

Optimisation du placement des antennes au Sénégal

SOMA Ben Idriss Diloma

2025-06-05

Table of Contents

Introduction.....	2
Présentation de la zone d'étude :Kédougou, Tambacounda et Matam.....	2
Généralités sur les Réseaux de télécommunicatin	4
canaux de communication	4
Spectre de fréquence d'un signal.....	4
Bande passante d'un canal	5
Capacité d'un canal de transmission – Théorie de Shannon.....	6
Propagation des ondes dans un réseau de télécommunications	7
Modélisation de la propagation des ondes.....	7
Propagation en présence d'obstacles	8
Approche empirique	9
Loi de décroissance de la puissance (modèle général)	10
Multiplexage et répartition des fréquences.....	10
Multiplexage Fréquentiel (FDMA)	10
Multiplexage Temporel (TDMA)	10
Combiné TDMA/FDMA	10
Optimisation du placement des antennes.....	10
Objectif de couverture.....	10
Modèles d'interférences.....	11
Optimisation de l'assignation de fréquences.....	11
Optimisation conjointe (placement + fréquence).....	11
Implémentation R (idées).....	12
Conclusion	12

Introduction

Au Sénégal, comme dans de nombreux pays en développement, l'accès équitable à la connectivité mobile constitue un enjeu majeur. Malgré les avancées technologiques, de nombreuses zones rurales restent encore mal desservies, avec une qualité de service limitée. Cette situation creuse la fracture numérique et freine le développement socio-économique de territoires pourtant porteurs de potentiel.

Dans ce contexte, le **placement des antennes de télécommunication** devient une problématique stratégique. Il ne s'agit pas seulement de couvrir les zones densément peuplées, mais également d'assurer une couverture efficace dans les **zones reculées**, souvent difficiles d'accès, où les contraintes géographiques, économiques et techniques rendent le déploiement complexe. Une mauvaise répartition des stations de base peut engendrer des zones blanches, une mauvaise qualité de service ou encore des interférences entre antennes utilisant les mêmes fréquences.

Ce projet vise ainsi à étudier l'**optimisation du placement des antennes**, avec pour objectif une **meilleure couverture réseau** tout en **réduisant les interférences**. L'approche prend en compte les réalités du terrain, notamment la **propagation des ondes**, la **répartition des fréquences**, ainsi que les **contraintes budgétaires** liées à l'installation et à l'entretien des infrastructures.

Face à la complexité des réseaux actuels, il devient essentiel de recourir à des outils d'aide à la décision basés sur la simulation et l'optimisation. Ce travail propose le développement et l'implémentation d'un modèle de réseau adapté, permettant de tester différentes configurations de placement et d'affectation de fréquence. Deux techniques d'optimisation sont mobilisées : un **algorithme de recherche directe** (MADS) et une **métaheuristique** (la recherche tabou), afin d'explorer efficacement l'espace des solutions possibles.

Les résultats obtenus permettront d'évaluer la performance de la méthode proposée et d'ouvrir la voie à une application à grande échelle dans le contexte sénégalais, en vue de réduire les inégalités d'accès au numérique et d'optimiser l'usage des ressources technologiques disponibles.

Présentation de la zone d'étude :Kédougou, Tambacounda et Matam

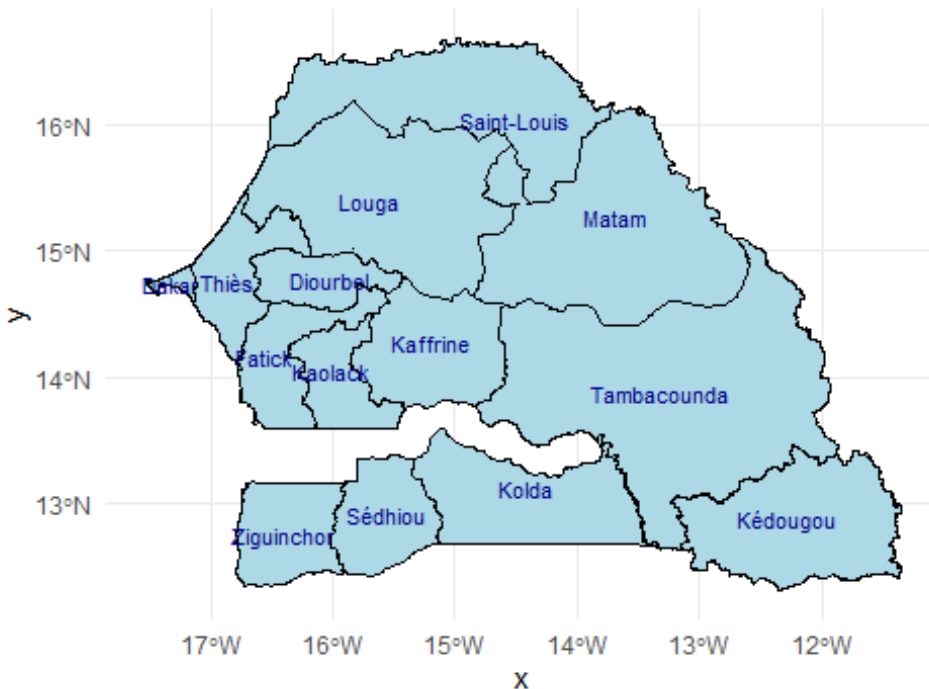
Le Sénégal est un pays d'Afrique de l'Ouest, avec une population d'environ 16 millions d'habitants. Le pays est divisé en 14 régions administratives, dont les régions de Kédougou, Tambacounda et Matam, qui sont situées dans la partie orientale du pays.

Ces régions sont caractérisées par une diversité géographique et culturelle, mais elles partagent également des défis communs en matière de connectivité mobile.

le taux de couverture réseau dans les régions de Kédougou, Tambacounda et Matam est relativement faible, avec des disparités importantes entre les zones urbaines et rurales. Les zones rurales, en particulier, souffrent d'un manque d'infrastructures de télécommunication, ce qui limite l'accès à Internet et aux services mobiles pour les populations locales.

```
Reading layer `gadm41_SEN_1' from data source
`C:\Users\USER\Desktop\ise math\s2\convexité et optimisation\optimisation-
reseau\donnee\shp\gadm41_SEN_1.shp'
using driver `ESRI Shapefile'
Simple feature collection with 14 features and 11 fields
Geometry type: MULTIPOLYGON
Dimension: XY
Bounding box: xmin: -17.54319 ymin: 12.30786 xmax: -11.34247 ymax: 16.69207
Geodetic CRS: WGS 84
```

Carte des régions du Sénégal



...

Généralités sur les Réseaux de télécommunication

canaux de communication

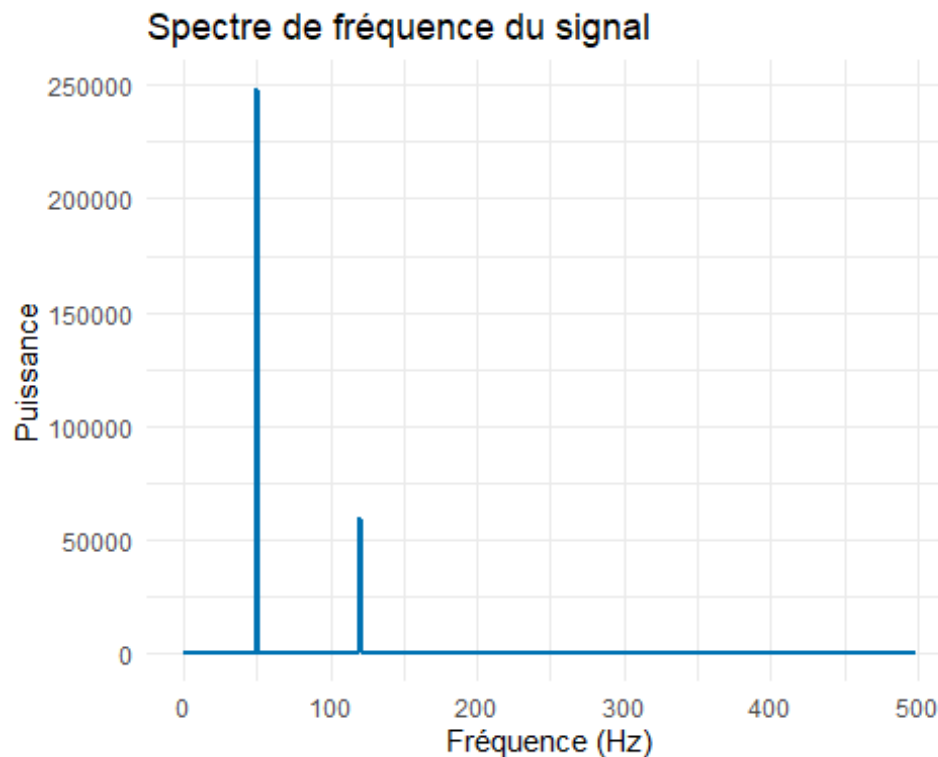
En télécommunications ou dans les réseaux informatiques, un canal de communication est un médium de transmission d'information, permettant l'acheminement d'un message d'une ou plusieurs sources à un ou plusieurs destinataires. Cette transmission d'information peut se faire au travers d'un support physique, comme un câble, ou d'un support logique, comme un canal radio.

Spectre de fréquence d'un signal

Lors de la transmission d'un signal dans un câble ou dans l'air, celui-ci est de nature analogique. Pour comprendre comment il transporte l'information, on analyse sa composition fréquentielle à l'aide de la **transformée de Fourier**.

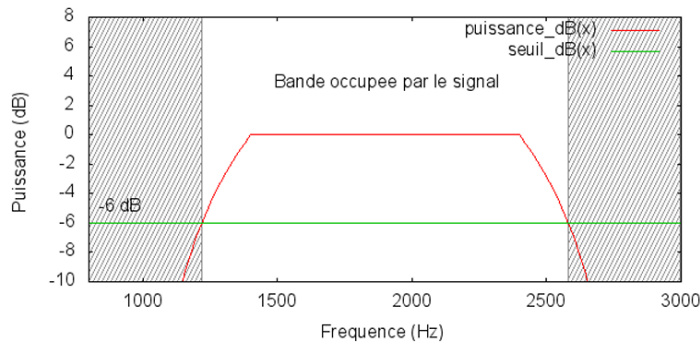
Cette analyse permet d'obtenir le **spectre de fréquences** du signal, c'est-à-dire la répartition de sa puissance selon les différentes fréquences. Pour les signaux réels, l'énergie est souvent concentrée dans une **bande passante limitée**. En dessous d'un certain seuil, la puissance est négligeable, ce qui permet de **délimiter la bande utile** du signal.

Illustration en R



Bande passante d'un canal

Il est très important de connaître les caractéristiques fréquentielles du canal sur lequel on veut transmettre de l'information. En effet, un canal ne peut transporter des signaux que dans une certaine bande de fréquences, appelée bande passante du canal.



signal

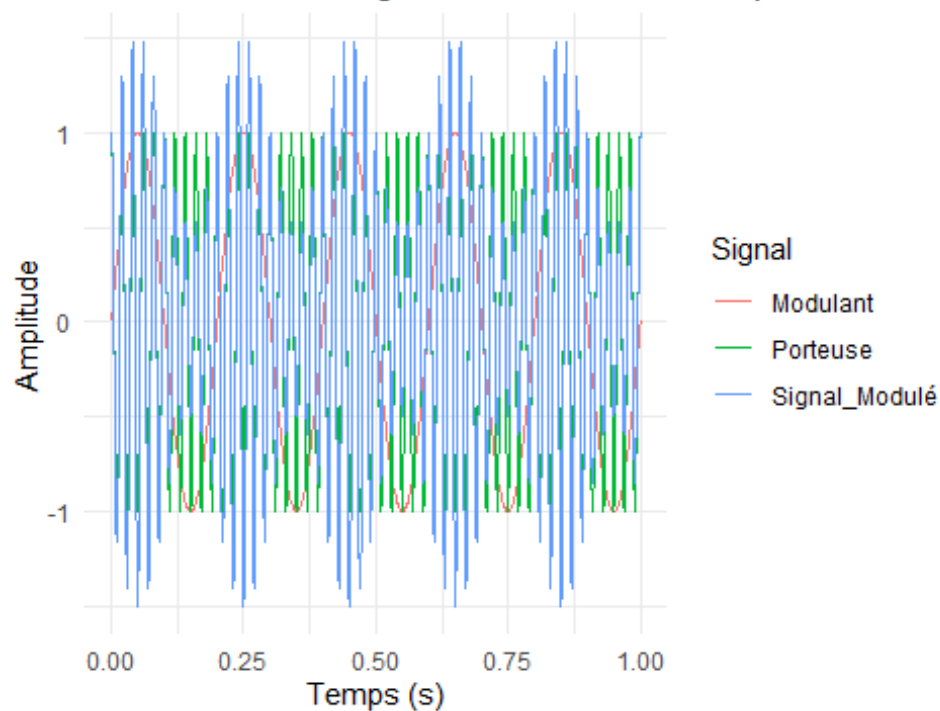
Modulation du

Afin de permettre la transmission d'un signal sur un support donné, il est souvent nécessaire d'adapter sa fréquence pour qu'elle corresponde à la bande passante du canal de transmission. Cette opération est réalisée par le procédé de modulation.

La modulation consiste à combiner le signal à transmettre, initialement en bande de base, avec une onde porteuse : une onde sinusoïdale de fréquence f_p et d'amplitude a_p , généralement située au centre de la bande passante du support. Mathématiquement, cette onde porteuse peut s'écrire :

$$s_p(t) = a_p \cos(2\pi f_p t)$$

Modulation d'un signal : onde modulante, porteuse et si



En modulant cette onde avec le signal d'origine, on obtient un signal modulé dont le spectre est déplacé autour de la fréquence f_{Pf} . Ce nouveau signal respecte les contraintes fréquentielles du support et peut donc être transmis efficacement.

Capacité d'un canal de transmission – Théorie de Shannon

Les signaux électromagnétiques transmis dans un réseau de télécommunications sont, comme vu précédemment, des **signaux modulés**. Leur spectre est étalé autour d'une fréquence centrale, en fonction de la technique de modulation utilisée.

Or, le **canal de transmission**, ici l'air, ne permet de transmettre que certaines fréquences : c'est ce qu'on appelle la **bande passante** du canal, notée Δf . Elle représente l'intervalle de fréquences que le support peut transmettre sans atténuation excessive.

La **théorie de l'information de Shannon** établit un lien fondamental entre cette bande passante et la **capacité maximale** du canal à transporter de l'information, exprimée en bits par seconde :

$$C_I = \Delta f \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right)$$

Avec : - C_I : capacité du canal (en bits/s) ; - Δf : largeur de bande (Hz) ; - P_S : puissance du signal reçu ; - P_N : puissance du bruit (perturbations).

Cette formule montre que plus la **bande passante** est large, plus le canal est capable de transporter de l'information, à condition que le **rapport signal/bruit (SNR)** soit favorable.

C'est pourquoi la **gestion efficace du spectre** et la **réduction des interférences** sont cruciales dans la conception des réseaux de télécommunications.

Propagation des ondes dans un réseau de télécommunications

Dans un réseau de télécommunications, les informations sont transmises à l'aide d'**ondes radio**, émises et reçues par les différentes composantes du réseau, notamment les **stations de base** et les **terminaux utilisateurs**. Ces ondes se propagent dans l'air, mais leur puissance diminue progressivement avec la distance à l'émetteur, ou lorsqu'elles rencontrent des obstacles tels que les bâtiments ou le relief.

Afin de **déterminer la zone géographique couverte** par une antenne, il est essentiel de connaître la **puissance du signal reçu** en différents points du territoire.

La première étape de la modélisation d'un réseau de télécommunications consiste donc à **modéliser la propagation des ondes radio**. Cette propagation est influencée par de nombreux facteurs (réflexion, diffraction, absorption...), rendant certains modèles complexes à mettre en œuvre.

Dans cette section, nous commencerons par étudier le **modèle le plus simple**, celui de la **propagation en espace libre (dans le vide)**, avant d'aborder des modèles plus réalistes prenant en compte les **principaux phénomènes physiques** qui altèrent la propagation des ondes.

Modélisation de la propagation des ondes

Modèle de propagation dans le vide (Equation de Friis)

Dans le modèle idéalisé sans obstacles (propagation en espace libre), la puissance reçue est donnée par **l'équation de Friis** :

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L}$$

Où : - $P_r(d)$: puissance reçue à une distance d - P_t : puissance transmise - G_t, G_r : gain des antennes émettrice et réceptrice - λ : longueur d'onde ($\lambda = c/f$) - L : pertes système (câbles, connecteurs...) - d : distance entre émetteur et récepteur

En dB, cela devient :

$$P_r(dB) = P_t(dB) + G_t(dB) + G_r(dB) - 20\log_{10}(4\pi d/\lambda) - L(dB)$$

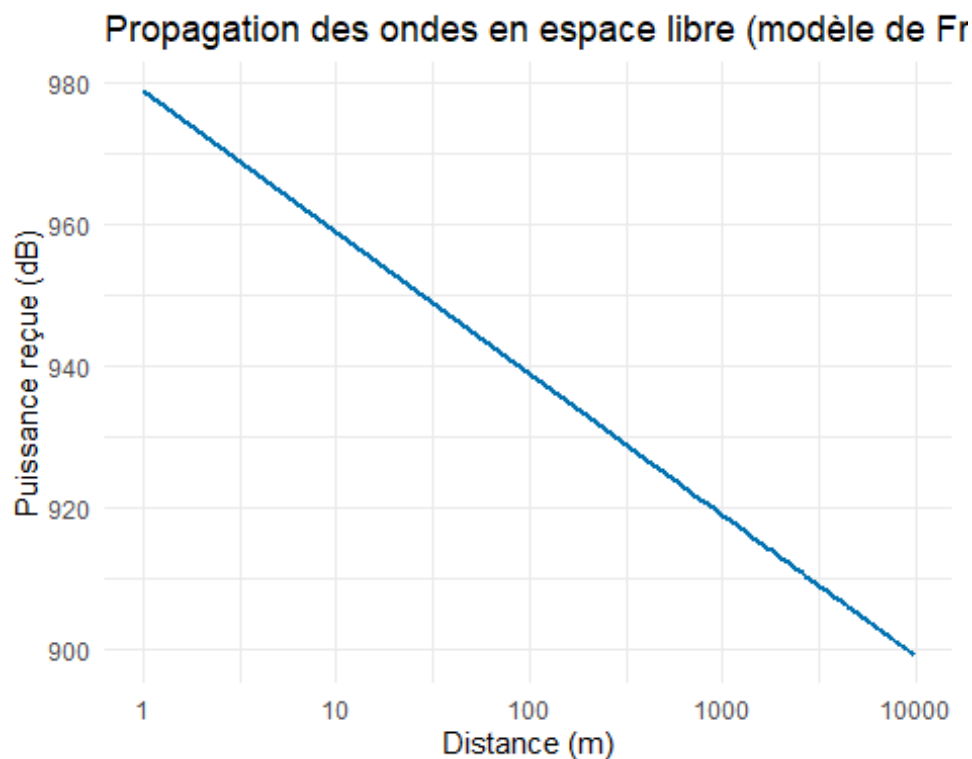
En télécommunications, il est souvent plus pratique de travailler avec la **fréquence** plutôt qu'avec la **longueur d'onde**. En utilisant la relation $f = \frac{c}{\lambda}$, où c est la vitesse de la lumière, l'équation de Friis peut être réécrite de la manière suivante :

$$P_r(d) = \frac{P_e G_e G_r c^2}{(4\pi d f)^2}$$

Cette forme met en évidence deux points essentiels :

- **Dépendance à la fréquence** : la puissance reçue est inversement proportionnelle au **carré de la fréquence** (f^{-2}). Cela signifie que plus la fréquence d'un signal est élevée, plus sa portée est limitée. Les signaux à haute fréquence se propagent donc **moins loin** que ceux à basse fréquence.
- **Dépendance à la distance** : la puissance reçue décroît rapidement avec la **distance** entre l'émetteur et le récepteur, suivant un facteur d^{-2} . Cela reflète l'atténuation naturelle des ondes dans l'espace libre, même en l'absence d'obstacles.

Modèle de propagation en espace libre (Friis) en R



Propagation en présence d'obstacles

En présence d'obstacles, la propagation des ondes est modifiée par des phénomènes tels que la diffraction, la réflexion et l'absorption. La diffraction permet aux ondes de courber autour des obstacles, et l'interférence peut produire des configurations d'ondes complexes. Deux types d'approches sont couramment utilisés pour modéliser la propagation des ondes lorsque les obstacles sont pris en compte : une approche théorique ou une approche empirique.

Approche théorique

L'approche théorique repose sur des modèles mathématiques basés sur les principes de la physique des ondes. Ces modèles prennent en compte les phénomènes de diffraction, de réflexion et d'absorption. Parmi les modèles théoriques les plus connus, on trouve :

Le modèle de réflexion sur le sol, présenté dans [Rappaport (2002b)], prend en compte deux trajets : un en ligne directe et un autre obtenu par réflexion sur le sol.

Les modèles de Walfisch-Bertoni et d'Ikegami, décrits dans [Granatstein (2008)], intègrent les effets de diffraction des ondes au niveau des toits d'immeubles.

Ces modèles sont particulièrement pertinents lorsque l'antenne est placée au-dessus des bâtiments et que le récepteur se trouve en contrebas, dans une rue.

Approche empirique

L'approche empirique peut être illustrée par le modèle de **Delisle-Egli**, présenté dans [Egli (1998)], qui est un modèle de propagation en milieu urbain.

Il se base sur un grand nombre de mesures effectuées dans des villes des États-Unis, qui ont permis d'établir la formule suivante pour l'atténuation de la puissance d'un signal :

$$L_{\text{empirique}} = \begin{cases} 4.27 \times 10^{-17} \frac{d^4 f^2}{h_b^2 h_m} & \text{si } h_m < 10 \text{ m} \\ 4.27 \times 10^{-17} \frac{d^4 f^2}{h_b^2 h_m^2} & \text{si } h_m > 10 \text{ m} \end{cases}$$

Ce modèle est particulièrement adapté aux environnements urbains.

Cependant, pour prendre en compte la variabilité des densités du milieu — allant des zones rurales ouvertes aux centres urbains très denses —

il est courant d'utiliser un modèle plus général pour l'atténuation L de la puissance du signal. Ce modèle repose sur la relation suivante :

$$L = K d^\alpha f^2$$

où : - K est une constante dépendant du milieu, - d est la distance entre l'émetteur et le récepteur, - f est la fréquence du signal, - $\alpha \in [2,4]$ est un paramètre caractérisant la densité du milieu de propagation : - $\alpha \approx 2$ dans les milieux dégagés comme les zones rurales, - $\alpha \approx 4$ dans les environnements très denses tels que les zones urbaines.

Ce modèle permet une modélisation souple et adaptée à différents contextes de propagation.

Loi de décroissance de la puissance (modèle général)

$$P_r(d) = P_0 \left(\frac{d_0}{d} \right)^n$$

- P_0 : puissance à distance référence d_0
 - n : coefficient d'affaiblissement (entre 2 et 5)
-

Multiplexage et répartition des fréquences

Multiplexage Fréquentiel (FDMA)

On divise le spectre en N canaux :

$$B_{total} = N \cdot B_{canal}$$

Chaque utilisateur utilise un canal fixe.

Multiplexage Temporel (TDMA)

Le temps est divisé en C créneaux de durée T :

$$T_{total} = C \cdot T$$

Chaque utilisateur communique à tour de rôle.

Combiné TDMA/FDMA

Chaque canal fréquentiel est subdivisé en créneaux temporels, pour une meilleure utilisation du spectre.

Optimisation du placement des antennes

Objectif de couverture

Donnons un modèle mathématique :

Soit x_i les coordonnées des antennes à placer, y_j les points à couvrir.

- P_{ij} : puissance reçue à y_j depuis l'antenne i .
- γ : seuil minimum de puissance.

Contraintes :

$$P_{ij} \geq \gamma \quad \text{pour tous } j \Rightarrow y_j \text{ est couvert}$$

Fonction objectif (par exemple) :

- Max. nombre de points couverts
- Min. nombre d'antennes placées
- Max. somme de puissances reçues (pondérées)

Modèles d'interférences

Le rapport signal-bruit (SNR) :

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{bruit}} + P_{\text{interférences}}}$$

Une zone est jugée couverte si $\text{SNR} \geq \theta$ (seuil).

Optimisation de l'assignation de fréquences

On affecte à chaque antenne i une fréquence $f_i \in \mathcal{F}$.

Objectif :

$$\min \sum_{(i,j) \in \text{Paires}} I_{ij}(f_i, f_j)$$

- I_{ij} : fonction modélisant les interférences entre antennes i et j .

C'est un **problème combinatoire**, souvent traité par :

- Algorithmes gloutons
 - Algorithmes génétiques
 - Recuit simulé (simulated annealing)
 - Programmation linéaire en nombres entiers (MILP)
-

Optimisation conjointe (placement + fréquence)

Fonction objectif conjointe :

$$\min [\text{coût}_{\text{placement}} + \text{interférences}]$$

On doit déterminer simultanément :

- Coordonnées x_i des antennes
- Fréquences f_i associées

Algorithmes utilisables :

- Algorithmes évolutionnaires multi-objectifs
 - Algorithmes hybrides
-

Implémentation R (idées)

- Simuler une grille 10x10 avec `expand.grid()`
 - Calculer les distances et puissances avec `dist()` et la formule de Friis
 - Optimisation via `optim()`, GA, GenSA
 - Visualisation avec `ggplot2`, `leaflet`, `shiny`
-

Conclusion

Ce projet propose une modélisation rigoureuse du placement optimal des antennes, intégrant les principes physiques de propagation, les contraintes réseaux, et l'optimisation combinatoire. Il peut servir de base à une application Shiny interactive pour l'analyse territoriale au Sénégal.