

Projet Ingénieur 4e année – Système LoRa pour communication en milieu souterrain

1. Contexte et objectifs généraux

Les opérations en milieu souterrain (spéléologie, tunnels, ouvrages enterrés, galeries techniques, interventions de secours) posent des contraintes extrêmes sur les communications radio :

- propagation fortement atténuée et imprévisible,
- absence d'infrastructure existante,
- environnement évolutif au fil de la progression,
- exigence de fiabilité élevée, voire critique pour la sécurité.

Les technologies radio longue portée et bas débit, telles que LoRa, constituent une solution potentielle, à condition d'être intégrées dans une architecture réseau spécifiquement conçue pour ces milieux contraints.

Objectif du projet

L'objectif de ce projet est de concevoir et implémenter un système de communication LoRa pour milieu souterrain, reposant sur le déploiement progressif de nœuds relais autonomes, garantissant :

- une transmission fiable de bout en bout entre un nœud de départ et un nœud d'arrivée,
- une détection explicite de la limite de portée entre deux nœuds consécutifs,
- un déploiement incrémental du réseau au fil de la progression dans la cavité,
- une interface utilisateur simple et robuste sur smartphone,
- une architecture linéaire, extensible ultérieurement vers une topologie arborescente.

2. Périmètre fonctionnel

2.1 Principe général

Le système est constitué de :

- un nœud de départ (entrée de la cavité),
- un nœud d'arrivée (équipe en progression),
- un ensemble de nœuds intermédiaires relais, déployés au fur et à mesure.

Les communications suivent une chaîne de nœuds LoRa, chaque nœud relayant les messages vers le suivant.

La priorité absolue est donnée à la fiabilité des transmissions, au détriment du débit et de la latence.

2.2 Types de messages

Le système doit supporter au minimum :

- messages texte courts (type SMS),
- messages d'alerte prioritaire,
- messages de supervision réseau (état des liens, portée, insertion des nœuds).

Les messages d'alerte doivent être :

- propagés à tous les nœuds,

- signalés visuellement (LED rouge) et côté utilisateur (son + vibration).

3. Architecture réseau et logique de communication

3.1 Topologie

- Architecture linéaire obligatoire :
 - Nœud 0 : départ
 - Nœud N : arrivée
 - Nœuds 1 à N-1 : relais
- Une évolution vers une architecture arborescente devra être envisagée conceptuellement.

Chaque nœud connaît :

- son prédécesseur,
- son successeur,
- l'état du lien radio avec ses voisins directs.

3.2 Détection de la limite de portée

Le système doit être capable de détecter de manière fiable :

- la dégradation du lien LoRa (RSSI, SNR, taux de pertes, délais),
- l'approche de la limite de portée opérationnelle.

Lorsque cette limite est atteinte :

- le nœud d'arrivée doit avertir l'utilisateur (smartphone),
- l'utilisateur sait qu'il doit déployer un nouveau nœud relais.

4. Nœuds du système

4.1 Nœuds de départ et d'arrivée

Caractéristiques :

- module LoRa sur étagère,
- connexion Bluetooth à un smartphone,
- alimentation rechargeable.

Fonctionnalités côté smartphone :

- envoi / réception de messages texte,
- envoi / réception d'alertes (son + vibration),
- affichage de l'état du lien (OK / limite de portée atteinte),
- interface volontairement minimale et robuste.

4.2 Nœuds intermédiaires

Caractéristiques matérielles :

- module LoRa autonome,
- batterie rechargeable,
- un seul bouton (mise sous tension),
- une LED multicolore.

Comportement attendu :

- à l'allumage, le nœud :
 - analyse l'état du réseau existant,
 - s'insère automatiquement comme relais,
 - confirme son insertion.

4.3 États de la LED

- Éteinte : nœud hors tension
- Allumée (couleur neutre) : nœud sous tension, non inséré
- Allumée (couleur validée) : nœud inséré dans le réseau
- Rouge (tous les nœuds) : alerte active

5. Fiabilité, robustesse et sécurité

Le système doit garantir :

- une livraison fiable de bout en bout (acknowledgements, retransmissions),
- l'absence de perte silencieuse de messages,
- la priorisation absolue des alertes,
- une continuité de service malgré :
 - pertes radio,
 - redémarrage d'un nœud intermédiaire.

Les étudiants devront :

- concevoir un protocole applicatif au-dessus de LoRa,
- justifier les mécanismes de fiabilité retenus.

6. Contraintes et limites

- Propagation radio fortement défavorable et variable
- Débit très limité
- Latence potentiellement élevée
- Consommation énergétique contrainte
- Simplicité d'usage critique (situation réelle de terrain)

Ces contraintes doivent être explicitement intégrées à la conception.

7. Travail attendu

7.1 Livrables

- Code source embarqué (nœuds LoRa)
- Code de l'application smartphone (ou prototype fonctionnel)
- Documentation technique (réseau, protocoles, choix)
- Documentation utilisateur simplifiée
- Schémas d'architecture matérielle et logicielle
- Documentation de la gestion de projet
- Rapport final

7.2 Démonstration

- Démonstration sur une chaîne réelle de nœuds
- Simulation de déploiement progressif
- Mise en évidence de la limite de portée
- Déclenchement et propagation d'une alerte

8. Évolutions possibles (bonus)

- Topologie arborescente
- Redondance de chemins
- Estimation automatique de la distance entre nœuds
- Cartographie approximative du réseau
- Chiffrement des communications
- Intégration de capteurs (gaz, température, mouvement)

9. Compétences mobilisées

- Réseaux radio bas débit
- Propagation et mesures radio
- Protocoles de communication fiables
- Systèmes embarqués
- Développement mobile
- Conception orientée sécurité
- Travail en équipe projet / gestion de projet

10. Organisation du projet

- Équipe de 2 à 5 étudiants
- Durée indicative : 8 à 12 semaines
- Travail en mode projet (jalons, revues, démonstrations intermédiaires)