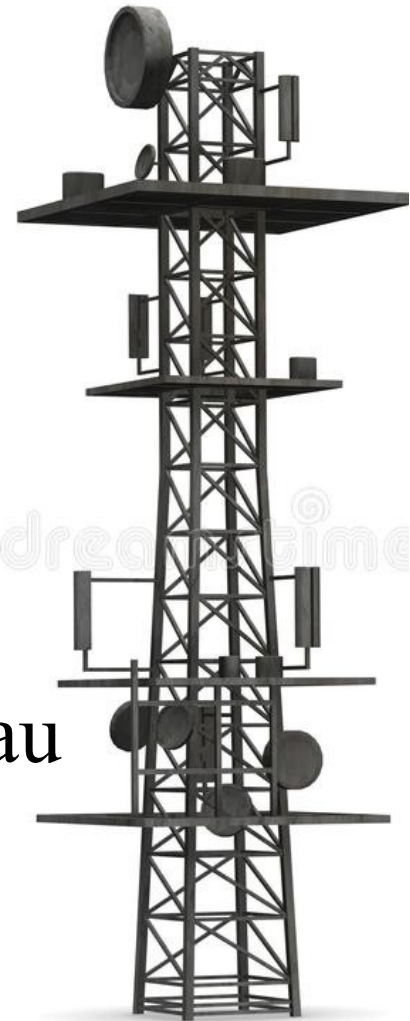
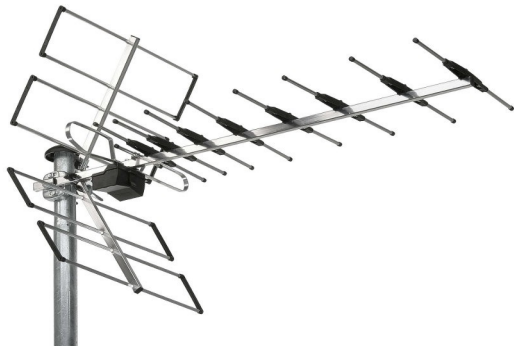


# Quelques aspects du problème de l'agencement des antennes au sein d'un réseau de radiocommunication

I. Propagation ionosphérique

II. Couplage d'antennes simples

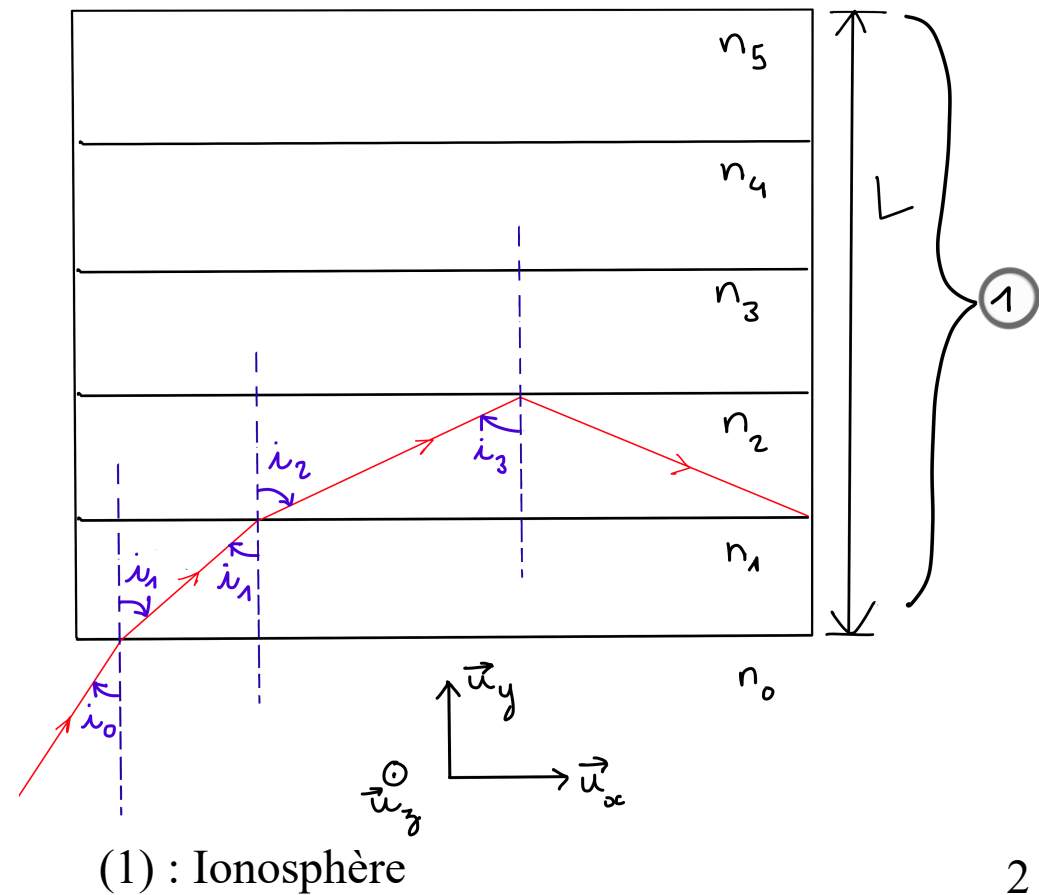
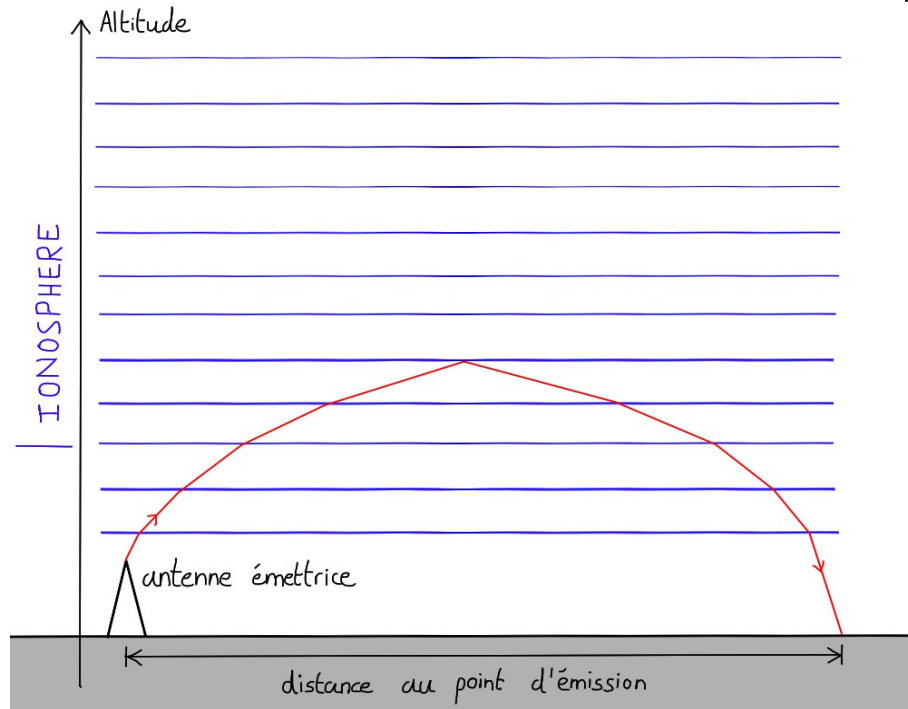
III. Agencement d'antennes complexes en réseau

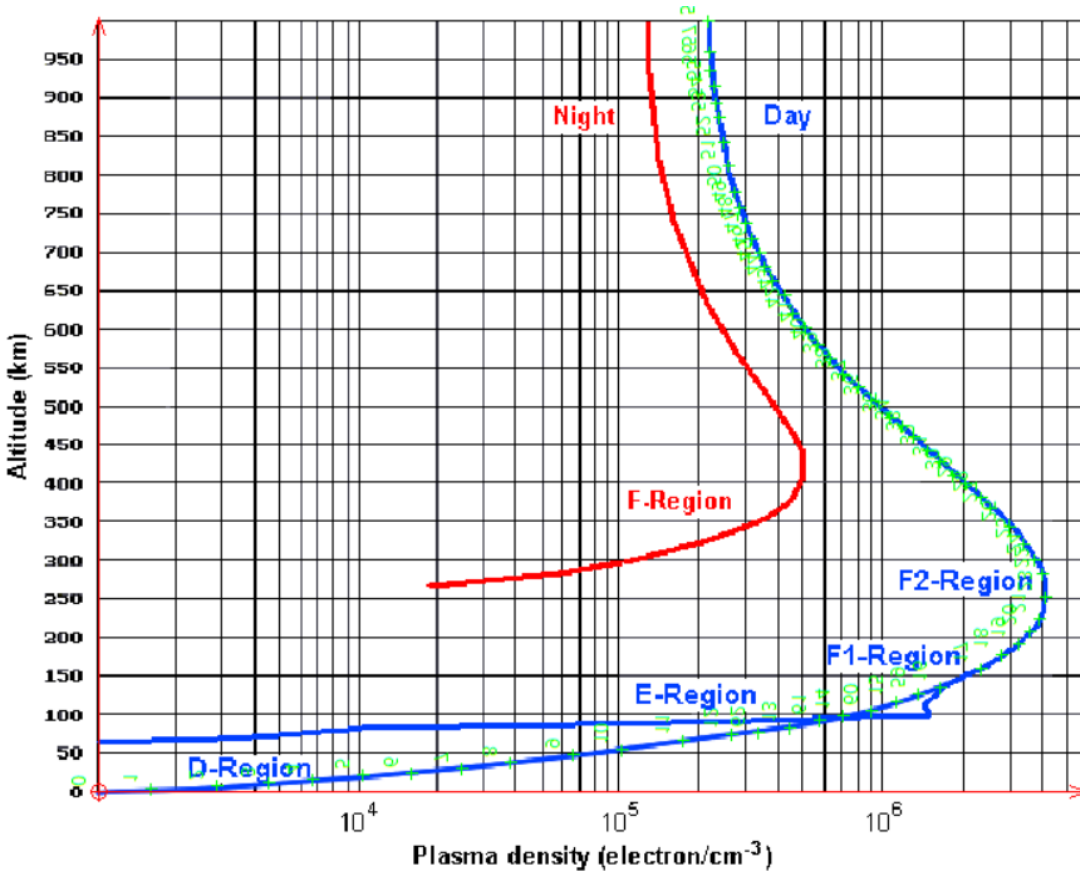


# I. Propagation ionosphérique

- *Objectif* : Comprendre la déviation des ondes électromagnétiques par l'ionosphère pour pouvoir réaliser un placement optimal des antennes dans le cadre de liaisons longue portée.

## Modélisation





➤ Ionisation des molécules des gaz composant l'air du fait du rayonnement solaire

➤ Modification de l'indice de réfraction de l'air

➤ Déviation des ondes électromagnétiques

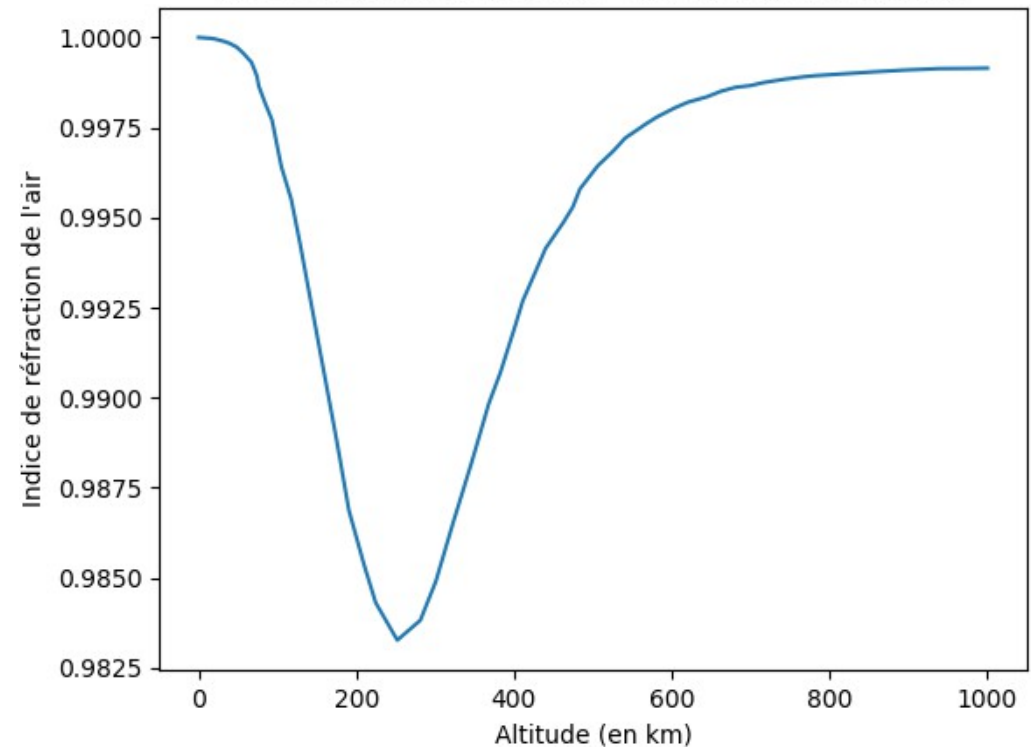
Indice de réfraction de l'air ionisé en fonction de la densité d'électrons  $\rho$  et de la fréquence de l'onde  $f$  :

$$n = \sqrt{1 - \frac{\rho e^2}{4\pi^2 m \epsilon_0 f^2}}$$

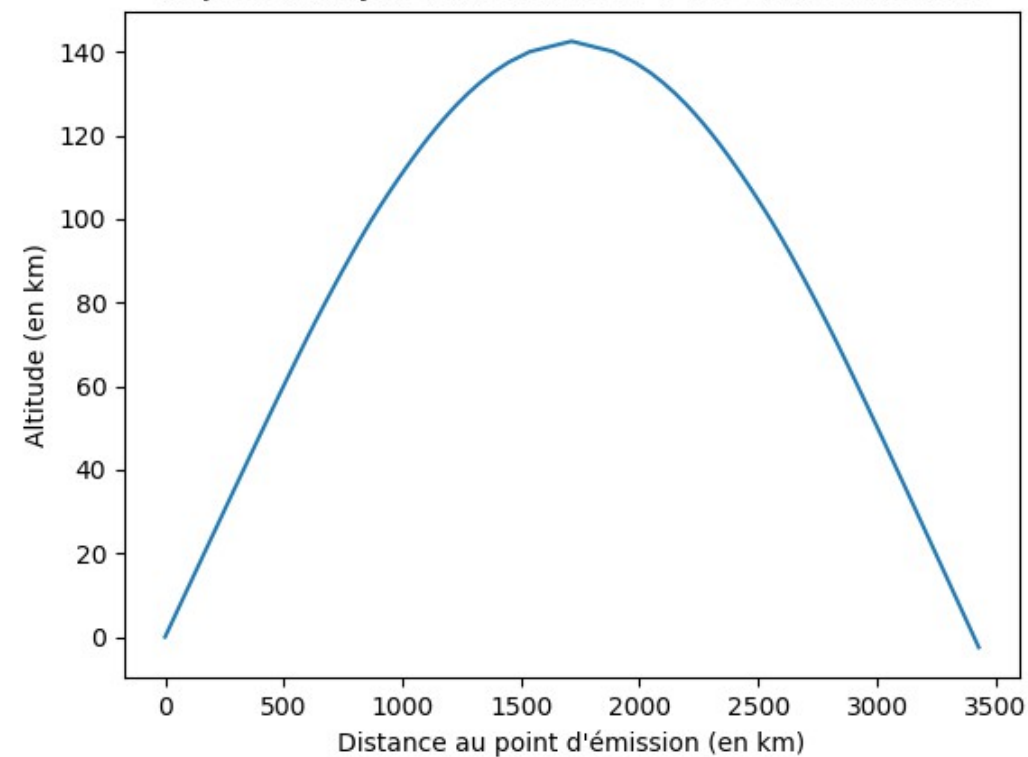
Fréquence de coupure :

$$f_c = \frac{e}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{m \epsilon_0}}$$

Indice de réfraction de l'air en fonction de l'altitude



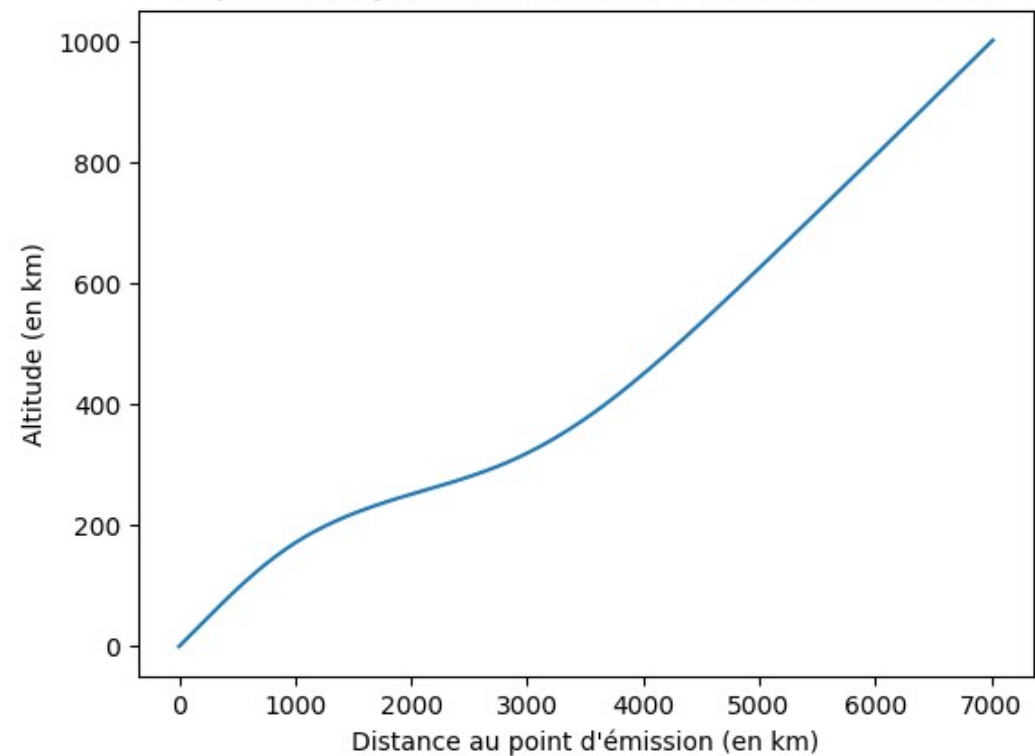
Trajet d'un rayon d'incidence  $83^\circ$ , 400 strates, 100MHz



Réflexion totale

Trajets associés au profil d'indice de réfraction présenté

Trajet d'un rayon d'incidence  $79^\circ$ , 400 strates, 100MHz



*Conclusion* : La déviation dépend de la fréquence de l'onde, de son angle d'incidence...

- Pas de réflexion totale en pratique (coefficients de réflexion et transmission)

## II. Couplage d'antennes simples

- *Objectif* : Proposer des solutions permettant de sélectionner la direction d'émission d'une antenne. Maximiser la directivité d'une antenne.

### 1. Doublet d'antennes dipolaires :

$$A : \vec{E}_1 = E_0 \frac{\sin(\theta)}{r_1} \exp(j(\omega t - kr_1)) \vec{u}_\theta$$

$$B : \vec{E}_2 = E_0 \frac{\sin(\theta)}{r_2} \exp(j(\omega t - kr_2 + \Delta\phi)) \vec{u}_\theta$$

$$r_1 = r + \left( \sqrt{r^2 + dr \cos(\varphi) + \frac{d^2}{4}} - r \right)$$

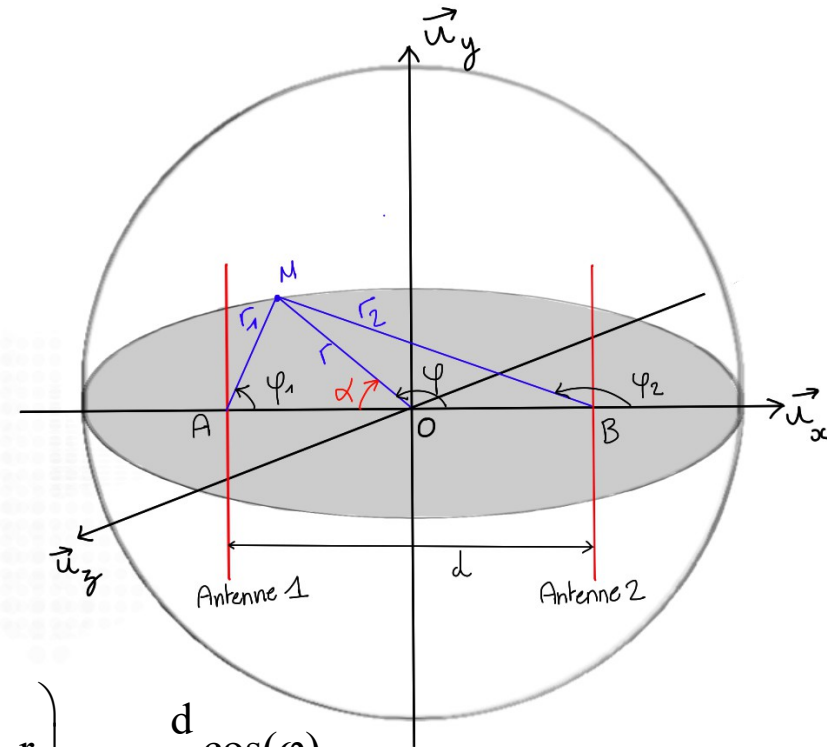
$$r_2 = r - \left( \sqrt{r^2 + dr \cos(\varphi) + \frac{d^2}{4}} - r \right)$$

$$\left( \sqrt{r^2 + dr \cos(\varphi) + \frac{d^2}{4}} - r \right) \underset{\frac{d}{r} \rightarrow 0}{\sim} \frac{d}{2} \cos(\varphi)$$

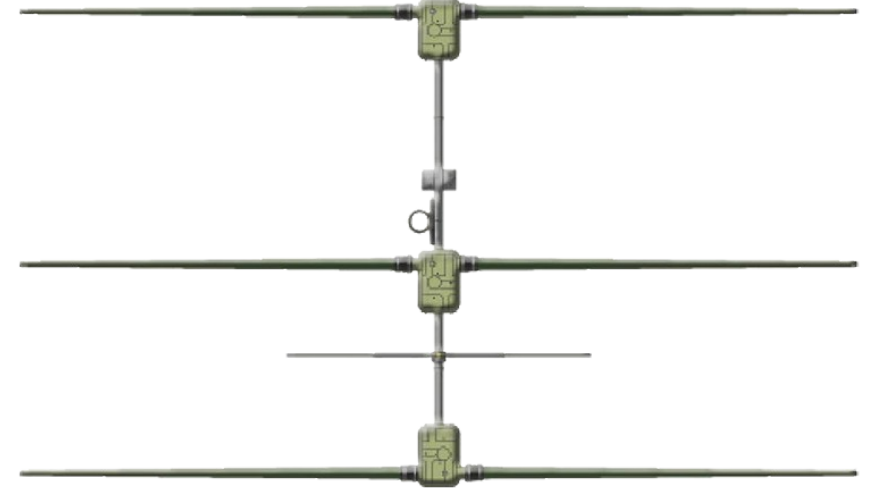
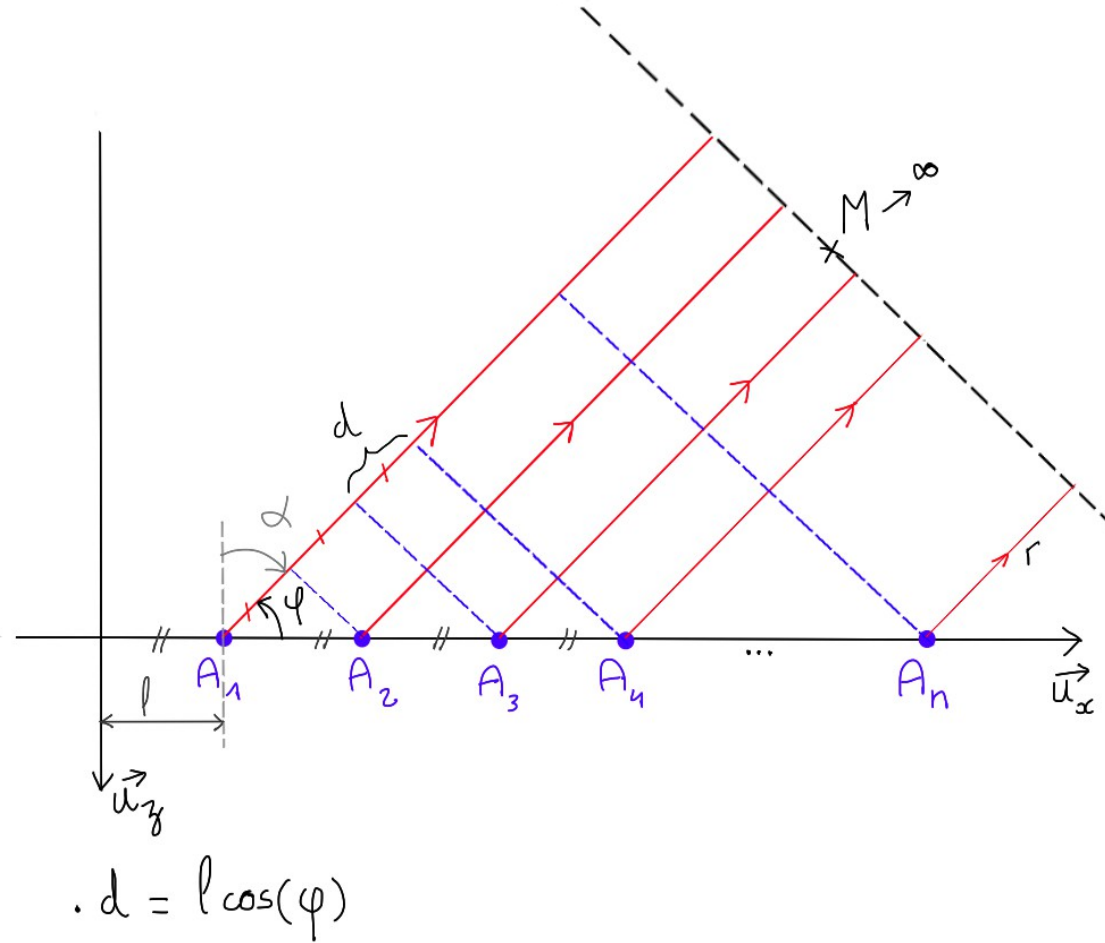
$$d \ll r : \quad r_1 \approx r + \frac{d}{2} \cos(\varphi)$$

$$r_2 \approx r - \frac{d}{2} \cos(\varphi)$$

$$E_{\text{tot}} = E_1 + E_2 = 2E_0 \frac{\sin(\theta)}{r} \left[ \cos\left(\frac{kd}{2} \cos(\varphi) + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \right]$$



## 2. Généralisation à n éléments :



Antenne Yagi à 3 éléments

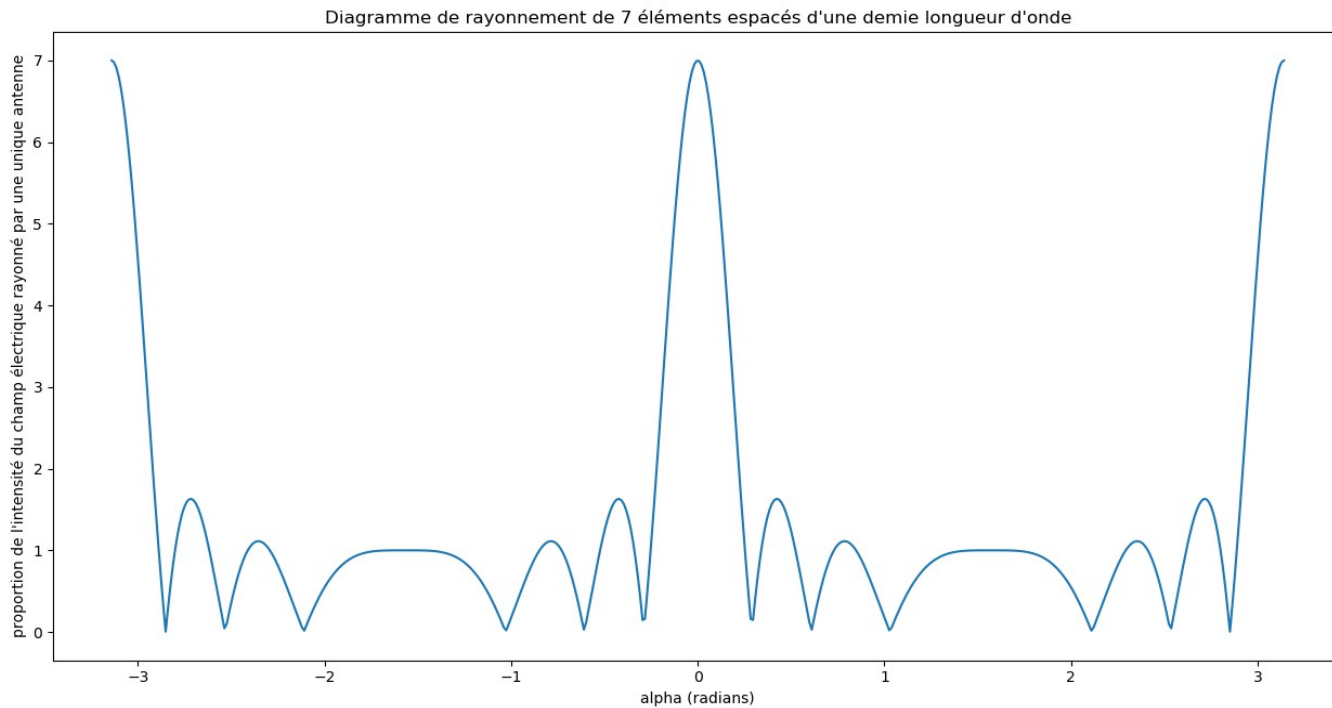
$$A_n : E_n = E_0 \frac{\sin(\theta)}{r} \exp(j(\omega t - kr))$$

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket,$$

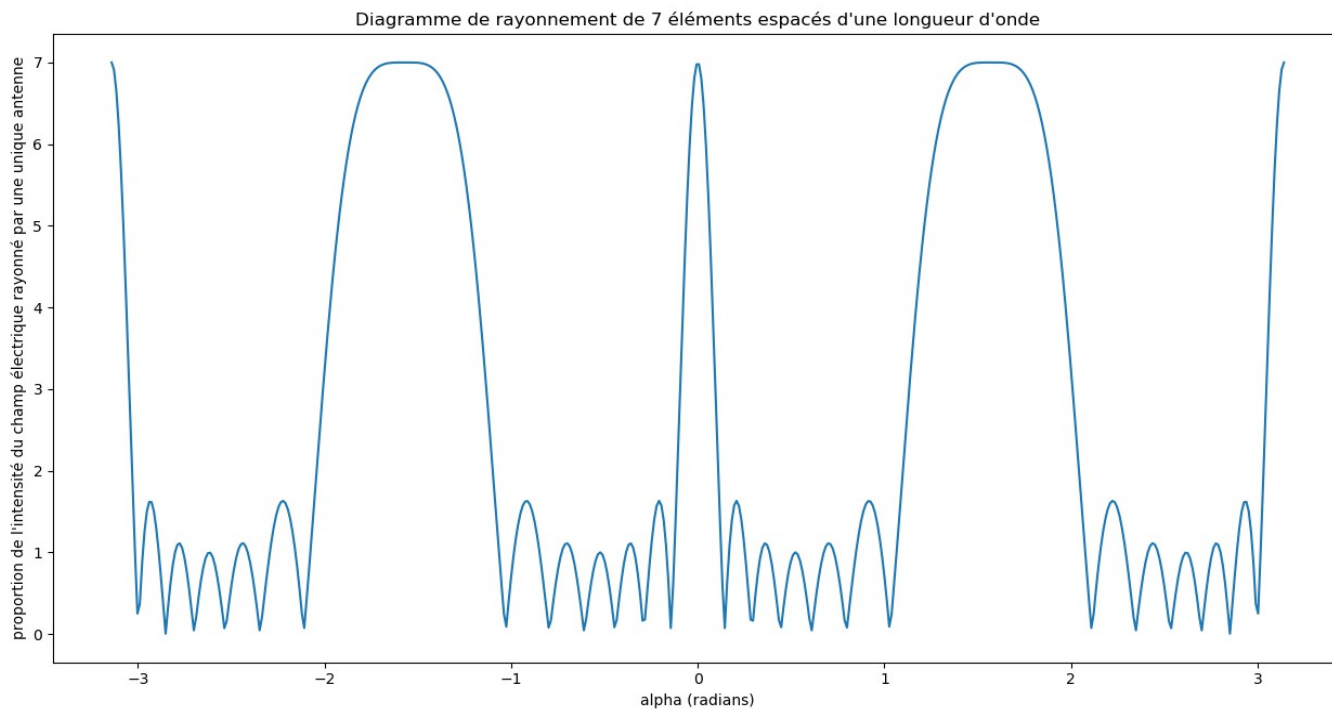
$$A_i : E_i = E_n \exp(j(i - n)kl \cos(\varphi))$$

$$E_{\text{tot}} = E_n \sum_{i=0}^{n-1} [\exp(-jkl \cos(\varphi))]^i$$

$$E_{\text{tot}} = C(t) \left[ \frac{\sin\left(\frac{nk}{2} l \sin(\alpha)\right)}{\sin\left(\frac{k}{2} l \sin(\alpha)\right)} \right]$$

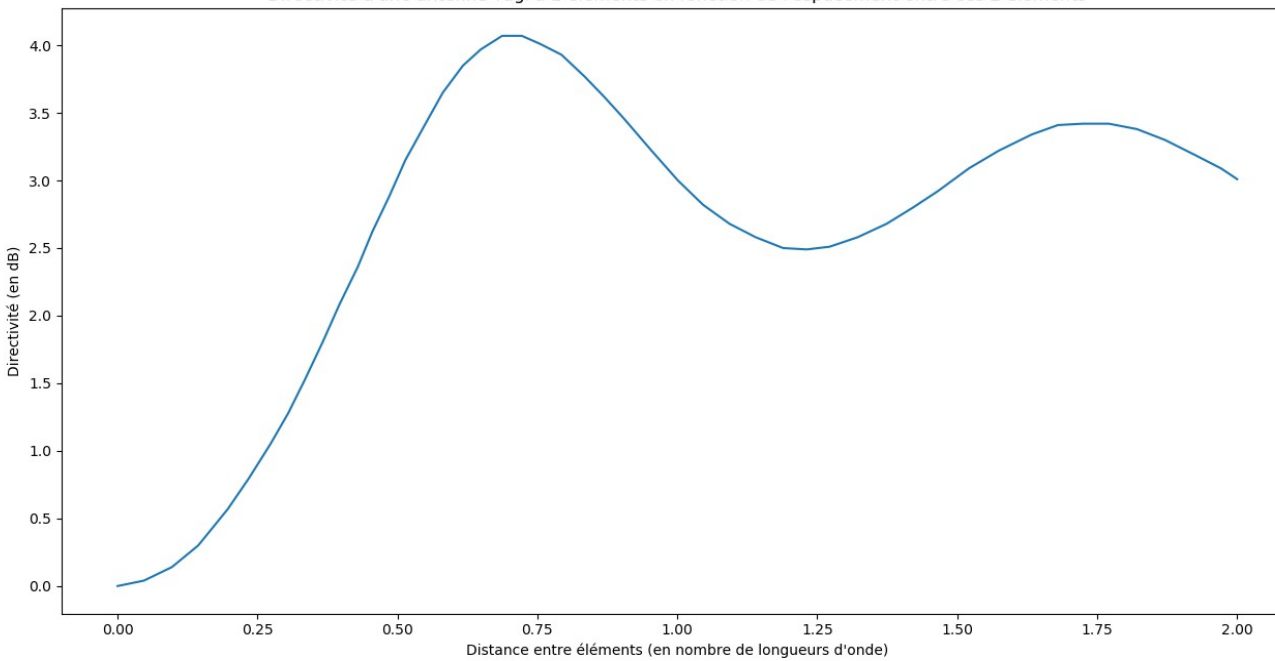


- La distance entre les éléments (antennes dipolaires) de l'antenne Yagi influe sur la directivité et le nombre de lobes principaux



- Introduire un déphasage entre les éléments permet de modifier la direction d'émission

Directivité d'une antenne Yagi à 2 éléments en fonction de l'espacement entre ces 2 éléments



Évolution de la directivité d'une antenne Yagi à deux éléments en fonction de la distance séparant ces deux éléments

➤ La directivité de l'antenne dépend également du nombre d'éléments

Diagramme de rayonnement de 20 éléments espacés d'une demie longueur d'onde

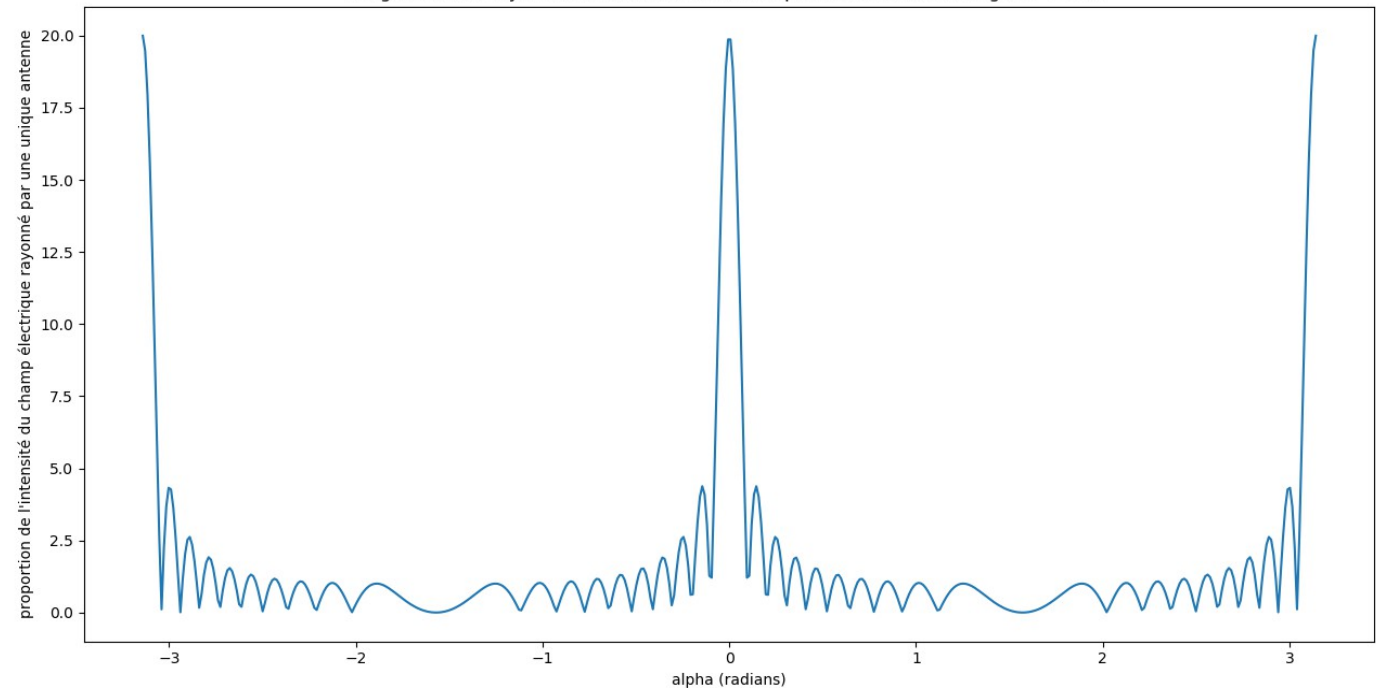
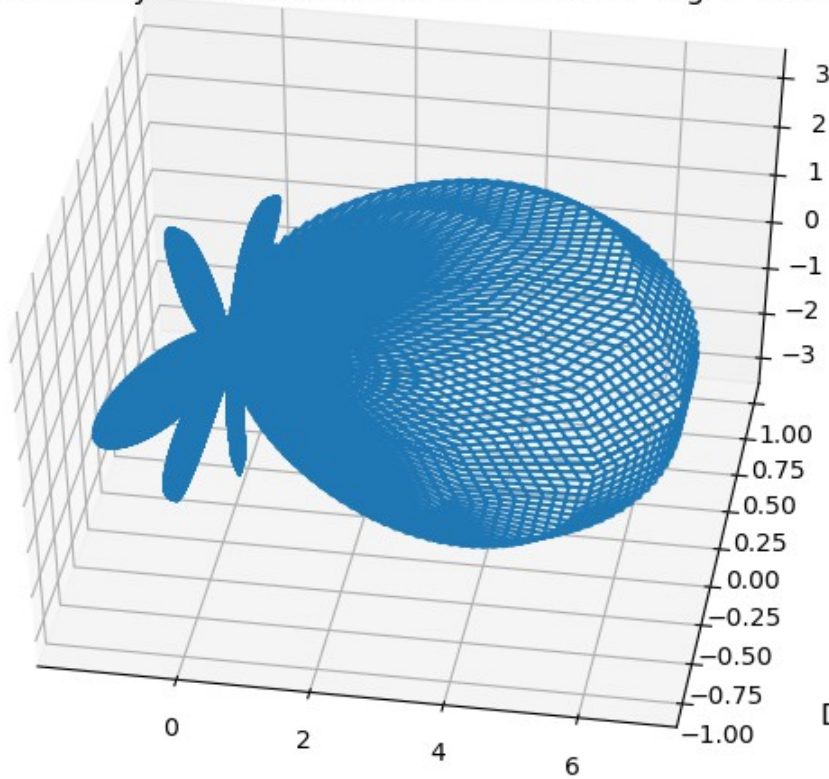


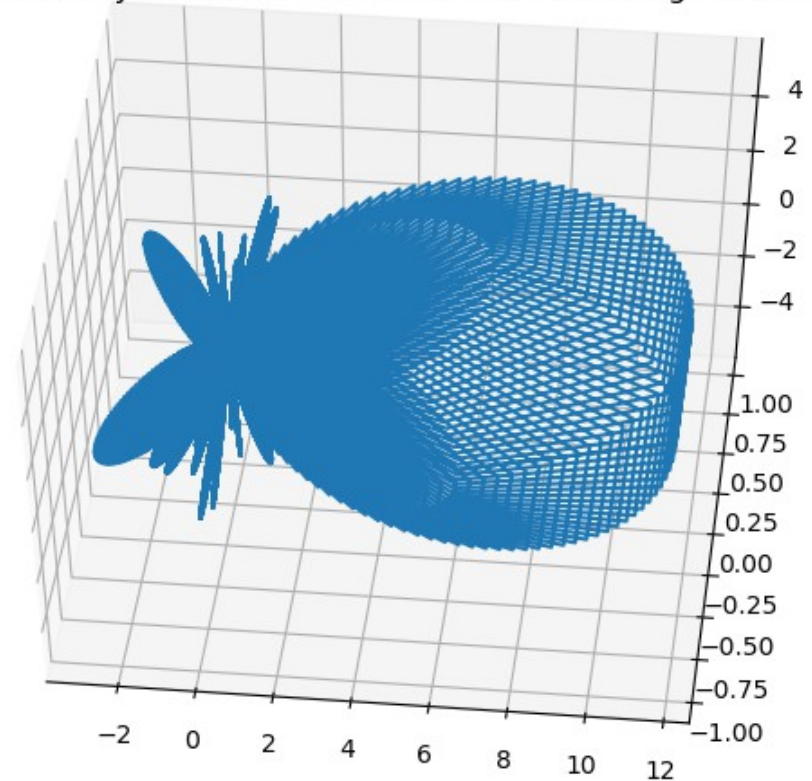


Diagramme de rayonnement simulé d'une antenne Yagi à 7 éléments



Simulation Python pour vérifier les résultats et déterminer les diagrammes de rayonnement d'un réseau quelconque d'antennes dipolaires

Diagramme de rayonnement simulé d'une antenne Yagi à 50 éléments



*Conclusion* : Le diagramme de rayonnement d'antennes complexes dépend :

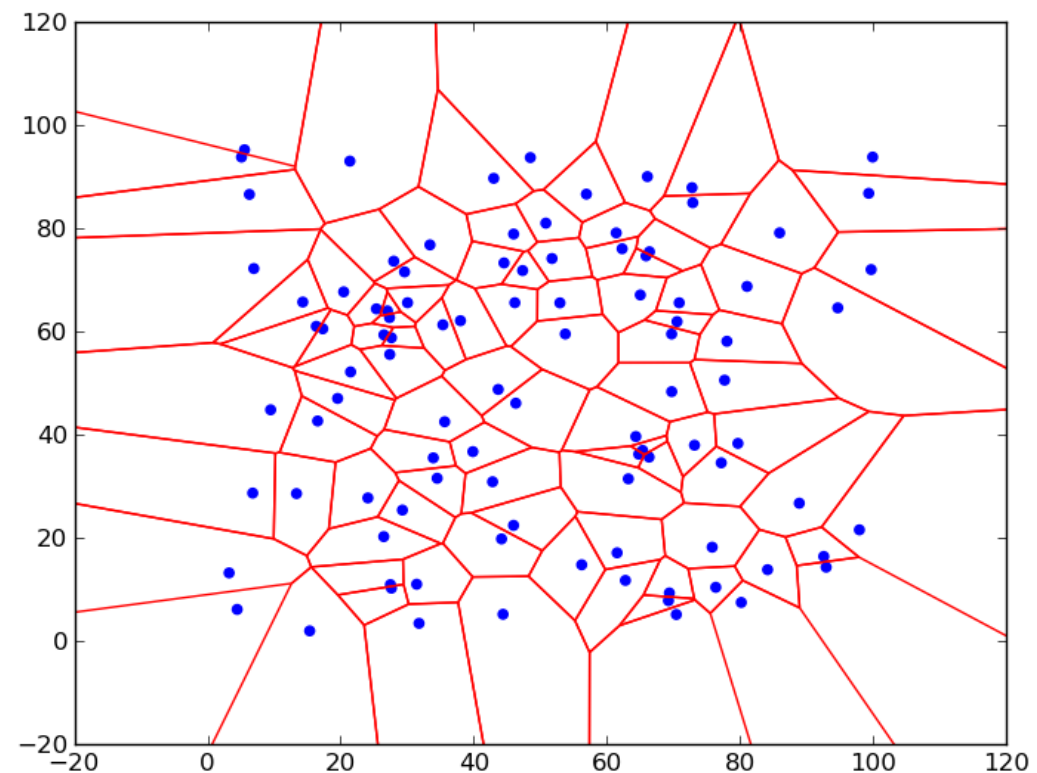
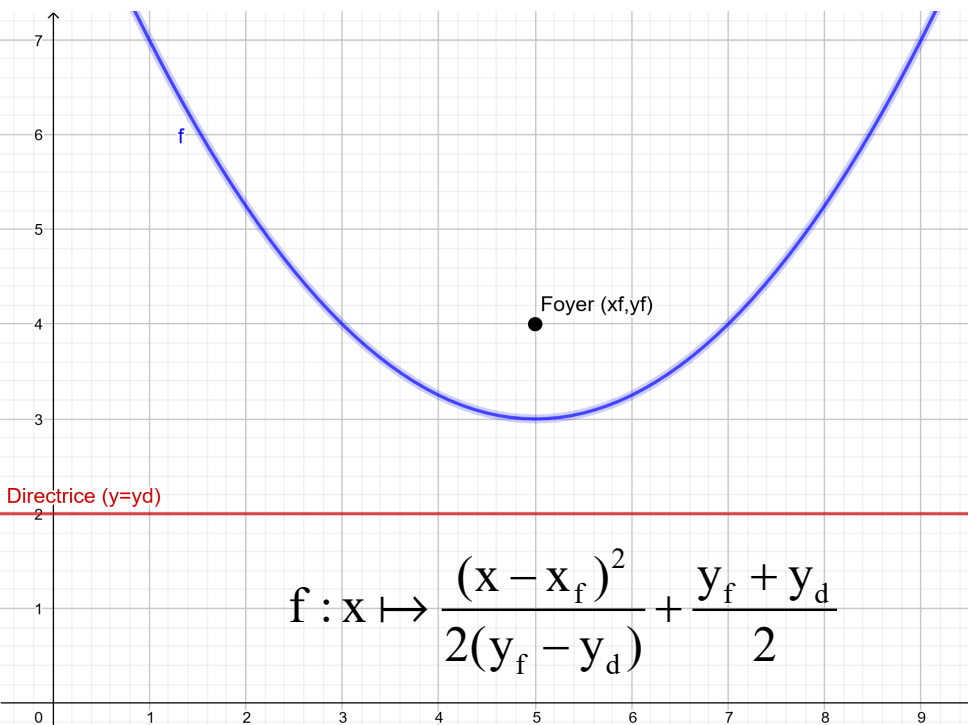
- du nombre d'éléments primaires
- de l'espacement entre ceux-ci
- d'éventuels déphasages

Importants pour optimiser des réseaux d'antennes complexes

# III. Agencement d'antennes complexes en réseau

- *Objectif* : Déterminer les agencements optimaux d'antennes au sein d'un réseau cellulaire à l'aide de diagrammes de Voronoï. Ajuster la construction des diagrammes avec les figures de rayonnement des antennes étudiées.

## 1. Diagrammes de Voronoï et algorithme de Fortune :



➤ Algorithme de balayage discret  
du plan

➤ Rapide pour un réseau  
comportant un grand nombre  
d'antennes (complexité en  
 $O(n \log(n))$ )

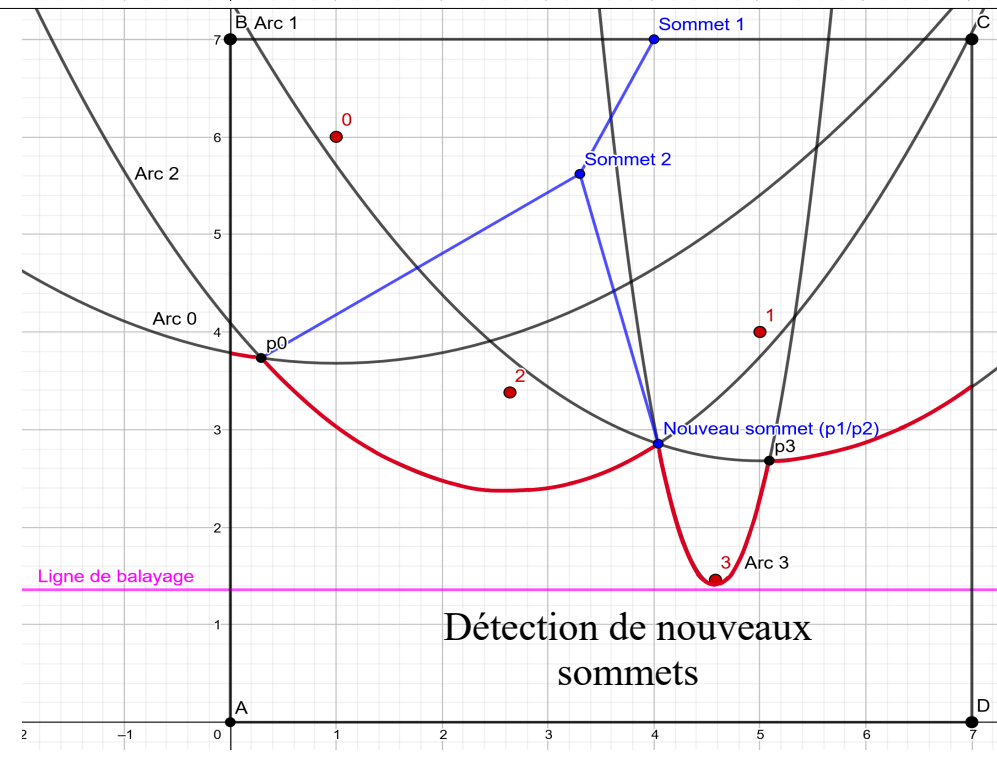
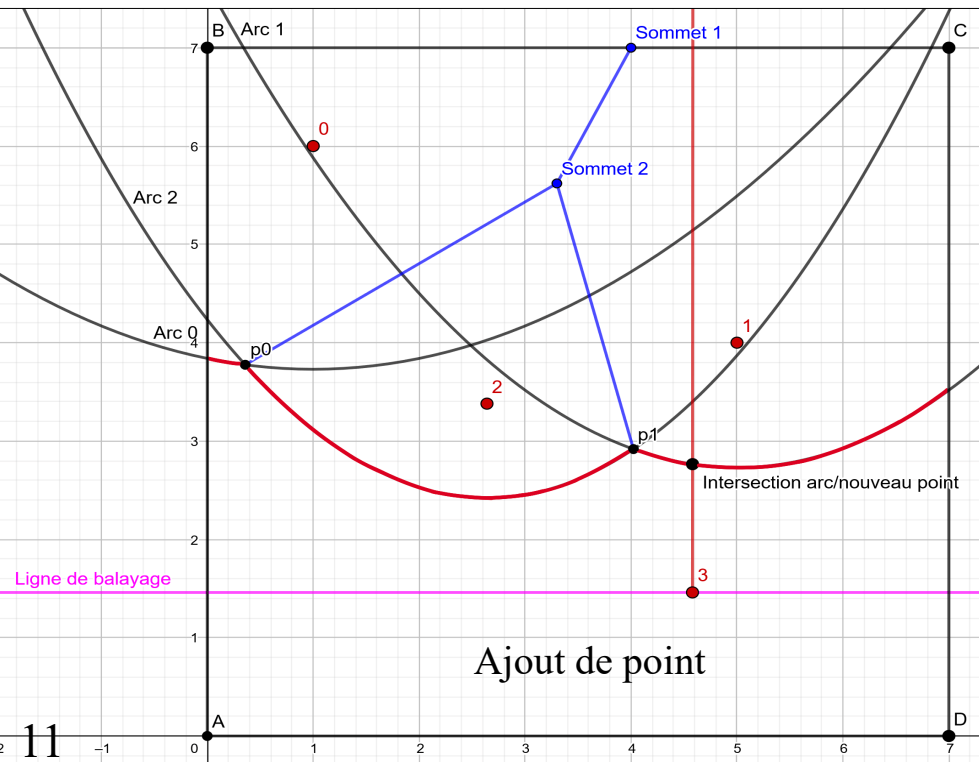
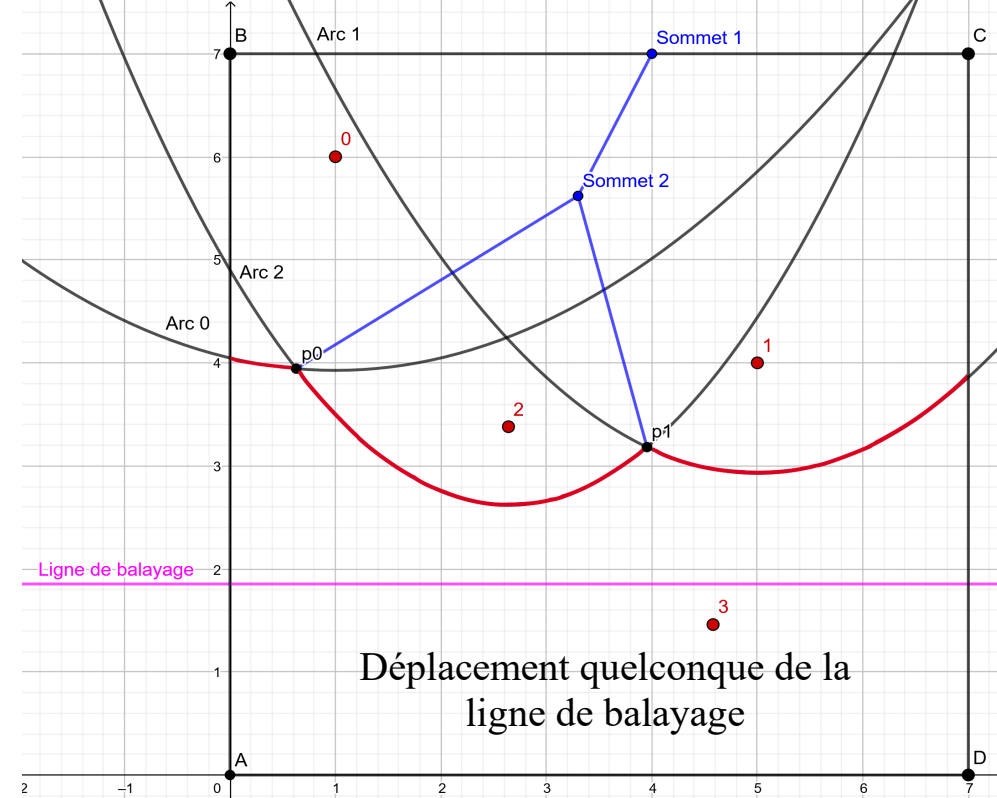
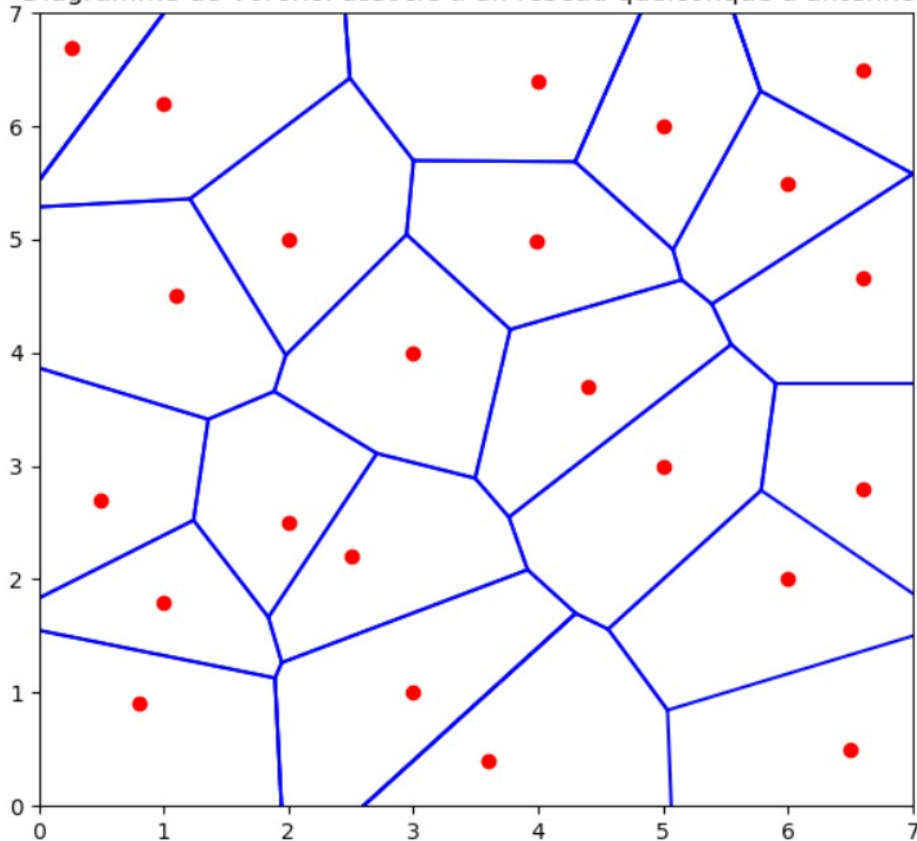


Diagramme de Voronoï associé à un réseau quelconque d'antennes

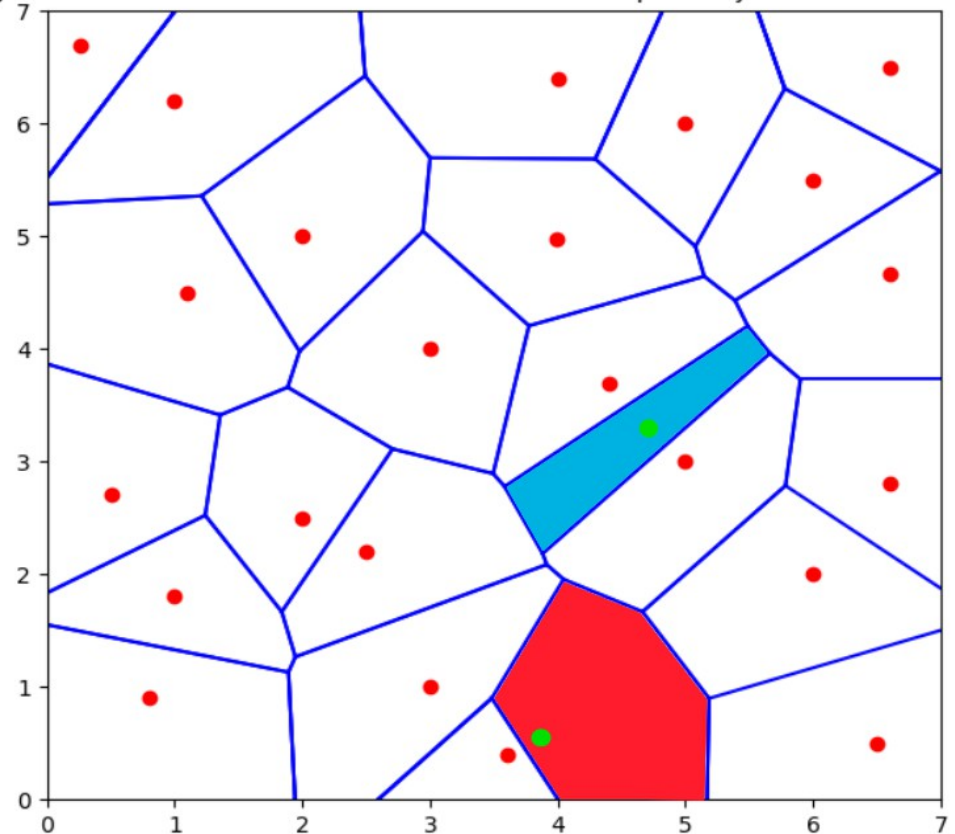


Résultats donné par l'implémentation faite sur Python pour une répartition quelconque d'antennes

Fournit les « zones d'influence » en termes de distance de chaque antenne

- Ajout rapide d'antenne
- Raffinement des cellules existantes
- Renseigne sur le type d'antennes à considérer

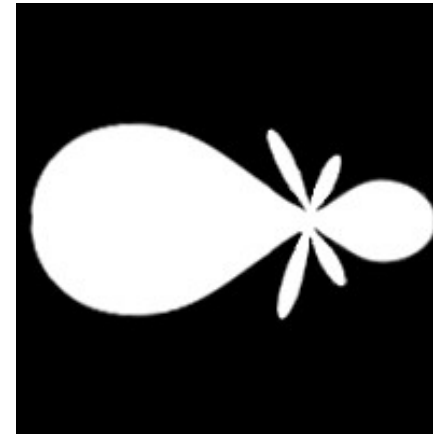
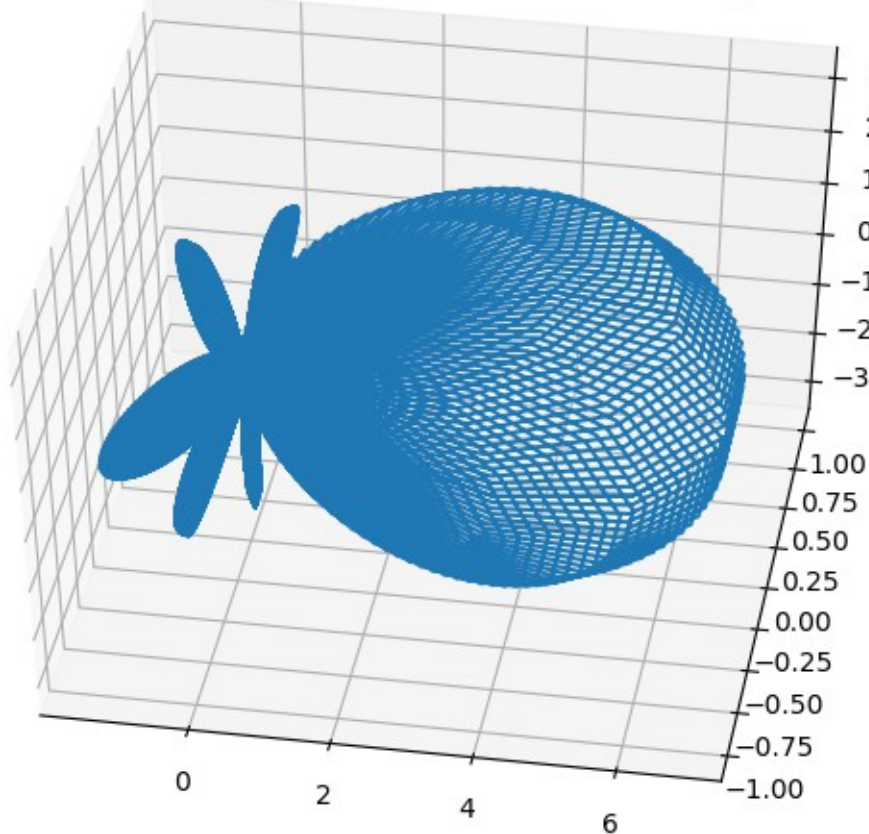
Diagramme de Voronoï associé au même réseau après l'ajout de deux antennes



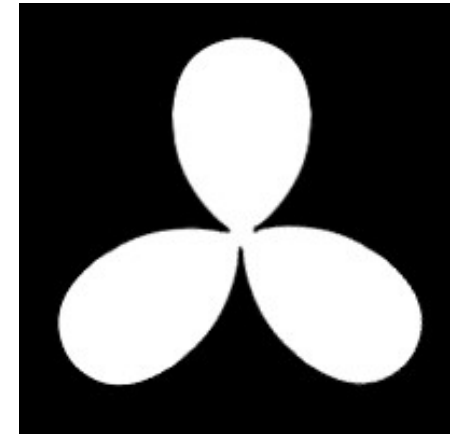


## 2. Cartes cellulaires adaptées aux propriétés des antennes :

Diagramme de rayonnement simulé d'une antenne Yagi à 7 éléments



Profil 1



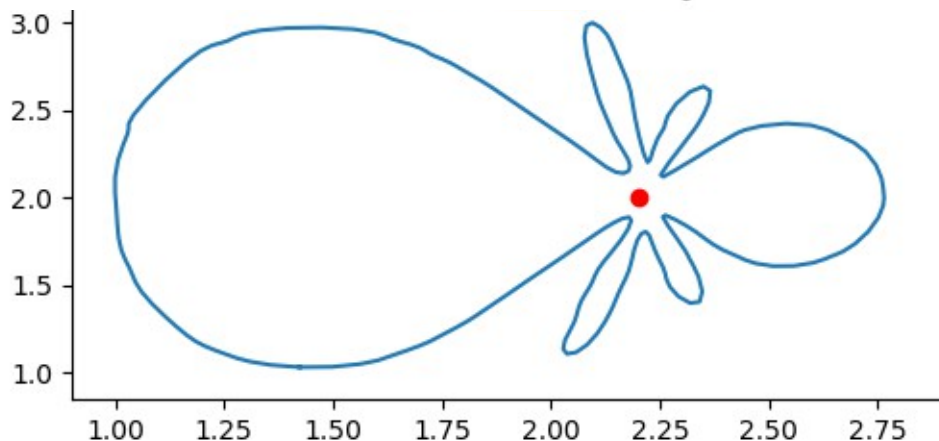
Profil 2

- Mise en évidence des « contours » des profils par traitement d'images sur Python
- Transformée de Fourier discrète pour obtenir une expression paramétrique des « contours »

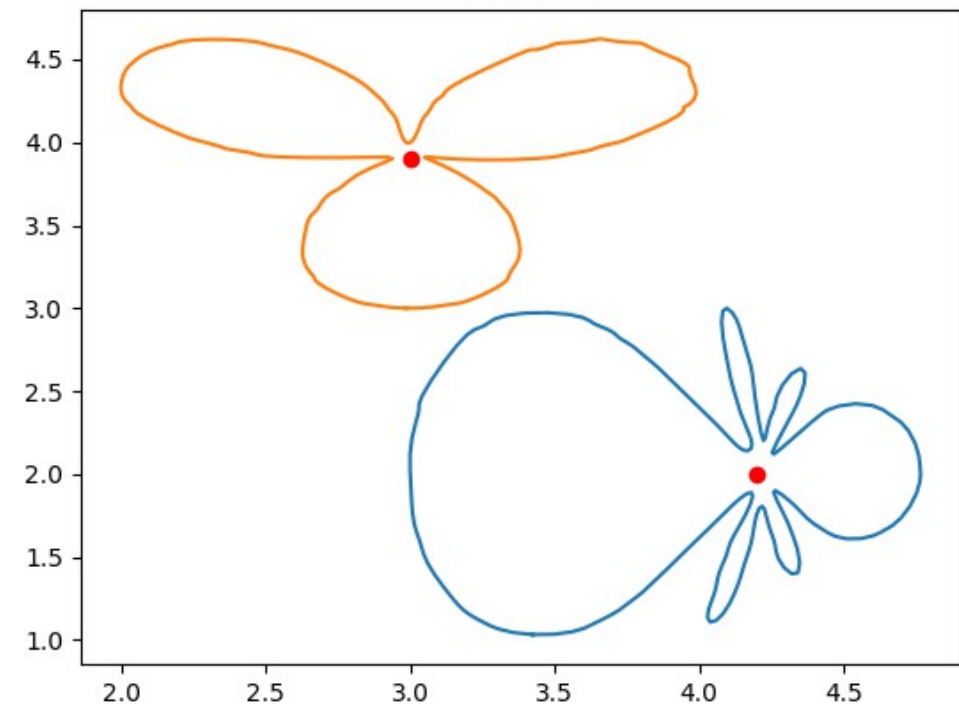
$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos(kt) + b_k \sin(kt))$$

$$y(t) = \frac{c_0}{2} + \sum_{k=1}^n (c_k \cos(kt) + d_k \sin(kt))$$

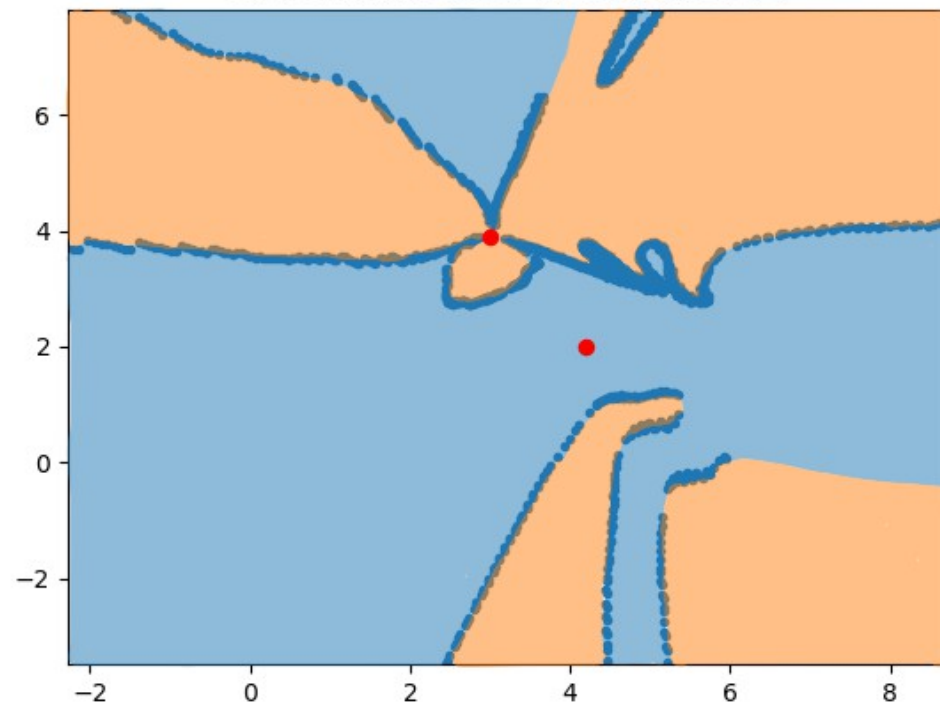
Exemple de résultat



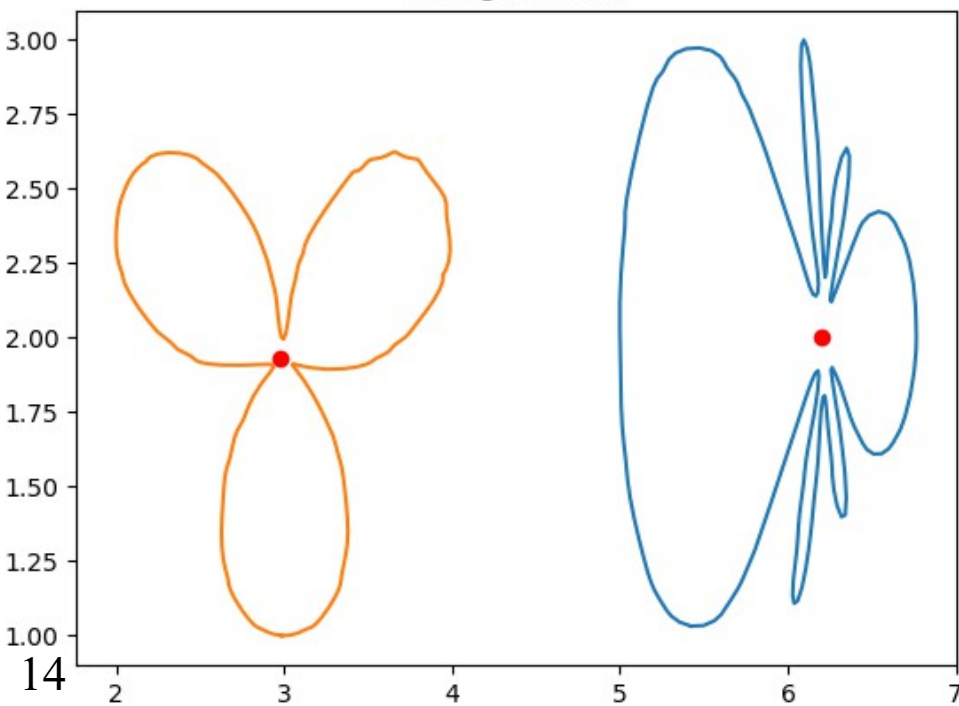
Configuration 1



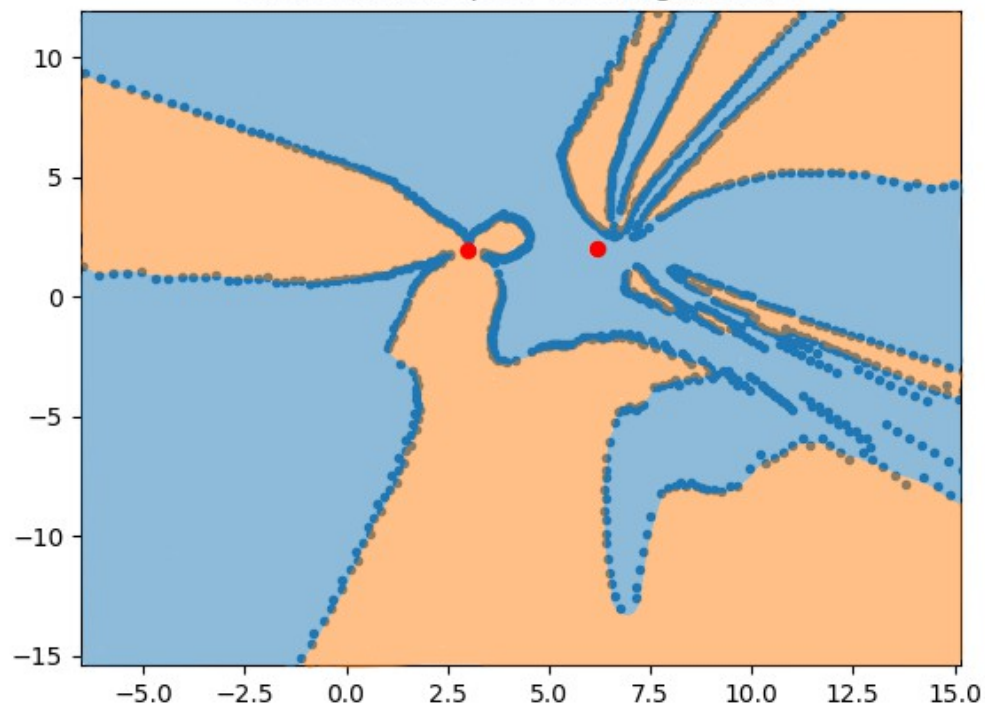
Carte cellulaire pour la configuration 1



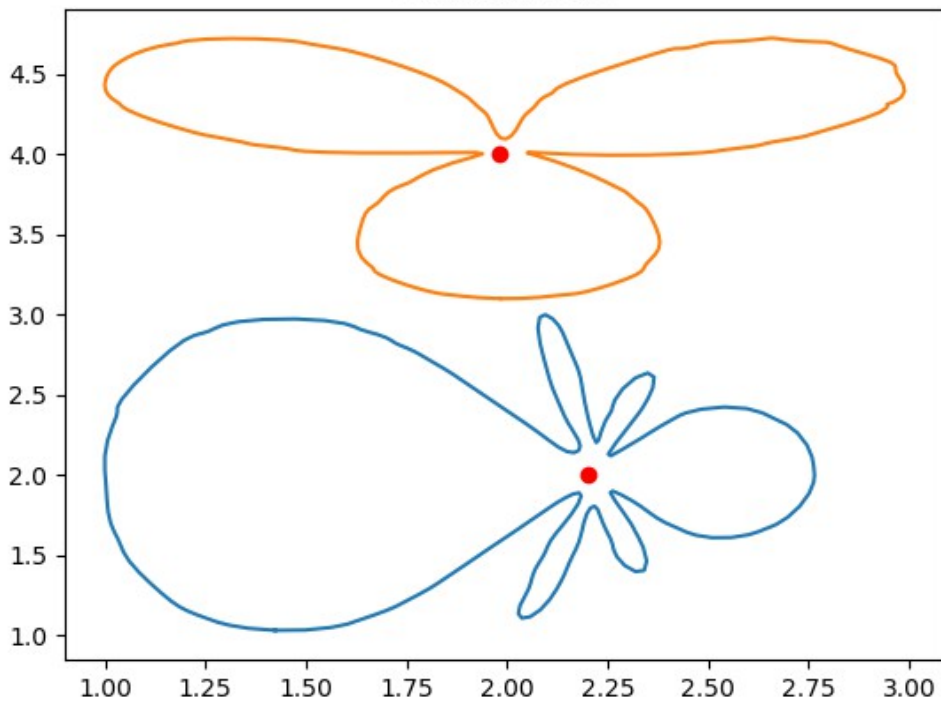
Configuration 2



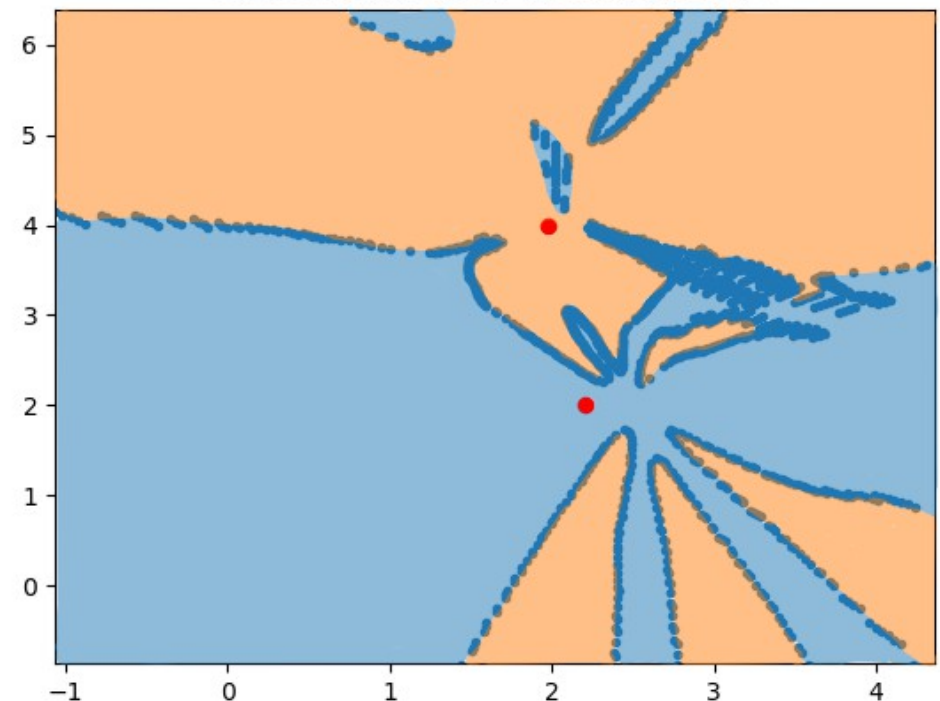
Carte cellulaire pour la configuration 2



Configuration 3



Carte cellulaire pour la configuration 3



### *Conclusion :*

Outils pour le placement d'antennes complexes en réseau :

- Diagrammes de Voronoï
- Raffinement des diagrammes de Voronoï avec des cartes cellulaires prenant en compte les spécificités des antennes en termes de rayonnement.

# Conclusion de l'étude

## *Résultats :*

- Cartes cellulaires associées à des réseaux d'antennes complexes
- Diagrammes de rayonnement d'antennes simples couplées pour former des antennes complexes
- Outils pour l'agencement d'antennes en réseau en ayant pris en compte spécificités environnementales et caractéristiques des antennes

## *Pistes de prolongement :*

- Étudier le problème de l'agencement d'antennes complexes en réseau avec une dimension supplémentaire (cartes cellulaires et diagrammes de Voronoï de l'espace  $\mathbb{R}^3$ )
- Étudier le problème de l'agencement des fréquences des canaux d'émission au sein d'un réseau de radiocommunication
- Généraliser la construction de cartes cellulaires du plan à un nombre quelconque d'antennes complexes