

# Implémentation du protocole D-STAR sur un transceiver radioamateur classique

Ing. X. WERNER  
Ir N. VETCOUR  
Ir J. PISANE  
GRAMME – Liège

*Actuellement, dans le commerce, seuls les appareils radioamateurs qui y sont spécialement dédiés permettent d'effectuer des communications selon le protocole numérique D-STAR. Or, aucun de ces émetteurs-récepteurs ne permet un pas en fréquence suffisamment fin que pour pouvoir communiquer sans interruption avec un satellite pendant toute la durée de son passage.*

*Cet article a pour objet l'étude et la réalisation de l'implémentation du D-STAR au sein d'un transceiver classique dont le pas de réglage en fréquence est suffisamment fin.*

*Mots-clés : D-STAR, GMSK, radioamateur, OUFTI-1, Doppler, système embarqué, télécommunication.*

*Currently, only the commercial transceivers that are designed to communicate with the D-STAR protocol can do so. But none of them enables a sufficiently fine step in order to have a precise frequency control to communicate with a satellite without interruption during the whole pass of this satellite.*

*The aim of this article is to study and to realize the implementation of the D-STAR protocol on a classic transceiver that has a sufficiently fine step.*

*Keywords: D-STAR, GMSK, ham radio, OUFTI-1, Doppler, embedded system, telecommunications.*

## 1. Introduction

### 1.1 Contexte

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet OUFTI-1 développé par l'Université de Liège. OUFTI-1 est un nano-satellite répondant au standard CubeSat. Il se présente sous la forme d'un cube de 10 cm d'arête. C'est aussi le premier satellite belge entièrement conçu par des étudiants au cours de la dernière année de leur formation d'ingénieur ou d'informaticien.

Trois canaux de communication seront embarqués sur OUFTI-1. Outre une balise de secours et une chaîne AX.25 dédiée à la transmission des télécommandes et des télémétries, le protocole D-STAR sera implémenté et constituera la charge utile principale du CubeSat. Le but est de démontrer l'utilisation d'un tel protocole dans l'espace.

Le protocole D-STAR est un protocole de communication digital de données et de voix utilisé par les radioamateurs. Il contient deux modes de fonctionnement distincts : le mode Digital Data (DD) et le mode Digital Voice (DV).

Le mode DD, présent uniquement sur la bande de fréquences des 23 cm de longueur d'onde, permet l'échange de paquets de données structurées à un débit de 128 kbps. Le mode DV, présent sur les bandes de fréquences des 2 m, 70 cm et 23 cm de longueur d'onde, permet l'échange de données vocales et de données digitales à un débit de 4,8 kbps (3,6 kbps pour la voix et 1,2 kbps pour les données).

OUFTI-1 intègre le mode DV de ce protocole sur les fréquences de 435.045 MHz en montée et 145.950 MHz en descente (fig. 1).

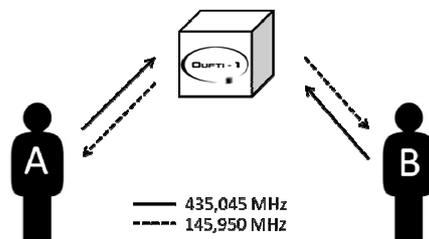


Figure 1: schéma de communication D-STAR via OUFTI-1

## 1.2 Problématique

Le satellite est mis en orbite autour de la Terre à la vitesse de 8 km/s, ce qui provoque un décalage entre la fréquence émise et la fréquence reçue (l'effet Doppler). Cet écart peut se calculer selon la formule suivante :

$$f_{re\grave{c}ue} = f_{\acute{e}mise} \sqrt{\frac{c - v}{c + v}}$$

où  $v$  est la vitesse relative du satellite par rapport à l'observateur terrestre.

L'écart maximum est de 3,9 kHz pour la bande VHF et de 11,6 kHz pour la bande UHF [7].

Il faudrait donc faire légèrement varier la fréquence d'émission pour obtenir la fréquence de réception attendue, et inversement. En pratique, la correction est faite en émission et en réception d'un seul côté de la chaîne, soit à bord du satellite, soit directement chez l'utilisateur.

### *Compensation de l'effet Doppler à bord du satellite*

Une correction de fréquence est prévue à bord du satellite. L'utilisateur désirant communiquer par le satellite peut le réserver via un site internet en indiquant sa localisation exacte. La différence entre la fréquence émise et la fréquence reçue est calculée au sol, de façon à déterminer une série de données qui serviront à paramétrer le satellite. Lors du prochain passage d'OUFTI-1 au dessus de l'Université de Liège, ces commandes lui seront envoyées. L'effet Doppler sera donc invisible pour l'utilisateur à l'origine de la réservation.

Cette solution, déjà traitée antérieurement à l'Université de Liège [1], ne fait pas l'objet de cet article et ne sera pas exposée.

### *Compensation de l'effet Doppler au sol*

L'autre méthode est la compensation de l'effet Doppler par l'utilisateur au sol en faisant légèrement varier ses fréquences d'émission et de réception selon la position du satellite et selon son déplacement.

Il a été démontré par une série de manipulations antérieures que la déviation maximum de fréquence admissible par un appareil commercial (c'est-à-dire

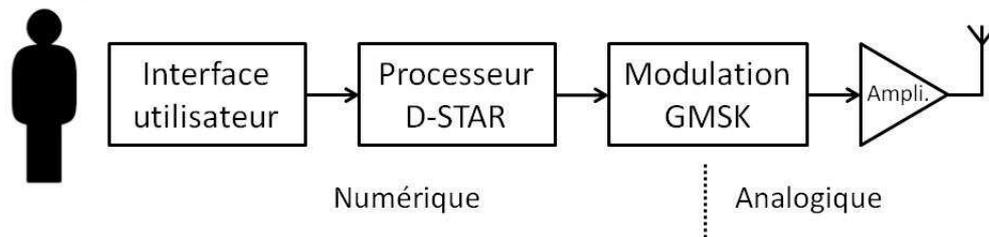
permettant le décodage du signal) est de 1,5 kHz [8]. Or, les transceivers dédiés au D-STAR ne permettent qu'un pas en fréquence de 5 kHz [4], valeur qui s'avère trop élevée pour compenser correctement l'effet Doppler.

Pour contrer ce phénomène, le protocole D-STAR va être implémenté dans un transceiver dont le pas de réglage en fréquence est de 0,1 kHz [3], soit 50 fois plus fin que celui d'un appareil dédié au D-STAR.

Cela induit un décalage maximum de 0,05 kHz, valeur inférieure à la déviation maximum admissible.

### 1.3 Solution envisagée

Le projet peut se diviser en deux grandes parties : d'une part une partie numérique de codage de la trame D-STAR et d'autre part une partie analogique de mise en forme et d'émission de cette trame.



*Figure 2 : Solution envisagée en émission*

La figure 2 présente le schéma de la solution envisagée en émission.

L'utilisateur, au travers d'une interface, stipule les données à envoyer. Ces données sont codées et structurées selon le protocole D-STAR par un processeur, appelé ici « processeur D-STAR ». Les trames D-STAR sont mises en forme et modulées avant d'être amplifiées en puissance et envoyées vers l'antenne.

La réception fonctionne de manière similaire, comme le montre la figure 3.

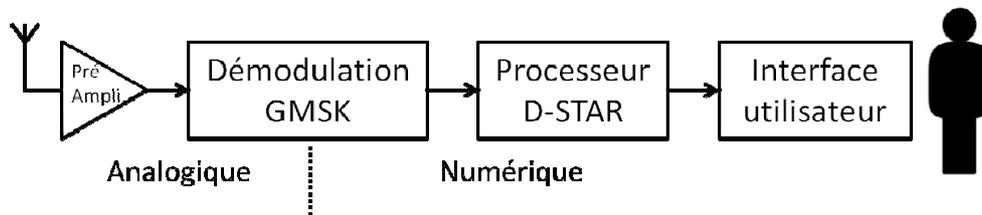


Figure 3 : Solution envisagée en réception

Le signal reçu est démodulé avant d'être décodé par le processeur D-STAR et envoyé vers l'utilisateur au travers d'une interface.

Le système doit pouvoir travailler en full-duplex dans deux bandes de fréquences différentes : l'une pour l'émission et l'autre pour la réception.

Les données sont de deux types : des données digitales (DD), qui constituent un court message, de 20 caractères maximum, composé par l'utilisateur et éventuellement par d'autres données telles que des données GPS qui fournissent des informations sur la localisation de l'émetteur, et des données vocales (DV).

Cet article s'attèle, dans un premier temps, à définir le protocole D-STAR dans ses grandes lignes tant au point de vue de sa structure numérique que de sa modulation. Dans un second temps, les détails de l'implémentation pratique sont exposés.

## 2. Le protocole D-STAR

La partie digitale du protocole D-STAR sera définie tant au niveau de ses charges utiles – provenant de l'utilisateur – que de la structure de ses trames. Cela équivaut, pour l'émission, à définir les éléments de la figure 4. En réception, le principe s'inverse.

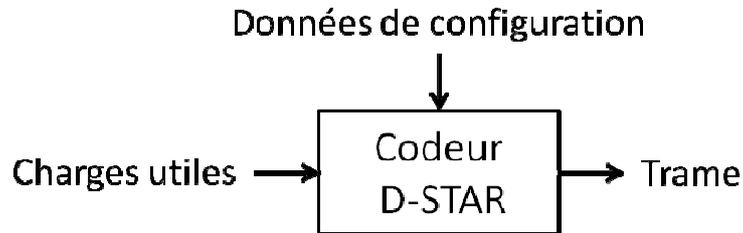


Figure 4 : Codeur D-STAR

Cette analyse en profondeur de la structure des trames et du fonctionnement des algorithmes est indispensable pour maîtriser parfaitement les différentes fonctions de codage et de décodage en vue de les implémenter dans un processeur en langage C.

### 2.1 Charges utiles

Les trames D-STAR véhiculent deux types de charges utiles déterminées par l'utilisateur : un message vocal et d'autres données digitales.

### 2.2 Données de configuration

Les données de configuration, ou *callsigns*, contiennent l'information utile au routage des trames D-STAR à travers le réseau et l'identification des utilisateurs concernés par la communication.

Ces données sont donc très importantes puisque ce sont elles qui guident la trame au travers du réseau D-STAR. De plus, le destinataire les voit apparaître sur son transceiver lors de la réception d'une communication.

Les données de configuration permettent de sélectionner l'un des trois types de communication D-STAR : communication directe, communication par un relais et communication au travers d'internet.

### 2.3 Structure de la trame D-STAR

La trame D-STAR se divise en deux parties : la partie header et la partie de données (fig. 5).

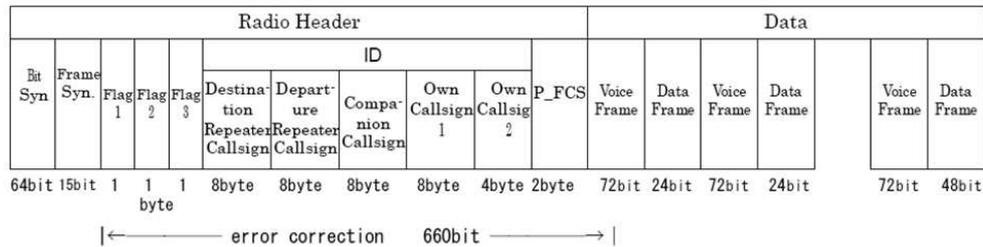


Figure 5 : Structure d'une trame D-STAR [5]

L'en-tête (Radio Header) contient les informations de configuration utiles au routage de la trame dans les relais D-STAR. La partie données (Data) contient les charges utiles. Elle est composée en alternance de données de voix et de données digitales.

## 2.4 Algorithmes de codage

La partie en-tête de la trame passe au travers de plusieurs algorithmes de codage afin de permettre une correction d'erreur à la réception.

### *Convolution*

Le premier algorithme de codage de correction d'erreurs est la convolution.

Chaque bit de la partie à coder du header est codé par plusieurs bits, selon le taux du code convolutif. Dans le cas du D-STAR, ce taux est de 1/2, ce qui signifie que chaque bit sera codé par deux bits selon les polynômes générateurs présentés à la figure 6.

En réception, la déconvolution sera réalisée grâce à l'algorithme de Viterbi. Celui-ci, basé sur les probabilités, permettra la correction d'erreur.

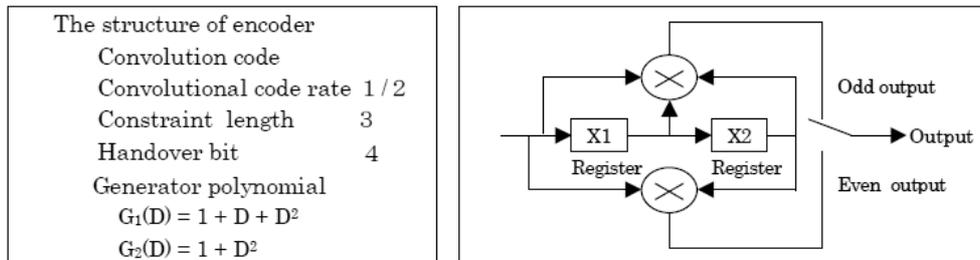


Figure 6 : Schéma de l'algorithme de convolution [5]

### Interleaving

Cette fonction intervient en deuxième lieu. Son rôle est de mélanger les bits afin de diminuer l'influence des erreurs en rafale. Cet objectif est atteint en écrivant les bits dans une matrice colonne par colonne et en les lisant ligne par ligne pour le codage et inversement pour le décodage.

Deux erreurs consécutives lors de la transmission sont donc séparées d'une taille de matrice au moment du décodage.

### Scrambling

Le rôle de ce troisième algorithme est d'éviter de longues séquences de '1' ou de '0' consécutifs, qui risqueraient de désynchroniser le récepteur, en rendant aléatoire la séquence codée. Pour ce faire, la séquence de bits est codée selon le polynôme générateur  $S(x) = x^7 + x^4 + 1$ , schématisé à la figure 7.

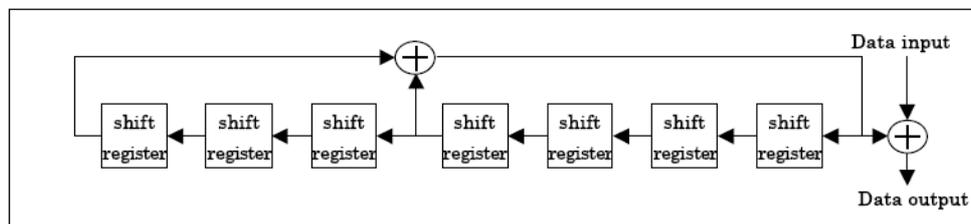


Figure 7 : Schéma de l'algorithme de scrambling [5]

## 2.5 Modulation

La norme D-STAR définit trois types de modulations possibles pour effectuer une communication D-STAR : la GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*), la QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) et la 4FSK (*Four-level FSK*). Les appareils commerciaux et les relais existants fonctionnent exclusivement avec une modulation GMSK. La GMSK est un cas particulier de la modulation FSK (*frequency shift keying*).

Chaque symbole binaire est associé à une fréquence ( $f_1$  et  $f_2$ ), ces deux fréquences sont différentes l'une de l'autre de sorte que :

$$\begin{aligned}f_1 &= f - \Delta f \\f_2 &= f + \Delta f\end{aligned}$$

Le rapport de la différence des fréquences sur le débit est imposé afin de concentrer l'énergie au maximum en une seule fréquence centrale, tel que :

$$0,5 = \frac{f_2 - f_1}{D} = \frac{2\Delta f}{D}$$

De plus, afin de réduire l'importance des lobes secondaires, le signal est filtré. Le filtre appliqué est un filtre à réponse gaussienne. Il est caractérisé par le produit BT, où B représente la fréquence de coupure à -3dB et T la durée d'un bit.

L'inconvénient de ce filtre gaussien est qu'il détériore la qualité du signal émis. L'origine de cette perturbation peut être identifiée en examinant la réponse impulsionnelle d'un filtre gaussien (fig. 8). Elle provient de l'interférence inter-symbole. En effet, les signaux traversant le filtre influencent sa réponse pendant plus d'une période.

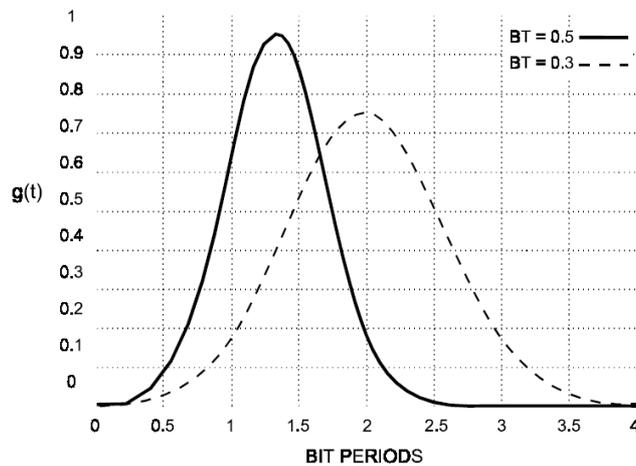


Figure 8 : Réponse impulsionnelle d'un filtre gaussien [2]

Il faut donc faire un compromis entre la résistance au bruit et la largeur de bande occupée. La norme D-STAR utilise un filtre dont le produit BT vaut 0,5.

### 3. Détails de l'implémentation

#### 3.1 Schéma global

Ce paragraphe décrit la solution envisagée pour implémenter le protocole D-STAR et en explique le principe de fonctionnement. Le schéma global en émission est représenté à la figure 9.

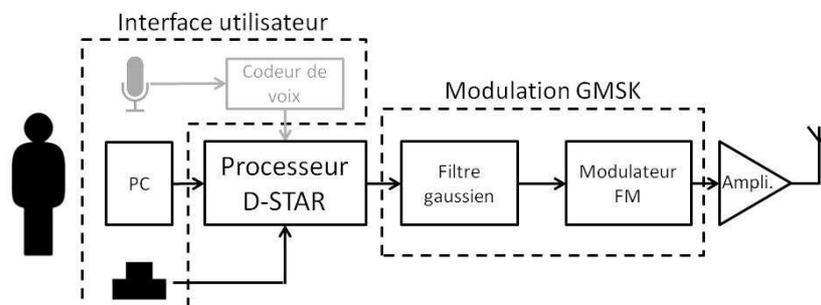


Figure 9 : Principe de fonctionnement en émission

Pour réaliser une émission D-STAR, l'utilisateur donne des ordres à un processeur au travers d'une interface. Ce processeur construit les trames D-STAR et les envoie ensuite vers le modulateur GMSK. Le signal est modulé puis amplifié avant d'être émis via les antennes.

### 3.2 Interface utilisateur

L'interface utilisateur sert d'intermédiaire entre l'homme et le module. Elle permet de transmettre les données utiles vocales et digitales et permet aussi de choisir les données de configuration à utiliser. De plus, elle fournit à l'utilisateur un moyen de déclencher l'émission des trames D-STAR.

Pour les données vocales, un microphone est utilisé en émission et un haut-parleur en réception. Un codeur de voix numérise les données vocales avant de les transmettre au processeur D-STAR. Les données digitales sont transmises par l'intermédiaire d'un ordinateur grâce à un programme spécialement développé en C++ (fig. 10). L'ordre de transmission, quant à lui, est donné par le maintien d'une pression sur un bouton poussoir.

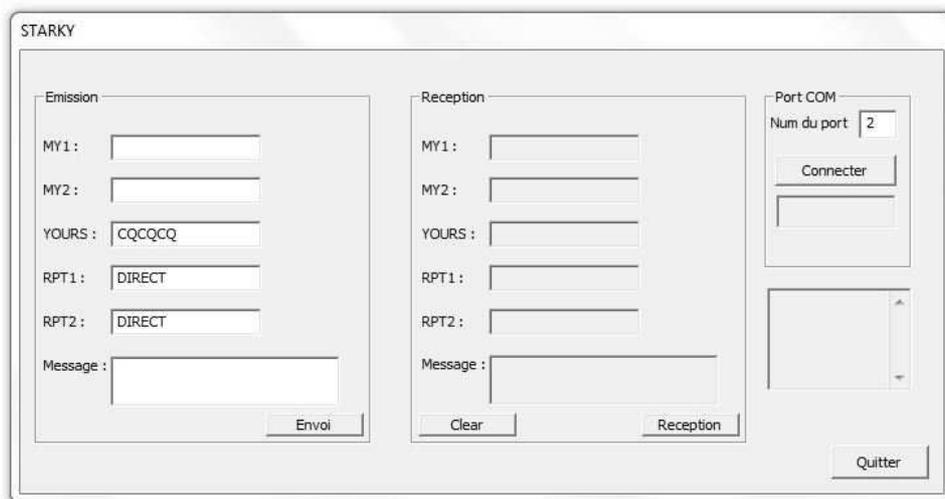


Figure 10 : Programme de l'interface utilisateur

### 3.3 Processeur D-STAR

La figure 11 schématise le fonctionnement du processeur D-STAR en émission.

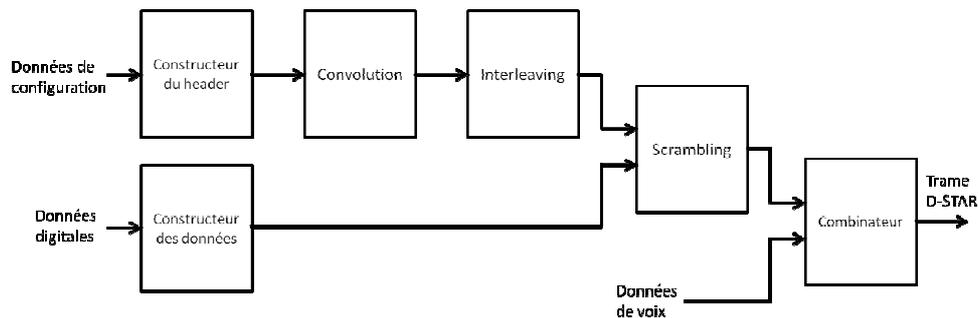


Figure 11: Fonctionnalités du processeur D-STAR en émission

Les données de configuration rentrées par l'utilisateur servent à la construction du header. Le header se compose alors de 328 bits. Ces bits traversent les trois algorithmes de correction d'erreurs décrits précédemment et deviennent 660 bits. Les données digitales, quant à elles, permettent de construire le message qui est brouillé ensuite par l'algorithme de scrambling. Quant aux données de voix, elles proviennent directement d'un codeur de voix.

Ces trois suites de bits sont combinées dans le combineur pour finalement obtenir la trame D-STAR.

Le fonctionnement en réception du processeur est similaire.

En pratique, le processeur D-STAR est implémenté dans un microcontrôleur. Le composant choisi est une plaquette Mbed (Fig. 12). Cette plaquette contient un microcontrôleur NXP LPC1768 haute performance. Le microcontrôleur est cadencé à une fréquence de 96 MHz, ce qui permet de générer et de recevoir sans problème un signal D-STAR dont la fréquence est de 4800 Hz.

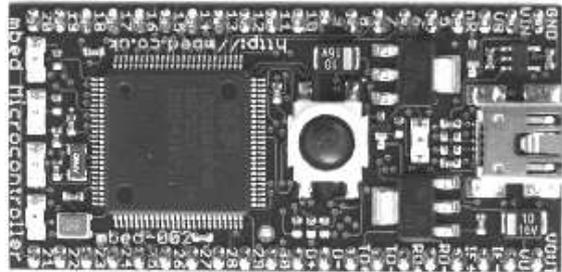


Figure 12 : Plaquette Mbed [6]

### 3.4 Modulation GMSK

En émission, la modulation GMSK est réalisée en trois étapes (fig. 13).

La première étape consiste à coder le signal d'entrée selon le codage en ligne NRZ (*non return to zero*) afin d'obtenir un signal oscillant autour de 0V.

La deuxième étape est l'étape de filtrage. Le signal NRZ passe par un filtre gaussien dont le coefficient BT vaut 0,5. Le signal obtenu après cette étape est un signal GMSK en bande de base, comparable à un signal audio.

La troisième et dernière étape de la modulation GMSK consiste à porter à haute fréquence le signal en bande de base via un modulateur FM.

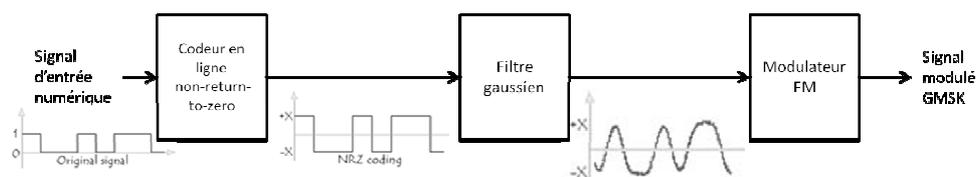


Figure 13 : Principe de la modulation GMSK en émission

En réception, le fonctionnement du démodulateur GMSK est différent (fig. 14). Le signal haute-fréquence est redescendu en bande de base par le démodulateur FM. Ce signal GMSK est ensuite filtré et interprété afin de récupérer les données transmises sous forme d'un signal numérique.

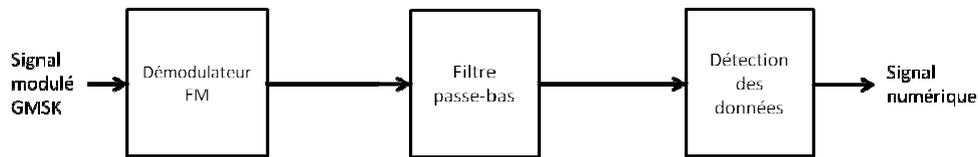


Figure 14 : Principe de la démodulation GMSK en réception

Le composant choisi pour remplir le rôle de modulateur/démodulateur GMSK en bande de base est le circuit intégré CMX589A de chez CML Microcircuit. Ce circuit est en effet utilisé dans les appareils commerciaux. De plus, il s'agit du seul modem GMSK en bande de base actuellement disponible sur le marché. Il permet un fonctionnement full-duplex à un débit compris entre 4 kbps et 200 kbps.

### 3.5 Amplification de puissance

L'amplificateur de puissance se trouve à l'extrémité de la chaîne d'émission et vise, comme son nom l'indique, à fournir de la puissance au signal.

En effet, le codage et la modulation du signal s'effectuent à faible puissance pour favoriser le rendement. Par contre, pour envoyer le signal par voie hertzienne, il est nécessaire de lui fournir une certaine puissance en fonction de l'importance de la distance qui sépare l'émetteur du récepteur et de l'environnement plus ou moins bruité dans lequel ils se trouvent.

Pour la réception, un préamplificateur est utilisé afin de pouvoir écouter des signaux plus faibles en les amplifiant. Le préamplificateur à utiliser doit être de bonne qualité, c'est-à-dire qu'il ne doit pas rajouter de bruit ni introduire de distorsion dans le signal.

En pratique, l'étage de puissance de l'émetteur commercial est utilisé, ainsi que son modulateur FM pour porter le signal GMSK en bande de base à haute fréquence. De plus, cela offre l'avantage de régler la fréquence d'émission ou de réception directement sur le transceiver comme pour une communication classique. L'objectif de réglage fin de la fréquence est donc atteint.

## 4. Tests et résultats

Différents tests ont été réalisés sur les éléments qui composent la chaîne de télécommunication. Ces tests, qui confirment la réalisation des objectifs, s'articulent en trois temps. En premier lieu, le bon fonctionnement des éléments pris indépendamment les uns des autres est vérifié. Dans un deuxième temps, ces éléments sont connectés entre eux. Et pour terminer, un test de la chaîne complète de communication est réalisé.

### 4.1 Tests sur les éléments unitaires

Ces tests permettent de vérifier que le comportement de chaque entité correspond bien à celui attendu. Cela regroupe entre autres le codage et le décodage d'une trame D-STAR à partir des données fournies par l'utilisateur et les caractéristiques des gaussiennes en bande de base.

#### *Processeur D-STAR*

Les tests sur le processeur D-STAR s'organisent en deux étapes. La première de ces étapes consiste à vérifier le fonctionnement des algorithmes de codage et de décodage de la trame D-STAR, la seconde consiste à tester l'envoi d'une trame.

Il est évident que les fonctions de codage et décodage sont des fonctions réciproques. Une trame est donc générée à partir des données fournies par l'utilisateur avant d'être directement décodée afin de retrouver ces mêmes données.

Ce test à lui seul ne permet cependant pas de valider le fonctionnement correct des algorithmes mais simplement de vérifier la réciprocity des fonctions. Pour en vérifier l'exactitude, une trame codée a été comparée bit à bit avec une autre trame codée à partir des mêmes données dans la carte COM d'OUFTI-1, dont le fonctionnement a déjà été validé. Le résultat est identique.

#### *Modem GSMK*

La trace de la figure 15 représente une gaussienne à la sortie du modem GSMK en bande de base. La durée de celle-ci est approximativement de 450  $\mu$ s. Cette durée correspond à 2,16 temps de bits. Par conséquent, le produit BT est égal à 0,5 (fig. 8).

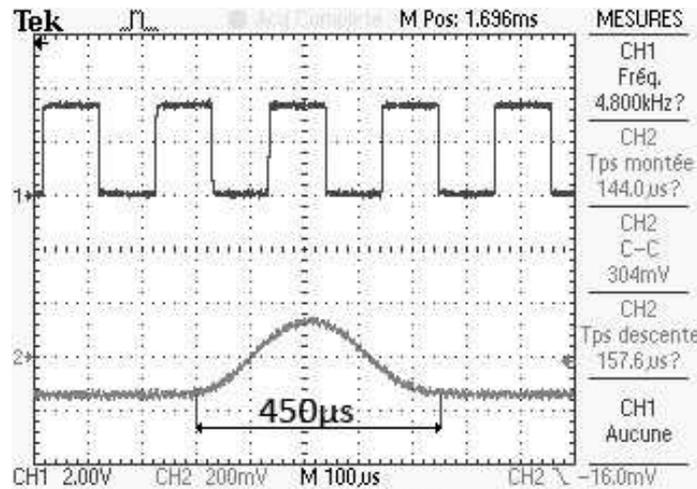


Figure 15 : Réponse du filtre gaussien

## 4.2 Interconnexion d'éléments unitaires

Ces tests permettent de vérifier, à différents endroits de la chaîne, que les caractéristiques du signal émis ou reçu correspondent à celles attendues.

### *Sortie analogique du modem GMSK en bande de base*

Ce test vérifie le comportement du modem lorsqu'une trame émise par le microcontrôleur le traverse.

La trace 1 (trace supérieure, en gris foncé) de la figure 16 représente le train de bits à l'entrée du modem GMSK et la trace 2 (trace inférieure, en gris clair), le signal analogique de sortie.

Le signal attendu est une suite de gaussiennes sans interférence inter-symbole entre elles.

Le signal analogique observé correspond bien au signal attendu.

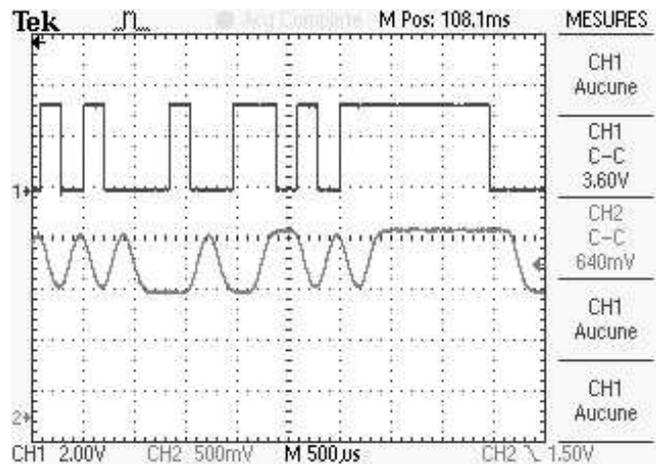


Figure 16 : Sortie analogique du modem GMSK

### Sortie haute-fréquence du transceiver

Le but de ce test est de vérifier la largeur de bande du signal GMSK émis par le transceiver lorsque celui-ci est commandé par le module D-STAR développé. Les tests ont été réalisés aux fréquences qui seront utilisées par OUFTE-1 (UHF et VHF).

La figure 17 montre le spectre obtenu pour respectivement les fréquences de 145,950 MHz et de 435,045 MHz.

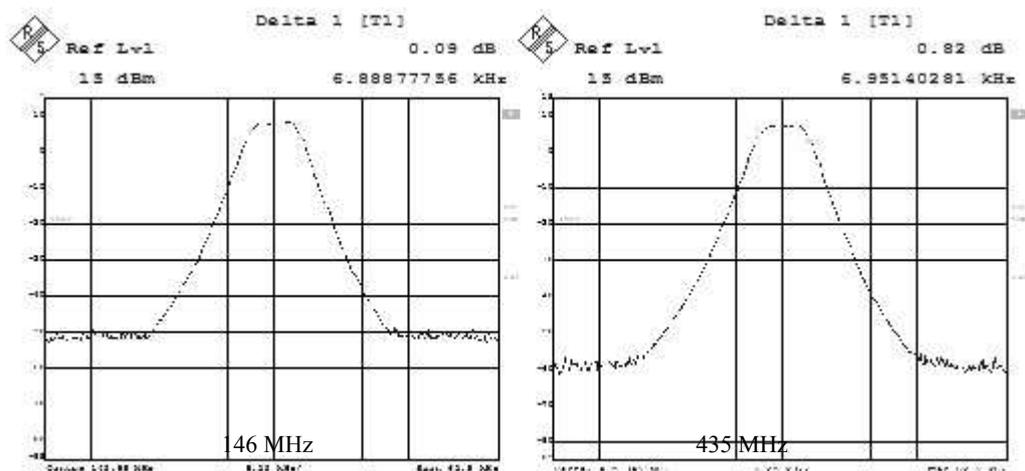


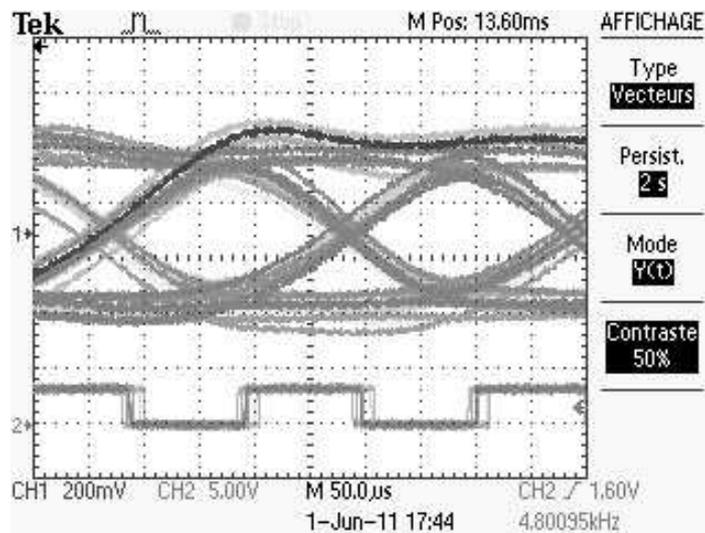
Figure 17: Largeur de bande du signal GMSK

La largeur de bande mesurée est de 6,89 kHz pour la bande de fréquence VHF et de 6,95 kHz pour la bande UHF.

Ces valeurs sont légèrement supérieures à la valeur de 6,25 kHz attendue. Ceci est dû au fait que l'indice de modulation du modulateur FM du transceiver n'est pas exactement de 0,5.

### ***Sortie du signal en bande de base du transceiver***

La figure 18 représente le diagramme de l'œil en réception à la sortie du transceiver. Ce diagramme résulte de l'observation du signal GMSK en bande de base reçu en synchronisant l'oscilloscope sur le débit. Pour réaliser cette synchronisation, l'horloge de réception du modem GSMK sera utilisée puisqu'elle est l'image du débit binaire.



*Figure 18 : Diagramme de l'œil*

Le diagramme obtenu est bon : l'œil est grand ouvert et la synchronisation a lieu aux extrema du signal. Les légères variations qui apparaissent sont dues au bruit lors de la transmission.

### 4.3 Tests sur la chaîne de télécommunication complète

Le D-STAR permet d'effectuer trois types de communications : la communication directe, la communication par un relais et celle au travers d'internet.

Toutes ces communications ont été testées, en conditions réelles, et fonctionnent. La figure 19 montre l'écran d'un appareil D-STAR commercial lorsque celui-ci reçoit une trame envoyée avec le module développé.



Figure 19 : Ecran LCD de l'IC-2820

## 5. Conclusions

Le nano-satellite OUFTI-1 possède à son bord une correction de l'effet Doppler. Une deuxième correction peut aussi être effectuée au niveau du relais D-STAR terrestre. Cependant, il n'en reste pas moins avantageux de pouvoir corriger cet effet directement chez l'utilisateur. Cette correction peut se faire via l'implémentation du protocole D-STAR sur un transceiver usuel. Cette solution permet également de tester la correction de l'effet Doppler à bord du satellite avant son lancement. En effet, si l'on possède un moyen de faire varier par pas très fin la fréquence de réception ou d'émission d'un transceiver, il sera possible de simuler les conséquences dues au déplacement du nano-satellite, alors qu'en reproduire les causes est beaucoup plus complexe.

Pour réaliser cette implémentation, il est évident qu'une connaissance approfondie du protocole D-STAR est indispensable. Son mode DV, seul mode supporté par le nano-satellite, a donc été étudié. La charge utile qu'est le message utilisateur a, elle aussi, été analysée en profondeur. Cela n'avait jamais été réalisé auparavant dans le cadre du projet OUFTI-1.

Dès lors, les différents algorithmes ont pu être implémentés en langage C de manière à ce qu'ils puissent être exécutés sur un microcontrôleur. Ces algorithmes regroupent à la fois les fonctions de construction de trames et d'interprétation des trames reçues, et les fonctions de détection d'erreurs (convolution, interleaving et scrambling).

Une fois la partie numérique du protocole opérationnelle, le circuit de modulation du signal en GMSK a été réalisé. Pour ce faire, en émission, le train de bits traverse un filtre gaussien. Le signal GMSK en bande de base obtenu est alors porté à haute fréquence par le modulateur FM du transceiver classique. En réception, le signal GMSK en bande de base est obtenu par le passage du signal reçu dans le démodulateur FM du transceiver. Ce signal en bande de base est interprété afin d'en dégager les données. Le passage par le modem FM du transceiver permet d'utiliser l'interface de ce dernier pour régler la fréquence et profiter de son étage de puissance.

L'implémentation terminée, le module a été testé avec succès pour les différents types de communication (en direct, par un relais et au travers d'internet). A présent, il est donc possible d'effectuer des communications D-STAR en full-duplex à l'aide d'un transceiver classique (IC-910H).

## 6. Sources

- [1] CROSSET Nicolas, *Implémentation du relais D-STAR à bord du nanosatellite OUFTI-1*  
Liège, Institut Gramme, mémoire inédit, 2010.
- [2] HENRARD Renaud, *Réalisation du système de télécommunication du satellite OUFTI-1*  
Liège, HEPL ISIL, mémoire inédit, 2009.
- [3] ICOM Inc. *Dual band FM transceiver IC-910H*  
Instruction Manual, 2002.
- [4] ICOM Inc. *Dual band FM transceiver IC-E2820*  
Instruction Manual, 2007.
- [5] *Japan Amateur Radio League, Inc. D-STAR System*  
D-STAR protocol.

- [6] *Mbed, Rapid Prototyping for Microcontrollers*  
Adresse URL : <http://mbed.org>
- [7] MELCHIOR Julien, *Réalisation d'un convertisseur de fréquence pilotable dans le cadre du projet OUFTI-1*  
Liège, HEPL ISIL, mémoire inédit, 2011.
- [8] PISANE Jonathan, *Design and implementation of the terrestrial and space telecommunication elements of the student nanosatellite of the University of Liege*  
Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 2008.
- [9] WERNER Xavier, *Implémentation du protocole D-STAR sur un transceiver radioamateur classique*  
Liège, Institut Gramme, mémoire inédit, 2011.