

COURS TRANSMISSION FH

1. Introduction aux Faisceaux Hertiens

1.1 Définition et généralités

Un faisceau hertzien (FH) est une liaison radioélectrique point à point qui utilise des ondes radio hautement directives pour transmettre de l'information.

- C'est une liaison bidirectionnelle (émission \leftrightarrow réception).
- On l'appelle aussi pont radio (*microwave link* en anglais).
- Il sert principalement à transporter de grandes capacités de données (voix, Internet, vidéo, etc.) sur des distances allant de quelques kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres.

1.2 Historique et évolution

- Années 1950-70 : FH analogiques utilisés pour la téléphonie longue distance et les liaisons télévisées.
- Années 1980-90 : Passage progressif au numérique, permettant plus de capacité et de fiabilité.
- Depuis 2000 : Explosion des besoins avec la 3G, 4G et 5G, où les FH sont devenus essentiels pour relier les antennes de téléphonie mobile aux réseaux principaux (backhaul).

1.3 Domaines d'application

a) Backhaul/Collecte

- Relier les stations de base mobiles (BTS, eNodeB, gNodeB) au cœur de réseau.
- Ex : liaison entre une antenne 4G isolée et le centre de commutation.

b) Accès

- Fournir une connectivité Internet dans des zones rurales ou montagneuses où la fibre est difficile à déployer.

c) Liaisons d'entreprise

- Interconnexion sécurisée de deux sites distants d'une société (ex : siège \leftrightarrow usine).

d) **Secours et redondance**

- Alternative aux fibres optiques pour maintenir un service en cas de coupure.
- Utilisé dans les réseaux critiques (énergie, santé, armée).

2. Principes de la Transmission et de la Propagation

2.1 Spectre électromagnétique

- Les FH utilisent des bandes de fréquence entre 1 GHz et 86 GHz (bande SHF et EHF).
- Exemples :
 - 6–13 GHz : longues distances.
 - 15–23 GHz : urbain, distances moyennes.
 - 38–86 GHz : petites cellules, backhaul 5G.

2.2 Théorie de la propagation

a) **Ligne de vue (LOS - Line Of Sight)**

- Condition essentielle : il faut un **chemin dégagé** entre les deux antennes.
- Si des obstacles bloquent la LOS, la liaison FH est compromise.

b) **Ellipsoïde de Fresnel**

- Zone en forme de ballon entourant le chemin direct entre émetteur et récepteur.
- Pour assurer une bonne qualité, au moins **60 % du premier ellipsoïde de Fresnel** doit être libre d'obstacles.

c) **Facteur K**

- Tient compte de la **courbure de la Terre** et de la réfraction atmosphérique.
- $K = 4/3$ en moyenne, ce qui "aplatit" la courbure terrestre et améliore la portée.

2.3 Phénomènes de propagation

• **Atténuations**

- **Espace libre** : puissance reçue diminue avec la distance.
- **Pluie / brouillard** : pertes importantes surtout > 10 GHz.
- **Végétation** : absorption du signal.

- **Évanouissements (fading)**
 - Fluctuations rapides du signal reçu.
 - Causes : multi-trajets, diffraction, réfraction.
 - Deux types :
 - **Sélectif** (n'affecte qu'une partie de la bande).
 - **Non sélectif** (toute la bande est impactée).
- **Réflexions et multi-trajets**
 - Le signal peut arriver par plusieurs chemins → interférences constructives ou destructives.

3. Composants et Architecture d'un Faisceau Hertzien

3.1 Structure d'une liaison FH

- **ODU (Outdoor Unit)**
 - Installé près de l'antenne.
 - Conversion fréquence intermédiaire \leftrightarrow RF, amplification.
- **IDU (Indoor Unit)**
 - Installé dans le local technique.
 - Multiplexage, modulation/démodulation, correction d'erreurs.
- **Antennes**
 - Paraboliques hautement directives (diamètre de 0,3 à 3 m).
- **Feeder**
 - Guide d'onde ou câble coaxial reliant antenne \leftrightarrow ODU.

3.2 Technologies de transmission

1. Modulation

- Adaptation du signal numérique en onde porteuse analogique.
- Exemple : **QAM (Quadrature Amplitude Modulation)** → combine amplitude et phase.

2. FEC (Forward Error Correction)

- Codes correcteurs d'erreurs (ex : Reed-Solomon, Turbo Codes).
- Améliore la fiabilité sans retransmission.

3. Hot Stand-By (1+1)

- Deux chaînes FH en parallèle.
- Si l'une tombe en panne, l'autre prend immédiatement le relais.

4. Ingénierie et Planification d'une Liaison FH

4.1 Calcul de bilan de liaison

Équation de base :

$$P_{\text{recue}} = P_{\text{emise}} + G_{\text{emetteur}} + G_{\text{recepteur}} - L_{\text{propagation}} - L_{\text{divers}}$$

- P_{recue} : Puissance reçue [dBm]
- P_{emise} : Puissance émise par l'émetteur [dBm]
- $G_{\text{emetteur}}, G_{\text{recepteur}}$: Gain des antennes [dBi]
- $L_{\text{propagation}}$: Pertes espace libre [dB]
- L_{divers} : Pertes pluie, câbles, connecteurs, etc. [dB]

4.2 Définition des marges

Lorsqu'on dimensionne une liaison par faisceau hertzien, on ne se contente pas de calculer la puissance reçue théorique. Le canal radio est soumis à des aléas importants qui peuvent, à certains moments, réduire considérablement la qualité du signal. Pour garantir une transmission fiable, l'ingénieur introduit ce que l'on appelle des marges de sécurité dans le bilan de liaison. Deux marges sont particulièrement essentielles : la marge de fading et la marge de dégradation.

La marge de fading correspond à une réserve de puissance destinée à compenser les pertes dues aux variations aléatoires du canal de propagation. Ces variations, appelées évanouissements, apparaissent lorsque le signal radio est perturbé par des phénomènes comme les multi-trajets, la diffraction sur des obstacles ou encore les conditions atmosphériques particulières. Par exemple, un lien qui fonctionne parfaitement par temps clair peut voir son niveau de réception chuter brutalement lors d'un épisode de pluie intense. La marge de fading joue donc le rôle d'amortisseur : elle garantit que, même en présence de ces fluctuations rapides et temporaires, la liaison reste utilisable et que le signal ne descend pas en dessous du seuil de sensibilité du récepteur.

La marge de dégradation, quant à elle, est pensée pour les effets plus lents et progressifs qui influencent la performance d'une liaison dans le temps. Les équipements électroniques

vieillissent, leurs caractéristiques peuvent se détériorer, et les conditions environnementales évoluent. Des phénomènes comme la corrosion des connecteurs, la dégradation des câbles ou encore l'accumulation d'humidité peuvent introduire des pertes supplémentaires. De même, des conditions climatiques extrêmes récurrentes, telles que des saisons de pluies prolongées ou des périodes de chaleur intense, finissent par réduire la fiabilité du système. La marge de dégradation permet d'anticiper ces dérives en laissant une réserve de performance disponible sur toute la durée de vie de la liaison.

4.3 Analyse du profil de liaison

Lorsqu'on planifie une liaison par faisceau hertzien, il ne suffit pas de relier deux points géographiques sur une carte. Il est indispensable d'étudier en détail le profil du terrain qui sépare les deux sites, car la qualité de transmission dépend directement de la visibilité entre les antennes. Cette **analyse topographique** consiste à tracer la coupe du relief sur l'axe reliant l'émetteur et le récepteur afin de détecter la présence éventuelle d'obstacles naturels (collines, forêts, vallées) ou artificiels (bâtiments, pylônes). Si ces éléments se trouvent sur le trajet, ils risquent de bloquer ou d'atténuer le signal, ce qui compromet la fiabilité de la liaison.

Une fois cette première étude réalisée, on doit s'assurer que la liaison bénéficie d'une **ligne de vue dégagée**. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, il ne suffit pas que les antennes puissent "se voir" directement. Il faut également considérer l'**ellipsoïde de Fresnel**, qui représente la zone autour du faisceau direct où les ondes radio se propagent. Pour qu'une liaison fonctionne correctement, une large partie de cet ellipsoïde – généralement au moins 60 % du premier – doit rester libre de toute obstruction. Si un obstacle pénètre dans cette zone critique, il peut provoquer des diffractions, des réflexions ou des affaiblissements qui dégradent fortement le signal reçu.

Afin de mener cette analyse de manière précise, les ingénieurs s'appuient sur des **données géographiques et des outils spécialisés**. Les modèles numériques de terrain issus de satellites, comme ceux du programme SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), fournissent une base fiable pour modéliser le relief. Des applications grand public telles que Google Earth peuvent également aider à visualiser la topographie et identifier des obstacles éventuels. Toutefois, dans un cadre professionnel, on utilise surtout des logiciels spécialisés comme Atoll ou Pathloss. Ces outils permettent de combiner les données de terrain, les paramètres techniques des équipements et les modèles de propagation pour produire un profil de liaison détaillé. L'ingénieur peut ainsi vérifier avec précision si la ligne de vue est respectée, calculer la zone de Fresnel, et évaluer les marges nécessaires pour assurer la disponibilité de la liaison.

4.4 Planification des fréquences

La planification des fréquences est une étape centrale dans la conception d'une liaison par faisceau hertzien. Les fréquences radio utilisées ne peuvent pas être choisies librement par l'ingénieur : elles sont encadrées par des règles strictes établies au niveau international et national. L'**Union Internationale des Télécommunications (UIT)** définit la répartition mondiale du spectre, en assignant des bandes précises aux différents services de radiocommunication, dont les liaisons hertziennes fixes. Chaque pays, à travers son régulateur national, adapte ensuite cette répartition en délivrant des autorisations d'utilisation pour les opérateurs et entreprises. Respecter ces allocations est donc indispensable, non seulement pour rester conforme à la réglementation, mais aussi pour éviter toute interférence avec d'autres services (télévision, satellites, radars, etc.).

Au-delà du respect des cadres réglementaires, l'ingénieur doit veiller à une **gestion rigoureuse des interférences**. En effet, un faisceau hertzien n'existe jamais isolément : il cohabite avec d'autres liaisons dans la même bande de fréquences, parfois dans des zones géographiques proches. Si deux liaisons utilisent des canaux trop rapprochés ou si leurs antennes ne sont pas suffisamment directives, des brouillages peuvent apparaître, entraînant une dégradation de la qualité de service. La planification consiste alors à attribuer les fréquences de manière à minimiser ces risques, en tenant compte de la réutilisation possible des canaux, des orientations d'antennes, et de la sélectivité des équipements.

Dans la pratique, cette gestion se traduit par une organisation en **canaux normalisés**. Selon la bande de fréquences choisie, on utilise des largeurs de canaux de 7, 14, 28 ou 56 MHz, voire plus dans les bandes millimétriques destinées aux débits très élevés. Le choix de la largeur de canal dépend directement de la capacité recherchée : un canal étroit suffit pour transporter une faible quantité de données, tandis qu'un canal large permet d'atteindre plusieurs gigabits par seconde, comme cela est nécessaire pour les applications de backhaul en 4G et 5G. L'ingénieur doit donc trouver un équilibre entre disponibilité spectrale, besoins de capacité et contraintes réglementaires.

TP 1 :



Simulation transmission FH avec GNU radio :

1. Structure du Flowgraph (Diagramme de Flux)

Un flowgraph en GNU Radio se compose de blocs qui représentent les différentes étapes de la chaîne de communication. Pour un TP sur les FH, vous devez inclure les blocs suivants :

- Générateur de données : Pour créer un flux de bits. Utilisez le bloc Random Source.
- Modulation : Pour convertir les bits en symboles. Utilisez un bloc de modulation approprié (QAM Mod, PSK Mod, etc.).
- Canal : Pour simuler le milieu de transmission. Le bloc AWGN Channel est idéal pour ajouter du bruit.
- Démodulation : Pour récupérer les symboles et les reconvertir en bits. Utilisez un bloc de démodulation correspondant (QAM Demod, PSK Demod, etc.).
- Évaluation des performances : Pour mesurer les erreurs. Le bloc BER (Bit Error Rate) est utilisé pour comparer les bits émis et reçus et calculer le taux d'erreur.
- Visualisation : Pour observer les signaux. Les blocs QT GUI Constellation Sink et QT GUI Time Sink sont utiles.

2. Étapes pour créer le Flowgraph

- a) Démarrer GNU Radio Companion (GRC) : Lancez l'application GRC. Un canevas vide apparaît.
- b) Ajouter la source de données : Cherchez le bloc Random Source dans la barre latérale et faites-le glisser sur le canevas. Configurez-le pour générer des octets (Output Type: Byte).
- c) Ajouter le modulateur :
 - Recherchez le bloc QAM Mod (ou PSK Mod si vous voulez simuler une autre modulation).
 - Configurez l'ordre de la modulation (par exemple, Modulation Order: 16 pour 16-QAM). Connectez la sortie de la source de données à l'entrée du modulateur.
- d) Ajouter le canal de transmission :
 - Cherchez le bloc AWGN Channel (pour *Additive White Gaussian Noise*).
 - Connectez la sortie du modulateur à l'entrée du canal.

- Réglez le niveau de bruit en modifiant le paramètre E_b/N_0 (dB). Vous pouvez ajouter une variable (bloc Variable) pour faire varier ce paramètre pendant la simulation.
- e) Ajouter le démodulateur :
 - Recherchez le bloc de démodulation correspondant, par exemple QAM Demod.
 - Réglez le même ordre de modulation que pour le modulateur. Connectez la sortie du canal à l'entrée du démodulateur.
- f) Évaluer le taux d'erreur :
 - Cherchez le bloc BER.
 - Connectez le signal binaire émis (Random Source ou Vector Source) et le signal binaire reçu (QAM Demod output) aux entrées du bloc BER.
 - Le bloc BER affichera le taux d'erreur binaire.
- g) Visualiser le signal :
 - Ajoutez un bloc QT GUI Constellation Sink pour observer le diagramme de constellation après le modulateur et après le canal AWGN.
 - Cela vous permet de visualiser l'effet du bruit sur le signal.
- h) Exécuter la simulation : Sauvegardez le flowgraph et cliquez sur le bouton "Générer et exécuter" (icône ►).

3. Points clés du TP

- Varier les paramètres : Changez l'ordre de la modulation (16-QAM, 64-QAM) et l' E_b/N_0 pour observer l'impact sur le BER.
- Comparer les courbes : Exportez les résultats de BER pour différentes valeurs d' E_b/N_0 et tracez une courbe pour illustrer la performance du système.
- Comprendre les limites : La simulation vous montrera que plus l'ordre de la modulation est élevé, plus le système est sensible au bruit, et que le BER augmente rapidement lorsque la qualité du canal se dégrade.

TP 2 :

- Principes des modulations : QPSK, QAM
- Domaines d'applications
- Simulation sous matlab

1. Préparation de la Simulation

- Définir les paramètres : Spécifiez les variables importantes comme le nombre de bits, l'ordre de la modulation (M), et la plage de valeurs d' E_b/N_0 à tester.

2. Modulation et Transmission

- Générer les données : Créez un flux de bits binaires aléatoires.
- Convertir en symboles : Regroupez les bits pour former des symboles (par exemple, 4 bits par symbole pour la 16-QAM).
- Moduler le signal : Utilisez la fonction `qammod` de MATLAB pour mapper les symboles aux points correspondants du diagramme de constellation.
- Ajouter du bruit : Simulez un canal de transmission en ajoutant du bruit blanc gaussien (AWGN) au signal modulé à l'aide de la fonction `awgn`.

3. Démodulation et Analyse des Erreurs

- Démoduler le signal : Utilisez la fonction `qamdemod` pour récupérer les symboles à partir du signal bruité.
- Convertir en bits : Transformez les symboles démodulés en un flux de bits.
- Calculer le BER : Comparez les bits reçus aux bits d'origine pour calculer le taux d'erreur binaire (BER) à l'aide de la fonction `biterr`.
- Tracer les résultats : Tracez la courbe du BER en fonction de l' E_b/N_0 et comparez-la à la courbe théorique.
- Diagramme de constellation : Visualisez les points du signal modulé avec bruit pour une valeur de C/N. Cela permet de voir clairement si le bruit perturbe la distinction entre les symboles.

TP 3:

- Principes des codes correcteurs d'erreurs : Reed-Solomon et Turbo Codes
- Domaines d'applications

- Simulation avec Matlab

1 : Définir le codeur

- Choisissez le type de code correcteur (par exemple, un code Reed-Solomon `rs.Encode` ou un code Turbo `turbo.Encode`).
- Spécifiez les paramètres du code, comme la longueur du code et le nombre de bits d'information.

2 : Générer les données et coder

- Créez un message binaire aléatoire.
- Utilisez la fonction de codage pour ajouter les bits de redondance au message. Le message codé sera plus long que le message original.

3 : Simuler le canal

- Ajoutez du bruit au signal codé pour simuler les erreurs de transmission. Utilisez la fonction `awgn` pour un canal à bruit blanc gaussien.

4 : Décodage

- Utilisez la fonction de décodage correspondante (par exemple, `rs.Decode` ou `turbo.Decode`). Le décodeur tente de corriger les erreurs introduites par le canal.

5 : Analyse des performances

- Calculez le taux d'erreur binaire (BER) en comparant le message décodé au message original.
- Comparez le BER avec et sans l'utilisation du code correcteur pour démontrer son efficacité.
- Tracez la courbe de performance (BER en fonction de E_b/N_0) pour visualiser l'amélioration apportée par le codage.

TP 3