

# Antennes à commande de phase

*Tipe 2020-2021 – Enjeux sociétaux*

Héloïse LAFARGUE

Numéro de candidat : 15603

# Introduction et problématique

Comment balayer l'espace sans mouvement physique de l'antenne ?

Comment mettre en œuvre un système d'antenne à commande de phase ?



*ONERA - 1er système européen de veille spatiale GRAVES, 2019*

## Enjeux :

détection d'objets en mouvement

- débris spatiaux
- satellites malveillants (sécurité militaire)

# Sommaire

## I – Généralités sur les antennes

- Principe d'une antenne
- Quelques caractéristiques

## II – Antenne sans déphasage

- Montage
- Problèmes rencontrés et hypothèses
- Résultats et observations

## III - Introduction d'un déphasage

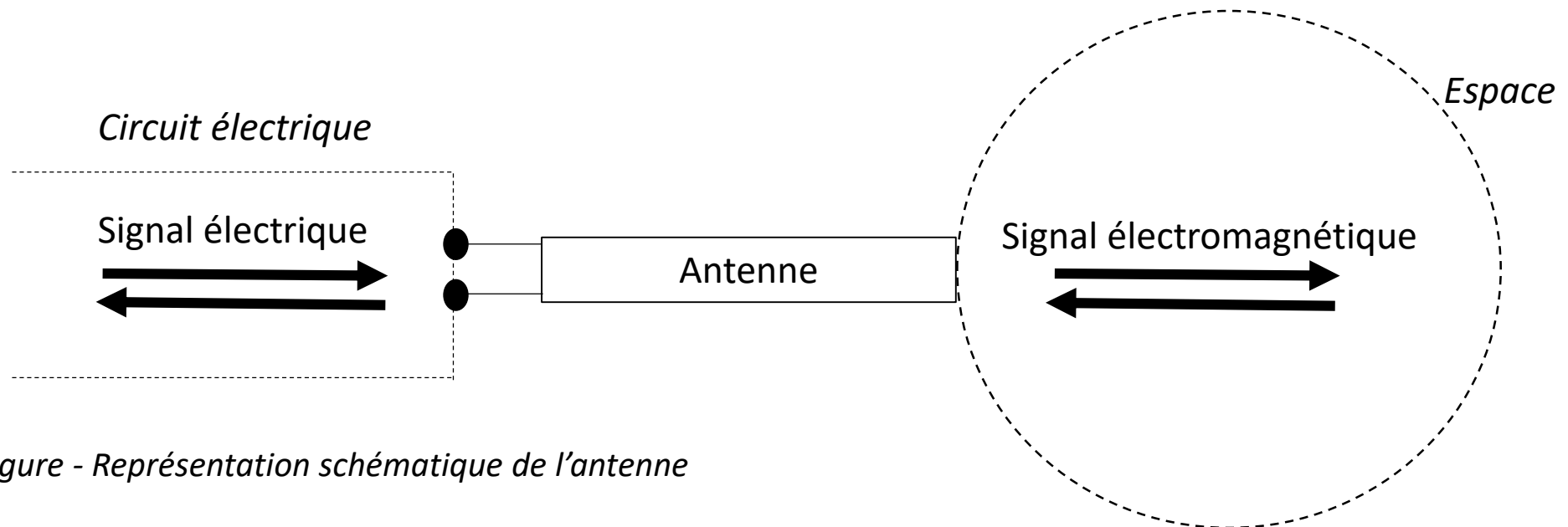
- Montage d'un déphaseur analogique
- Résultats et analyse théorique

## IV- Détection d'un objet

- Montage et résultats

# I – Généralités sur les antennes

- Principe d'une antenne
  - Transfert d'information par propagation d'ondes électromagnétiques
  - Conversion signal électrique/électromagnétique



*Figure - Représentation schématique de l'antenne*

# I – Généralités sur les antennes

- Quelques caractéristiques
  - diagramme de rayonnement
  - directivité et largeur du faisceau

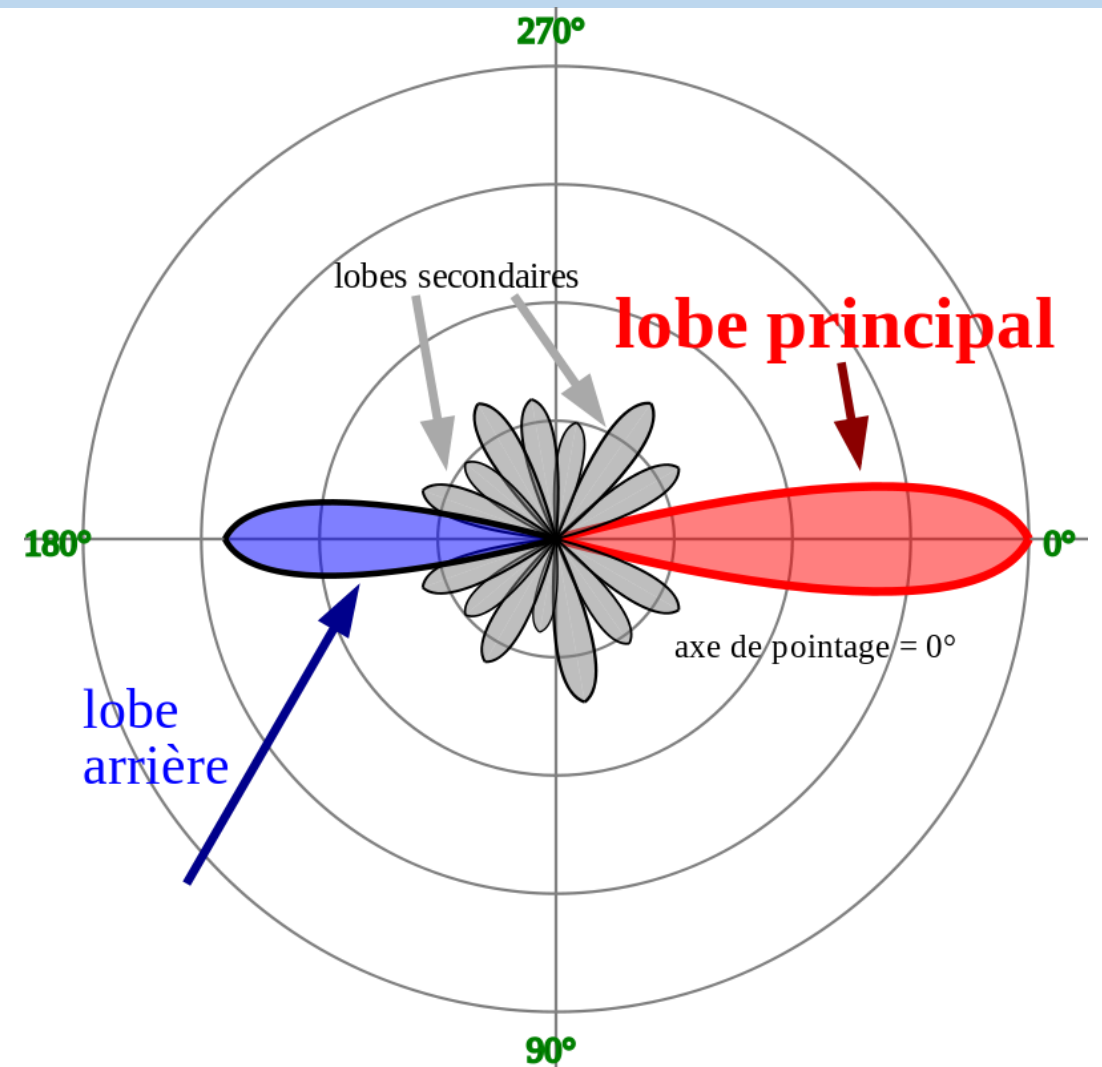


Figure – Diagramme de rayonnement Wikipédia

## II- Mise en place d'une antenne sans déphasage

- Montage

Amplificateur

*Geneboost, 0–200 kHz*

Buzzer

*piézoélectrique SV3  
 $f_{\text{résonance}} = 2\,833\text{ Hz}$*

Plateau  
tournant

GBF

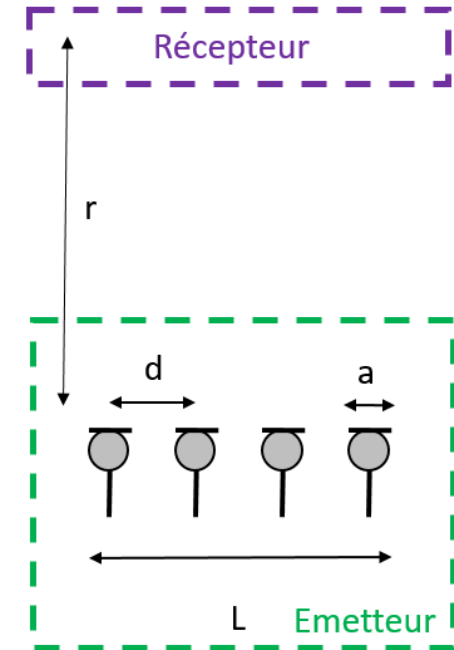
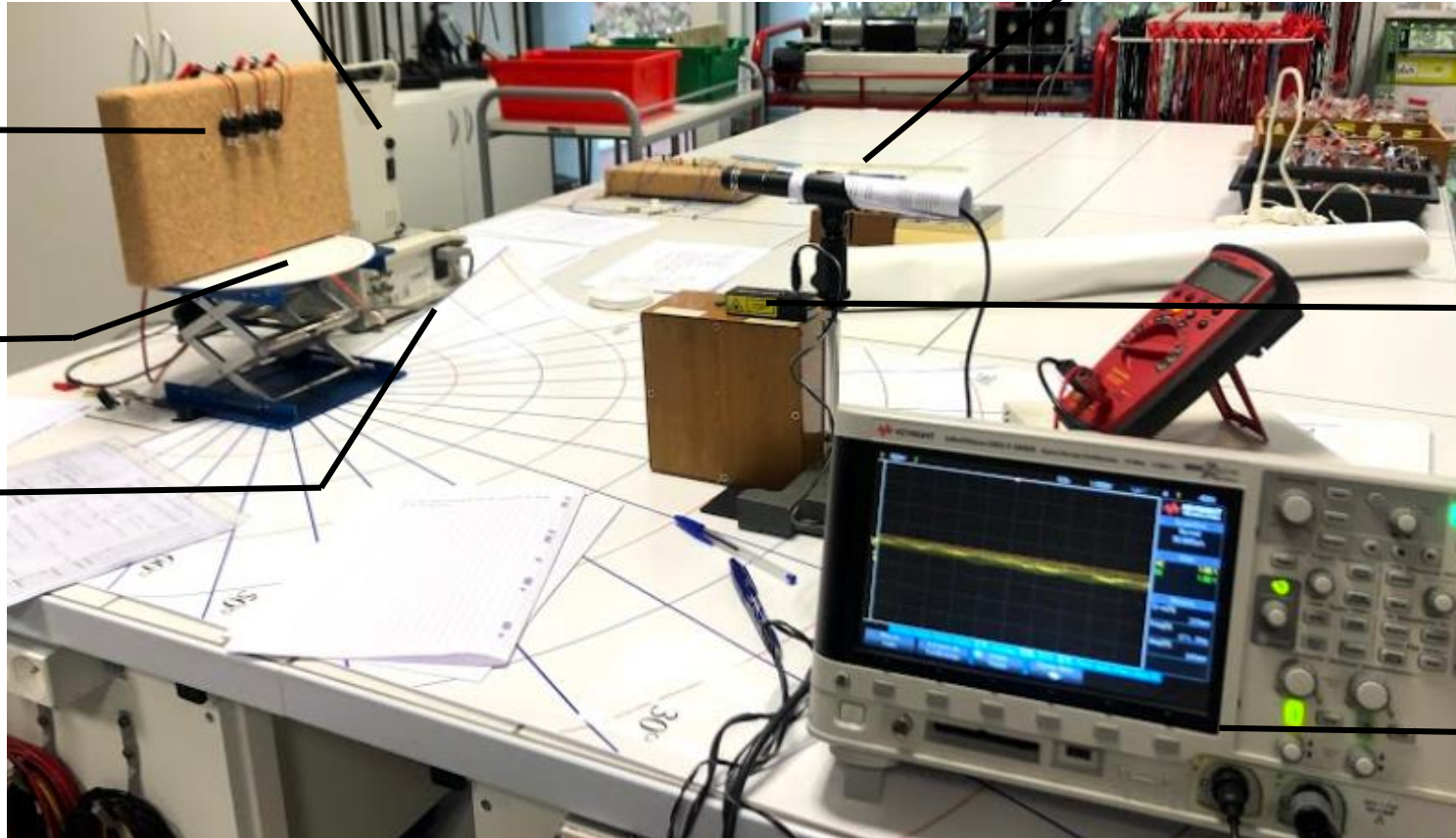
*RIGOL, signal  
sinusoïdal  
à 2833 Hz, 10 V<sub>pp</sub>*

Micro

Laser

Oscilloscope

*Keysight*



*Distances :*

$a = 1,5\text{ cm}$

$d = 3\text{ cm}$

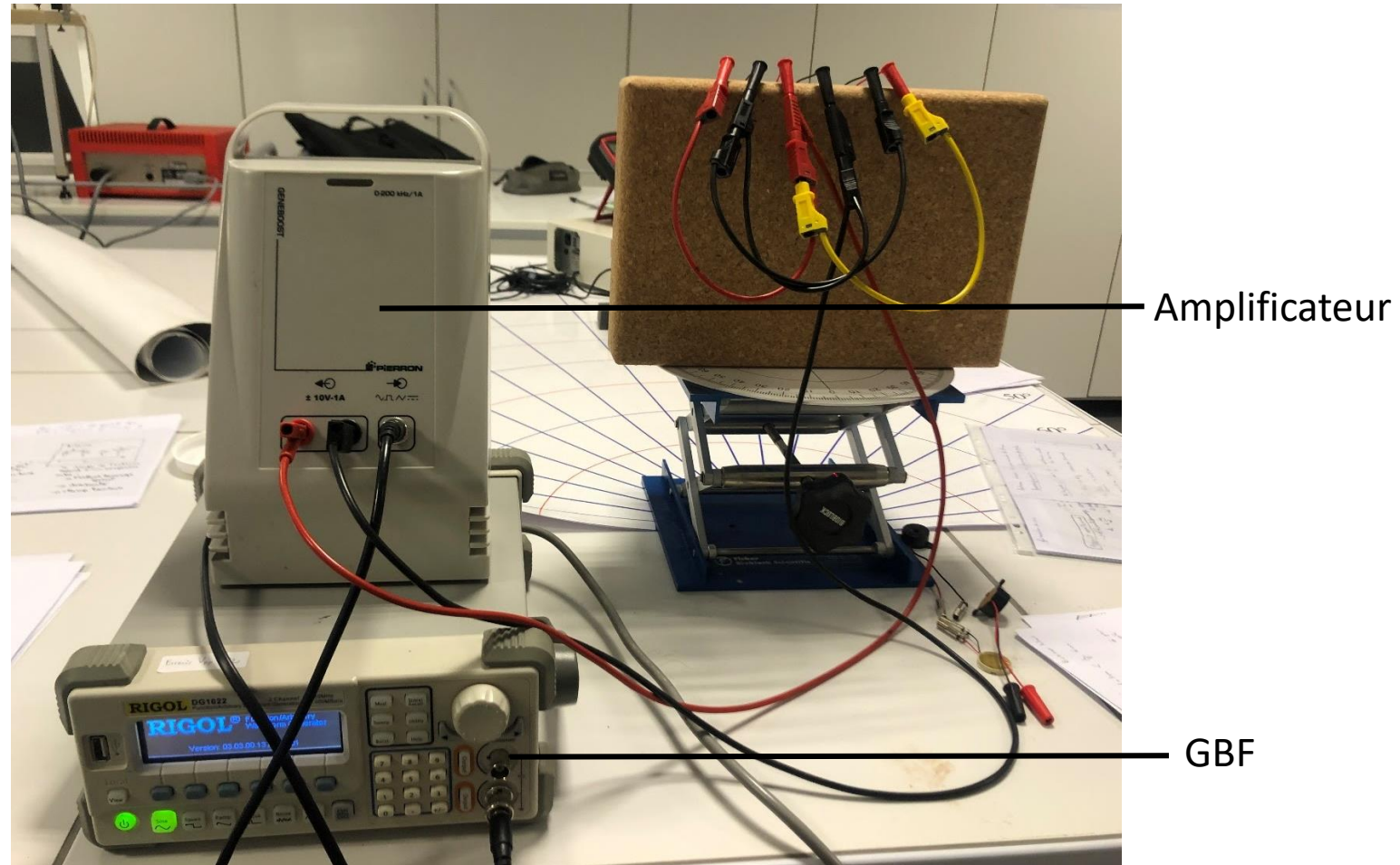
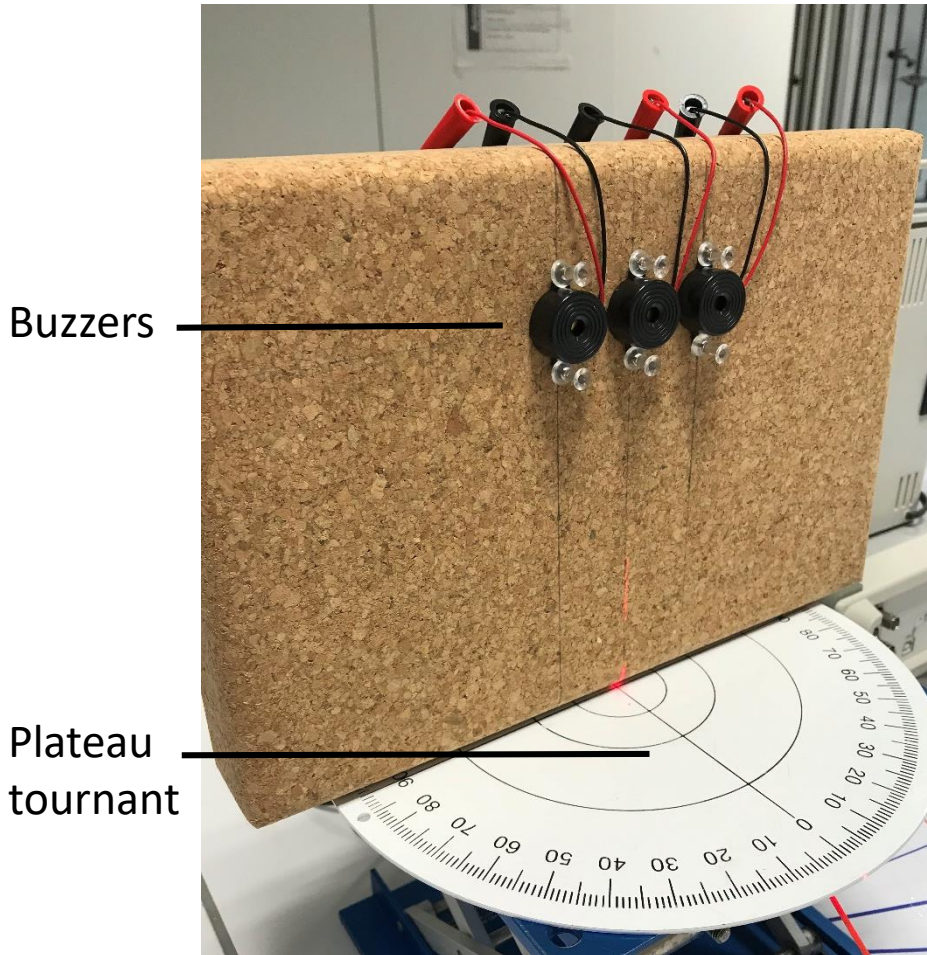
$f = 2\,833\text{ Hz}$

$r = 1\text{ m}$



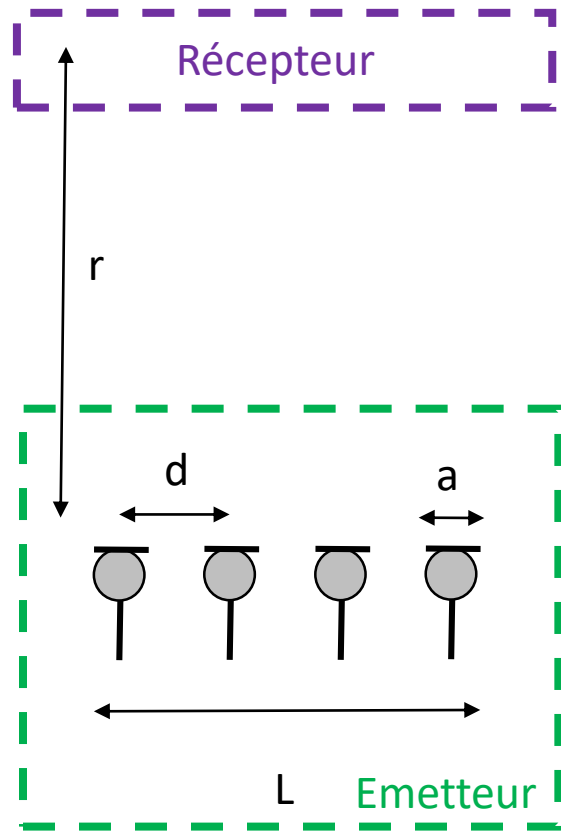
## II- Mise en place d'une antenne sans déphasage

- Montage



## II- Mise en place d'une antenne sans déphasage

- Hypothèses théoriques initiales :



-> échantillonnage spatial : théorème de Shannon

$$f_e > 2 f_0$$

$$f = \frac{1}{T}$$

$$\lambda = cT$$

$$d < \frac{\lambda_0}{2}$$

-> champ lointain

$$d \gg \frac{2 a^2}{\lambda_0}$$

$$r \gg \frac{2 L^2}{\lambda_0}$$

→ choix **ondes sonores** + distances caractéristiques  $d = \frac{\lambda_0}{4}$

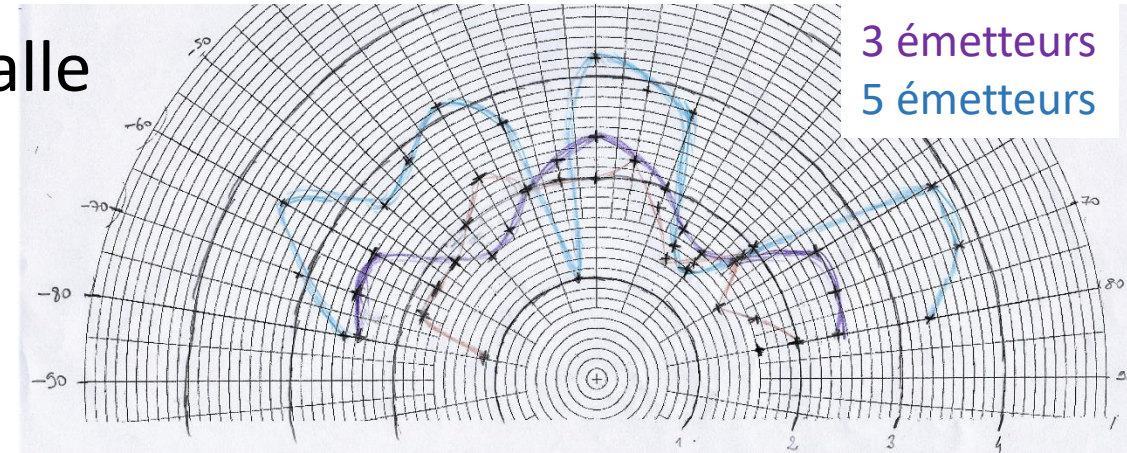
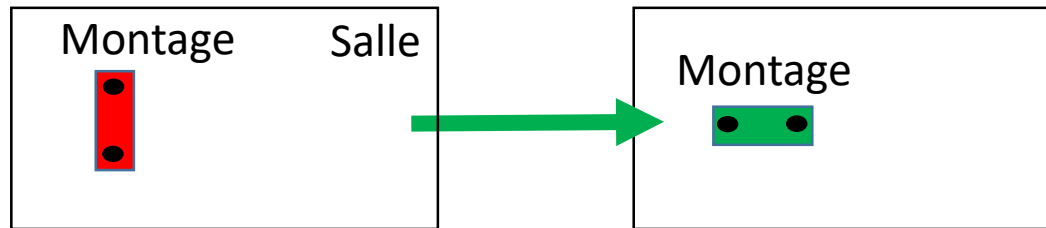
Expériences :  $f_0 = 2833\text{Hz}$   $\lambda_0 = 12\text{ cm}$   $d = 3\text{ cm}$   $a = 1,5\text{ cm}$   $r = 1\text{ m}$



## II- Mise en place d'une antenne sans déphasage

- Problèmes rencontrés

- réflexions dues à la position dans la salle



1<sup>er</sup> diagramme de rayonnement, défauts dus aux réflexions

- fréquence de résonance du buzzer



Buzzer SV12

Fréquence : 5 kHz

[Fiche technique de Ag-Electronique.fr]



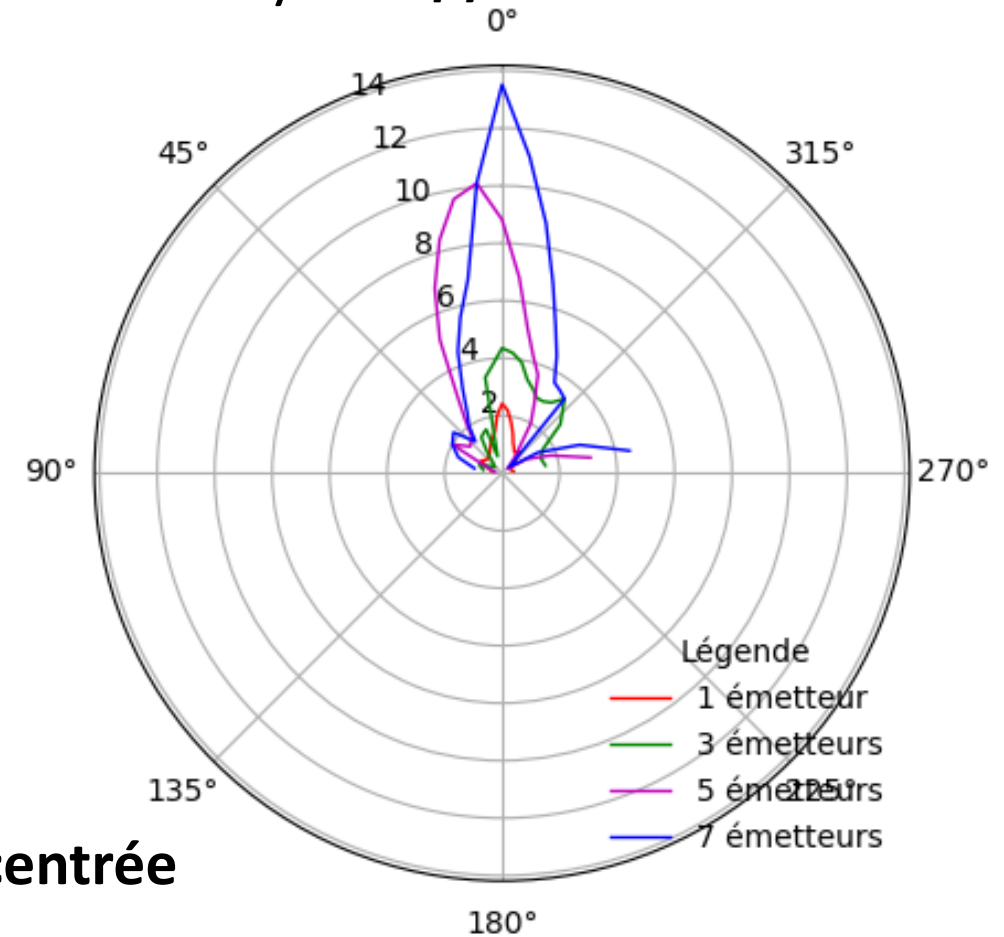
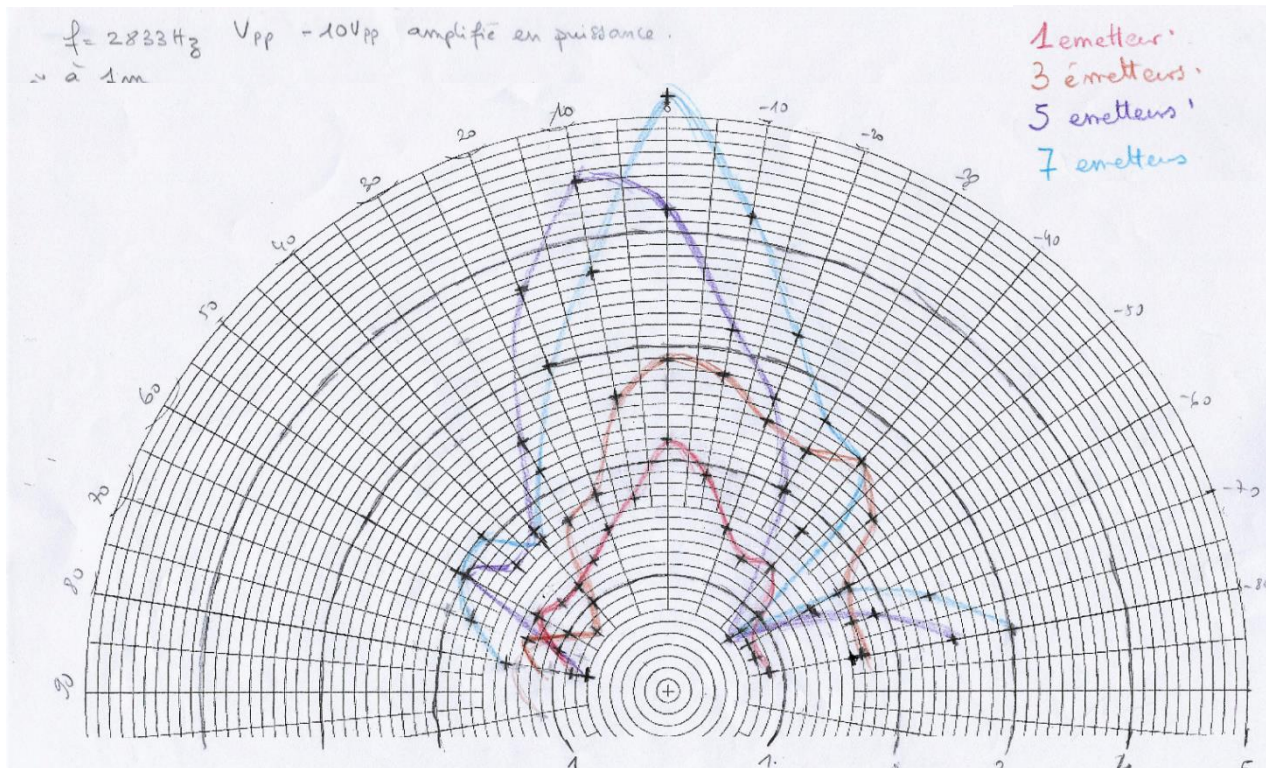
Buzzer piézoélectrique SV3

Fréquence: 2,8 kHz

[Fiche technique de Gotronic.fr]

## II- Mise en place d'une antenne sans déphasage

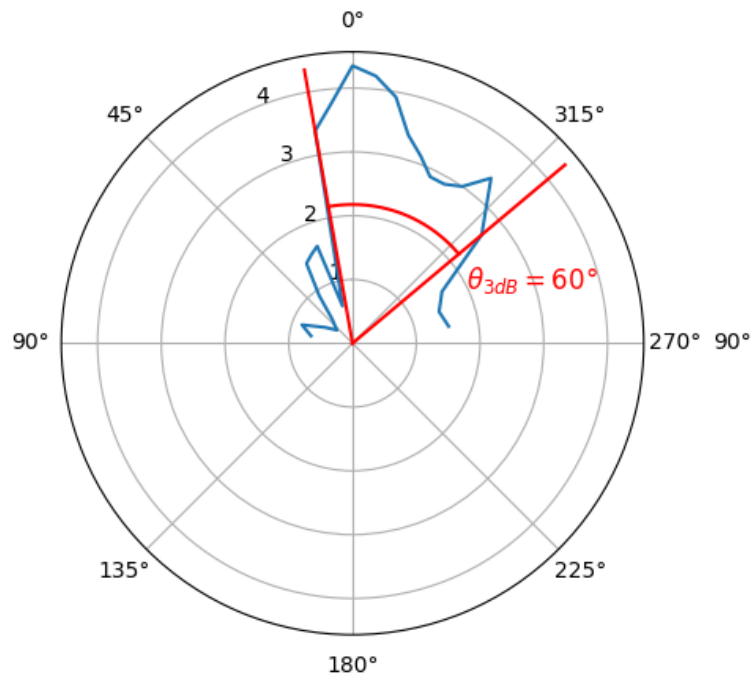
- Diagrammes de rayonnement en amplitude tracé à la main et en puissance sous Python [1]



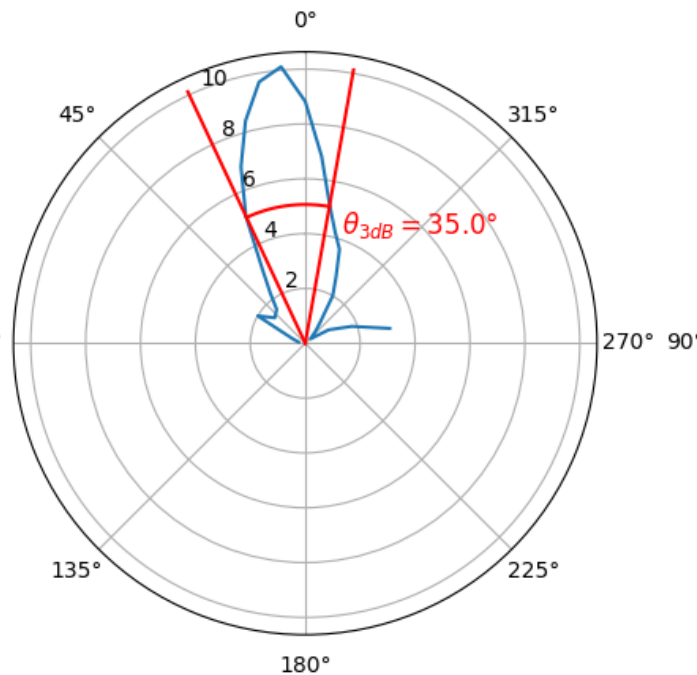
→ Plus il y a d'émetteurs : plus l'énergie est concentrée dans l'axe de l'antenne (0°)

## II- Mise en place d'une antenne sans déphasage

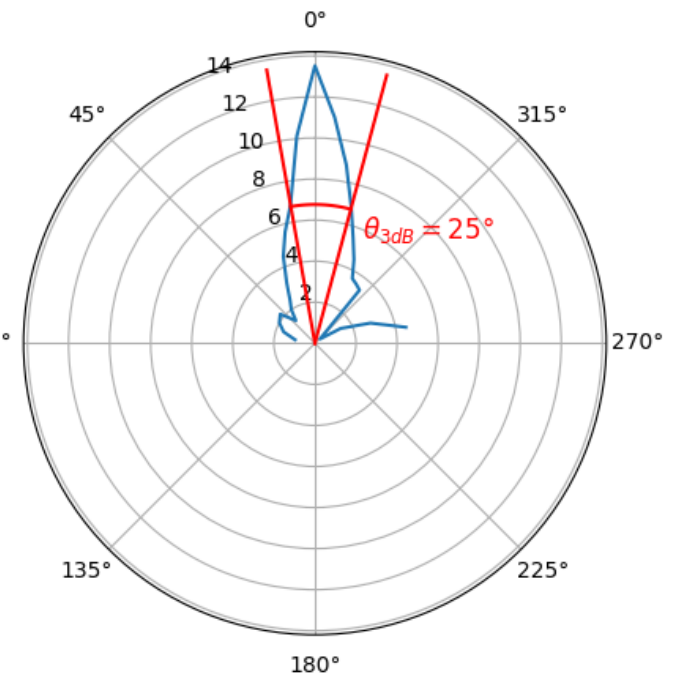
- Observations sur la directivité  
diagrammes de rayonnement en puissance Python [2]



3 émetteurs



5 émetteurs



7 émetteurs

→ Plus il y a d'émetteurs : plus la **directivité** augmente (lobe principal plus étroit)



## II- Mise en place d'une antenne sans déphasage

- Théorie à l'aide de la fonction réseau [3]

➤ Intensité résultante :

$$I = I_0 \cos^2 \theta \left[ \frac{\sin\left(\frac{N\pi d}{\lambda} \sin(\theta)\right)}{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin(\theta)\right)} \right]^2$$
$$= I_0 \cos^2 \theta \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi}{4} N \sin(\theta)\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{4} \sin(\theta)\right)} \right]^2$$

avec  $d = \frac{\lambda}{4}$

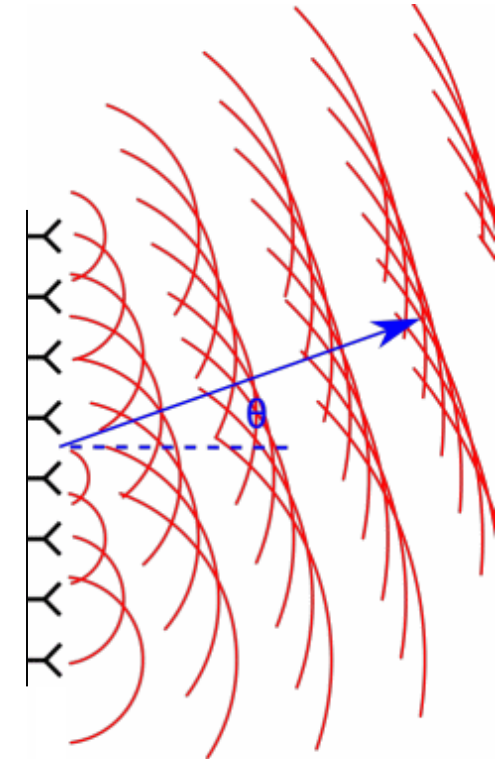
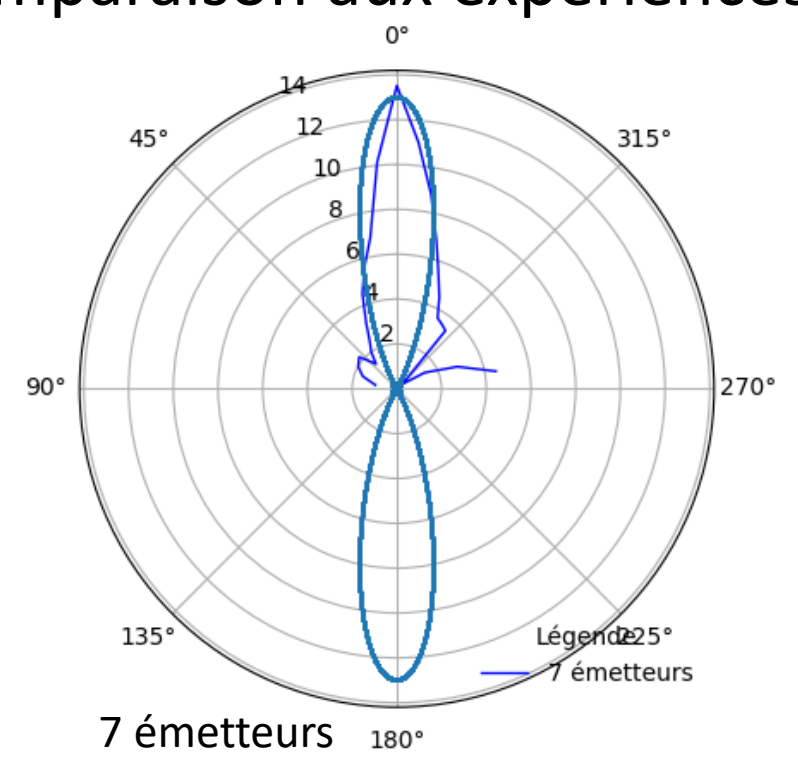
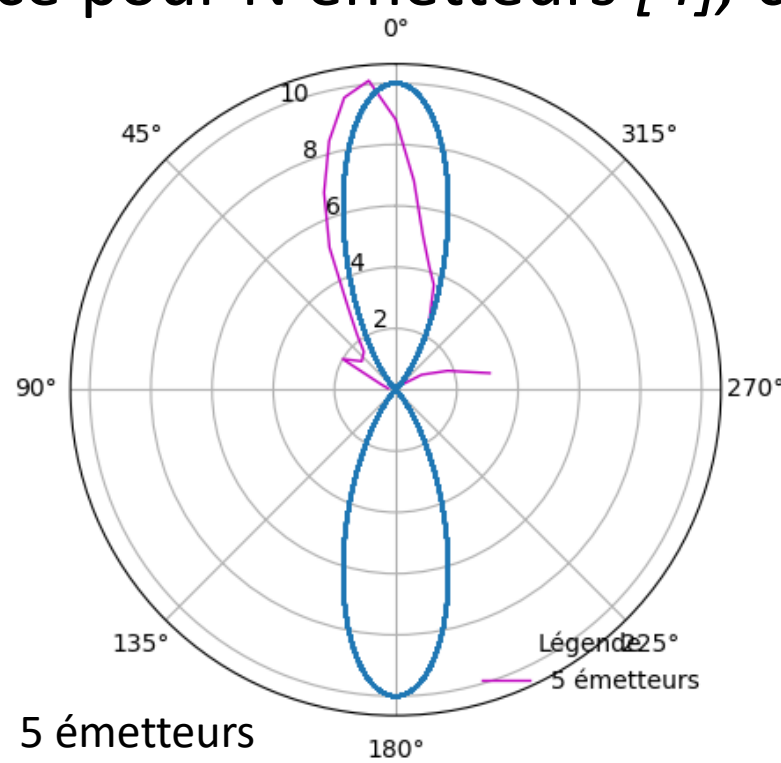
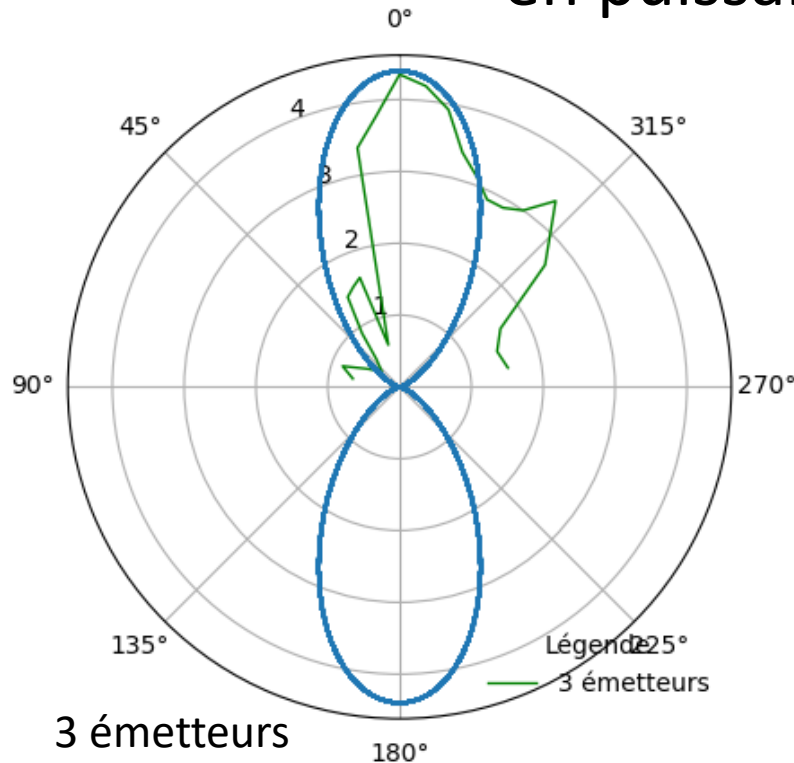


Diagramme d'un réseau d'antenne - Wikipédia

## II- Mise en place d'une antenne sans déphasage

- Diagrammes de rayonnement théoriques en puissance pour N émetteurs [4], comparaison aux expériences



→ Validation des observations : la **directivité augmente avec le nombre d'émetteurs** [5]



### III- Introduction d'un déphasage

- Montage d'un déphaseur analogique

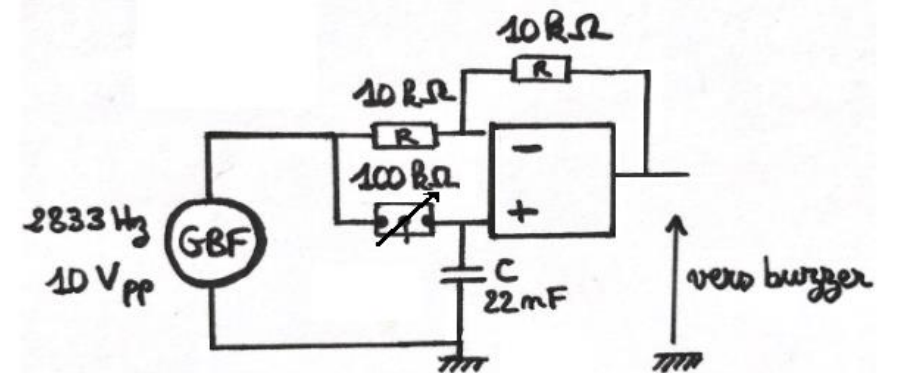
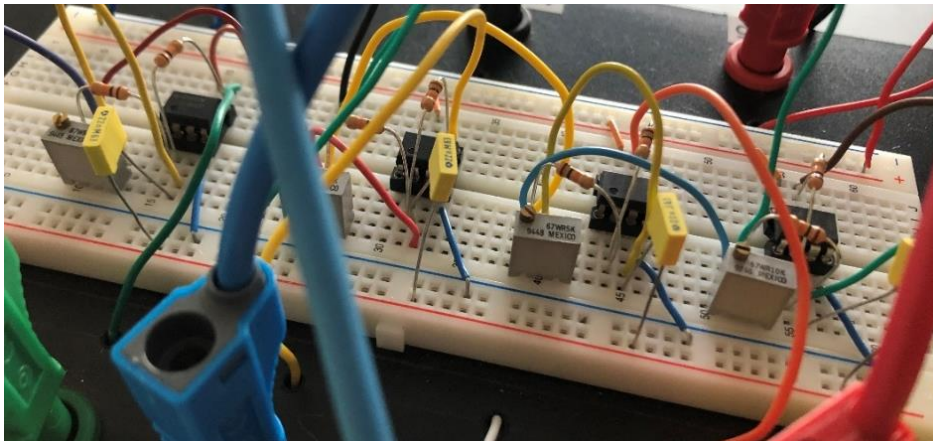
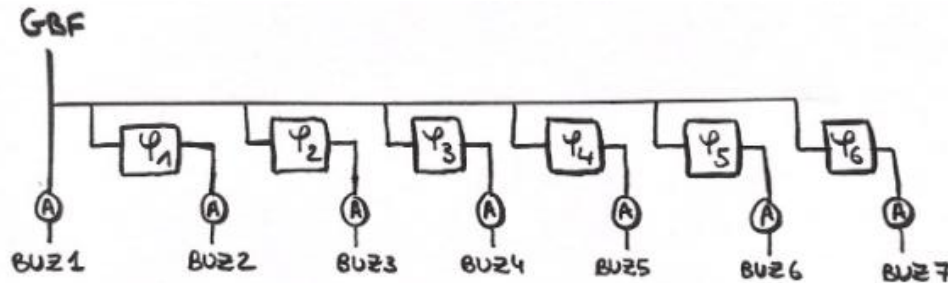


Figure – Montage déphaseur d'après Dictionnaire de physique expérimentale  
Tome III L'électronique par Daniel Aubert

**Fonction de transfert [6] :**

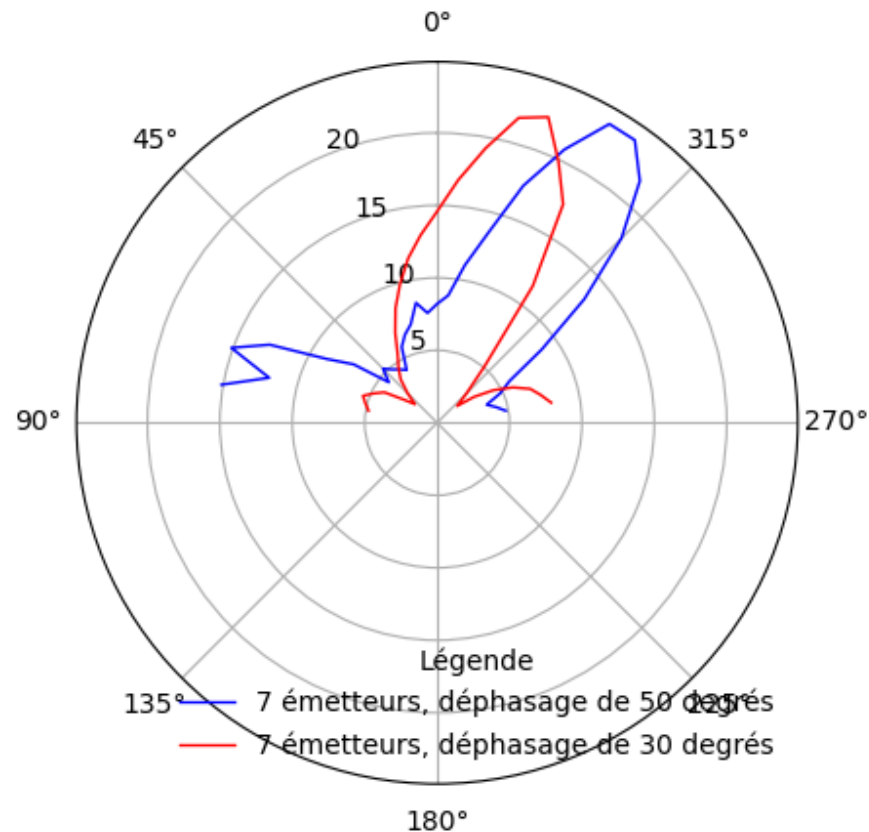
$$\underline{H} = \frac{V_s}{V_e} = \frac{1 - jRC\omega}{1 + jRC\omega}$$

$$|\underline{H}| = 1 \quad \arg(\underline{H}) = -2 \arctg(RC\omega) \rightarrow \text{déphaseur}$$

# III- Introduction d'un déphasage

- Résultats expérimentaux

Diagramme de rayonnement en puissance pour 7 émetteurs avec des déphasages de 30° et 50° [7]



Cohérence avec les calculs théoriques [8]

$$\theta = - \arcsin\left(\frac{\lambda \Phi}{2\pi d}\right)$$

Déphasage $\Phi$ (en °)	30	40	50	60
Déviatiion $\theta$ théorique (en °)	19,5	26	33	41,5
Déviatiion $\theta$ expérimentale (en °)	20	-	33	-

### III- Introduction d'un déphasage

- Théorie à l'aide de la fonction réseau [9]

➤ Intensité résultante :

$$I = I_0 \cos^2 \theta \left( \frac{\sin \left( \frac{N}{2} \left( \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta + \phi \right) \right)}{\sin \left( \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta + \frac{\phi}{2} \right)} \right)^2$$

$$= I_0 \cos^2 \theta \left[ \frac{\sin \left( \frac{\pi}{4} N \sin \theta + \frac{N}{2} \phi \right)}{\sin \left( \frac{\pi}{4} \sin \theta + \phi \right)} \right]^2$$

avec  $d = \frac{\lambda}{4}$

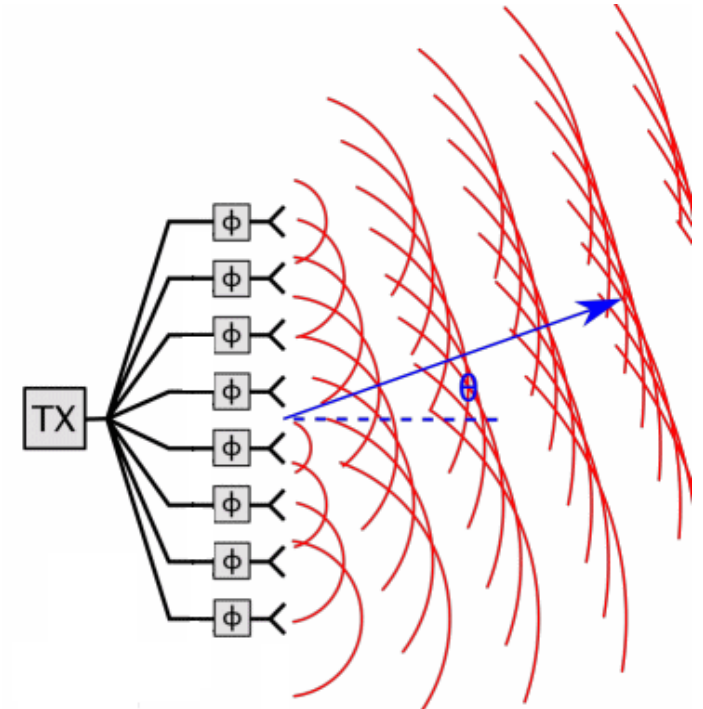
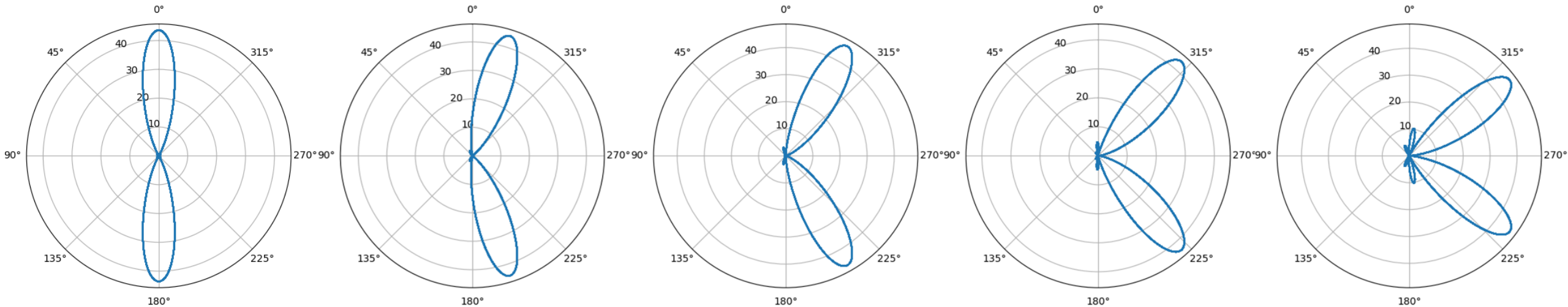


Diagramme d'un réseau d'antenne avec déphasage - Wikipédia

### III- Introduction d'un déphasage

- Modélisation pour N émetteurs et déphasage

Diagrammes de rayonnement pour des déphasages de  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $90^\circ$  [10]



→ L'introduction d'un **déphasage** induit une **dévi**ation du lobe principal

## IV – Détection d'un objet

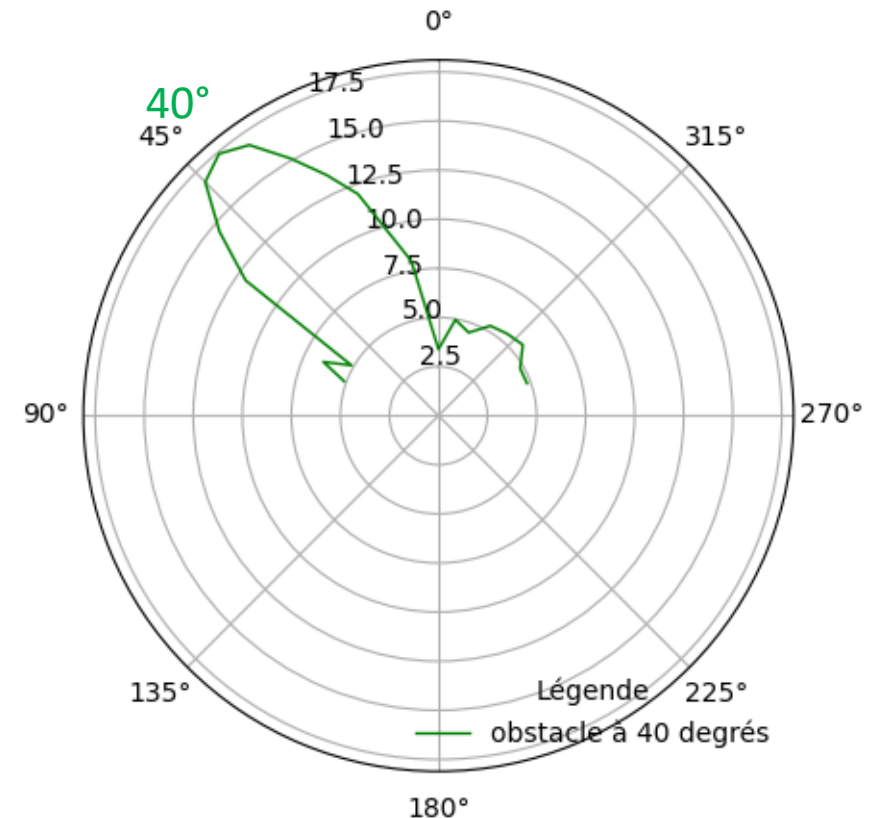
- Détection d'une cible fixée à 40°

### Montage :

Cible fixée dans la direction 40° par rapport à l'axe du microphone  
Réglage du déphasage électronique avec les potentiomètres



### Diagramme de rayonnement en puissance pour 7 émetteurs - Python





# Conclusion

Antennes à commande phase :

- On peut choisir la taille et la directivité du faisceau en modifiant le nombre  $N$  d'émetteurs
- Introduire un déphasage électronique permet de balayer l'espace
  - détection d'objet, sans mouvement physique de l'antenne

- Annexe [1] : Code python, antenne sans déphasage, expériences

```
## Diagramme de rayonnement pour 1,3,5,7 émetteurs (expérience)
```

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
thetarad = np.radians([-80,-70,-60,-50,-40,-35, -30, -25, -20,-15,-10,-5,0,5,10,15,20,25,30,35,40,50,60,70,80])
```

```
veff_1 = np.array([0.9, 0.8, 0.85, 1, 1.4, 1.35, 1.3, 1.4, 1.5, 1.7, 1.9, 2.1, 2.2, 2, 1.7, 1.6, 1.5, 1.4, 1.3, 1.25, 1.2, 1.2, 1.3, 1, 0.85])
veff_3 = np.array([1.75, 1.7, 1.8, 2.3, 2.6, 2.45, 2.4, 2.4, 2.5, 2.6, 2.8, 2.9, 2.95, 2.75, 2.6, 1.1, 1.8, 1.75, 1.7, 1.35, 1, 0.8, 1, 1.3, 1.15])
veff_5 = np.array([2.5, 1.9, 1.4, 0.7, 1.1, 1.4, 2, 2.3, 2.7, 2.9, 3.2, 3.7, 4.2, 4.5, 4.4, 4.1, 3.7, 3.2, 2.5, 2.1, 1.8, 1.7, 2, 1, 0.7])
veff_7 = np.array([3, 2.4, 1.7, 0.8, 2.6, 2.65, 2.7, 3, 3.3, 3.7, 4.2, 4.7, 5.2, 4.5, 3.7, 3.35, 3, 2.55, 2.2, 2, 1.7, 2.1, 2, 1.8, 1.4])
```

```
intensite_1 = veff_1**2 /2
intensite_3 = veff_3**2 /2
intensite_5 = veff_5**2 /2
intensite_7 = veff_7**2 /2
```

```
ax = plt.subplot(111,projection='polar')
ax.plot(thetarad, intensite_1, 'r-', label='1 émetteur', linewidth=1)
ax.plot(thetarad, intensite_3, 'g-', label='3 émetteurs', linewidth=1)
ax.plot(thetarad, intensite_5, 'm-', label='5 émetteurs', linewidth=1)
ax.plot(thetarad, intensite_7, 'b-', label='7 émetteurs', linewidth=1)
```

# x, y, couleur (- relié), taille

```
ax.legend(loc="lower right", title="Légende", frameon=False)
```

```
ax.plot()
```

```
ax.set_title("Intensité (theta)", va='bottom')
ax.set_theta_zero_location("N")
```

```
plt.show()
```

- Annexe [2] : Code python, expérience sans déphasage, ouverture à 3dB

```
"""
Tracer du diagramme de rayonnement
theta est l'angle polaire
Y20values : valeurs expérimentales de l'amplitude
"""
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#
# Valeurs pour 7 émetteurs
#
theta=np.radians([-80,-70,-60,-50,-40,-35, -30, -25, -20,-15,-10,-5,0,5,10,15,20,25,30,35,40,50,60,70,80])
Y20values=[3, 2.4, 1.7, 0.8, 2.6, 2.65, 2.7, 3, 3.3, 3.7, 4.2, 4.7, 5.2, 4.5, 3.7, 3.35, 3, 2.55, 2.2, 2, 1.7, 2.1, 2, 1.8, 1.4]
Y20values_2 = [p**2 / 2 for p in Y20values]

#
# Ouverture à 3 dB
#
Y20_max = np.max(Y20values_2)
i = np.where( Y20values_2 >= Y20_max/2 )
theta_3db_min = np.min( theta[i] )
theta_3db_max = np.max( theta[i] )
theta_3dB = ( theta_3db_max - theta_3db_min ) * 180 / np.pi

#
# tracer du diagramme en puissance et de l'ouverture à 3 db
#
theta_3db_arc = np.linspace(theta_3db_min, theta_3db_max, 50)
ax = plt.subplot(111, projection="polar")
ax.plot(theta, Y20values_2)
ax.plot(theta_3db_arc, [Y20_max/2] * len(theta_3db_arc), "r")

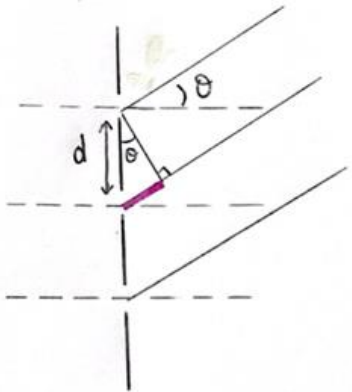
ax.annotate(r"$\theta_{3dB} = $" + str(theta_3dB) + "°", xy=(theta_3db_min - 5 * np.pi / 180, Y20_max/2), ha="left",
va="top",color="r",fontSize=12)

ax.plot(2 * [theta_3db_min], [0, Y20_max], "r", 2 * [theta_3db_max], [0, Y20_max], "r")
ax.set_theta_zero_location("N")

plt.show()
```

- Annexe [3] : théorie N émetteurs sans déphasage

Superposition de N ondes, de même pulsation  $\omega$ , de même amplitude, mutuellement cohérentes :



→ Différence de marche :  
 $S = n_{\text{air}} d \sin \theta$

Retard de phase :

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} S = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$$

\* Vibration résultante en M :

→ onde en M, issue de la source  $S_p$  :  $S_p(M, t) = S_1 e^{i(\omega t - \varphi_p(M))}$

$S_{p+1}$  :  $S_{p+1}(M, t) = S_p e^{-i\Delta \varphi}$

avec  $\Delta \varphi = \varphi_{p+1}(M) - \varphi_p(M)$

donc  $S_p(M, t) = S_{p-1}(M, t) e^{-i\Delta \varphi}$   
 avec  $S_1(M, t) = A e^{i\omega t}$   
 $= \dots = S_1(M, t) e^{-i(p-1)\Delta \varphi}$

→ onde résultante au point M :

$$\begin{aligned} S_{\text{tot}}(M, t) &= \sum_{p=1}^N S_p(M, t) = S_1(M, t) \sum_{p=1}^N e^{-i(p-1)\Delta \varphi} = S_1(M, t) \frac{1 - e^{-iN\Delta \varphi}}{1 - e^{-i\Delta \varphi}} \\ &= S_1(M, t) \frac{e^{-iN\Delta \varphi/2}}{e^{-i\Delta \varphi/2}} \left( \frac{e^{iN\Delta \varphi/2} - e^{-iN\Delta \varphi/2}}{e^{i\Delta \varphi/2} - e^{-i\Delta \varphi/2}} \right) \end{aligned}$$

$$S_{\text{tot}}(M, t) = S_1(M, t) e^{-i(N-1)\Delta \varphi/2} \frac{\sin(N\Delta \varphi/2)}{\sin(\Delta \varphi/2)}$$

\* Intensité résultante :

$$I(M) = K S_{\text{tot}}(M, t) S_{\text{tot}}^*(M, t) = K A^2 \left[ \frac{\sin(N\Delta \varphi/2)}{\sin(\Delta \varphi/2)} \right]^2$$

$$I(M) = I_0 \cos^2 \theta \left[ \frac{\sin\left(\frac{N\pi}{\lambda} d \sin \theta\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta\right)} \right]^2$$

- Annexe [4] : Code python, théorie N émetteurs sans déphasage

```
"""
trace le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes
theta : angle polaire
Y20 : intensité ou éclairement
"""

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.special import jv
```

Choix du nombre d'émetteurs

```
def Y20(t):
    """ Calcul des valeurs de Y20 """
    N = 7
    n_air = 1
    lambda0 = 0.12
    d = lambda0 / 4
    psi = np.pi*n_air*d/lambda0*np.sin(t)
    phi = 0*np.pi/180
```

Utilisation de la fonction réseau

```
    return ( np.cos(t)*(np.sin(N*(psi + phi/2))/(np.sin(psi + phi/2))) )**2

step = 1e-3
theta = np.arange(-180, 180, step)
Y20values = np.abs(Y20(theta))

ax = plt.subplot(111, projection="polar")
ax.plot(theta, Y20values)

ax.set_theta_zero_location("N")

plt.show()
```



- Annexe [5] : Evolution de la directivité en fonction du nombre N d'émetteurs

```
"""
Trace la fonction réseau pour N émetteurs
"""

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

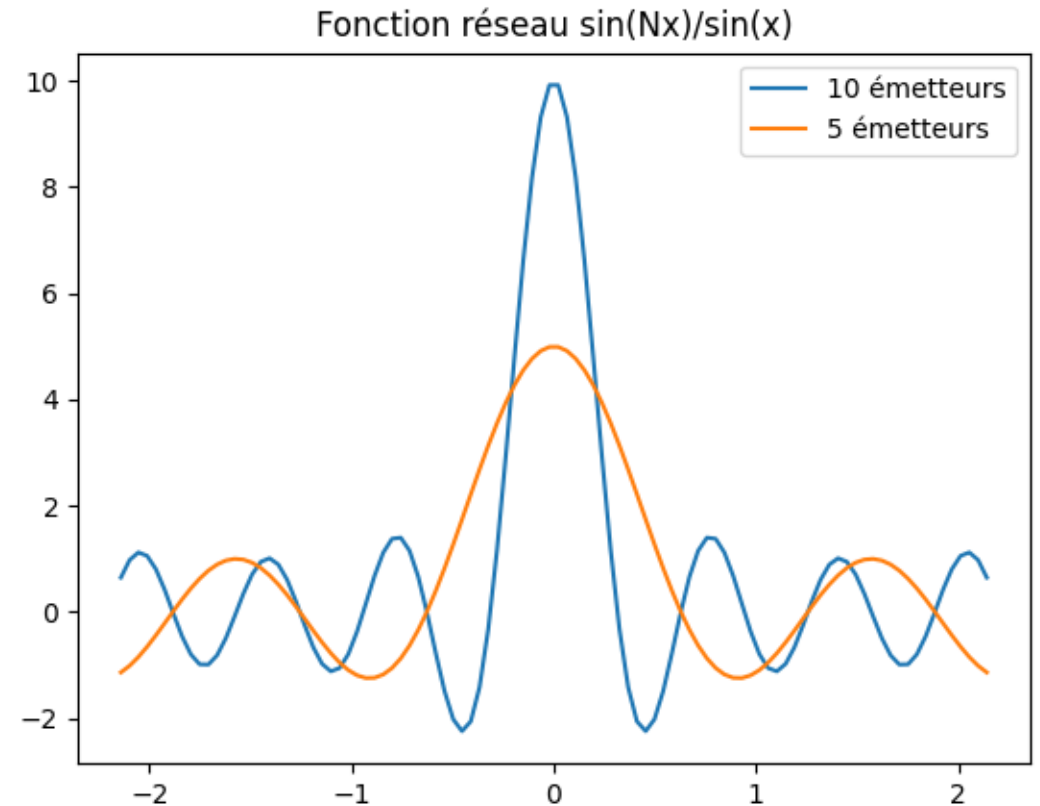
N1 = 10
N2 = 5

theta = np.linspace(-np.pi + 1, np.pi - 1, 100)

f1 = np.sin(N1 * theta) / np.sin(theta)
f2 = np.sin(N2 * theta) / np.sin(theta)

plt.plot(theta, f1, label="10 émetteurs")
plt.plot(theta, f2, label="5 émetteurs")

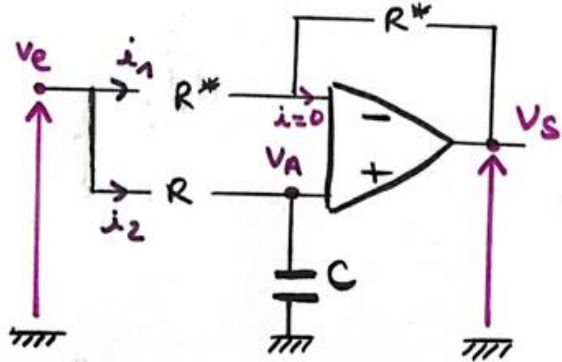
plt.title("Fonction réseau sin(Nx)/sin(x)")
plt.legend()
plt.show()
```



Maximum atteint en  $x = 0$

Premier zéro en  $x = 2\pi / N$

- Annexe [6] : Fonction de transfert du montage déphaseur



ALI :  $v_e^+ = v_e^- = V_A$   
en mode linéaire

En régime sinusoïdal forcé :

$$\underline{V_e} - \underline{V_s} = 2 R^* \underline{i_1} \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} \underline{V_e} - \underline{V_A} = R^* \underline{i_1} \\ \underline{V_e} - \underline{V_A} = R \underline{i_2} \end{array} \right\} R^* \underline{i_1} = R \underline{i_2} \quad (2)$$

$$\underline{V_e} - 0 = \left( R + \frac{1}{jC\omega} \right) \underline{i_2} \Rightarrow \underline{i_2} = \frac{\underline{V_e}}{R + \frac{1}{jC\omega}} \quad (3)$$

$$\text{d'où } \underline{V_e} - \underline{V_s} \stackrel{(1)}{=} 2 R^* \underline{i_1} \stackrel{(2)}{=} 2 R \underline{i_2} \stackrel{(3)}{=} 2 R \frac{\underline{V_e}}{R + \frac{1}{jC\omega}}$$

$$\text{donc } \underline{V_e} \left( 1 - \frac{2R}{R + \frac{1}{jC\omega}} \right) = \underline{V_s}$$

$$\underline{H} = \frac{\underline{V_s}}{\underline{V_e}} = 1 - \frac{2R}{R + \frac{1}{jC\omega}} = 1 - \frac{jRC\omega}{1 + jRC\omega} = \frac{1 - jRC\omega}{1 + jRC\omega}$$

$$\underline{H} = \frac{1 - jRC\omega}{1 + jRC\omega}$$

$$\text{on a } \underline{|H|} = 1 \text{ et } \arg(\underline{H}) = \arg(1 - jRC\omega) - \arg(1 + jRC\omega) \\ = \arctg(-RC\omega) - \arctg(RC\omega) \\ = \underline{-2 \arctg(RC\omega)}$$

- Annexe [7] : Code python, expériences avec déphasage 30° et 50°

```
## Diagramme de rayonnement pour 7 émetteurs avec déphasage (expérience)
```

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
thetarad = np.radians([-80,-75,-70,-65,-60,-55,-50,-45,-40,-35, -30, -25,
-20,-15,-10,-5,0,5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55,60,65,70,75,80])
```

```
veff_50 = np.array([3.1, 2.9, 2.7, 3.1, 3.4, 4.2, 5.15, 6, 6.6, 6.9, 6.9, 6.45, 5.9, 5.2, 4.7, 4.2, 4.05, 3.9, 4.1, 3.75, 3.6, 3.4,
2.9, 3, 3.1, 3.25, 2.95, 3.75, 4.2, 5.05, 5.5, 4.9, 5.5])
```

```
veff_30 = np.array([4, 3.85, 3.7, 3.4, 3, 2.5, 1.9, 2.4, 3.2, 4.8, 5.9, 6.3, 6.7, 6.6, 6.2, 5.8, 5.4, 5.1, 4.8, 4.45, 4.1, 3.7, 3.3,
3.05, 2.8, 2.4, 2, 2.35, 2.9, 3.1, 3.3, 3.2, 3.1])
```

```
intensite_50 = veff_50*veff_50 / 2
intensite_30 = veff_30*veff_30 / 2
```

```
ax = plt.subplot(111,projection='polar')
```

```
ax.plot(thetarad, intensite_50, 'b-', label='7 émetteurs, déphasage de 50 degrés', linewidth=1)
ax.plot(thetarad, intensite_30, 'r-', label='7 émetteurs, déphasage de 30 degrés', linewidth=1)
```

```
ax.legend(loc="lower right", title="Légende", frameon=False)
```

```
ax.plot()
```

```
ax.set_title("Intensité (theta)", va='bottom')
ax.set_theta_zero_location("N")
```

```
plt.show()
```

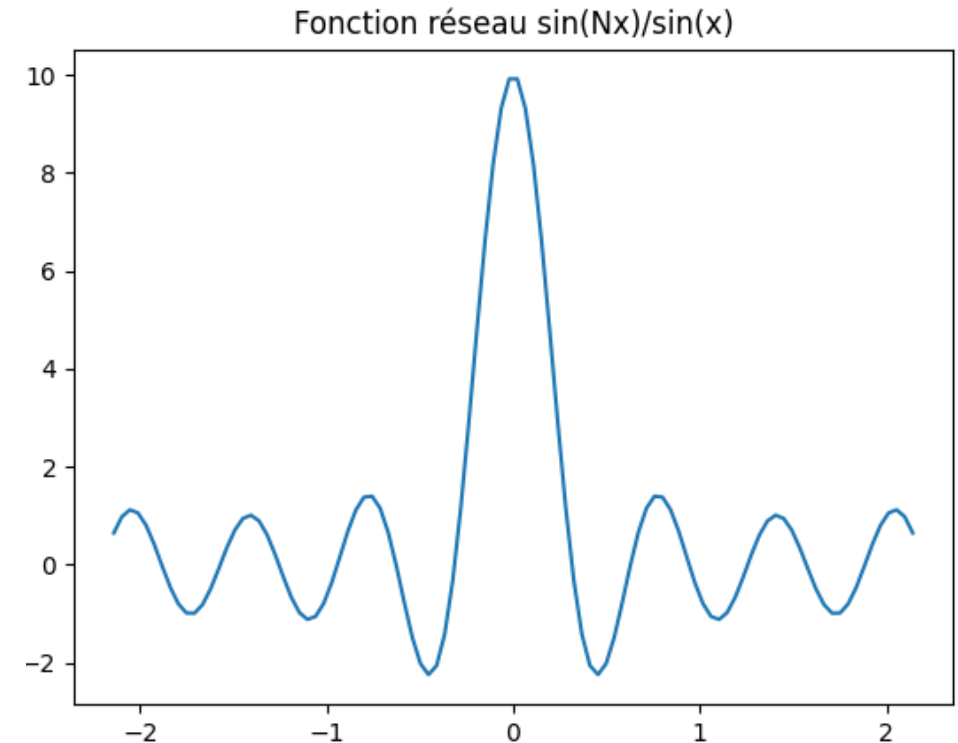
- Annexe [8] : Calculs du déphasage

$$I = I_0 \cos^2 \theta \left[ \frac{\sin \left( \frac{N}{2} \left( \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta + \phi \right) \right)}{\sin \left( \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta + \frac{\phi}{2} \right)} \right]^2$$

$I$  maximale pour  $\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta + \phi = 0$

soit  $\theta = -\arcsin \left( \frac{\lambda \phi}{2\pi d} \right) \underset{\substack{\uparrow \\ d = \frac{\lambda}{4}}}{=} -\arcsin \left( \frac{2\phi}{\pi} \right)$

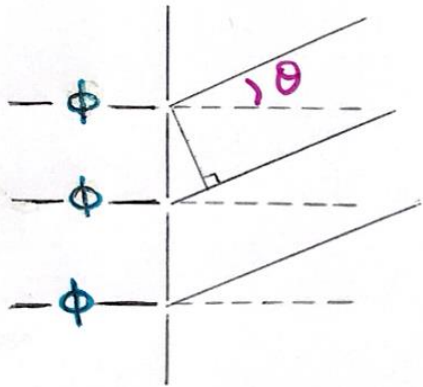
Déphasage $\Phi$ (en °)	30	40	50	60
Déviation $\theta$ théorique (en °)	19,5	26	33	41,5



Maximum atteint en  $x = 0$

- Annexe [9] : Théorie pour N émetteurs avec déphasage

Superposition de N ondes, de même pulsation  $\omega$ , de même amplitude, mutuellement cohérentes, avec déphasage à l'émission :



\* Retard de phase :

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= \Delta\varphi_{\text{avant}} + \Delta\varphi_{\text{après}} \\ &= \phi + \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta\end{aligned}$$

$\Delta\varphi_{\text{avant}}$  à l'entrée du réseau,  $\Delta\varphi_{\text{après}}$  à la sortie

\* Vibration résultante :

$$\underline{S}_{\text{tot}}(M,t) = \underline{S}_1(M,t) e^{-i(N-1)\frac{\Delta\varphi}{2}} \frac{\sin(N\frac{\Delta\varphi}{2})}{\sin(\frac{\Delta\varphi}{2})}$$

\* Intensité résultante :

$$I(\theta) = I_0 \cos^2\theta \left[ \frac{\sin\left(\frac{N\pi}{\lambda} d \sin\theta + \frac{N}{2}\phi\right)}{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin\theta + \frac{\phi}{2}\right)} \right]^2$$



- Annexe [10] : Code python théorie pour N émetteurs, déphasage

```
"""
trace le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes
theta : angle polaire
Y20 : intensité ou éclairement
"""

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.special import jv
```

```
def Y20(t):
    """ Calcul des valeurs de Y20 """
    N = 7
    n_air = 1
    lambda0 = 0.12
    d = lambda0 / 4
    psi = np.pi*n_air*d/lambda0*np.sin(t)
    phi = 30*np.pi/180
```

Choix du nombre d'émetteurs

Déphasage

Utilisation de la fonction réseau

```
    return ( np.cos(t)*(np.sin(N*(psi + phi/2))/(np.sin(psi + phi/2))) )**2

    step = 1e-3
    theta = np.arange(-180, 180, step)
    Y20values = np.abs(Y20(theta))

    ax = plt.subplot(111, projection="polar")
    ax.plot(theta, Y20values)

    ax.set_theta_zero_location("N")

    plt.show()
```