collaboration avec le LATMOS (anciennement Service d'Aéronomie, France) et l'Institut de recherche Spatiale Russe (IKI). SPICAM analyse la composition de l'atmosphère en utilisant principalement des observations en occultation solaire et stellaire. Le canal UV permet de détecter l'ozone et d'étudier les nuages et poussières alors que le canal IR est sensible à la vapeur d'eau. Les nuages de glace présentent des variations saisonnières et spatiales importantes. Les scientifiques s'intéressent au cycle annuel de ces nuages qui sont clairement reliés au cycle plus général de la vapeur d'eau et de la circulation atmosphérique [5].

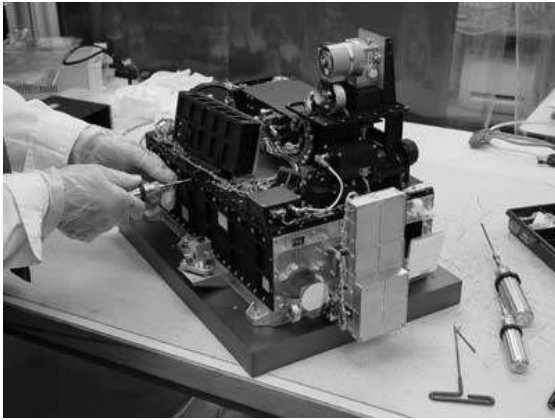
Venus Express

Après le succès de la mission Mars Express, l'ESA a voulu profiter de l'élan en mettant sur pied sa prochaine mission planétaire, cette fois vers Vénus. Afin d'économiser à la fois de l'argent et du temps, il fut décidé de récupérer le plus possible d'éléments conçus pour les missions Mars Express et Rosetta : l'orbiteur serait le même que celui développé pour Mars Express, adapté bien sûr aux conditions rencontrées sur Vénus (réduction de la taille des

panneaux solaires, par exemple) et reprise d'instruments déjà existants. C'est ainsi que l'instrument SPICAV fut proposé, copie à l'identique de son petit frère SPICAM, à l'exception notable d'un troisième canal, SOIR, entièrement développé et fabriqué par l'IASB. C'est ainsi que SOIR, Solar Occultation in the IR [6], fit partie de la mission. Venus Express fut mise en orbite en 2005 depuis le cosmodrome de Baïkonour au Kazakhstan et se mit en orbite autour de Vénus en avril 2006. Depuis lors la mission a fourni de nombreux résultats sur la planète et son atmosphère.

L'orbiteur ainsi que les instruments furent réalisés en 4 ans ! SOIR faillit bien ne pas être intégré à temps, suite à la destruction d'une pièce essentielle lors des tests de vibration. Heureusement celle-ci fut remplacé *in extremis* par une pièce de rechange. Ce fut donc un réel soulagement pour les ingénieurs et scientifiques de l'IASB quand l'activation de l'instrument se révéla être un succès. A l'heure actuelle SOIR est toujours opérationnel et s'est avéré être l'un des instruments les plus performants et fiables de la mission Venus Express.

SOIR a déjà fourni une quantité impressionnante de résultats qui ont permis de mettre en évidence des structures atmosphériques totalement insoupçonnées jusqu'à aujourd'hui. Grâce à ses observations en occultation solaire, SOIR sonde la région du terminateur (la séparation entre les côtés jour et nuit), une région où la dynamique et la circulation sont très particulières. SOIR a ainsi montré l'existence d'une couche extrêmement froide située vers 120 km, avec des températures pouvant atteindre 100K. Ce qui a fait dire à l'ESA, qu'il « neigeait sur Vénus » ! (<http://sci.esa>



L'instrument SPICAV/SOIR. SOIR a été conçu comme étant le second étage construit au-dessus de SPICAV, la copie de l'instrument SPICAM

int/venus-express/54066-5-snow-on-venus).

ExoMars

Surfant sur le succès de SOIR sur Venus Express, l'IASB a proposé d'utiliser ce concept d'instruments pour d'autres missions spatiales, notamment pour une mission Scout de la NASA, appelée TGE, qui était en concurrence avec la mission MAVEN finalement sélectionnée, ainsi que pour la future mission de l'ESA vers Mars, ExoMars. Cette dernière sera composée de deux éléments : le premier sera mis en orbite en 2016 et sera constitué d'un orbiteur (TGO, Trace Gas orbiter) et d'un démonstrateur d'atterrissage (EDM) ; le second élément sera lancé deux ans plus tard et comprendra un rover et une station sol. Initialement ExoMars était une mission combinée des agences ESA et NASA, mais aujourd'hui, suite au retrait de l'agence américaine, la mission est organisée sous l'égide de l'ESA et de ROSCOSMOS, l'agence spatiale russe.

L'IASB fournira un instrument pour cette mission. NOMAD ("Nadir and Occultation for MArS Discovery") est constitué de trois canaux qui permettront

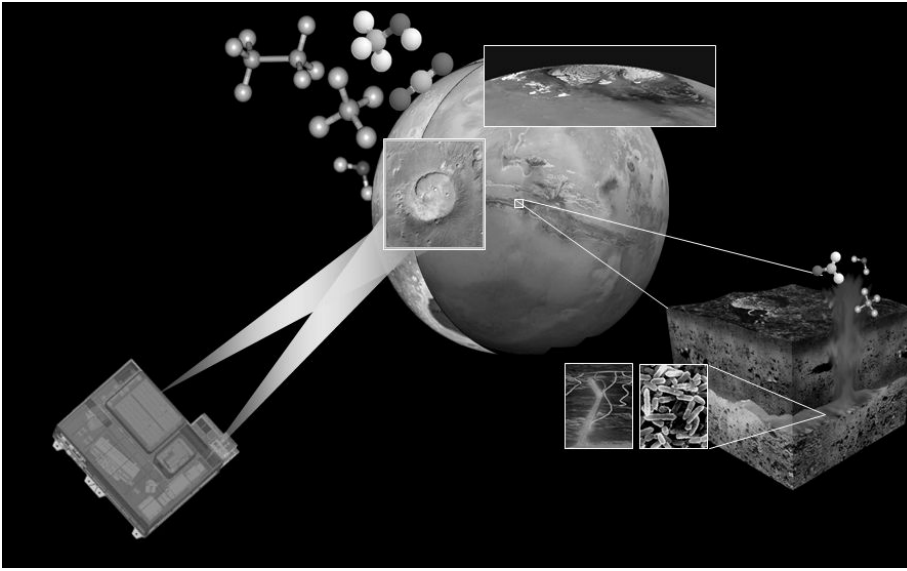
une couverture tant spectrale que spatiale de l'atmosphère de Mars: le premier canal, SO, est une copie conforme de l'instrument SOIR à bord de Venus Express; le second, LNO, en est une version améliorée et optimisée pour des observations en visée nadir et limbe pour lesquelles la quantité de lumière atteignant le détecteur est nettement plus faible qu'en occultation solaire; enfin, le troisième canal, UVIS, est un instrument opérant dans le domaine UV-visible, soit en visée nadir soit en occultation solaire. NOMAD est le résultat d'une collaboration entre la Belgique et d'autres partenaires européens (Espagne, Italie et Royaume Uni). En Belgique, l'IASB dirige une équipe qui compte entre autres le PI (Principal Investigator), le 'Project Scientist', et le 'Project Manager'. Le Centre Spatial de Liège (CSL) est également impliqué dans ce projet ainsi que des collègues de l'Observatoire Royal de Belgique et de l'Université de Liège. A l'origine, l'Espagne était responsable de la conception et de la fabrication de toute l'électronique, l'Italie était impliquée dans la conception des périscopes extérieurs et le Royaume-Uni devait fournir le canal UVIS. Cependant, suite à la situation économique en Europe, la contribution internationale a été fortement réduite et pratiquement toutes leurs activités ont été reprises par la Belgique. Aujourd'hui, pratiquement toutes les tâches, exception faite de la conception de l'électronique pour l'ensemble (Espagne) et pour UVIS (UK), sont réalisées par des ingénieurs et scientifiques belges, ainsi que par l'industrie localisée en Belgique. OIP (Audenaarde) est le maître

d'œuvre, responsable pour la construction des canaux IR (SO et LNO) et l'intégration finale de tous les sous-ensembles et celle de l'instrument dans le satellite. LambdaX (Nivelles) construit le canal UVIS (excepté l'électronique), Thales Alenia (Charleroi) s'occupe de la fabrication de l'électronique centrale et de celle des canaux SO et LNO, AMOS (Liège) fournit certains éléments optiques, tels que des miroirs et les réseaux de diffraction.

L'instrument est entré dans sa phase de construction et sera livré début 2015 à l'ESA. En attendant les ingénieurs et scientifiques impliqués préparent activement les phases de tests et pensent déjà à la préparation d'outils scientifiques qui permettront d'exploiter au mieux les résultats obtenus par l'instrument et la mission.

La modélisation planétaire : un outil indispensable

La quantité de données fournie par les missions spatiales existantes et surtout futures, alliée à l'accroissement de la puissance de calcul des ordinateurs actuels, font qu'il devient indispensable et possible de s'aider d'outils performants pour analyser ces données recueillies. Un de ces outils est la modélisation 3D de la circulation atmosphérique (GCM, Global Circulation Model, modèle de circulation générale) En pratique, un GCM est un modèle numérique qui résout explicitement les équations primitives de la mécanique et de la thermodynamique des fluides géophysiques dans les 3 dimensions spatiales et dans le temps. Les GCMs simulent aussi le transfert du rayonnement et les sources et puits d'énergie qui en résultent dans le milieu atmosphérique. La résolution spatiale des modèles est limitée par la puissances des ordinateurs existants, et certains processus



L'instrument NOMAD constitué de trois canaux qui effectuera des observations de Mars en occultation solaire et en visée nadir

thermodynamiques de petites échelles (turbulence, convection...) doivent être paramétrisés, avec les incertitudes supplémentaires que cela implique. D'autres processus sont probablement encore trop mal connus pour être explicitement simulés même s'il n'y avait pas de limitation de résolution. Les caractéristiques physiques et optiques des nuages en est un exemple. Ces outils permettent d'intégrer les résultats de différentes missions et d'ainsi avoir une vision globale de l'atmosphère. L'IASB développe de

tels modèles pour la Terre mais également pour Mars.

Il n'est pas toujours nécessaires de considérer des modèles 3D, parfois des modèles plus simples et relatifs à des échelles spatiales plus petites sont tout aussi utiles. C'est ainsi que l'IASB a développé une série de modèles concernant notamment les aérosols, leur formation, leur évolution au sein de l'atmosphère ou encore un modèle de la couche limite de Mars. Celle-ci a été notamment observée grâce aux instruments embarqués sur l'atter-

risseur Phoenix, une mission Scout de la NASA qui s'est posé avec succès sur la surface de Mars en 2008 et y a étudié entre autres les phénomènes se produisant dans la couche atmosphérique proche de la surface. Le modèle qui décrit la création de nuages à partir de la nucléation de cristaux de glace sur les poussières et contient une description microphysique des processus impliqués, a confirmé la formation de nuages dans la couche limite et la présence de particules de glace de grande taille qui sédimentent à grande vitesse. Cet effet est très comparable à la formation de cirrus sur Terre [7].

Conclusions

L'IASB a une longue histoire derrière elle d'implication active dans de nombreuses missions spatiales vers Mars et Vénus. Actuellement, de nouvelles missions vers ces planètes mais aussi vers Jupiter et ses satellites naturels sont en cours d'étude et c'est avec certitude que l'institut et ses chercheurs et ingénieurs en feront partie.

Références

- [1] Korablev, O., Ackerman, M., Krasnopolsky, V.A., Moroz, V.I., Muller, C., Rodin, A., Atreya, S., 1993. Tentative identification of formaldehyde in the Martian atmosphere. *Planet. Space Sci.* 41, 441-451.
- [2] Korablev, O., 2002. Solar Occultation Measurements of the Martian Atmosphere on the Phobos Spacecraft: Water Vapor Profile, Aerosol Parameters, and Other Results. *Solar System Research* 36, 12-34.
- [3] Bertaux, J.L., Vandaele, A.C., Wilquet, V., Montmessin, F., Dahoo, R., Villard, E., Korablev, O., Fedorova, A., 2008. First observation of 628 CO₂ isotopologue band at 3.3 μm in the atmosphere of Venus by solar occultation from Venus Express. *Icarus* 195, 28-33.
- [4] Villanueva, G., Mumma, M.J., Novak, R., Hewagama, T., 2008. Identification of a new band system of isotopic CO₂ near 3.3 μm : Implications for remote sensing of biomarker gases on Mars. *Icarus* 195, 34-44.
- [5] Matashvili, N., D. Fussen, F. Vanhellefont, C. Bingen, E. Dekemper, N. Loodts and C. Tetard. Water ice clouds in the Martian atmosphere: two Martian years of SPICAM nadir UV measurements. *Planetary and Space Science*. *Planetary and Space Science*. Volume 57, Issue 8-9, p.1022-1031, 2009. doi: doi:10.1016/j.pss.2008.10.007
- [6] Nevejans, D., E. Neefs, E. Van Ransbeeck, S. Berkenbosch, R. Clairquin, L. De Vos, W. Moelans, S. Glorieux, A. Baeke, O. Korablev, I. Vinogradov, Y. Kalinnikov, B. Bach, J.P. Dubois, and E. Villard, Compact high-resolution space-borne echelle grating spectrometer with AOTF based on order sorting for the infrared domain from 2.2 to 4.3 micrometer. *Applied Optics*, 2006. 45(21): p. 5191-5206
- [7] Daerden, F., J.A. Whiteway, R. Davy, C. Verhoeven, L. Komguem, C. Dickinson, P.A. Taylor, and N. Larsen (2010), Simulating Observed Boundary Layer Clouds on Mars, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L04203, doi:10.1029/2009GL041523