

# Examen Transmission de l'Information 2018

J.-M Friedt, 15 mars 2018

Connexion internet interdite, téléphones portables interdits, communications interdites, réflexion autorisée.  
Supports de cours à 172.20.133.70

## 1 Dessin sur le spectre radiofréquence

Nous avons vu que l'analyse du spectre du signal émis par une source inconnue est un pré-requis à toute analyse du contenu informatif transmis par cette source. Nous nous proposons d'étudier en détail l'information portée par un signal émis volontairement dans la bande Industrielle Scientifique et Médicale (ISM) qui permet une émission continue tant que la puissance rayonnée est inférieure à 0 dBm. Cette bande comprend la gamme [433,05 ; 434,92 MHz]. Ce signal volontaire est perturbé par une émission parasite à proximité : ce brouilleur est une onde continue ne présentant pas de modulation. Nous ferons l'acquisition du signal à analyser au moyen d'un récepteur de télévision numérique terrestre utilisé comme radio logicielle contrôlée par GNURadio.

1. Quelle est la fréquence du signal modulé émis ?
2. Quelle est la fréquence du signal interférant ne présentant pas de modulation ? Justifier.
3. La modulation sélectionnée pour transmettre une information par le premier signal est une modulation de fréquence : sélectionner le signal à démoduler uniquement (proposer le flux de traitement qui rejette le signal interférant), et le passer dans un démodulateur FM large bande.
4. analyser le signal démodulé dans une bande de  $\pm 30$  kHz en affichant l'évolution temporelle de son spectre au moyen du *waterfall*.
5. Quel est le message transmis ?

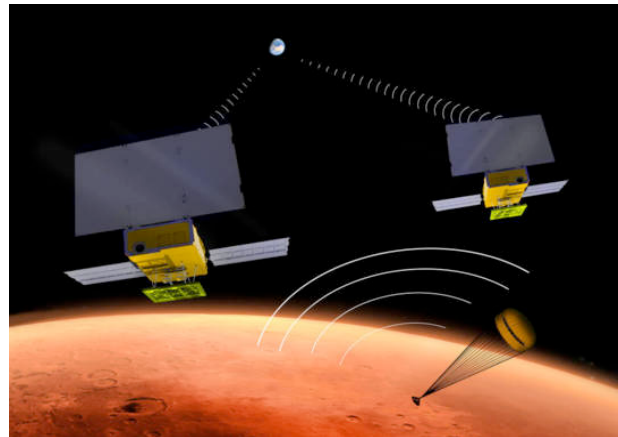
## 2 Bilan de liaison : CubeSat vers Mars

Le numéro de Février 2018 de IEEE Spectrum propose un article sur les antennes déployées sur deux mini-satellites envoyés par le JPL vers Mars, "A mighty antenna from a tiny CubeSat grows" de N.E. Chahat. Dans cet article, annoté par nos soins par les commentaires entre [...], nous apprenons que

*"The MarCO [Mars Cube One] CubeSats are designed to receive data from Insight's entry, descent, and landing using a deployable UHF loop antenna. Each satellite's software-defined radio will then retransmit the data at a higher X-band [8 GHz] frequency for the 160-million-km trip across interplanetary space back to Earth. One of the Deep Space Network [DSN] antennas, which each measure 70 meters across, will receive the data. Given the limited RF output power of the CubeSat radio, the tiny satellite's antenna needs an aperture of 33.5 by 60 cm to establish a reliable radio link at 8 kilobits per second."*

Notre objectif dans l'étude qui va suivre est de valider (ou invalider) les affirmations de cet article.

6. quelles sont les pertes de propagation lors de la liaison entre Mars et la Terre compte tenu des données fournies dans l'article ?
7. Quel est la gain d'antenne au sol ?
8. Quel est le gain d'antenne de l'aéronef, en se rappelant que le numérateur du gain de parabole n'est autre que la surface du réflecteur concentrant l'onde plane incidente vers le foyer ?
9. En déduire le bilan de liaison entre l'émetteur et le récepteur, qui fournit le ratio de la puissance reçue au foyer d'une parabole du DSN à la puissance émise par le CubeSat.
10. Avons nous toutes les informations pour vérifier le débit de communication proposé dans l'article ? si oui, justifier ce débit de communication. Si non, estimer la grandeur manquante et évaluer la pertinence du résultat obtenu.
11. Une alternative à la bande X est de déployer une antenne fonctionnant à 35,75 GHz. En supposant que la forme du paraboloïde de révolution doit respecter la forme idéale à  $\lambda/4$  près, commenter sur la difficulté de réaliser une antenne parabolique sous forme de parapluie capable de se déployer dans l'espace, et ce pour une gamme de températures variant de  $-20^\circ$  à  $+85^\circ$ . On pourra en particulier s'interroger sur le nombre de baleines nécessaires dans la conception du parapluie pour garantir que la forme de la parabole est respectée à  $\lambda/4$  près, sachant que la parabole est conçue pour présenter un diamètre de 50 cm.



**Figure 3.** An artist drawing of the Mars Cube One spacecraft in the operations phase anticipated for the Fall of 2018. MarCO would be positioned about 3500 km above the Martian surface in view of the EDL of the InSight spacecraft and would receive the UHF signal transmitted by InSight to an orbiter then relay it in real time at X-band to the DSN<sup>6</sup>.

**Figure 1:** Illustration extraite de "S. Asmar & S. Matousek, *Mars Cube One (MarCO) – Shifting the Paradigm in Relay Deep Space Operations*, SpaceOps Conferences 16-20 May 2016, Daejeon, Korea". Les grands rectangles gris représentent les antennes permettant la communication avec la Terre (les antennes UHF communiquant avec la surface de Mars sont les petits rectangles jaunes sous les satellites).

## Corrections

1. 434,6 MHz
2. 434,3 MHz
3. Centrer la fréquence de réception (oscillateur local) sur 434,6 MHz, filtre passe-bas puis décimation pour rejeter le signal à 434,3 MHz : une fréquence de coupure de l'ordre de 150 à 200 kHz convient.
4. Le passage du signal filtré et décimé dans un démodulateur FM large bande (WBFM) permet de visualiser le message transmis dans le spectre affiché en mode *waterfall*...
5. ... ce message est évidemment "Hello World"
6. la seule subtilité tient à ne pas se tromper dans l'unité des distances, puisque

$$FSPL = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) - 147,55$$

suppose l'utilisation d'unités SI, donc une distance en mètres (et non en km).  $FSPL = 20 \log_{10}(160 \cdot 10^9) + 20 \log_{10}(8 \cdot 10^9) - 147,55 = 275$  dB

7. Une parabole de diamètre  $D$  présente un gain de  $10 \log_{10} \left( \frac{\pi^2 D^2}{\lambda^2} \right)$  avec  $\lambda = \frac{300}{f_{MHz}} = 300/8000 = 3,75$  cm. Ainsi, une parabole de  $D = 70$  m de diamètre présente un gain de  $G_A = 75$  dB
8.  $G_a \simeq 10 \log_{10} \left( \frac{0,335 \times 0,6}{0,0375^2} \right) \simeq 22$  dB
9. Bilan de liaison donnant le rapport de la puissance reçue au foyer du DSN à la puissance émise par le CubeSat :  $22 + 75 - 275 = -178$  dB
10. Le débit de communication est donné par le rapport signal à bruit dans le théorème de Shannon. Nous connaissons la densité spectrale de bruit thermique induit par le rayonnement thermique de la Terre et du fond cosmologique, mais nous ne connaissons pas la puissance émise par le satellite. Nous pouvons donc prendre le problème à l'envers en cherchant quelle puissance émise permet d'atteindre le débit de communication, connaissant le bilan de liaison calculé ci-dessus.

Si nous reprenons le calcul vu en cours d'une densité spectrale de bruit de  $10 \log_{10}(k_B \cdot T)$  à  $T \simeq 10$  K, nous trouvons  $10 \log_{10}(1,38 \cdot 10^{-23} \times 10 \times 1000) = -189$  dBm/Hz (le dernier 1000 correspondant à la conversion de W en mW). Sachant que le bilan de liaison est de -178 dB et le débit de communication est 8 kb/s, nous en déduisons que la puissance émise  $P_E$  est de l'ordre de  $P_E - 178 = 10 \log_{10}(8000) - 189 \Leftrightarrow P_E = 10 \log_{10}(8000) - 189 + 178 = 28$  dBm ou 700 mW. Ce résultat est proche de l'information fournie dans Wikipedia qui nous informe d'une puissance maximale émise de 5 W! (noter que cette même page nous informe de communications avec les antennes plus petites du DSN avec un diamètre de 34 m, justifiant d'un peu de marge dans le bilan de liaison puisque le gain d'antenne est dans ce cas 69 dB ou une variation par rapport au calcul précédent de 6 dB, soit un facteur 4 qui nous amène à 2,8 W émis).

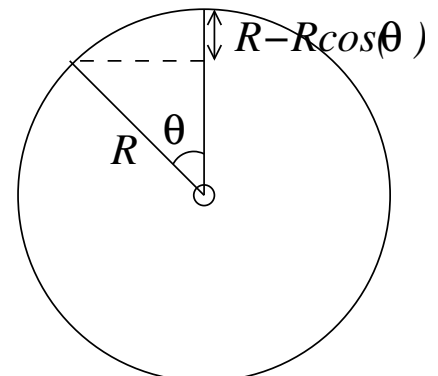
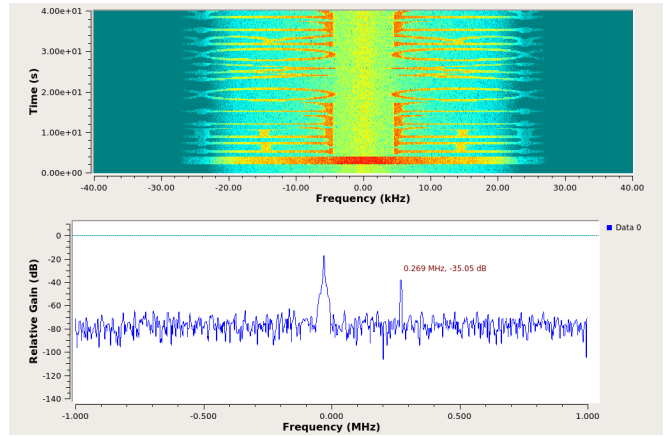
11. Le même article de IEEE Spectrum nous informe de CubeSat dont le RADAR fonctionne à 35,75 GHz avec une antenne parabolique de 50 cm de diamètre. La longueur d'onde à cette fréquence est  $300/35,750=8,4$  mm.

La difficulté de conception d'une antenne est donc de concevoir un parapluie dont la surface s'écarte de moins de 2,1 mm de la position idéale de la surface, et ce quelsoient les gradients thermiques.

À titre d'exemple de la difficulté, le paraboloïde de révolution est approximé par un polygone dont le nombre de sommets est donné par le nombre de baleines du parapluie. Le pire cas est pour une distance égale au rayon, pour lequel l'écart entre le cercle et la droite est donnée par une analyse trigonométrique illustrée ci-contre.

Avec cette illustration, nous observons que l'écart entre la position idéale  $R$  et la position réelle au sommet du cercle  $R \cos(\vartheta)$  est  $R - R \cos(\vartheta)$  avec  $\vartheta$  le demi-angle entre deux baleines successives. Si nous nous imposons que cette différence soit inférieure à  $\lambda/4$ , alors nous constatons que  $\vartheta = \arccos \left( 1 - \frac{2,1 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-2}} \right)$

ou  $\vartheta \simeq 7,5^\circ$ . Ainsi, les baleines sont séparées de  $15^\circ$ , et il faut au total  $360/15 = 24$  baleines. Ce résultat est proche de la solution adoptée par les ingénieurs du JPL de sélectionner un parapluie avec 30 baleines, sachant que nous n'avons pris aucune tolérance pour l'impact des conditions environnementales sur la forme du réflecteur.



**Figure 2:** Illustration de l'écart entre la forme idéale de la parabole et le parapluie utilisé pour réaliser l'antenne.