

---

## Projet en traitement avancé du son - M2 ISI 2021/2022

Groupe 11, sujet 2.2 : Localisation de sources sonores par formation de voie

ALOULEN Bilal – BANI Mohamed-iadh – BEN FTIMA Mohamed – DA ROCHA MARTINS Mickaël

---

### 1 Présentation et objectif du projet

Dans le contexte de l'analyse de scène sonore, la localisation de sources sonores. La localisation des sources sonores consiste à déterminer la position d'une source sonore dans l'espace à partir de différents indices physiques.

Ce projet a pour but de créer dans premier temps un simulateur d'ondes sonores créées par des sources placées dans l'espace et reçues par une antenne de microphones. Deuxièmement, nous allons implémenter un système de localisation de sources sonores par une approche de formation de voie pour déterminer la position de la source simulée dans l'espace.

Ce projet est divisé en deux grandes parties :

- Dans la première partie, nous allons créer un simulateur d'ondes sonores reçues par un nombre  $N$  des microphones qui constituent l'antenne simulée. Les microphones et les sources sont placés dans un espace 3D et donc les paramètres de notre simulateur vont être les coordonnées spatiales des sources sonores et des  $N$  microphones et en sortie nous cherchons à obtenir les signaux de sortie des microphones.

Pour simplifier les affichages et valider notre simulation, nous allons traiter premièrement le cas d'une seule source sonore et plusieurs microphones placés linéairement dans l'espace pour évaluer leurs signaux de sortie et les évaluer et comparer leurs caractéristiques (retard, atténuation...)

- Dans la deuxième partie du projet, nous chercherons à concevoir les filtres placés au niveau des voies des microphones et évaluer le diagramme de directivité de l'antenne pour pouvoir localiser les positions des sources sonores.

### 2 Simulation des sorties de microphones

#### 2.1 Description et objectifs

En lieu et place d'un dispositif expérimental réel, il s'agit dans un premier temps de réaliser la même expérience mais simulée, aussi réaliste que possible. Par réaliste, nous entendons reproduire les conditions expérimentales d'un système microphones/sources sonores en champ libre, en ajoutant de manière contrôlée un bruit intrinsèque de mesure et éventuellement un bruit extrinsèque pour pouvoir quantifier la contribution d'une source sonore indésirable sur la méthode de beamforming. L'avantage important de cette démarche est qu'il n'est pas nécessaire de s'équiper et d'opérer des instruments acoustiques nécessitant exigence dans leur mise en œuvre, limités par leur spécifications techniques ou possiblement chers à obtenir, sans parler d'avoir à disposition un chambre anéchoïque. Ainsi l'expérience est simplifiée tout en réduisant significativement le risque d'erreurs humaines.

Une simulation impose cependant la définition d'un modèle de propagation des ondes sonores et par extension d'un modèle de mesure, qui sert de base théorique pour une simulation réussie. Fort heureusement ces modèles sont connus et le premier décrit la pression acoustique en tout point et instant de l'espace considéré :

$$p(r, r^s, t) = \frac{j\rho k^s c}{4\pi \|r - r^s\|} e^{-jk\|r - r^s\|} e^{jkct} \quad (1)$$

Où  $p$  désigne la pression acoustique en fonction de  $r$  la position d'intérêt dans le milieu (m),  $r^s$  la position de la source et  $t$  l'instant considéré (s). On retrouve également dans cette expression :

- la masse volumique du milieu de propagation  $\rho$  en  $\text{kg.m}^{-3}$ ,
- le nombre d'onde de la source sonore  $k^s$  en  $\text{rad.m}^{-1}$ ,

— la vitesse de propagation du son  $c$  en  $\text{m.s}^{-1}$ .  
Notons que :

$$\frac{k^s c}{4\pi} = \frac{\omega^s}{4\pi} = \frac{2\pi f^s}{4\pi} = \frac{f^s}{2} \quad \text{avec } f^s \text{ la fréquence d'émission de la source sonore en Hz.}$$

Ce modèle se base cependant sur des hypothèses non seulement sur le milieu mais aussi sur la nature de la source. Cette dernière doit être monochromatique tandis le milieu doit être un gaz parfait, homogène et isotrope. Ainsi bien qu'une cuve d'eau ou une brique soient des milieux de propagation d'onde sonore tout à fait valides, ils ne pourront pas être modélisés par l'équation (12).

Nous introduisons maintenant le microphone qui mesure la pression en  $r$  à un facteur de sensibilité près  $S$  en  $\text{V.Pa}^{-1}$ . Nous supposons ce microphone idéal, dans le sens où sa réponse impulsionnelle est un dirac, pour éviter de s'appesantir sur des considérations techniques secondaires au projet :

$$m(r, r^s, t) = S \times \delta(t) * p(r, r^s, t) = Sp(r, r^s, t) \quad (2)$$

Enfin, une dernière hypothèse est que le milieu est élastique linéaire. Autrement dit, le principe de superposition est vérifié et la contribution totale de plusieurs sources est simplement la somme des contributions de chaque source. En reprenant l'équation (2) et en la remaniant, nous obtenons l'équation (3), où  $R^s$  désigne l'ensemble des positions des sources sonores :

$$m(r, R^s, t) = \sum_{r^s \in R^s} \frac{j\rho S f^s}{2 \|r - r^s\|} \exp\left(j2\pi f^s \left(t - \frac{\|r - r^s\|}{c}\right)\right) \quad (3)$$

Le simulateur se basera essentiellement sur cette équation (3).

## 2.2 Configuration expérimentale

Dans le cadre de cette simulation, nous nous plaçons dans un milieu en champ libre composé d'air à  $20^\circ\text{C}$ , dont on connaît la masse volumique et la vitesse de propagation du son dans ce milieu. Aussi, nous fixons la sensibilité  $S$  des microphones à un nombre représentatif de ce qui peut se trouver en réalité. Ainsi nous pouvons écrire de suite que :

$$\rho = 1.2 \text{ kg.m}^{-3} \quad c = 343 \text{ m.s}^{-1} \quad S = 1 \text{ mV.Pa}^{-1}$$

Ce milieu est d'abord bidimensionnel, pour vérifier sur un exemple suffisamment simple que la simulation fonctionne comme prévu. Ensuite nous ajouterons une troisième dimension pour croître en réalisme. Rien ne nous empêche de généraliser à d'autres dimension, nous dirons simplement que nous travaillons sur  $D$  dimensions. Le milieu présente  $M$  microphones et  $N$  sources chacune de fréquence donnée, et il est étudié sur une période de temps contenant  $T$  échantillons. Ces paramètres se prêtent très bien aux notation matricielles et nous pouvons réécrire les arguments en entrée de l'équation (3) et sa sortie comme des matrices :

$$r = r_{M \times D} \quad r^s = r_{N \times D}^s \quad f^s = f_N^s \quad t = t_T \quad \text{et la sortie } m = m_{M \times T}.$$

Ces matrices sont alors traitées par l'algorithme 1. On voit apparaître dans cet algorithme des tenseurs intermédiaires comme la matrice des normes euclidiennes entre chaque source et chaque microphone deux à deux que l'on désigne par  $d_{N \times T}$ . On trouve aussi un tenseur des phases  $\Theta_{N \times M \times T}$  et un dernier tenseur  $\Omega_{N \times M \times T}$  contenant l'ensemble des sorties complexes pour chaque source, chaque microphone et chaque instant. Ce dernier est particulier, car le lecteur averti constatera que l'unité complexe  $j$  est représentée par la même lettre que l'indice sur la deuxième dimension du tenseur. Précisons donc que la lettre  $j$  dans l'expression de ce tenseur a valeur d'indice uniquement en indice du tenseur des phases et de la matrice des normes euclidiennes.

## 2.3 Résultats obtenus

Nous testons le simulateur sur trois microphones disposés linéairement et une source placée arbitrairement dans le plan, tels que décrits en (\*) et illustré en Figure 1a.

$$r = \begin{bmatrix} -0.1 & 0 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad r^s = [0.757 \quad 0.941] \quad f^s = [440] \quad (*)$$

Nous faisons en sorte que l'origine du repère soit placé sur le microphone 1 (avec les indices démarrant à 0, il correspond au microphone du centre), avec les microphones séparés de 10 cm. On simule donc une

---

**Algorithme 1** : Calcul des signaux en sortie des  $M$  microphones

---

**Données** : microphones  $r_{M \times D}$ , sources  $r_{N \times D}^s$ , fréquences des sources  $f_N^s$ , échantillons  $t_T$   
**Résultat** : signaux des microphones  $m_{M \times T}$

initialisation de la matrices des normes euclidienne  $d_{N \times M}$

**pour chaque** source d'indice  $i$  dans  $r_{N \times D}^s$  **faire**  
    **pour chaque** microphone d'indice  $j$  dans  $r_{M \times D}$  **faire**  
         $d_{ij} \leftarrow \|r_i^s - r_j\|$

initialisation du tenseur des phases  $\Theta_{N \times M \times T}$

**pour chaque** source d'indice  $i$  dans  $r_{N \times D}^s$  et de fréquence  $f_i$  **faire**  
    **pour chaque** microphone d'indice  $j$  dans  $r_{M \times D}$  **faire**  
        **pour chaque** instant d'indice  $k$  dans  $t_T$  **faire**  
             $\Theta_{ijk} \leftarrow 2\pi f_i(t_k - \frac{d_{ij}}{c})$

initialisation du tenseur des sorties complexes des microphones  $\Omega_{N \times M \times T}$

**pour chaque** source et fréquence d'indice  $i$  dans  $r_{N \times D}^s$  et  $f_i^s$  **faire**  
    **pour chaque** microphone d'indice  $j$  dans  $r_{M \times D}$  **faire**  
        **pour chaque** instant d'indice  $k$  dans  $t_T$  **faire**  
             $\Omega_{ijk} \leftarrow \frac{j S_{pf_i}}{2d_{ij}} \exp(j\Theta_{ijk})$

initialisation de la matrice des sorties des microphones  $m_{M \times T} = \mathbf{0}_{M \times T}$

**pour chaque** élément d'indices  $i, j$  et  $k$  dans  $\Omega$  **faire**  
     $m_{jk} \leftarrow m_{jk} + \text{Re } \Omega_{ijk}$

---

antenne de 20 cm de longueur équipée de trois microphones. La source quant à elle est un La 440, émettant à une amplitude normalisée à 1 et à une fréquence de 440 Hz donc. Nous considérons que cette source est allumée avant les microphones, de sorte à ne pas pouvoir constater le retard de détection de l'onde si microphones et source avaient été allumés simultanément. L'instant 0 correspondra alors au moment où les microphones sont allumés.

La simulation est lancée, puis la sortie des microphones est représentée en Figure 1b. Nous observons deux phénomènes qui valident l'implémentation du simulateur : le premier est celui de la différence d'amplitude entre les microphones. Comme le microphone 2 est plus proche de la source que le microphone 1, lui même plus proche que le microphone 0, l'amplitude du signal qu'il détecte est supérieure à ce que détectent les autres microphones. La même chose s'observe avec le microphone 1 par rapport au microphone 0. Le second phénomène est celui des déphasages : pour la même raison, du fait que le microphone 2 est plus proche de la source, il détecte le signal avant les deux autres, ce qui fait que le signal du microphone 1 présente un déphasage par rapport au 2, et la même chose s'observe encore entre 1 et 0.

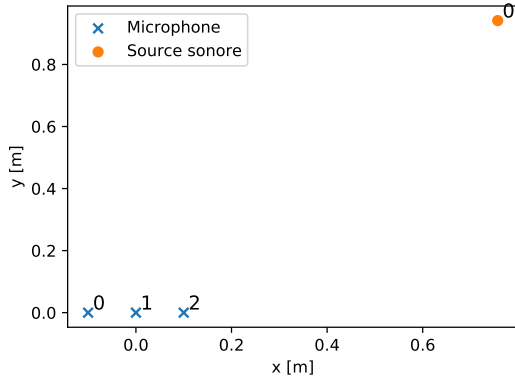
Une autre expérience reprenant la même configuration mais plaçant la source deux fois plus loin dans la même direction, permet d'illustrer le cas où la source est dite placée à l'infini. Les sorties des microphones pour cette expérience sont visibles sur la Figure 2 et nous constatons que le premier phénomène, concernant la différence des amplitudes, n'est plus observé. La différence d'amplitude existe belle et bien, mais elle devient négligeable. Un autre élément qui corrobore la validité du simulateur est que pour une source placée deux fois plus loin, l'amplitude est réduite de moitié, comme le veut l'équation (3).

Bien que la section du signal que nous observons est différente, on observe les mêmes déphasages qu'en Figure 1b, ce qui constitue la raison d'être de la technique de beamforming que nous abroderons plus bas.

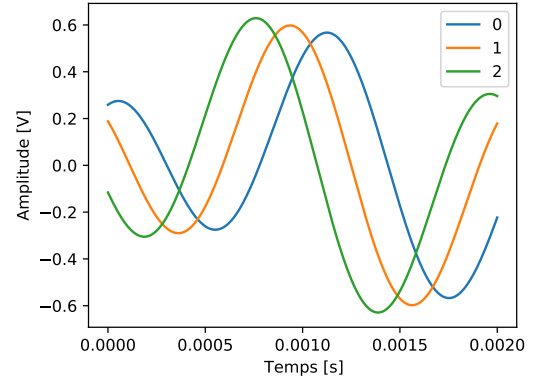
## 2.4 Discussion

Du point de vue théorique, ce simulateur permet de correctement représenter l'acquisition de signaux monochromatiques placés dans un milieu donné. Les amplitudes en sorties en fonction des entrées sont prévisibles, de même pour le déphasage entre les sorties des différents signaux. Certains éléments, notamment la fréquence d'échantillonnage du signal ou les détails sur le déphasage en fonction de la position de la source ont été omis, car considérés comme peu pertinents dans le cadre de cette première partie.

Du point de vue technique, l'algorithme de la simulation est suffisamment versatile pour prendre en compte un certain nombre de cas de figures :



(a) Disposition des sources et microphones telle que décrite en (\*)



(b) Sorties des microphones

FIGURE 1 – Simulation des sorties des microphones sur une fenêtre de temps

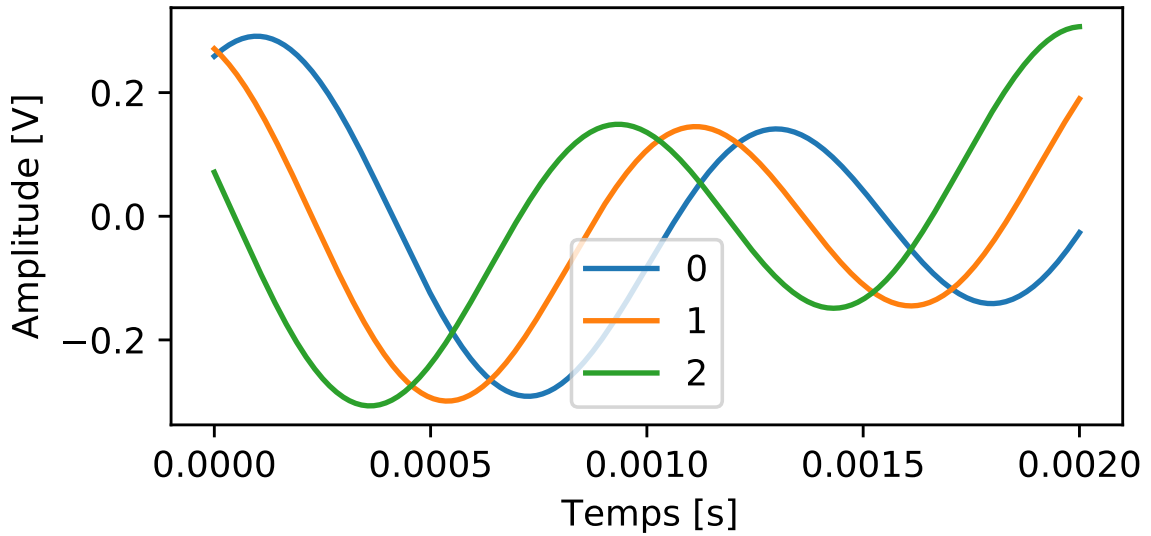


FIGURE 2 – Sorties des microphones pour une source placée à l'infini

- pour simuler un signal harmonique de fréquence fondamentale  $f_0$ , il suffit de placer  $n$  sources monochromatiques de fréquences  $if_0$  pour  $1 \geq i \leq n$  au même endroit,
- pour simuler un bruit intrinsèque d'acquisition du signal, il suffit de sommer un bruit gaussien avec les signaux captés par les microphones,
- pour simuler un bruit extrinsèque, nous procédons de la même manière que pour le bruit intrinsèque.

Reste le cas de la voix qui n'est pas modélisé par l'algorithme, car la théorie sous-jacente ne prend en compte que les sources sonores monochromatiques.

### 3 Localisation de sources sonores par formation de voix

Après avoir réalisé un simulateur de système d'émission et de réception d'ondes sonores, nous allons maintenant localiser les sources sonores par une approche de formation de voix (Beamforming).

Le Beamforming consiste à polariser un réseau de microphones dans une direction spécifique de l'espace dans le but de pouvoir amplifier les signaux d'intérêt et réduire les signaux qui viennent de toutes les autres directions. Cette opération d'amplification / atténuation s'effectue grâce au diagramme de directivité  $D(r,k)$  qui représente l'opération de filtrage spatial et fréquentiel effectué par le réseau de microphones. Le Beamforming a de nombreuses applications notamment dans les télécommunications et dans l'exploitations des radars directs.

### 3.1 Description et objectifs

Dans cette partie du projet, nous cherchons à créer à l'aide d'un ensemble de microphone un système polarisé capable d'amplifier les sons provenant d'une direction d'intérêt et de réduire l'amplitude des signaux provenant des autres directions. Ceci revient à scanner l'environnement de manière à détecter d'où viennent les ondes sonores (localisation des sources sonores).

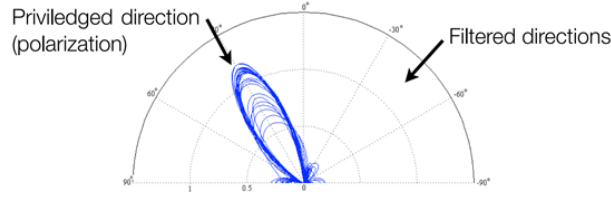


FIGURE 3 – Diagramme de directivité montrant la direction d'intérêt et la direction filtrée

Notre objectif est alors de localiser les sources sonores dans un espace 2D ou 3D en polarisant notre système de microphones dans plusieurs directions où peuvent se trouver les sources sonores à localiser. Par conséquent, une fois une source sonore est détectée, nous allons avoir une réponse (énergie) non nulle à la sortie de notre système de formation de voix (Beamformer).

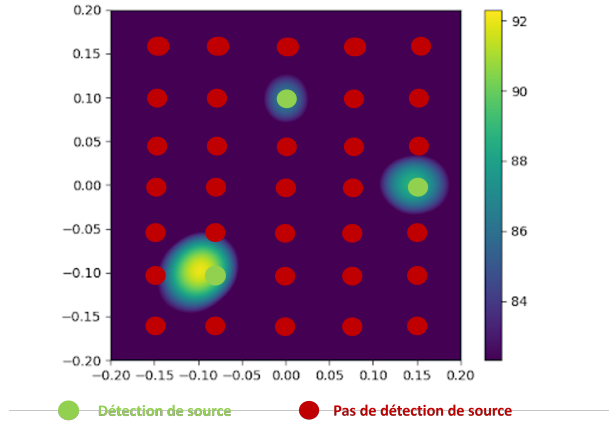


FIGURE 4 – Exemple de points de polarisation d'un réseau de microphones

Revenons maintenant sur le schéma du système de formation de voix représenté dans la figure 2. Le principe est de remettre à la sortie de chaque microphone un filtre de réponse impulsionnelle  $w_n$  et sommer la sortie de tous les filtres pour construire la sortie  $y$  du beamformer.

$$y(t) = \sum_{n=1}^N w_n(t) * m_n(t) \quad (4)$$

Un passage au domaine fréquentiel permet d'écrire :

$$Y(k) = \sum_{n=1}^N W_n(k) M_n(k) \quad (5)$$

Avec  $M_n$  est le contenu spectral du nième microphone qui s'écrit sous la forme :

$$M(k) = \sum_{s=1}^s V_n(r_s^S, k) S_s^0(k) + B_n(k) \quad (6)$$

En développant les calculs on obtient le résultat suivant :

$$Y(k) = \sum_{s=1}^s D(r_s^S, k) S_s^0(k) + \sum_{n=1}^N W_n(k) B_n(k) \quad (7)$$

Avec D le diagramme de directivité de l'antenne qui s'écrit :

$$D(r, k) = \sum_{n=1}^N W_n(k) V_n(r, k) \quad (8)$$

Après avoir déterminé la structure de notre beamformer, nous allons maintenant voir comment synthétiser les filtres  $w_i$ . Pour une antenne linéaire, en se plaçant dans le cas particulier où les filtres  $w_i$  valent tous 1, la sortie de notre antenne n'est autre que la somme des N sorties des microphones. Cette configuration avec les  $w_i(t) = 1$  est une configuration sans filtre, elle permet d'établir l'équation du diagramme d'antenne suivant :

$$D^\infty(\theta, k) = \sum_{n=1}^N e^{-jk(n - \frac{N+1}{2})d \cos \theta} = \frac{\sin(k \frac{Nd}{2} \cos \theta)}{\sin(k \frac{d}{2} \cos \theta)} = \frac{\sin(\frac{\pi f}{c} Nd \cos \theta)}{\sin(\frac{\pi f}{c} d \cos \theta)} \quad (9)$$

On remarque que le diagramme dépend de la géométrie de l'antenne, de la fréquence et de l'angle  $\theta$ . La formation de voix étant constituée de la somme des sorties des microphones, avec la configuration  $w_i(t)=1$  la sommation est constructive pour une source sonore en face du réseau d'antenne, en effet le front d'onde de la source sonore touche tous les micros en même temps de façon que tous les signaux soient identiques, on somme donc N fois le même signal. Lorsque la source n'est pas en face, les signaux en sorties des microphones diffèrent entre eux uniquement d'un retard. La sommation peut être destructive, on va d'abord avoir une diminution de la valeur de l'amplitude du signal de sortie mais aussi pour certaines valeurs de position particulière de la source : une destruction totale du signal de sortie. On peut parler d'une 'polarisation naturelle', les filtres  $w_i(t) = 1$  permettent de maximiser la directivité en face de l'antenne.

Etant donné qu'une source sonore est placé sur le côté de l'antenne, les signaux en sorties des microphones ne diffèrent que de retards, il faut compenser grâce aux filtres  $w_i(t)$  les retards liés à la propagation pour aligner les signaux de sortie afin d'obtenir une sommation constructive pour la position  $\theta$  choisi.

On cherche donc à créer des filtres avec pour réponse en fréquence :

$$W_n(k) = e^{jkz_N \cos \theta_0} \quad (10)$$

Il s'agit de déphaseur pur où la valeur du retard est ici pour compenser le retard lié à la propagation pour un  $\theta_0$  choisi. L'expression du diagramme d'antenne dépend désormais de la variable angulaire  $\theta$  (positions potentielles où une source sonore émet),  $\theta_0$  la position du lobe principale représentant la direction dans laquelle on veut écouter et la fréquence f. Voici la formule :

$$D^\infty(\theta) = \frac{\sin(\frac{\pi f}{c} Nd(\cos \theta_0 - \cos \theta))}{\sin(\frac{\pi f}{c} d(\cos \theta_0 - \cos \theta))} \quad (11)$$

On peut désormais avec ces nouvelles valeurs de filtres compenser le retard de propagation et ainsi maximiser la directivité de notre antenne par rapport à un angle souhaité.

En polarisant l'antenne dans toutes les directions possible grâce aux filtres  $w_i(t)$ , on peut désormais déterminer l'énergie de la sortie de la formation de voix pour chaque direction de façon à créer une carte d'énergie de toutes les directions, afin de privilégier les directions où on détecte une ou des sources sonores.

### 3.2 Configuration expérimentale

Pour mettre en œuvre et simuler notre système de localisation de sources sonores par formation de voix, nous allons dans un premier temps simuler sous Python la sortie de notre beamformer. Nous allons voir par la suite une localisation de sources en nous inspirant d'un code Matlab cité dans les références[1]. Pour voir l'impact du nombre de micros pour une antenne linéaire, nous avons créé une fonction Python qui simule le diagramme de directivité à partir de la géométrie de l'antenne, la fréquence cible et l'angle de direction de l'antenne  $\theta$ .

Pour pouvoir simuler la sortie du beamformer sous Python, nous avons créé dans un premier temps une fonction `convolution(w, m)` qui calcule la convolution entre deux signaux numériques quelconques. Une fois cette fonction est testée et validée, nous avons créé une fonction `Y(wn, mn)` qui prend en entrée  $w_n$ , une liste contenant la réponse impulsionnelle de chaque filtre et  $m_n$  une liste contenant les signaux de sortie de chaque microphone. La sortie de cette fonction est la somme de des convolutions  $w_i * m_i$  avec  $i = 1, 2, \dots, n$ .

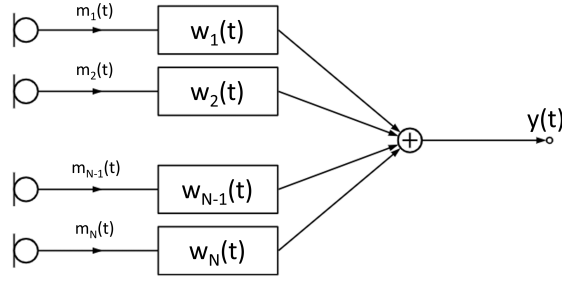


FIGURE 5 – Schéma de fonctionnement de la fonction  $Y(mn, w_n)$

Revenons maintenant sur le script Matlab « beamforming.m », dans ce script on commence par initialiser les grandeurs constantes de notre système de formation de voix, les coordonnées de nos microphones qui constituent l'antenne dans un plan 2D et les coordonnées de notre source sonore. Ce script permet de construire un système de formation de voix et de faire des affichages qui décrivent la localisation de la source sonore.

[1] A. I. Enthusiast, Sound Source Localization. 2021. Accessed : Dec. 08, 2021. [Online]. Available : [https://github.com/aishoot/Sound\\_Localization\\_Algorithms](https://github.com/aishoot/Sound_Localization_Algorithms)

### 3.3 Résultats obtenus et discussion

La première étape dans la localisation des sources sonores est de simuler la sortie de notre beamformer. Pour cela, nous allons considérer une antenne linéaire de microphones et une source sonore et afficher grâce à la fonction  $Y(w_n)$  la sortie  $y(t)$ .

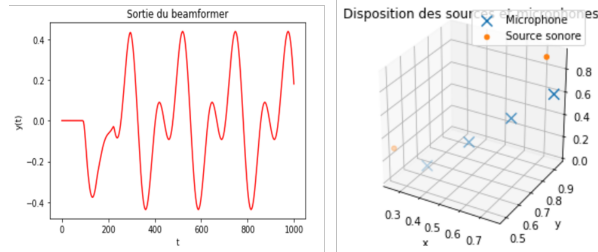


FIGURE 6 – Simulation des sorties des microphones sur une fenêtre de temps

Définissons maintenant un réseau de 5 microphones placés dans le plan  $(x,z)$  de la manière suivante :  $(9,12)$  ,  $(12,12)$ ,  $(12,9)$ ,  $(12,15)$ ,  $(15,15)$ .

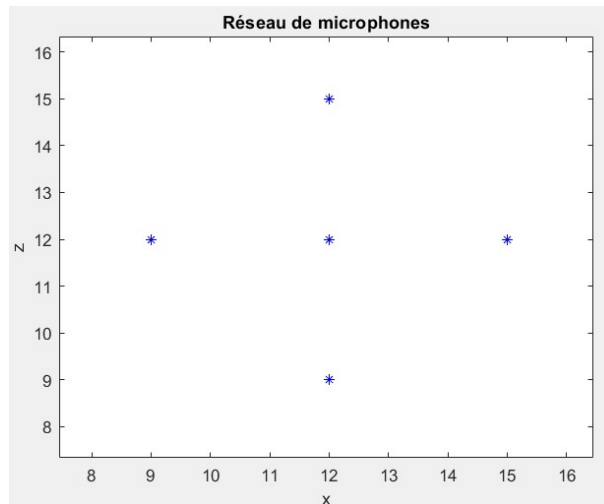


FIGURE 7 – réseau de microphones

On définit maintenant une source sonore placée en  $z=13$  ;  $x=13$  Notre système de beamforming donne une énergie importante dans l'endroit centré en  $(13,13)$

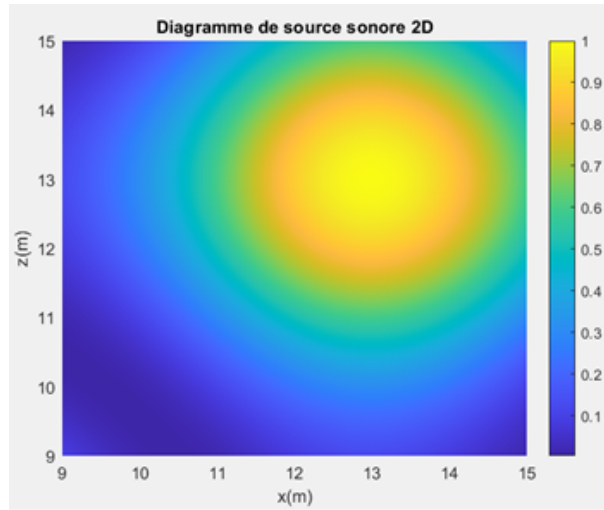


FIGURE 8 – Polarisation de l’antenne dans le plan 2D

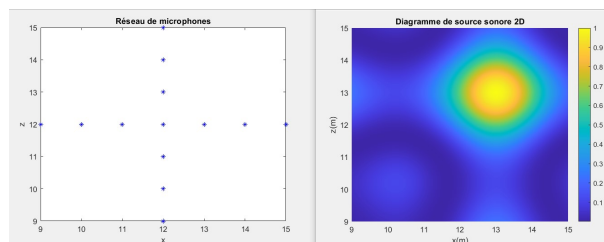


FIGURE 9 – Polarisation de l’antenne pour 13 microphones

On va maintenant augmenter le nombre de microphones de 5 à 13 (voir figure 9) :

On obtient maintenant une localisation plus précise de notre source sonore.

Revenons sur notre code python « `diagramme_directivite_antenne_lineaire.ipynb` », ce code permet de générer un diagramme de directivité d’une antenne linéaire régulièrement espacée. Pour voir l’impact du nombre de microphones sur la directivité de notre antenne, nous allons choisir plusieurs valeurs du paramètre  $N$  et tracer dans la même figure la directivité de l’antenne.

Nous avons pris comme valeurs initiales :  $f=1500$  Hz ;  $L=0.4$  m ;  $\theta_0 = 90$  deg

Diagramme de directivité pour theta fixe et N variant

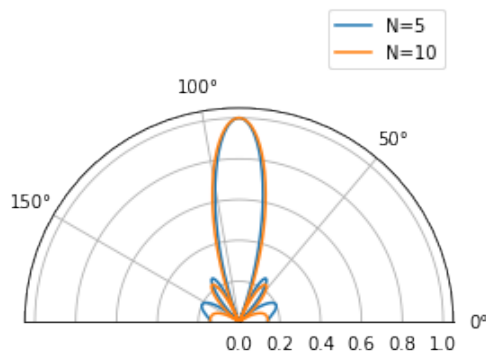


FIGURE 10 – Impact du nombre de microphones sur le diagramme de directivité

On remarque alors que l’amplitude des lobes secondaires se réduit qu’on on augmente le nombre des microphones et par conséquent on peut jouer sur ce paramètre pour réduire le bruit provenant d’autres directions. De la même manière, nous pouvons également voir l’impact de la longueur d’antenne sur la largeur du lobe principale.

Nous avons pris comme valeurs initiales :  $f=1500$  Hz ;  $N=10$  ;  $\theta_0=90$  deg



Diagramme de directivité pour theta fixe et N variant

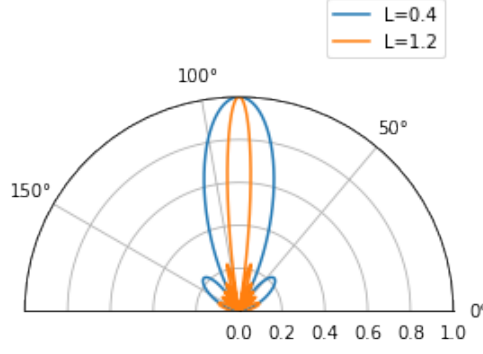


FIGURE 11 – Impact de la longueur d'antenne sur le diagramme de directivité de l'antenne

On remarque que la sélectivité de l'antenne se réduit lors de l'augmentation de la longueur de l'antenne  $L$  (augmentation de l'écart entre les microphones) et par conséquent notre antenne se polarise vers une direction plus spécifique dans l'espace. En augmentant 3 fois la valeur de  $L$  on arrive à réduire la largeur du lobe principal d'un facteur 3.

Pour voir l'impact de la fréquence sur le phénomène de repliement spectral, nous allons faire varier la valeur de  $f$  et tracer le diagramme de directivité de l'antenne.

Nous avons pris comme valeurs initiales :  $L=0.4\text{m}$  ;  $N=10$  ;  $\theta_0=90$  deg

Diagramme de directivité pour theta fixe et N variant

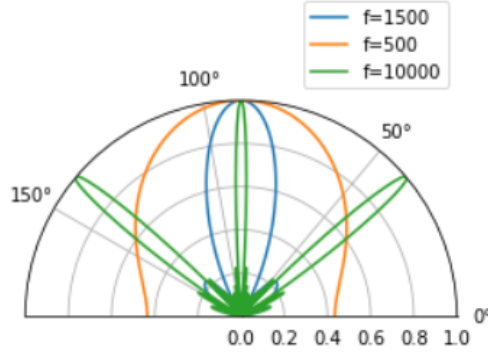


FIGURE 12 – Impact de la fréquence sur le diagramme de directivité de l'antenne

D'après cette figure, on peut constater que la fréquence cible influe sur la directivité de l'antenne suivant le « sampling theorem » :

$$d < d_{max} = \frac{\lambda_{min}}{2} = \frac{c}{2f_{max}} \quad (12)$$

Pour la courbe verte où la fréquence cible vaut 5000Hz, on peut remarquer un repliement spectral dû au non-respect du théorème d'échantillonnage et par conséquent on capte des signaux venant de directions parasites.  $d_{max} = 340/2*5000=0.034$  et  $d = L/10 = 0.04$  le théorème n'est pas respecté => repliement spectral

Pour la courbe orange qui correspond à une fréquence de 500Hz :  $d_{max} = 340/2*500=0.34$  et  $d = L/10 = 0.04$  Dans ce cas  $d_{max} \gg d$  alors le lobe principal a une largeur importante qui cache les lobes secondaires. Par conséquent, si on diminue trop la fréquence cible il faut augmenter la taille de l'antenne ou diminuer le nombre de microphones.

## 4 Conclusion

Pour conclure, ce projet de simulation de localisation de source sonore nous a permis de mettre en pratique les différentes notions vu en cours de Beamforming. Le principe est basé sur la géométrie

d'une antenne constituée d'un réseau de microphones. La sortie de chaque microphone est alors filtrée judicieusement, afin de polariser l'antenne vers l'orientation souhaitée. Nous avons étudié le cas d'une antenne linéaire en changeant les différents paramètres de l'antenne :  $N$  nombre de microphones,  $L$  taille de l'antenne et  $f$  la fréquence cible. Les différents tests nous ont permis d'identifier les rôles des paramètres notamment sur la sélectivité vers une direction plus spécifique, la réduction d'amplitude et sur la sommation destructive de signaux provenant de directions vers lesquelles nous ne sommes pas polarisés. Ce projet de localisation de source sonore a de multiples applications notamment dans le domaine avec des applications radars ou en télécommunications.