Système de Communication du CubeSat 1U

# Exigences Détaillées du Sous-Système de Communication

Voici les exigences sous forme de tableau :

| **ID** | **Exigence** | **Description** |
| --- | --- | --- |
| **1. Exigences Fonctionnelles** | | |
| REQ-COM-01 | Transmission des télémesures | Envoi des télémesures vers la station sol avec un débit minimum de 1 kbps. |
| REQ-COM-02 | Réception des commandes | Latence de réception des commandes inférieure à 2 secondes. |
| REQ-COM-03 | Protocole de communication | Compatible avec AX.25, CSP ou standards CCSDS. |
| REQ-COM-04 | Redondance logicielle | Prévention des pertes critiques de communication. |
| REQ-COM-05 | Fréquence de communication | Utilisation des bandes UHF (435-438 MHz) et/ou VHF (144-146 MHz). |
| REQ-COM-06 | Modulation | Utilisation de BPSK, QPSK, FSK, GMSK selon les conditions. |
| REQ-COM-07 | Gestion de l’effet Doppler | Support du décalage Doppler dû à la vitesse orbitale. |
| REQ-COM-08 | Correction d’erreur | Implémentation de FEC, CRC ou Reed-Solomon. |
| REQ-COM-09 | Sécurité des commandes | Authentification des commandes critiques. |
| REQ-COM-10 | Gestion des interférences | Détection et mitigation des interférences radio. |
| **2. Exigences Matérielles** | | |
| REQ-COM-11 | Puissance d’émission | Réglable entre 100 mW et 2 W. |
| REQ-COM-12 | Facteur de bruit du récepteur | Inférieur à 3 dB. |
| REQ-COM-13 | Interface de communication | Compatible I2C, SPI, UART ou CAN. |
| REQ-COM-14 | Déploiement des antennes | Système d’antennes repliables au lancement et déployables en orbite. |
| REQ-COM-15 | Gain d’antenne | Optimisation pour un SNR suffisant (>10 dB). |
| REQ-COM-16 | Orientation des antennes | Assurer une couverture continue en fonction de la rotation du CubeSat. |
| **3. Exigences de Performance** | | |
| REQ-COM-17 | Sensibilité du récepteur | Inférieure à -120 dBm pour assurer la réception des signaux faibles. |
| REQ-COM-18 | BER de la liaison montante | Inférieur à 10⁻⁵. |
| REQ-COM-19 | Puissance d’émission en descente | Assurer un SNR minimal de 6 dB à la station sol. |
| REQ-COM-20 | Débit de transmission | Adaptable entre 1 et 19.2 kbps. |
| **4. Exigences Environnementales** | | |
| REQ-COM-21 | Température de fonctionnement | Entre -40°C et +85°C. |
| REQ-COM-22 | Résistance aux radiations | Protection contre les radiations spatiales et les interférences électromagnétiques. |
| REQ-COM-23 | Consommation énergétique | Maximum 2 W en émission et 0.5 W en réception. |
| **5. Exigences d’Intégration et de Vérification** | | |
| REQ-COM-24 | Tests en environnement simulé | Vérification dans des conditions orbitales (chambre anéchoïque, tests RF). |
| REQ-COM-25 | Compatibilité avec la station sol | Validation des liaisons radio avant le lancement. |
| REQ-COM-26 | Déploiement des antennes | Test en conditions de vibration et de vide thermique. |

# Liste Préliminaire des Composants Envisageables pour le Sous-Système de Communication d’un CubeSat 1U

| **Catégorie** | **Composant** | **Modèle/ Référence** | **Caractéristiques Principales** |
| --- | --- | --- | --- |
| **Émetteur-Récepteur (Transceiver)** | UHF/VHF Transceiver | **ISIS TRXUV** | Full-duplex, 1200-9600 bps, protocole AX.25, faible consommation. |
| SDR (Software Defined Radio) | **Ettus USRP B205mini** | Large bande de fréquence, modulation adaptable, compatible GNU Radio. |
| Radio définie par logiciel embarquée | **LimeSDR Mini** | Supporte VHF/UHF, modulation adaptable, interface USB. |
| **Antenne** | Antenne UHF | **ISIS Deployable Antenna System** | Déploiement automatique, gain optimisé, faible encombrement. |
| Antenne patch | **Haigh-Farr 4106** | Antenne directionnelle compacte, gain moyen. |
| Antenne hélicoïdale | **STENSAT UHF Helix** | Gain élevé, robuste aux interférences. |
| **Processeur/ Interface** | MCU pour gestion radio | **STM32H7** | Faible consommation, compatible SPI/I2C/UART. |
| FPGA pour traitement du signal | **Xilinx Zynq-7000** | Intégration processeur ARM et logique programmable, modulation avancée. |
| **Amplificateur RF** | Amplificateur de puissance UHF | **Mini-Circuits ZHL-42W** | Puissance de sortie jusqu'à 2 W, faible bruit. |
| LNA (Low Noise Amplifier) | **Mini-Circuits ZX60-33LN** | Réduction du bruit en réception, gain élevé. |
| **Filtrage et Duplexage** | Duplexeur UHF/VHF | **Doris RF Duplexer** | Séparation des signaux montants et descendants, faible perte d’insertion. |
| Filtre passe-bande | **MuRata SAW Filter** | Réduction des interférences hors bande. |
| **Correction d’Erreur et Sécurité** | Encodeur/Décodeur FEC | **Reed-Solomon RS(255,223) - FPGA implémentation** | Correction d'erreur avancée, standard CCSDS. |
|  | Module d’authentification | **TPM Infineon SLB9670** | Sécurisation des commandes critiques. |

**Comparaison des Options en Termes de Performances, Coût et Compatibilité**

| **Option** | **Performance** | **Coût (€)** | **Compatibilité** |
| --- | --- | --- | --- |
| **ISIS TRXUV** | Fiable, faible consommation, full-duplex | ~5000 € | Compatible CubeSat, UART/I2C |
| **Ettus USRP B205mini** | Large bande, flexible, modulation adaptable | ~1200 € | Compatible GNU Radio, USB |
| **LimeSDR Mini** | SDR compact, modulation avancée | ~300 € | USB, compatible CubeSat mais exigeant en énergie |
| **ISIS Deployable Antenna** | Gain optimisé, déploiement fiable | ~2000 € | Compatible CubeSat, UHF |
| **Haigh-Farr 4106** | Compacte, directionnelle | ~1500 € | VHF/UHF, nécessite alignement précis |
| **Mini-Circuits ZHL-42W** | Amplification stable, faible bruit | ~700 € | Compatible CubeSat, RF |
| **STM32H7** | Faible consommation, bon traitement radio | ~15 € | I2C, SPI, UART, facile à intégrer |
| **Xilinx Zynq-7000** | Haute performance, modulation flexible | ~500 € | Exigeant en énergie, performant |
| **Reed-Solomon RS(255,223)** | Correction d’erreur avancée | Implémentation FPGA | Compatible CubeSat, CCSDS |

✅ **Choix recommandés** :

* **Transceiver** : **ISIS TRXUV** pour sa fiabilité et compatibilité standard CubeSat.
* **Antenne** : **ISIS Deployable Antenna** pour son gain optimisé et son intégration facile.
* **Traitement du signal** : **STM32H7** pour un bon compromis performance/consommation, ou **Zynq-7000** pour plus de flexibilité.
* **Sécurité & Correction d’erreur** : **Reed-Solomon RS(255,223)** pour la correction avancée.

# Stratégie d’Intégration et de Tests

**1. Intégration Matérielle**

1. **Assemblage des composants** :
   * Montage du transceiver avec les interfaces de communication du CubeSat.
   * Connexion des antennes avec le sous-système RF (amplificateur, filtre).
   * Intégration du processeur et FPGA pour la gestion du signal et du protocole.
2. **Tests préliminaires (au sol)** :
   * **Test de connectivité** : Vérification des interfaces (UART, I2C, SPI).
   * **Test de puissance** : Mesure de la consommation énergétique et ajustement des paramètres RF.
   * **Test de transmission** : Vérification du signal RF émis et reçu avec une station sol simulée.

**2. Validation Fonctionnelle**

* **Test en environnement radio réel** :
  + Mesure du débit, du BER et de la latence avec la station sol.
  + Simulation du Doppler shift pour valider la robustesse de la liaison.
* **Tests de compatibilité avec la mission** :
  + Validation des protocoles de communication (AX.25, CCSDS).
  + Tests d’intégrité des commandes envoyées.

**3. Tests Environnementaux**

1. **Test thermique** :
   * Vérification du fonctionnement à **-40°C à +85°C** en chambre climatique.
2. **Test de vibration** :
   * Simuler les conditions de lancement avec un vibrateur mécanique.
3. **Test en chambre anéchoïque** :
   * Vérifier l’efficacité de l’émission et la sensibilité du récepteur en condition radio réelle.
4. **Test de déploiement des antennes** :
   * Vérifier le bon fonctionnement du mécanisme de déploiement en conditions orbitales simulées.

**4. Tests en Opération Réelle (Post-Lancement)**

* Vérification des premiers signaux du CubeSat en orbite.
* Ajustement des paramètres RF si nécessaire.
* Suivi continu du système de communication et correction des anomalies.

# ✅ Résumé des Étapes Clés

1. **Sélection des composants** en fonction des performances, coût et compatibilité.
2. **Assemblage et tests unitaires** (connectivité, puissance, transmission).
3. **Validation fonctionnelle** (liaison radio, correction d’erreur, sécurité).
4. **Tests environnementaux** (thermique, vibration, chambre anéchoïque).
5. **Tests post-lancement** pour assurer la fiabilité du système.

Avec cette approche, on garantit une communication robuste et efficace entre le CubeSat et la station sol. 🚀

4o