

OUFTI-1, le nanosatellite des étudiants liégeois

Par Ir. Amandine Denis

Depuis trois ans, la célèbre interjection liégeoise a pris un sens nouveau à l'Université de Liège, et même au-delà. OUFTI, devenu l'acronyme de Orbital Utility For Telecommunication Innovation, rassemble les étudiants autour d'un projet ambitieux : concevoir, construire, mettre en orbite et finalement opérer un satellite. OUFTI-1 sera certes de taille modeste (un cube de 10 cm de côté seulement) mais comportera les fonctionnalités typiques de tout satellite : le défi technologique est donc de taille ! Outre les trois démonstrations technologiques qu'il embarquera, un objectif majeur est d'ordre éducatif. Le projet représente en effet une formidable opportunité d'amener les étudiants à développer des compétences transversales tout en menant un travail technique poussé.

4

Figure 1 : Maquette éducative d'OUFTI-1 lors d'une exposition au Parlement européen (Réalisation : Paco - ON6LP)



tion d'éjection...) et d'opérations (aucun déploiement ni émission radio durant les trente minutes suivant l'éjection...). Le standard CubeSat a été développé par les universités américaines de CalPoly et de Stanford en 1999, avec pour objectif de faciliter l'accès à l'espace aux universités. En effet, le temps de développement (typiquement entre 18 mois et 4 ans) et le budget (à partir de 65 000 \$) nécessaires à la réalisation d'un CubeSat sont tout à fait compatibles avec un projet universitaire. De plus, le standard CubeSat s'accompagne d'un système de déploiement robuste : le P-POD (boîtier parallélépipédique pouvant contenir jusqu'à trois CubeSats durant le lancement). Ces deux éléments, standard + P-POD, facilitent l'accès à des lancements en tant que charge utile secondaire : tandis que le satellite principal assume la majorité des coûts, un ou plusieurs CubeSats peuvent bénéficier, pour un budget raisonnable, de l'espace libre résiduel dans la coiffe du lanceur. Le succès des CubeSats est conséquent : depuis le premier lancement en 2003, une cinquantaine de CubeSats ont été lancés et de nombreux projets sont actuellement en développement. Les missions de ces satellites sont variées : expériences scientifiques (par exemple, étude de l'électroluminescence des couches supérieures de l'atmosphère par SwissCube), démonstrations technologiques (par exemple, cellules solaires sur film mince pour Delfi-C3, ou même tests de composants pour de futures missions par Boeing) ou « simples » démonstrations de savoir-faire (images de la Terre pour de nombreuses missions, transmission de l'hymne national colombien pour Libertad-1...). De même, plusieurs options coexistent concernant le développement technique : entre l'achat de modules fonctionnels commerciaux (approche « kit »), le développement complet des différents sous-systèmes, ou une combinaison de ces deux approches, les possibilités sont nombreuses. Dans ce panorama, OUFTI-1 se positionne comme un projet de démonstration technologique, avec un maximum de développements propres.

La charge utile

OUFTI-1 emportera trois charges utiles de démonstration technologique : un relais de

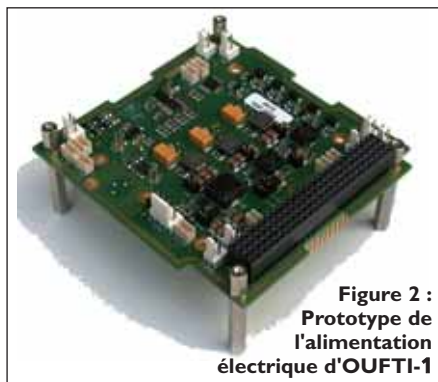


Figure 2 :
Prototype de
l'alimentation
électrique d'OUFTI-1

télécommunication D-STAR, une alimentation électrique expérimentale et des cellules solaires à haute efficacité.

Relais D-STAR

Le D-STAR (*Digital Smart Technologies for Amateur Radio*) est un protocole numérique (« digital ») de télécommunication radioamateur développé en 2001 par l'association des radioamateurs japonais (JARL). Le D-STAR présente de nombreuses caractéristiques intéressantes, parmi lesquelles figurent : une communication numérique, la transmission simultanée de voix et de données (par exemple, données GPS ou informatiques), le routage complet via internet, ou encore la possibilité de roaming à travers le monde sur base des indicatifs radioamateurs (identifiant unique et propre à chaque radioamateur, de type ON4EYA). Le système D-STAR classique est développé pour trois bandes de fréquences : VHF (145 MHz), UHF (435 MHz) et UHF/bande L (1,2 GHz). Parmi celles-ci, OUFTI-1 n'en utilisera que deux : UHF (435 MHz) pour le lien montant et VHF (145 MHz) pour le lien descendant.

OUFTI-1 sera le premier satellite à emporter un relais dédié au D-STAR. Il s'intégrera au réseau existant de relais terrestres et permettra aux radioamateurs d'établir des communications D-STAR sur de longues distances, y compris en utilisant le roaming et internet.

Il faut noter que l'effet Doppler sera tout à fait invisible pour les utilisateurs. En effet, le matériel D-STAR classique n'est pas conçu pour les communications par satellite, et ne permettrait pas de corriger la déviation de fréquence due à l'effet Doppler de façon suffisamment fine pour garantir une bonne réception. Afin de ne pas imposer aux radioamateurs de modifier leurs équipements, l'effet Doppler sera compensé à bord pour des zones déterminées sur base de réservations. Les utilisateurs situés dans ces zones n'auront qu'à émettre et recevoir sur les fréquences nominales.

Alimentation électrique expérimentale

La deuxième charge utile d'OUFTI-1 consiste en un système d'alimentation électrique innovant, dont la caractéristique principale est d'être contrôlé numériquement. Ce projet est développé en collaboration avec Thales Alenia Space ETCA (Charleroi).

Cellules solaires à haute efficacité

Des cellules solaires de nouvelle génération constituent la troisième charge utile d'OUFTI-1. Ces cellules sont de technologie triple jonction (arséniure de gallium, GaAs) et auront une efficacité de l'ordre de 30 %, alors que l'efficacité des cellules actuelles est de l'ordre de 28 %. Les cellules solaires d'OUFTI-1 sont développées et offertes par AzurSpace, à qui les mesures de performance en orbite seront fournies.

La plateforme

La plateforme désigne la partie du satellite destinée à permettre le fonctionnement de la charge utile. La plateforme se divise en sous-systèmes, chacun d'entre eux remplissant une fonction donnée.

Structure

La structure doit supporter l'ensemble des équipements du satellite et leur fournir des points d'attache. Elle constitue également l'interface avec le système de déploiement et doit assurer l'intégrité structurelle du satellite lors du lancement et en orbite.

La solution choisie est la structure développée et commercialisée par la société américaine Pumpkin. En effet, le développement d'une structure propre à OUFTI-1 présentait peu d'intérêt, et il a été préféré de concentrer les efforts sur d'autres développements. De plus, la structure Pumpkin a prouvé ses qualités en orbite.

La structure est en aluminium, pour une masse totale de 148,5 g. Les différentes cartes électroniques s'y empilent, guidées par quatre tiges situées aux quatre coins et séparées verticalement par des cylindres en aluminium.

Alimentation électrique

Le système d'alimentation électrique (EPS, pour *Electrical Power Supply*) a pour objectif de gérer et distribuer la puissance électrique nécessaire à bord. L'EPS d'OUFTI-1 est constituée de trois éléments principaux : les cellules solaires, les batteries et le système de distribution et conditionnement de puissance.

Les cellules solaires sont celles d'AzurSpace présentées précédemment. Deux cellules connectées en série seront présentes sur cinq des six faces du satellite (pour un total de 10 cellules), l'ensemble étant connecté en parallèle (via des diodes de protection) et alimentant un bus non-régulé (2,7 – 4,2 V). Les batteries, de technologie Lithium-ion polymère, sont connectées à ce bus non-régulé. Elles sont destinées à fournir de l'énergie en période d'éclipse (soleil occulté par la Terre) ou lors de pics de consommation. La puissance électrique est ensuite distribuée selon trois bus correspondant à des tensions données (3,3 V, 5 V et 7,2 V) et auxquels sont connectés les différents composants.

L'alimentation électrique expérimentale s'interconnecte à l'EPS au niveau du bus 3,3 V. Sur télécommande, l'alimentation électrique expérimentale alimentera soit une charge de test, soit le bus 3,3 V, ou sera désactivée.

Ordinateur de bord

Afin de gérer les différentes données et commandes, un ordinateur de bord (OBC, pour *On-Board Computer*) est nécessaire. Il garantira également la gestion de la mission et de l'énergie disponible, en allumant et éteignant les différents équipements. L'OBC initialement choisi était celui de Pumpkin, basé sur le microprocesseur MSP430 (Texas Instruments). L'inconvénient de cette carte est le grand encombrement de sa surface. La carte de Pumpkin comporte en effet de nombreux éléments prévus pour s'interfacer avec d'autres modules commerciaux ; ces éléments sont donc tout à fait inutiles pour OUFTI-1. Il a donc été décidé de réaliser un OBC propre au projet, en se basant sur le même microprocesseur mais en dépouillant la carte de ses composants inutiles. Cet OBC fait-maison sera l'OBC principal d'OUFTI-1, mais l'OBC de Pumpkin, embarqué lui aussi, le surveillera continuellement. Cette solution de double OBC permet de bénéficier du « *flight*

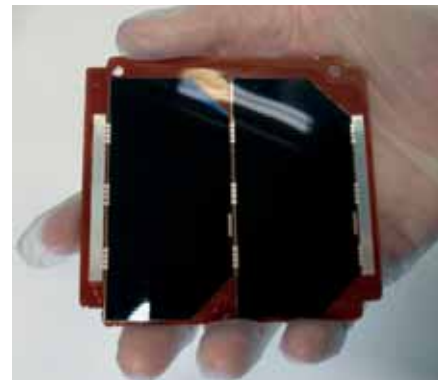


Figure 3 : Deux cellules solaires d'OUFTI-1

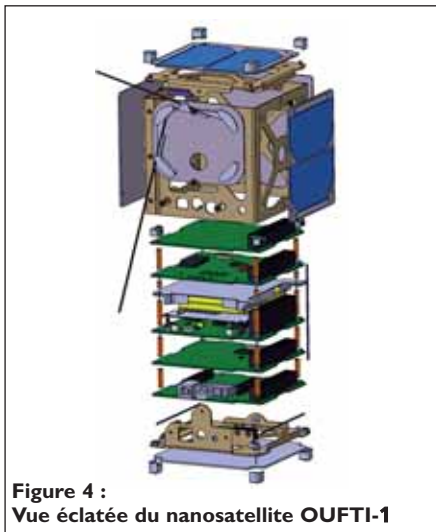


Figure 4 :
Vue éclatée du nanosatellite OUFTI-1

heritage » de la carte Pumpkin tout en testant l'OBC propre à OUFTI. Cet OBC pourrait être réutilisé seul (ou doublé) dans de futurs projets.

Le logiciel de bord est développé sur base du système d'exploitation temps réel FreeRTOS. Il s'organise en différents modules réalisant les tâches requises. L'ensemble est développé en C. Un bus I2C assure le transfert des données.

Télécommunications

6 Trois canaux de télécommunications sont implémentés à bord d'OUFTI-1. Le premier canal est constitué par le relais D-STAR, présenté précédemment. En tant qu'expérience technologique, il ne peut être considéré comme un canal fiable pour les communications de contrôle et de maintenance du satellite ; une autre solution doit donc être développée. Ainsi, un deuxième canal de communication sera destiné à l'échange de télécommandes (communications de la Terre vers le satellite) et de télémétries (communications du satellite vers la Terre). Le protocole radioamateur AX.25 a été choisi à cet effet. Son atout principal est qu'il est largement utilisé, notamment par les radioamateurs réalisant du « trafic » satellite. Le protocole est donc bien connu et les ressources disponibles sont nombreuses, de même que les stations-sol disposées à prêter main-forte si nécessaire. Le troisième canal de communication est destiné à garantir la récupération de données au sujet d'OUFTI-1 en toutes circonstances, y compris les plus difficiles (début et fin de vie, défaillances techniques...) ou lorsque le satellite n'est pas en visibilité de l'Université de Liège. Dans ce but, une balise simple et robuste est implémentée. Elle transmet continuellement, codés en morse, douze paramètres essentiels au suivi de la bonne santé d'OUFTI-1 ou au diagnostic de pannes éventuelles. De plus, ce

signal sera recevable par les radioamateurs du monde entier qui pourront le transmettre à l'équipe OUFTI-1 à Liège, garantissant ainsi une surveillance quasi-continue du satellite. De tels systèmes de balise ont déjà fait leurs preuves lors de précédentes missions CubeSats.

Tout comme pour le D-STAR, la liaison montante en AX.25 se fera dans la bande UHF (435 MHz) et les liaisons descendantes (AX.25 et balise) dans la bande VHF (145 MHz). Les fréquences exactes ont été attribuées par l'ARU (*International Amateur Radio Union*) et seront approuvées prochainement par l'ITU (*International Telecommunication Union*).

Système de rétention et de déploiement des antennes

Afin de mettre en œuvre les canaux de télécommunications décrits ci-dessus, des antennes sont nécessaires. Le choix s'est porté sur des antennes quart d'onde, pour le caractère quasi-omnidirectionnel de leur diagramme de rayonnement. Les antennes ont par conséquent des longueurs de 17 et 50 cm (correspondant aux deux bandes de fréquences). Ces antennes doivent toutefois être contenues dans le dm³ imposé par le standard CubeSat, pour n'être déployées qu'après trente minutes d'orbite.

La solution développée s'inspire des mètres rubans métalliques, qui s'enroulent mais se déploient par effet ressort dès qu'ils sont relâchés. Les antennes, réalisées en copro-béryllium, sont enroulées autour d'un support et maintenues en place par un fil de Dyneema (semblable à du fil de pêche). Après les trente minutes d'attente réglementaires (en orbite), le fil est fondu par deux résistances en titane, et les antennes se déploient d'elles-mêmes. Le dispositif prend place sur la face d'OUFTI-1 n'accueillant pas de cellules solaires, pour une épaisseur totale inférieure à 6,5 mm.

Contrôle d'attitude

L'attitude désigne l'orientation du satellite en orbite, autour de son centre de gravité. Dans le cas d'OUFTI-1, les contraintes de masse et de puissance, les contraintes thermiques (pas de face continuellement exposée au soleil) ainsi que le caractère quasi-omnidirectionnel des antennes ont mené au choix d'un système passif. Un aimant permanent aligne un axe d'OUFTI-1 sur le champ magnétique terrestre, tandis que des barreaux de matériau hystérétique orientés selon les deux autres axes ralentiront la rotation du satellite.

Contrôle thermique

L'objectif du système de contrôle thermique est de garantir à chaque composant un environnement thermique adéquat. Les composants électroniques utilisés étant commerciaux et non qualifiés-spacial (pour des raisons d'économie, d'indisponibilité et d'expérimentation), leurs plages de températures de fonctionnement sont restreintes : typiquement entre -20 et +60 °C, alors que les températures rencontrées en orbite peuvent varier de -150 à +150 °C. Un choix judicieux des matériaux et la création de liens conductifs suffisent pour la plupart des composants, mais les batteries requièrent une attention particulière. En effet, une température positive doit leur être garantie. Elles bénéficient donc d'un système de contrôle thermique actif, composé de chaufferettes (résistances « patchs » collées sur les batteries) et de thermostats miniaturisés.

Le segment sol

Le projet OUFTI-1 ne comprend pas seulement le développement d'un satellite, mais aussi celui du segment sol complet, fait sur mesure. Un segment sol doit donc permettre d'envoyer des télécommandes vers OUFTI-1, d'en recevoir des télémétries, et d'assurer l'intégration du répéteur D-STAR dans le réseau terrestre existant. Le segment sol d'OUFTI-1 est divisé en deux parties, selon ces différents rôles : les échanges de télécommandes et de télémétries sont assurés grâce au segment de contrôle, et les communications D-STAR par le segment D-STAR.

Segment de contrôle

Le segment de contrôle est composé d'une part d'une station sol regroupant les antennes et l'équipement nécessaire à les contrôler, ainsi que l'équipement radio (émetteur-récepteur commandé par ordinateur), et d'autre part d'un centre de contrôle de mission où s'effectuent le suivi du satellite, la composition des télécommandes et le traitement des télémétries. La station sol et le centre de contrôle de mission peuvent être distants, leur interconnexion s'effectuant par un lien TCP/IP. Ce dernier centre peut se limiter à un ordinateur portable, donc très mobile.

La station sol est actuellement installée à l'Université de Liège (à l'Institut Montefiore). Elle permet d'initier les étudiants au tracking de satellites. Une station sol de backup est installée à l'EuroSpace Center de Redu.

Figure 5 : Les antennes de la station sol à l'Institut Montefiore



Segment D-STAR

Le segment D-STAR permet de relier OUFTI-1 au réseau de relais D-STAR terrestres. Concrètement, il s'agit d'une extension (antennes et leur système de contrôle, module D-STAR, et convertisseur de fréquence) greffée au relais D-STAR classique. Ce relais est installé à l'ULg et opérationnel depuis 2008. L'extension est en cours de développement.

L'équipe

L'aperçu technique ci-dessus le prouve : OUFTI-1 est un projet réellement pluridisciplinaire. Une solide équipe est donc nécessaire pour mener à bien la réalisation tant du segment spatial que du segment sol. Constituée initialement (année académique 2007-2008, pour de premières études de faisabilité) d'étudiants ingénieurs civils issus de l'ULg, l'équipe s'est vite enrichie de profils d'ingénieurs industriels. L'ISIL (HEPL) et l'Institut Gramme (HELMO) ont rejoint le projet en 2008-2009. En 2009-2010, la recherche d'expertise en radiofréquences a mené à l'intégration d'un étudiant de l'Université Catholique de Louvain (UCL). Cette année, ce sont deux bacheliers en informatique de l'INPRES (HEPL) qui rejoignent l'équipe. Les profils sont donc variés, y compris parmi les étudiants ULg : ingénieurs électroniciens, informaticiens, physiciens, et en aérospatiale, ainsi que masters en informatique... Il en va de même pour l'équipe d'encadrement : les trois professeurs initiateurs du projet (G. Kerschen et P. Rochus – Département d'aérospatiale et mécanique, et J. Verly – Département d'électricité, électro-

nique et informatique) ont été rejoints par plusieurs professeurs de l'ULg, des hautes écoles et de l'UCL. Le projet reste cependant entre les mains des étudiants. Il s'agit en effet d'un objectif fondamental : permettre la réalisation d'un satellite par et pour les étudiants. Dans le cadre de leur travail de fin d'études, ils sont donc responsables du travail technique, mais sont également impliqués dans un maximum d'aspects du projet : contacts avec les nombreux industriels partenaires, présentations en Belgique (public expert ou néophyte) et à l'étranger, publications... Le travail d'équipe est crucial pour OUFTI-1. Il en résulte notamment que les travaux de fin d'études liés au projet prennent un caractère tout à fait unique. Par exemple, les opportunités de voyages (conférence, workshops) et de rencontres (développeurs de CubeSats, experts... Frank De Winne !) à travers le monde sont nombreuses. Les étudiants se révèlent motivés et passionnés, et leurs travaux ont été récompensés par de nombreux prix (Meilleurs Travaux de Fin d'Études, Prix Odissea, Baudouin Elleboudt Award, Prix Wallonie Espace). Pour beaucoup, OUFTI-1 constitue un tremplin vers une carrière dans le secteur spatial ; on retrouve ainsi d'anciens étudiants chez Spacebel, au Centre Spatial de Liège, chez Thales Alenia Space... et même à la NASA !

Sur la voie du lancement

OUFTI-1 a été sélectionné pour être mis en orbite par le nouveau lanceur européen VEGA lors de son vol inaugural. Celui-ci est actuellement prévu pour 2011 et placera OUFTI-1 sur une orbite basse elliptique de 340 x 1450 km, avec une inclinaison de 71°. Huit autres CubeSats universitaires européens seront du voyage, grâce à une initiative de l'Agence Spatiale Européenne (ESA).

L'échéance de VEGA rend le planning très serré ; mais quoi qu'il en soit, l'équipe entière, étudiants comme encadrants, est déterminée à fournir un travail de qualité. Les défis posés par ce petit satellite sont gigantesques, et de nombreuses solutions innovantes ont déjà été développées. La prochaine étape cruciale sera l'interconnexion des sous-systèmes afin d'évoluer vers un prototype fonctionnel, puis vers un modèle de vol qui sera testé au Centre Spatial de Liège.

En trois ans, le projet OUFTI-1 aura touché plus de 40 étudiants, leur permettant de développer les qualités techniques et humaines indispensables aux ingénieurs de demain au travers d'une expérience unique.



Figure 7 : Le nouveau lanceur européen VEGA, qui mettra OUFTI-1 en orbite (Photo : ESA)



Figure 6 : L'équipe OUFTI-1 avec Frank De Winne



Ir. Amandine Denis

est ingénieur civil physicien, orientation techniques spatiales (ULg 2007). Ir. Amandine Denis est Project Manager pour OUFTI-1 au sein du Département d'Aérospatiale et Mécanique de l'ULg.