



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic OF Algeria
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH
جامعة الشهيد العربي التبسي - تبسة
Echahid Cheikh Larbi Tebessi University-Tebessa



كلية العلوم و التكنولوجيا

UNIVERSITÉ DE CHEIKH LAARBI TEBESSI-TEBESSA-

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN

Spécialité : INSTRUMENTATION.

THEME

*Réalisation d'un microphone de conférence avec
mélangeur (mixer) intégré.*

Présenté par le binôme :

- ❖ FARES Kawther
- ❖ SLIMI Hadjer

Devant le jury :

- WANAS Djamal	MCB	Président
- MAAMRI Mahmoud	Pr	Encadreur
- NAHAL Wasila	MCB	Examineur

Année Université
2022/2023



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH
جامعة الشهبان العربي - تبسة
Cheikh Laarbi Tebessi-Tebessa University-Tebessa



كلية العلوم و التكنولوجيا

UNIVERSITÉ DE CHEIKH LAARBI TEBESSI-TEBESSA-

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN

Spécialité : INSTRUMENTATION.

THEME

*Réalisation d'un microphone de conférence avec
mélangeur (mixer) intégré.*

Présenté par le binôme :

❖ FARES Kawther

❖ SLIMI Hadjer

Devant le jury :

- WANAS Djamel

- MAAMRI Mahmoud

- NAHAL Wasila

MCB

Pr

MCB

Président

Encadreur

Examineur

Année Université

2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative floral element consisting of a central flower with several leaves and smaller buds, positioned at the top left of the calligraphic text.



REMERCIEMENT

Mon dieu ne prend la nuit bonne qu'en vous remerciant et ne rend la journée bonne qu'en vous obéissant.

Avant tout, nous remercions le bon dieu tout puissant qui nous a donné la foi, du courage et la patience afin d'accomplir ce modeste travail. Expressions de remerciement et d'appréciation pour votre contribution de coopération et de don, demandez à dieu pour vous récompenser avec la meilleure récompense **LE** **Professeur Dr MAAMRI MAHMOUD.**

Nous remercions également sincèrement tous les professeurs du Département de génie électrique.

KAWTHER ET HADJER.





Dédicace

Grace à notre bonne volonté, notre acharnement dieu tout puissant nous a donné la force et le courage pour la réalisation de notre mémoire. Je dédie ce travail a ceux qui nous ont été source d'inspiration et de volonté: mes très chers parents IBRAHIM et HOURIA.

pour l'affection qu'ils m'ont donnée, leur soutien moral et financier.

Et A mes chères frères DHIA et GHAITH.

A mes chères sœurs FATMA et KARIMA.

A nos estimés ingénieurs.

Mes amis et collègues.

A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation à faire ce travail.

FARES KAWTHER.





Dédicace

- A mon ange gardien, ma mère bien-aimée (ALIA) Et le héros d'enfance de mon père(MESBAH).
- A mes chères sœurs EMAN, CHAIMA, MARWA, SAFA, DHOHA.
- A tous les membres de la famille.
- A nos estimés ingénieurs.
- A mes amis qui n'ont pas lésiné sur moi avec des conseils.

Nous leur dédions cet humble effort, demandé au dieu tout-puissant pour lui profiter.



SLIMI HADJE

RESUME

Les microphones sont utilisés dans de nombreuses applications et systèmes de contrôle du son. Par conséquent propose ici une nouvelle configuration de microphones de façon à obtenir une forme de directivité cardioïde. Pour réaliser ce projet nous utilisons des microphones MEMS qui ont les caractéristiques de technologies idéales à des prix abordables avec mélangeur à 4 entrées. on propose trois configurations de microphones. La première forme en triangle, la deuxième forme en triangle plus un microphone au centre la réponse de directivité des deux formes est omnidirectionnelle, ce type de microphone est utilisé dans des lieux ouverts tels que les festivals et les fêtes, et la troisième forme en triangle, plus un microphone au centre avec Mic3 présentant un retard et une inversion et le Mic4 qui présente aussi un retard et une inversion la réponse de directivité obtenue est cardioïde. Ce type de microphones est utilisé dans des lieux fermés tels que les salles de réunion, les conférences, et les studios.

ABSTRACT

Microphones are used in many sound monitoring applications and systems. Therefore proposes here a new configuration of microphones in order to obtain a form of cardioids directivity. To carry out this project we use MEMS microphones which have the characteristics of ideal technologies with a 4-input mixer. three microphone configurations are offered. The first triangle shape, the second triangle shape, plus a microphone in the centre the directivity response of the two shapes is omnidirectionnel, this type of microphone is used in open places such as festivals and parties, and the third shape in triangle plus a microphone in the centre with Mic3 featuring delay and inversion and Mic4 also featuring delay and inversion the directivity response obtained is cardioids. This type of microphone .is used in closed places such as meeting rooms, conferences, and studios

المخلص

تستخدم الميكروفونات في العديد من تطبيقات وأنظمة مراقبة الصوت. لذلك يقترح تولى هندسية للميكروفونات من أجل الحصول على شكل من أشكال الاتجاه القلبي. لتنفيذ هذا المشروع ، نستخدم ميكروفونات MEMS التي تتميز بخصائص التقنيات المماثلة مع خالط رباعي المداخل . يتم توديم ثلاثة تكوينات للميكروفون. شكل الاول مثال ، شكل الثاني مثال ، بالإضافة إلى ميكروفون في المنتصف ، تكون الاستجابة الاتجاهية للشكلين متعددة الاتجاهات ، ويستخدم هذا النوع من الميكروفونات في الأماكن المفتوحة مثل المهرجانات والحفلات ، والشكل الثالث مثال ، بالإضافة إلى ميكروفون في الوسط مع Mic3 الذي يتميز بالتأخير والعكس و Mic4 يتميز أيضا بالتأخير والعكس ، تكون الاستجابة الاتجاهية التي تم الحصول عليها قلبي الشكل. يستخدم هذا النوع من الميكروفونات في الأماكن المغلقة مثل غرف الاجتماعات والمؤتمرات والاستوديوهات.

Table des Matières

Dédicaces	<u>/</u>
Remerciements	<u>/</u>
RESUME	<u>/</u>
Table des Matières	<u>I</u>
Liste des figures	<u>III</u>
Introduction Générale	<u>01</u>
<i>Partie Théorique</i>	
Chapitre 1 Généralité des Microphones	
1.1 Introduction	<u>05</u>
1.2 Définition de Microphone	<u>05</u>
1.2.1 Microphone électrodynamique	<u>05</u>
1.2.2 Microphone statique	<u>06</u>
1.2.3 Microphone électret	<u>07</u>
1.2.4 Microphones MEMS	<u>07</u>
1.3 La Directivité	<u>09</u>
1.3.1 La directivité omnidirectionnelle	<u>09</u>
1.3.2 Directivités directionnelles	<u>10</u>
1.4 Conclusion	<u>13</u>
Chapitre 2 Microphone Array Beamforming (Multi microphone)	
2.1 Introduction	<u>15</u>
2.2 Broadside Arrays	<u>16</u>
2.3 Endfire Arrays	<u>18</u>
2.4 Conclusion	<u>20</u>
<i>Partie pratique</i>	
1.1 Mélangeur (Mixer)	<u>22</u>
1.2 Array proposé avec géométrie	<u>23</u>
1.2.1 Première forme en triangle	<u>23</u>

• Simulation en OrCAD PSpice de forme en triangle	<u>25</u>
• Résulta de simulation	<u>26</u>
• Réponse directivité	<u>27</u>
• Réponse directivité en plan (x, y)	<u>27</u>
1.2.2 Deuxième forme en triangle, plus un microphone au centre	<u>28</u>
• Simulation en OrCAD PSpice de forme en triangle, plus un microphone au centre.....	<u>30</u>
• Résulta de simulation	<u>31</u>
• Réponse directivité	<u>32</u>
• Réponse directivité en plan (x, y)	<u>32</u>
1.2.3 Troisième forme en triangle, plus un microphone au centre avec Mic3 présente un retard Δh avec inversion et Mic4 présente aussi un retard $\Delta h/2$ avec inversion	<u>33</u>
• Circuit de retard RC:	<u>35</u>
• Simulation en OrCAD circuit de retard RC	<u>37</u>
• Résulta de simulation	<u>37</u>
• Simulation en OrCAD PSpice de forme en triangle, plus un microphone au centre avec deux microphones ont un delay et un inverseur	<u>38</u>
• Résulta de simulation	<u>40</u>
• Réponse directivité en plan (x, y)	<u>40</u>
1.3.Les testes	<u>41</u>
Conclusion Générale	<u>47</u>
Références Bibliographiques	<u>49</u>

Liste des figures

<u>Chapitre 1</u>	
Figure 1. Le fonctionnement d'un micro dynamique.	05
Figure 2. Micro statique.	06
Figure 3. Micro électret détaillé.	07
Figure 4. Architecture type d'un microphone MEMS.	08
Figure 5. À gauche : schéma d'une application utilisant un microphone MEMS analogique.	09
<i>À droite : schéma d'une application utilisant un microphone Numérique.</i>	10
Figure 6: Microphone omnidirectionnel.	10
Figure 7: Directivité omnidirectionnelle.	10
Figure 8: Microphone directionnel (cardioïde).	11
Figure 9 : Directivité cardioïde.	11
Figure 10 : Directivité super cardioïde.	11
Figure 11 : Directivité hyper cardioïde.	12
Figure 12 : Directivité bidirectionnelle.	12
<u>Chapitre 2</u>	
Figure 1. Les réseaux de microphones à formation de faisceau amplifient les signaux utiles par rapport au bruit de fond.	16
Figure 2. Microphone Broadside Array.	17
Figure 3. Microphone Broadside Array.	17
Figure 4. Réponse de a 2 et 3 microphone broadside array.	17
Figure 5. Microphone Endfire Array.	18
Figure 6. Microphone Endfire bidirectionnelle Beamformer.	18

Figure 7. Microphone Endfire Cardioïde Beamformer.	19
<u>Partie Pratique</u>	
Figure 1. Schéma de mélangeur (Mixer).	22
Figure 2. Array proposé avec géométrie en triangle.	23
Figure 3. Schéma de simulation de forme en triangle .	25
Figure 4. Résultats de simulation en Angle 0°.	26
Figure 5. Résultats de simulation en Angle 25°.	26
Figure 6. Résultats de Simulation en Angle 45°.	26
Figure 7. Résultats de simulation en Angle 90°.	27
Figure 8. Réponse directivité de array proposé avec géométrie en triangle.	28
Figure 9. Array proposé avec géométrie en triangle, plus un microphone au centre.	28
Figure 10. Schéma de Simulation du forme en triangle, plus un microphone au centre.	30
Figure 11. Résultats de Simulation en Angle 0°.	31
Figure 12. Résultats de Simulation en Angle 25°.	31
Figure 13. Résultats de Simulation en Angle 45°.	31
Figure 14. Résultats de Simulation en Angle 90°.	32
Figure 15. Réponse directivité du forme en triangle, plus un microphone au centre.	32
Figure 16. Array proposé avec géométrie en triangle, plus un microphone au centre avec Mic3 il a (delay Δh + inverseur) et Mic4 il a (delay Δh /	33

2 + inverseur) .	
Figure 17. Schéma de simulation circuit de retard RC.	37
Figure 18. Résultats simulation circuit de retard RC.	37
Figure 19. Schéma de simulation de forme en triangle, plus un microphone au centre avec Mic3 il a (delay Δh + inverseur) et Mic4 il a (delay $\Delta h/2$ + inverseur).	38
Figure 20. Résultats de simulation en Angle 0°.	39
Figure 21. Résultats de simulation en Angle 90°.	39
Figure 22. Résultats de simulation en Angle 180°.	40
Figure 23. Réponse directivité de forme en triangle, plus un microphone au centre avec Mic3 il a (delay Δh + inverseur) et Mic4 il a (delay $\Delta h/2$ + inverseur).	40
Figure 24. Teste en angle 0°.	41
Figure 25. Teste en angle 90°.	42
Figure 26. Teste en angle 135°.	42
Figure 27. Teste en angle 180°.	42
Figure 28. Résultats du teste en angle 0°.	43
Figure 29. Résultats du teste en angle 90°.	43
Figure 30. Résultats du teste en angle 135°.	44
Figure 31. Résultats du teste en angle 180°.	44

Introduction Générale

Introduction Générale

Les technologies pour rendre directionnel la captation du son ont beaucoup évolués. Au début du [XX] ^eme, la directivité n'était pas la préoccupation première des ingénieurs qui étaient concentrés sur la délité des microphones en testant différentes technologies de capteurs. Les microphones étaient soit omnidirectionnels, soit bidirectionnels mais dans les années 20 sont apparus les premiers microphones unidirectionnels (cardioïdes). Beaucoup d'autres directivités intermédiaires sont ensuite apparues ainsi que des microphones à capsules interchangeables voire à directivités réglables grâce à des systèmes mécaniques. Ensuite, les évolutions de l'électronique ont permis de pouvoir combiner les signaux de deux capteurs distincts au sein du même microphone, ce qui permet d'obtenir une grande variété de directivités de manière aisée.

Dans le monde de l'audio professionnel, les microphones modernes reposent encore sur ces technologies alors que dans les domaines de l'industrie et de la recherche, de nouvelles techniques d'obtention de directivités se sont beaucoup développés, notamment la formation de faisceaux (on beamforming). Cette technologie apparue dans les années 70 dans le domaine des télécommunications est liée avec le développement du traitement du signal numérique. Cette technologie utilise un nombre important de capteurs (le plus souvent omnidirectionnel) et les combine pour créer virtuellement une directivité. Ce procédé est aujourd'hui très utilisé dans différents domaines : le Wifi, les réseaux de téléphonie mobiles, les microphones des ordinateurs portables et des téléphones, la métrologie acoustique...

Par contre, malgré ses apports potentiels, en termes de directivité, par exemple, ce procédé est quasiment inutilisé dans le domaine de l'audio professionnel non par désintérêt mais à cause de la difficulté de mise en place du dispositif, la complexité des traitements dont il a besoin, de la méconnaissance de ce dispositif par les ingénieurs du son, entre autres.[1]

L'objectif de ce projet est de proposer une nouvelle façon de créer une forme d'un prototype de microphone à directivité cardioïde. Pour réaliser ce projet

Introduction Générale

nous utilisons des microphones MEMS qui ont les caractéristiques de technologies idéales à des prix abordables.

La partie théorique contient deux chapitres, le première chapitre est une généralité des microphones, nous avons précisé les différentes technologies de microphone et le deuxième chapitre array beamforming (multi microphone) compris broadside arrays et endfire arrays. Est consacré à l'étude des microphones array beamforming à base du broadside et de l'endfire arrays.

Dans la partie pratique on propose un mélangeur à 4 entrées dans les calculs et simulation avec OrCAD PSpice ont simplifié la réalisation pratique. Nous proposons comme géométrie d'abord 3 microphones MEMS en triangle dont l'étude de directivité a montré que c'est simplement un type de broadside. Nous avons ajouté un 4^{ème} microphone au centre du triangle (équilatéral de 2cm de côté) ce qui encore à montrer que la directivité est du type broadside. Nous utilisons Microsoft office Excel pour générer les courbes de directivité (2D).

Ces courbes sont produites par simple calcul des retards de l'arrivée du son aux microphones en fonction de la direction de la source audio.

Partie Théorique

Chapitre 1

Généralité des Microphones

Chapitre 1 : Généralité des Microphones

Introduction :

Le microphone est la base du travail sonore sans lequel aucun projet, programme, travail artistique ou informationnel ne se fait, il est utilisé dans certains appareils de radiodiffusion et de télévision, les téléphones et les enregistreurs, **alors qu'est-ce qu'un microphone ?**

Définition de Microphone:

Le microphone est un transducteur électroacoustique, c'est-à-dire un dispositif qui transforme un signal sonore en signal électrique, il en existe de différentes technologies [1] :

- Microphone électrodynamique.
- Microphone statique.
- Microphone électret.
- Microphones MEMS.

Microphone électrodynamique:

Dans un microphone dynamique la membrane est reliée à une bobine mobile se déplaçant aux alentours d'un aimant. Le déplacement de la bobine en fonction de l'onde sonore produit un courant, c'est le même principe que pour une dynamo de vélo ou une turbine de centrale hydro-électrique : l'induction électromagnétique. Il ne nous reste plus qu'à récupérer le signal aux bornes de la bobine pour avoir un signal sonore électrique.

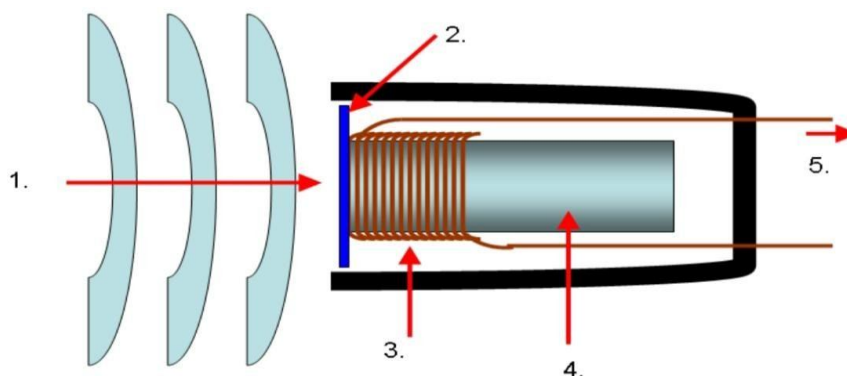


Figure 1. Le fonctionnement d'un micro dynamique.

Chapitre 1 : Généralité des Microphones

Sur le schéma on retrouve en (1) l'onde sonore, qui percute la membrane (2), celle-ci déplace la bobine (3). Cette dernière se déplace autour d'un aimant (4) et génère un faible courant électrique, notre signal (5).

Ce type de micro est robuste et ne craint pas trop les chocs où les intempéries. Parfait pour les chanteurs de métal lors d'un orage en festival [2].

Microphone statique:

Le microphone statique utilise globalement la même construction sauf que le montage bobine et aimant est remplacé par un condensateur. Pour pouvoir récupérer un signal sonore il faut alimenter le micro avec une alimentation électrique, couramment appelée alimentation fantôme. Celle-ci permet de polariser le circuit, de le mettre sous tension. Lors du déplacement de la membrane, la capacité du condensateur est modifiée, car elle dépend de l'espace entre ses armatures. De cette variation de capacité se produit une variation de signal électrique que l'on récupère aux bornes du circuit.

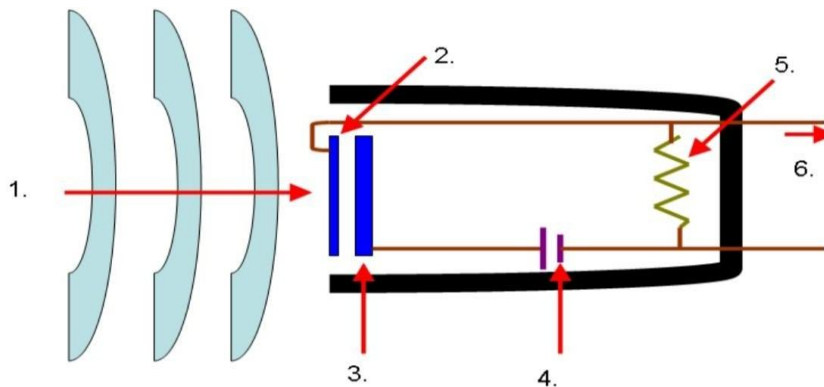


Figure 2. Le fonctionnement d'un micro statique.

Dans ce schéma on retrouve l'onde sonore percutant la membrane avant (1 et 2). Celle-ci se déplace et modifie son écartement avec l'armature arrière (3) formant le condensateur. Tout le circuit est alimenté (4) et présente une résistance (5). On récupère aux bornes du micro notre signal (6). Ce type de micro est souvent plus

Chapitre 1 : Généralité des Microphones

coûteux, car la réalisation de la membrane intégrée au condensateur est une opération complexe. D'autre part le champ électrostatique utilisé est plus homogène que le champ électrodynamique et permet un résultat sonore souvent de meilleure qualité. Il existe en réalité d'autres types de micros (à ruban, électret, etc.), mais ils utilisent des principes similaires à ceux vus ci-dessus [2].

Microphone électret:

Un microphone à électret est un condensateur avec une membrane chargée et polarisée en permanence fixée sur un côté entre les plaques. La membrane chargée en permanence est un "électret", et la charge permanente agit comme deux plaques supplémentaires, ce qui donne l'équivalent de deux condensateurs en série chargés en permanence. La figure 3 montre le condensateur à électret avec un diaphragme d'un côté qui entre et sort en réponse au son [3].

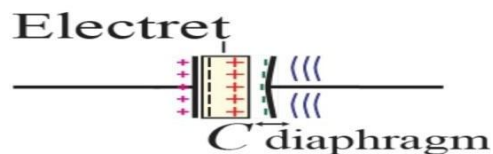


Figure 3. Micro électret détaillé.

Microphones MEMS (Micro-Electro-Mechanical System):

[Les microphones MEMS](#) sont construits avec un composant MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) placé sur une carte de circuit imprimé (PCB) et protégé par un capot mécanique. Un petit trou est fabriqué dans le boîtier pour permettre au son d'entrer dans le microphone et est soit désigné comme étant à orifice supérieur si le trou se trouve dans le couvercle supérieur, soit à orifice inférieur si le trou se trouve dans le circuit imprimé. Le composant MEMS est souvent conçu avec un diaphragme mécanique et une structure de montage créés sur une puce semi-conductrice.

Chapitre 1 : Généralité des Microphones

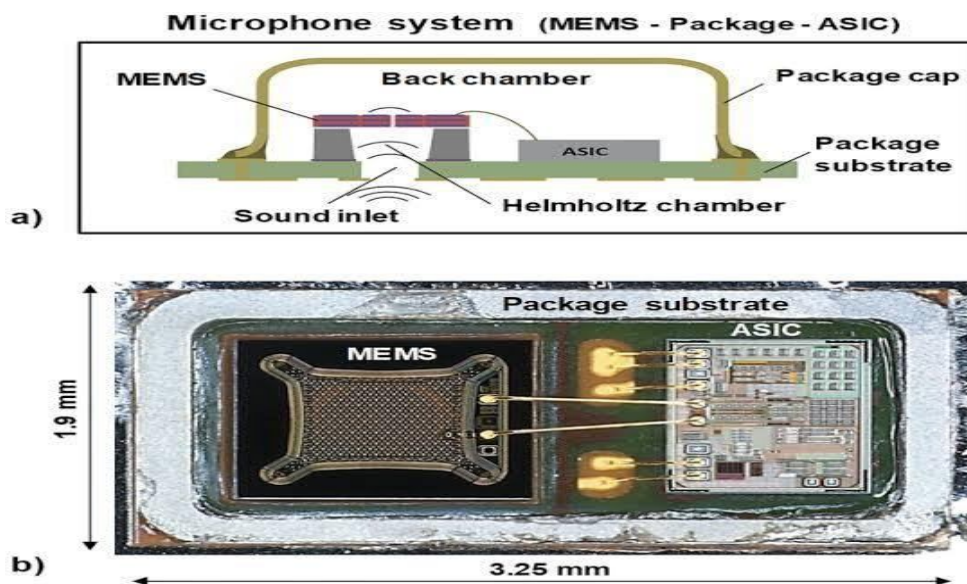


Figure 4. Architecture type d'un microphone MEMS.

Le diaphragme MEMS forme un condensateur et les ondes de pression sonore entraînent le mouvement du diaphragme. Les microphones MEMS contiennent généralement une deuxième matrice de semi-conducteurs (ASIC) qui fait office de préamplificateur audio et convertit les changements de capacitance du MEMS en signal électrique. La sortie du préamplificateur audio est transmise à l'utilisateur si un signal de sortie analogique est souhaité.

La taille générale d'un seul dispositif MEMS varie entre 20 micromètres et un millimètre [4], par contre la taille du microphone est de l'ordre de $1.9 * 3.25 * 1mm^3$.

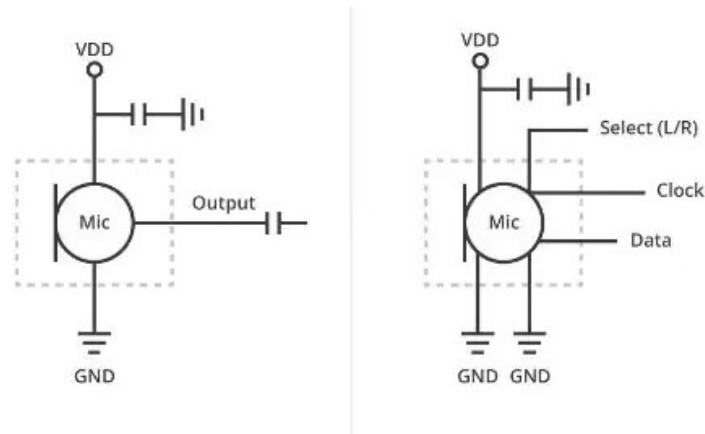


Figure 5. À gauche : schéma d'une application utilisant un microphone MEMS Analogique.

À droite : schéma d'une application utilisant un microphone Numérique.

La Directivité:

Les microphones sont classés selon leurs types de capsules, mais aussi selon leur directivité, autrement dit la manière dont ils captent le son provenant de différentes directions. Dans ce domaine, on distingue deux grands types de microphones : les omnidirectionnels et les directionnels.

Pour mieux comprendre le fonctionnement des microphones directionnels, vous trouverez les diagrammes polaires (directivité) dans nos brochures et nos fiches produits. Ces graphiques circulaires indiquent la sensibilité relative du microphone en dB lorsqu'il tourne face à une source sonore fixe. Vous pouvez également considérer qu'il s'agit d'une « tranche » du diagramme illustré en Figure 6.

La directivité omnidirectionnelle: Les microphones omnidirectionnels présentent la conception, la fabrication et la facilité d'utilisation les plus simples qui existent. Ils constituent également un point de référence pour les autres. Ils captent le son uniformément, quelle que soit sa provenance, qu'on les pointe sur le sujet ou à l'opposé, mais bien sûr, à égale distance. Néanmoins, les meilleurs modèles ont tendance à devenir directionnels en hautes fréquences, par conséquent, un son de même intensité provenant de l'arrière semblera moins net que celui de l'avant.

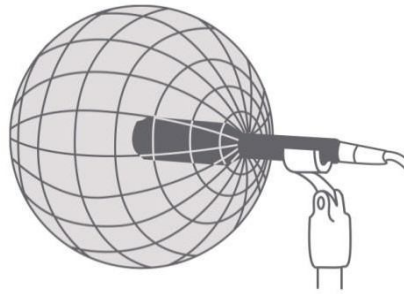


Figure 6: Microphone omnidirectionnel.

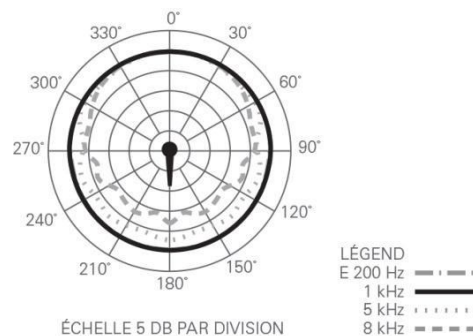


Figure 7: Directivité omnidirectionnelle.

Leur fonctionnement omnidirectionnel en très hautes fréquences dépend directement de leur taille. Car le boîtier du microphone bloque tout simplement les ondes de hautes fréquences provenant de l'arrière. Plus leur diamètre est petit, plus ils seront omnidirectionnels.

Directivités directionnelles:

Les microphones directionnels sont spécialement conçus pour la prise de son à l'avant (et également à l'arrière dans le cas des modèles bidirectionnels), en éliminant le son hors axe. Cet effet varie selon les fréquences et seuls les meilleurs modèles garantissent une élimination uniforme dans une large bande de fréquences. La directivité dépend des ouvertures externes et passages internes du microphone permettant au son d'atteindre précisément les deux côtés de la membrane. Le son parvenant de l'avant du microphone fera vibrer la membrane, alors que celui de l'arrière annulera cette vibration.

Les principaux modèles directionnels comprennent les microphones cardioïdes, super cardioïdes, hyper cardioïdes et bidirectionnels. On inclut également dans

Chapitre 1 : Généralité des Microphones

cette catégorie générale de microphones bidirectionnels, les microphones canon, dont la conception beaucoup plus sophistiquée permet une directivité supérieure à celle des quatre modèles de base.

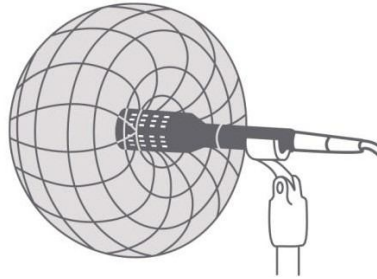


Figure 8 : Microphone directionnel (cardioïde).

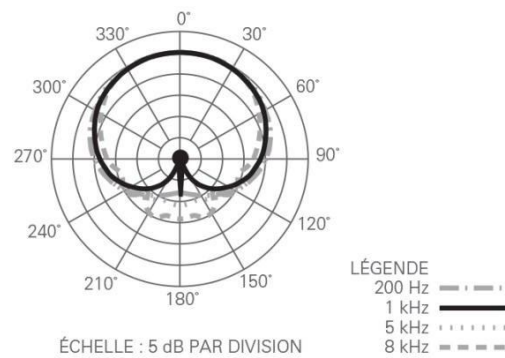


Figure 9: Directivité cardioïde.

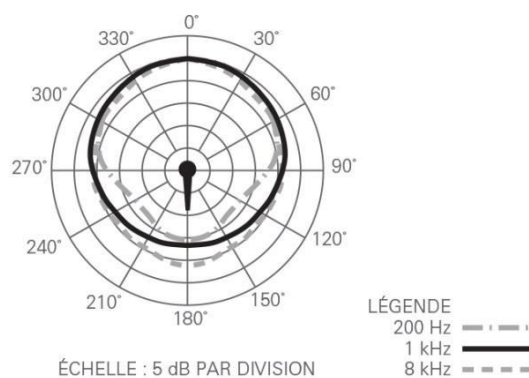


Figure 10 : Directivité super cardioïde.

Chapitre 1 : Généralité des Microphones

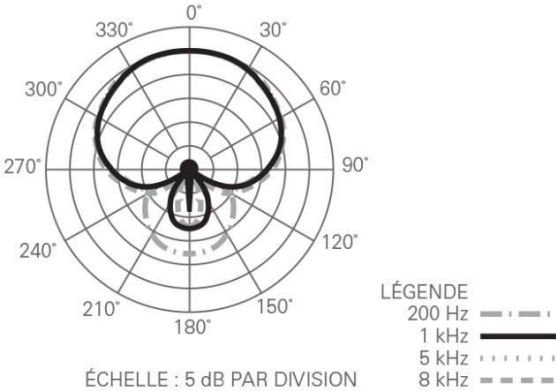


Figure 11 : Directivité hyper cardioïde.

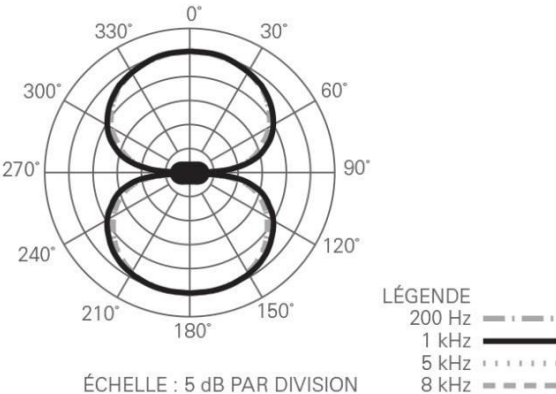


Figure 12 : Directivité bidirectionnelle.

Chapitre 1 : Généralité des Microphones

Conclusion :

Nous concluons dans ce chapitre de nombreux facteurs doivent être pris en compte lors du choix d'un microphone électret, MEMS, statique ou électrodynamique. La part de marché des microphones MEMS continue d'augmenter à un rythme rapide en raison des nombreux avantages procurés par cette technologie. Par exemple, pour les applications soumises à des contraintes d'espace, les petits formats proposés pour les microphones MEMS peuvent être intéressants. De plus, il est possible de réduire la surface occupée sur les cartes à circuit imprimé ainsi que le coût par composant grâce aux circuits analogiques et numériques intégrés à l'architecture des microphones MEMS. L'impédance de sortie relativement faible des microphones MEMS analogiques et les sorties des microphones MEMS numériques sont idéales pour les applications utilisées dans des environnements soumis aux bruits électriques. [4]

Chapitre 2

Microphone Array Beamforming (Multi microphone)

Introduction :

Tous les microphones MEMS ont une réponse de captation omnidirectionnelle, ce qui signifie qu'ils répondent de la même manière aux sons provenant de n'importe quelle direction. Plusieurs microphones peuvent être configurés dans un réseau pour former une réponse directionnelle ou un motif de faisceau. Un réseau de microphones à formation de faisceaux peut être conçu pour être plus sensible au son provenant d'une ou plusieurs directions spécifiques qu'au son provenant d'autres directions. [6]

D'autre part, l'omnidirectionnalité peut permettre aux sons ambiants ou indésirables de concurrencer la source sonore principale, rendant le son moins clair ou difficile à entendre.

Un réseau de formation de faisceaux contenant plusieurs microphones MEMS peut surmonter ce problème en amplifiant les sons provenant d'une certaine direction et en atténuant les autres. Ceci est réalisé en additionnant les signaux du microphone, en utilisant des techniques de traitement du signal telles que l'insertion de retard, l'amplification et le filtrage pour minimiser les signaux des sons indésirables. Les signaux représentant la source audio utile s'additionnent, tandis que les signaux parasites s'additionnent de manière incohérente et sont ainsi atténués par rapport au signal principal. La figure 01 illustre cette méthode. Le traitement du signal peut être assez simple dans le cas d'un ensemble de deux microphones de base soigneusement conçu.

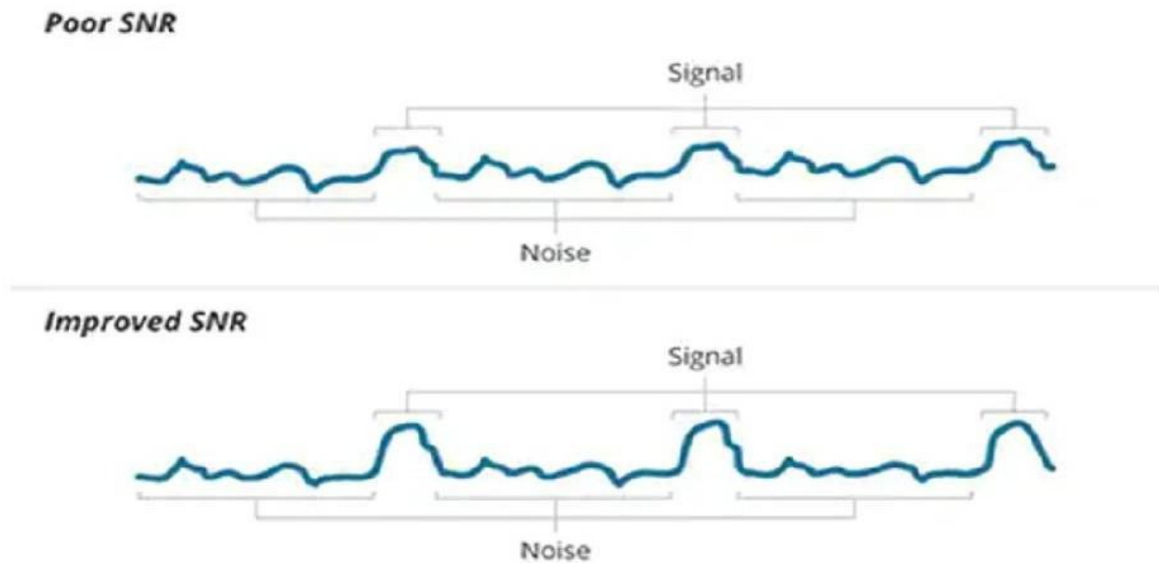


Figure 1. Les réseaux de microphones à formation de faisceau amplifient les signaux utiles par rapport au bruit de fond.

Un réseau de formation de faisceaux de base peut contenir aussi peu que deux microphones, créant ainsi un instrument doté d'un seul axe. Avec un traitement de signal approprié, un réseau large peut être créé pour maximiser les signaux résultant de sons provenant directement du côté du réseau, perpendiculairement à l'axe des deux microphones. Alternativement, un réseau endfire est créé en optimisant la directivité des sons se déplaçant le long de l'axe du microphone. Dans chaque cas, il est important que les microphones du réseau aient une sensibilité et une réponse en fréquence étroitement adaptées. Heureusement, il s'agit d'un point fort des microphones MEMS en raison des processus de fabrication à l'échelle de la plaquette utilisés lors de la fabrication. [7]

Broadside Arrays:

Est celui dans lequel une ligne de microphones est disposée perpendiculairement à la direction préférée des ondes sonores.

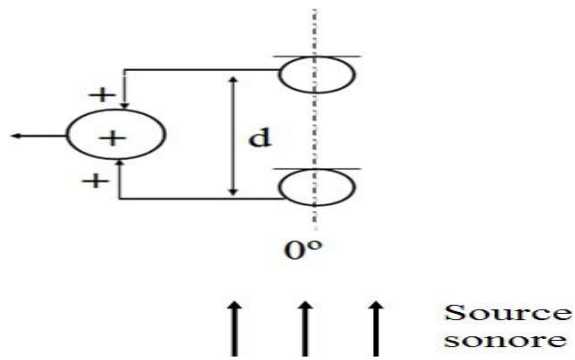


Figure 2. Broadside Array à 2 Microphones.

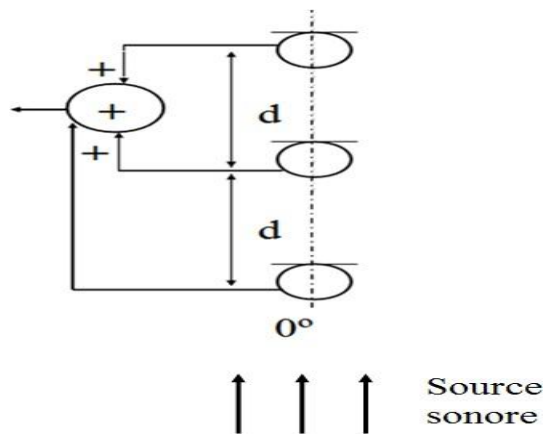


Figure 3. Broadside Array à 3 Microphones.

✓ **Directivité du Broadside Array:**

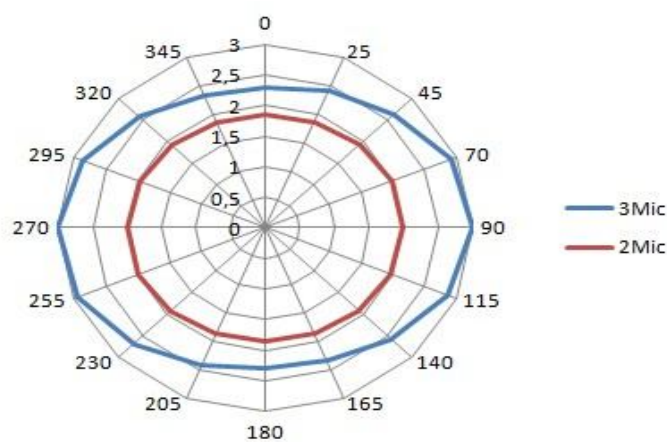


Figure 4. Réponse de 2 et 3 Microphones en Broadside Array.

Chapitre 2 : Microphone Array Beamforming (Multi microphone)

Endfire Arrays:

On obtient une directivité bidirectionnelle si la sortie du 2^{ème} microphone est inversée et ajoutée à la sortie du 1^{er} microphone.

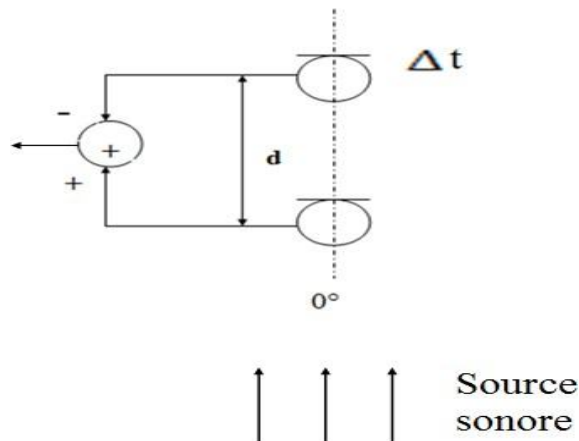


Figure 5. Endfire Array à 2 Microphones.

➤ Directivité de l'Endfire Array:

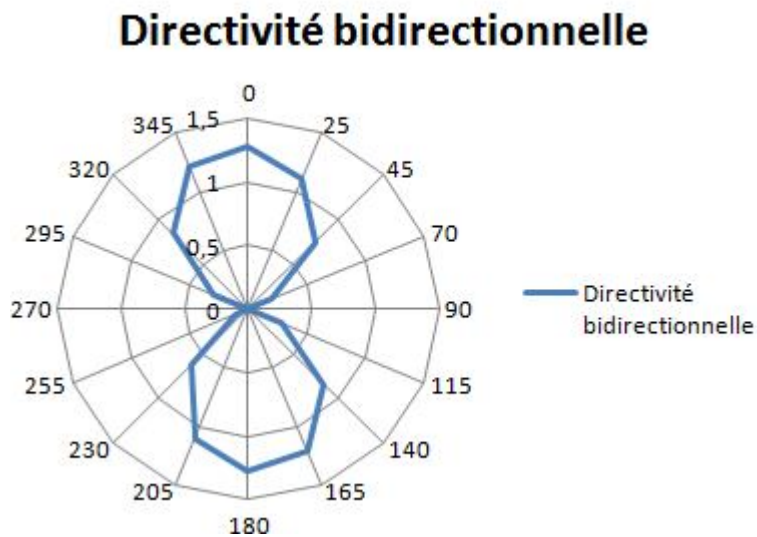


Figure 6. Réponse bidirectionnelle en Endfire Array.

Chapitre 2 : Microphone Array Beamforming (Multi microphone)

- Un réseau endfire se compose de plusieurs microphones disposés en ligne avec la direction souhaitée de propagation du son. Lorsque le microphone avant du réseau (le premier atteint par la propagation du son dans l'axe) est additionné à un signal inversé et retardé du ou des microphones arrière, cette configuration est appelée réseau différentiel [6], on obtient par cette technique une réponse cardioïde.
- **Réponse directivité:**

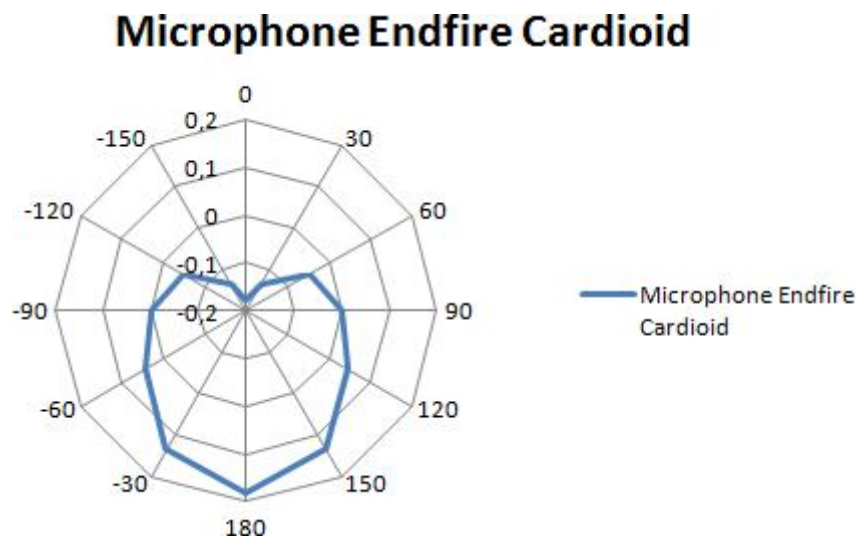


Figure 7. Réponse Cardioïde en Endfire Array.

Chapitre 2 : Microphone Array Beamforming (Multi microphone)

Conclusion:

Dans ce chapitre, nous dérivons les avantages et les désavantages d'endfire array pour broadside array et les expliquons dans le tableau suivant [6]:

Configuration Array	Avantage	Désavantage
Sommation Broadside	Profondeur de réseau peu profonde Le traitement est facile à mettre en œuvre (somme simple)	Atténuation inférieure de l'axe. Un petit espacement entre les microphones est nécessaire pour empêcher l'aliasing.
Différentiel Endfire	Meilleure atténuation hors axe. Taille globale plus petite.	Profondeur plus profonde. Plus de complexité de traitement (retard du signal requis). Réponse à basse fréquence atténuée.

Partie Pratique

Partie Pratique

Mélangeur (Mixer) :

Pour réaliser un array de plusieurs microphones, nous avons utilisé un mélangeur, un mélangeur est un circuit permettant de combiner plusieurs signaux audio contenant des informations différentes pour donner à la sortie un signal unique.

Mélangeur audio : En technique audio, un mélangeur est un circuit à deux ou plusieurs entrées, dont la tension de sortie est la somme pondérée des tensions appliquées à ses entrées. Ce circuit est parfois appelé table de mixage [8].

Le mélangeur sert simplement à faire la somme des sorties des microphones de l'array.

En plus du filtrage, chaque sortie de microphone peut être ajustée séparément en terme de niveau.

La sortie du mélangeur est envoyée généralement à un amplificateur de puissance.

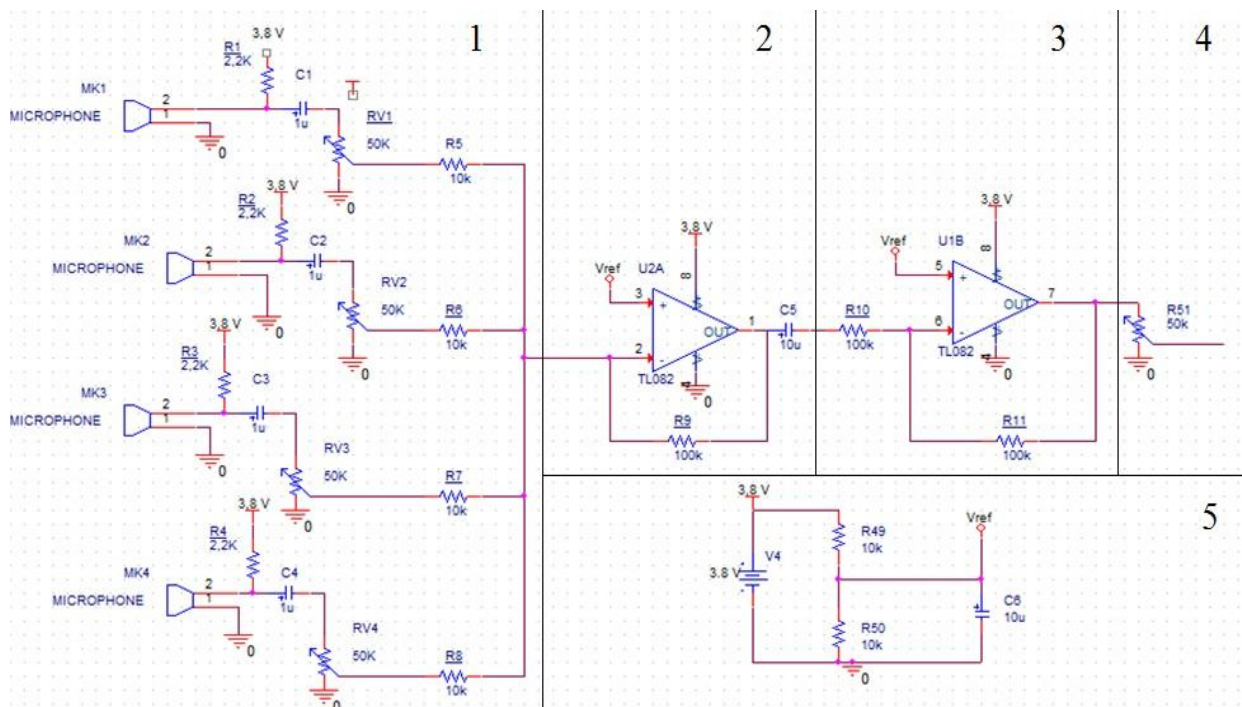


Figure 1. Schéma du mélangeur (Mixer) à quatre entrées.

Partie Pratique

DESCRIPTION:

- 1: 4 Entrée à Niveau réglable .
- 2 : Circuit sommateur(sortie inversée à gain=11).
- 3: Circuit inverseur.
- 4: Niveau du signal de sortie (vers l'amplificateur de puissance).
- 5: Tension de référence $V_{ref} = 1.9$

Array proposé avec géométrie :

Proposer une nouvelle façon de créer une forme d'un prototype de microphone à directivité contrôlable et orientable de 0 à 360°, Nous avons propose trois forme d'un prototype de microphone.

Premier forme en triangle :

On place trois microphones en forme de triangle équilatéral et la distance entre chaque microphones **2cm** et une hauteur **h**, les trois microphones sans retard et sans inverseur ils n'ont qu'un retard de distance, comme indiqué dans la figure suivante:

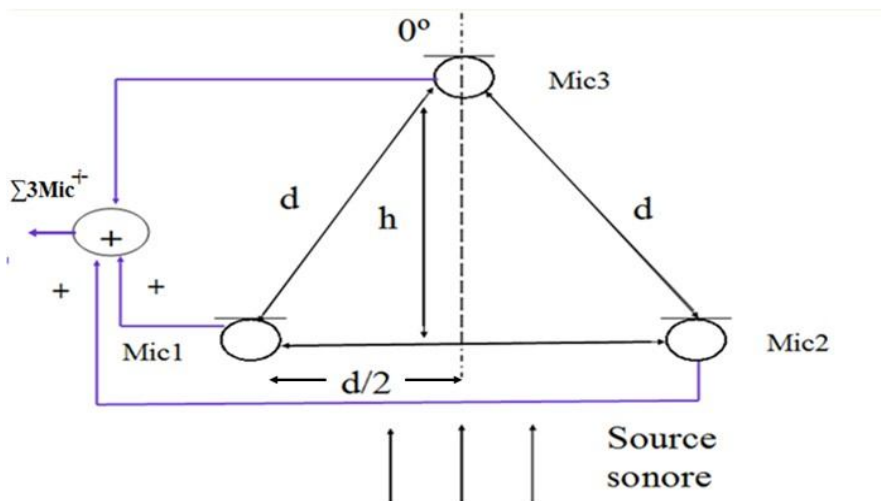


Figure 2. Array proposé avec géométrie en triangle.

Partie Pratique

✓ Les calculs:

- Distance (**d**): $d = 2cm.$
- Hauteur (**h**):
 $h = d * \cos 30.$
 $h = 1.73 cm .$
- Delay (Δ) : C'est le retard de distance qui change avec l'angle.
 - $\Delta_1 = h * \cos \alpha .$
 - $\Delta_2 = d * \cos \alpha .$
 - $\Delta_3 = d/2 * \cos \alpha .$
- Equation de la réponse du signal du microphone : $s(t) = A * \sin(\omega t + \Delta).$

- L'amplitude de la grandeur, appelée aussi valeur de crête ,dans l'unité de la grandeur mesurée (**A**)=1v.
- Phase instantanée (mt)=90°.

❖ Chaque microphone a quatre positions :

Par exemple:

En plan (x, y) , $\alpha = 0$

De l'angle 0° a 90° le premier microphone est la référence.

$$s(t)=A * \sin(\omega t + \Delta).$$

En angle 0°:

microphone 1: $s(t) = 1 * \sin(90 + 0).$

microphone 2: $s(t) = 1 * \sin(90 + 0).$

microphone 3: $s(t) = 1 * \sin(90 + h).$

Partie Pratique

En angle 25°:

microphone 1:

$$s(t) = 1 * \sin(90 + 0).$$

microphone 2:

$$s(t) = 1 * \sin(90 + d/2).$$

microphone 3:

$$s(t) = 1 * \sin(90 + d).$$

En angle 45°:

microphone 1:

$$s(t) = 1 * \sin(90 + 0).$$

microphone 2:

$$s(t) = 1 * \sin(90 + h).$$

microphone 3:

$$s(t) = 1 * \sin(90 + h).$$

En angle 90°:

microphone 1:

$$s(t) = 1 * \sin(90 + 0).$$

microphone 2:

$$s(t) = 1 * \sin(90 + d).$$

microphone 3:

$$s(t) = 1 * \sin(90 + d/2).$$

- **Simulation en OrCAD PSpice de forme en triangle:**

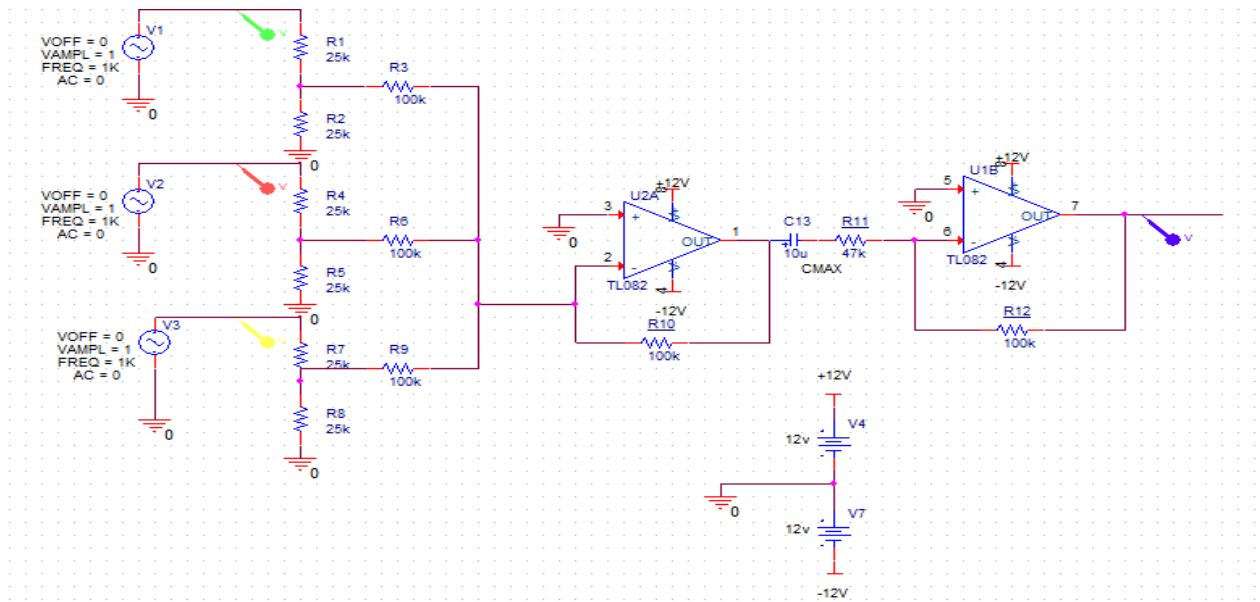


Figure 3. Schéma de Simulation de forme en triangle.

➤ Résultats de Simulation:

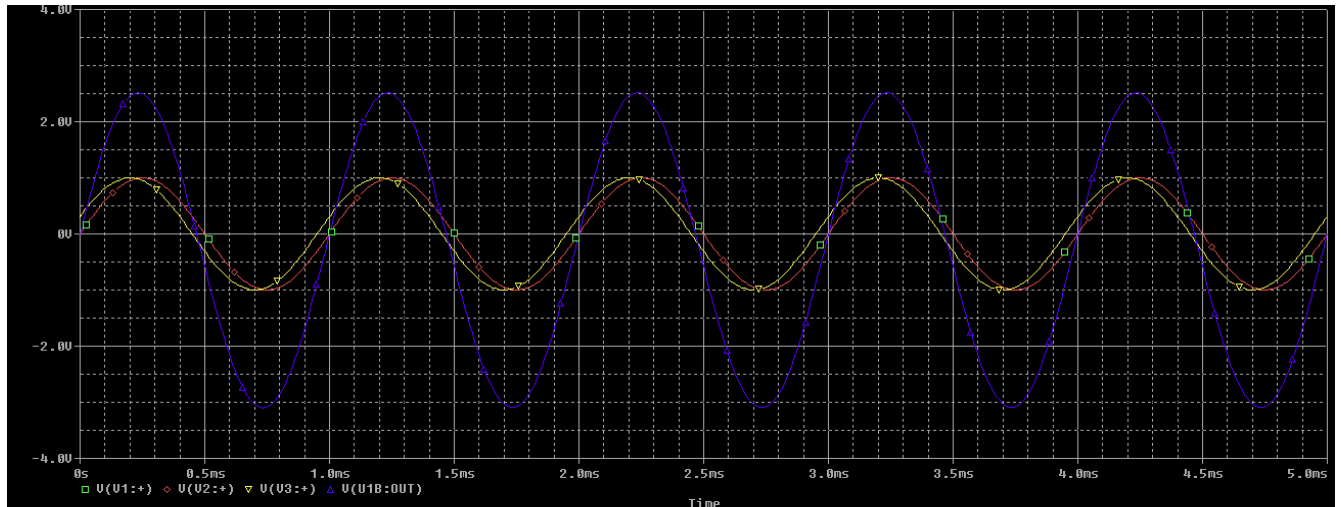


Figure 4. Résultats de Simulation en Angle 0° .

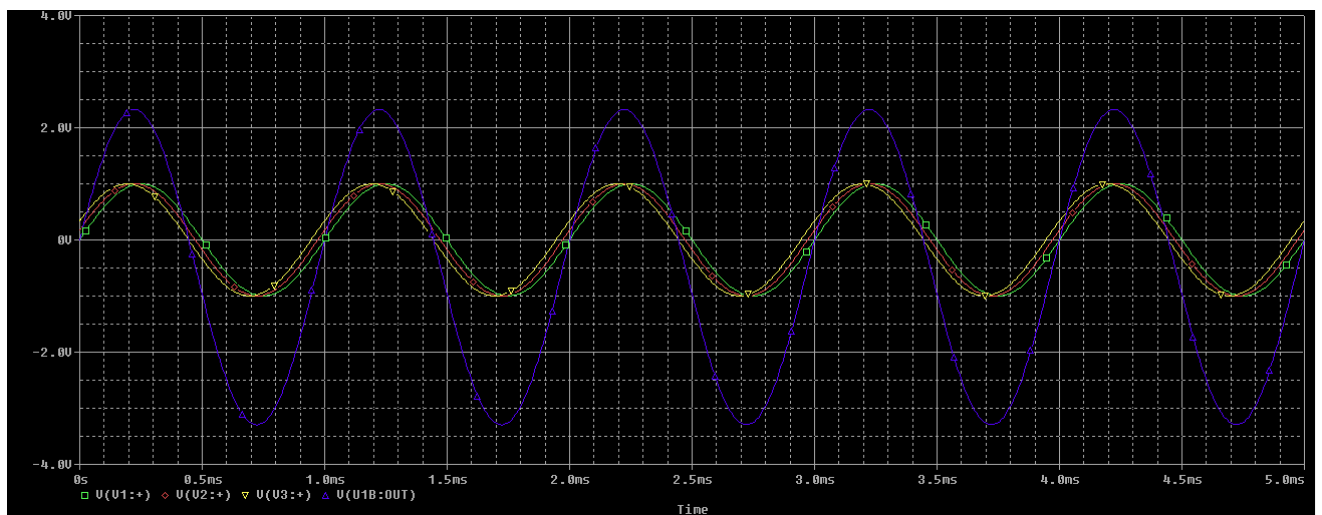


Figure 5. Résultats de Simulation en Angle 25° .

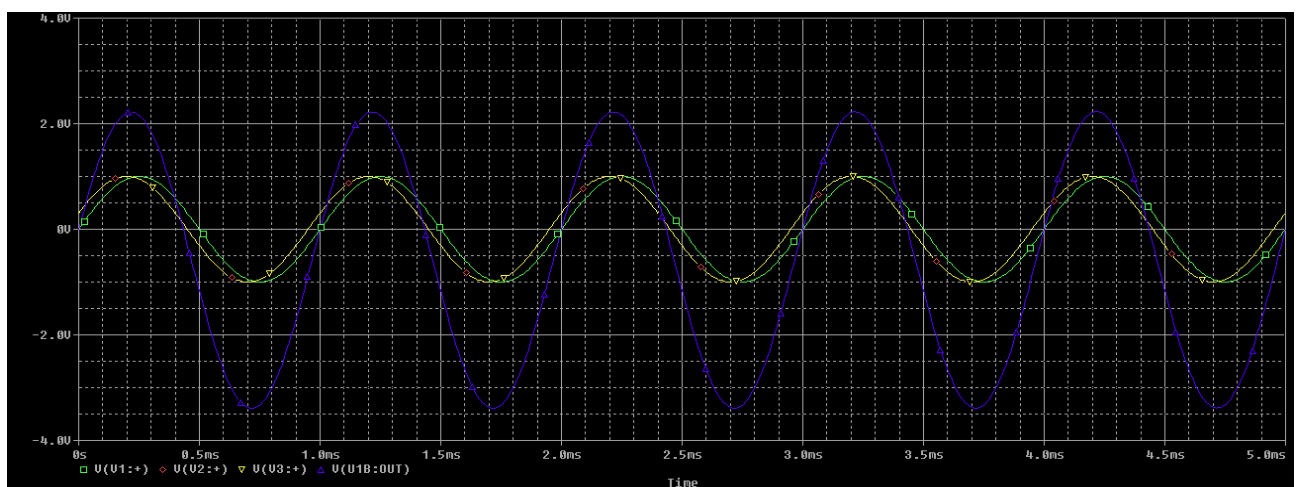


Figure 6. Résultats de Simulation en Angle 45° .

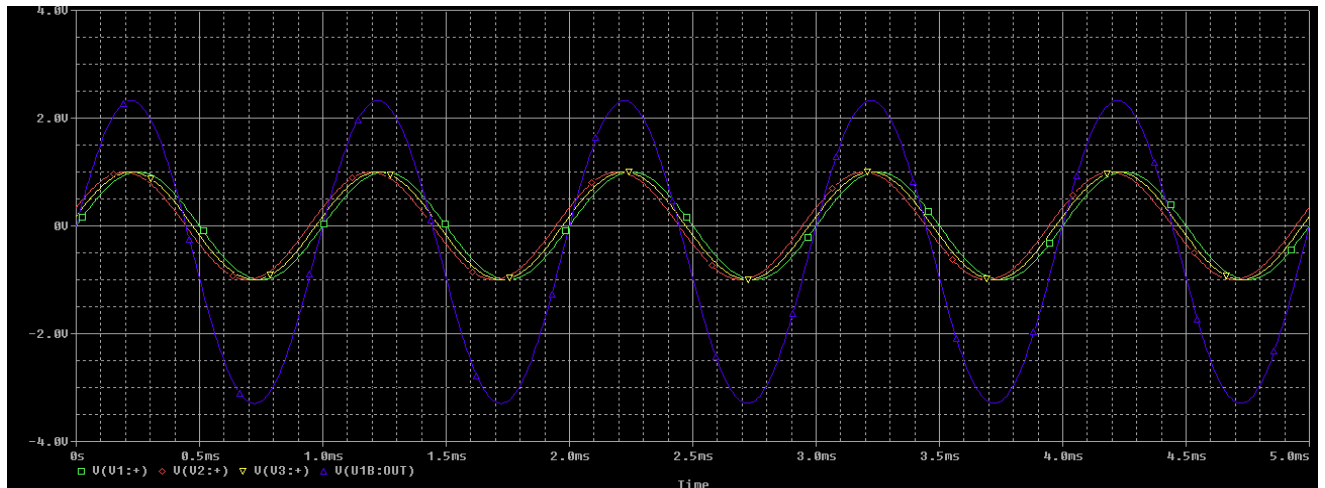


Figure 7. Résultats de Simulation en Angle 90° .

✓ **Description du résultats de simulation :**

- La couleur est verte signal du la première entrée.
- La couleur est rouge signal du la deuxième entrée.
- La couleur est jaune signal du le troisième entrée.
- La couleur est bleu signal du sortie .

L'amplitude maximale du signal de sortie par laquelle nous définissons la réponse de directivité.

✓ **Réponse directivité de array proposé avec géométrie en triangle:**

La Réponse directivité du angle $[0^\circ \text{ à } 90^\circ]$, angle $[135^\circ \text{ à } 202^\circ]$ et angle $[225^\circ \text{ à } 330^\circ]$, symétrique.

Partie Pratique

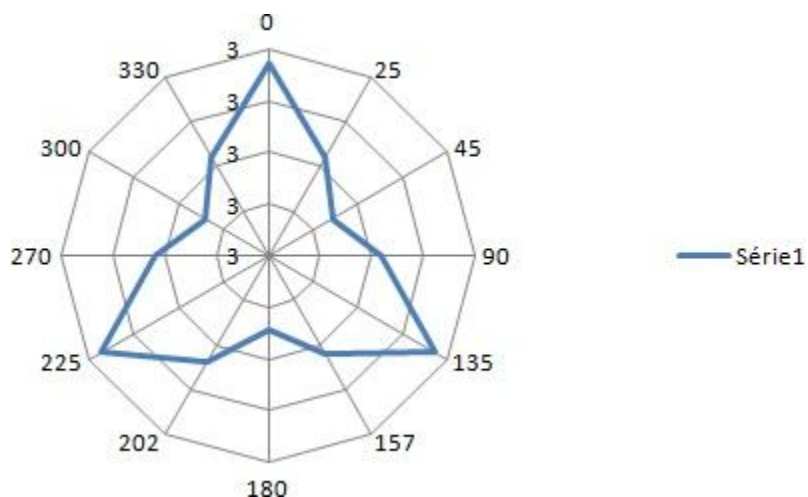


Figure 8. Diagramme de directivité de array proposé avec géométrie en triangle .

Remarque:

On déduit de la simulation et de réponse directivité, array proposé comportement broadside, parce que la directivité est omnidirectionnelle, nous cherchons une directivité cardioïde il faut donc proposer une autre forme .

Deuxième forme en triangle, plus un microphone au centre:

On place trois microphones en forme de triangle équilatéral plus un microphone au centre et la distance entre les trois microphones **2cm** et une hauteur **h**, les quatre microphones sans retard et sans inverseur ils n'ont qu'un retard de distance, comme indiqué dans la figure suivante:

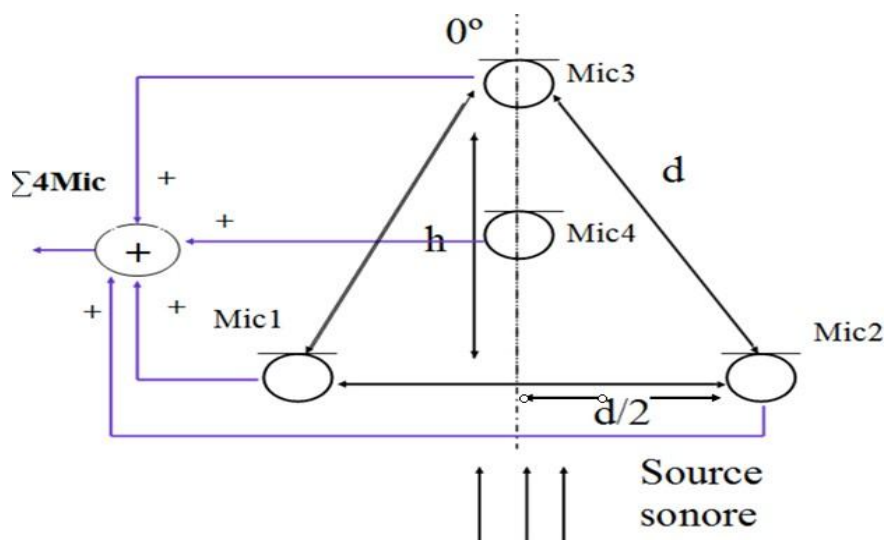


Figure 9. Array proposé avec géométrie en triangle, plus un microphone au centre.

Partie Pratique

✓ Les calculs:

- Distance (**d**): $d = 2\text{cm}$.

- Hauteur (**h**):

$$h = d \cdot \cos 30.$$

$$h = 1.73 \text{ cm}.$$

- Delay (Δ) : C'est le retard de distance qui change avec l'angle.

- $\Delta_1 = h * \cos \alpha$.

- $\Delta_2 = d * \cos \alpha$.

- $\Delta_3 = h/2 * \cos \alpha$.

- $\Delta_4 = d/2 * \cos \alpha$.

- Equation de la réponse du signal du microphone : $s(t) = A * \sin(\omega t + \Delta)$.

- L'amplitude de la grandeur, appelée aussi valeur de crête, dans l'unité de la grandeur mesurée (**A**)=1v.

- Phase instantanée (mt) = 90° .

❖ Chaque microphone a quatre positions :

Par exemple:

En plan (x, y) $\alpha = 0$

De l'angle 0° a 90° le premier microphone est la référence.

En angle 0° :

$$s(t) = A * \sin(\omega t + \Delta).$$

microphone 1: $s(t) = 1 * \sin(90 + 0)$.

microphone 2: $s(t) = 1 * \sin(90 + 0)$.

microphone 3: $s(t) = 1 * \sin(90 + h)$.

microphone 4: $s(t) = 1 * \sin(90 + h/2)$.

Partie Pratique

En angle 25°:

- microphone 1: $s(t)=1 * \sin(90 + 0).$
- microphone 2: $s(t)=1 * \sin(90 + d/2).$
- microphone 3: $s(t)=1 * \sin(90 + d).$
- microphone 4: $s(t)=1 * \sin(90 + d/2).$

En angle 45°:

- microphone 1: $s(t)=1 * \sin(90 + 0).$
- microphone 2: $s(t)=1 * \sin(90 + h).$
- microphone 3: $s(t)=1 * \sin(90 + h).$
- microphone 4: $s(t)=1 * \sin(90 + h/2).$

En angle 90°:

- microphone 1: $s(t)=1 * \sin(90 + 0).$
- microphone 2: $s(t)= 1 * \sin(90 + d).$
- microphone 3: $s(t)= 1 * \sin(90 + d/2).$
- microphone 4: $s(t)=1 * \sin(90 + d/2).$

- **Simulation en OrCAD PSpice du forme en triangle, plus un microphone au centre:**

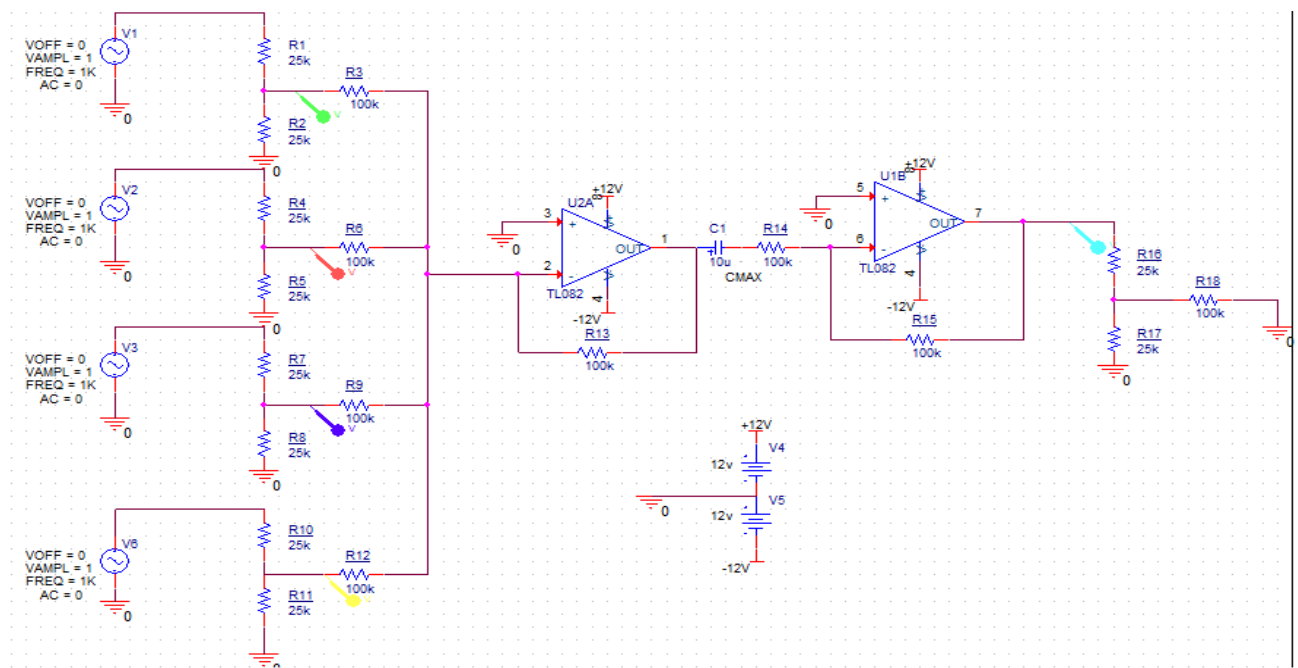


Figure 10. Schéma de simulation du forme en triangle, plus un microphone au centre .

✓ Résultats de Simulation:

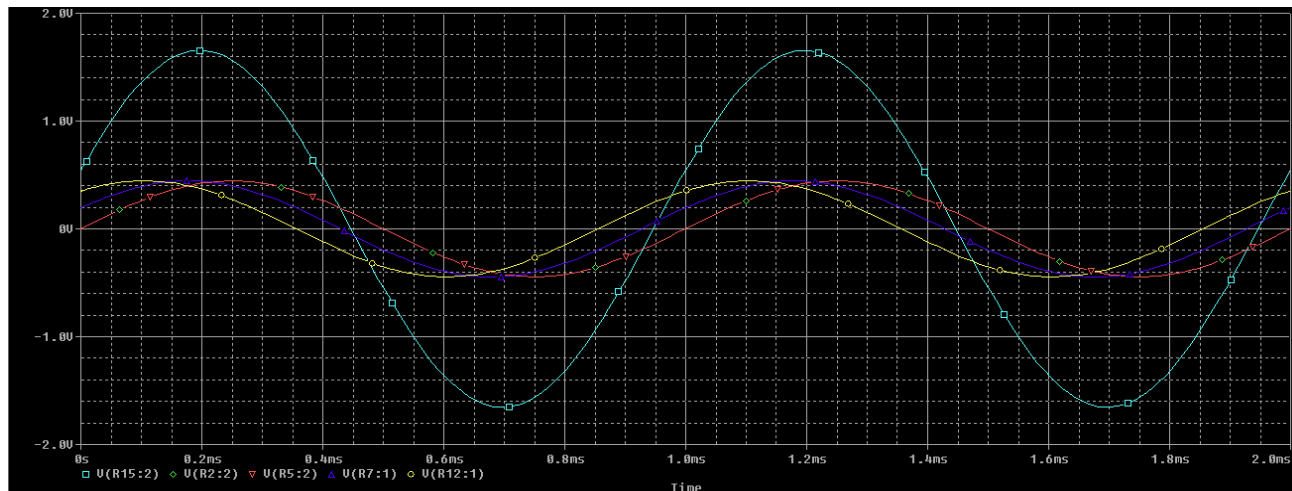


Figure 11. Résultats de Simulation en Angle 0°.

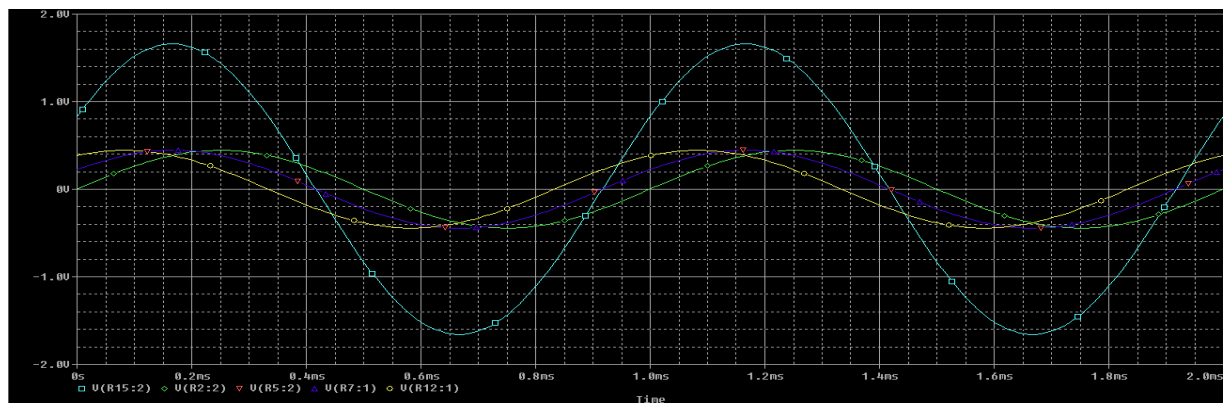


Figure 12. Résultats de Simulation en Angle 25°.

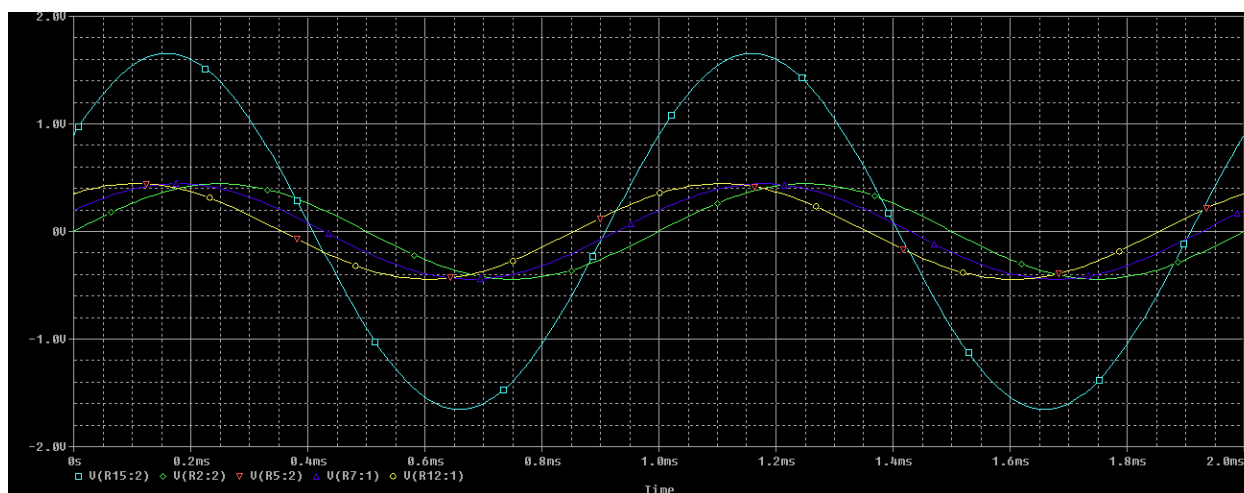


Figure 13. Résultats de Simulation en Angle 45°.

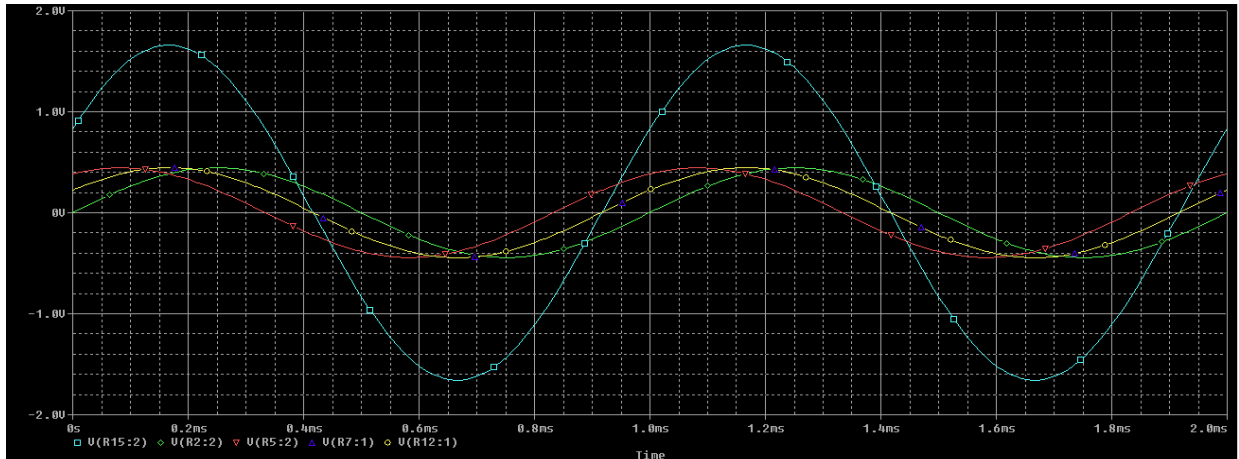


Figure 14. Résultats de Simulation en Angle 90°.

✓ **Description du résultats de simulation:**

- La couleur est verte signal du la première entrée.
- La couleur est rouge signal du la deuxième entrée.
- La couleur est bleu signal du le troisième entrée .
- La couleur est jaune signal du le quatrième entrée .
- La couleur est bleu clair signal du sortie .

L'amplitude maximale du signal de sortie par laquelle nous définissons la réponse de directivité.

✓ **Réponse directivité du forme en triangle, plus un microphone au centre :**

La réponse directivité du angle [0° à 90°], angle [135° à 202°] et angle [225° à 330°], symétrique.

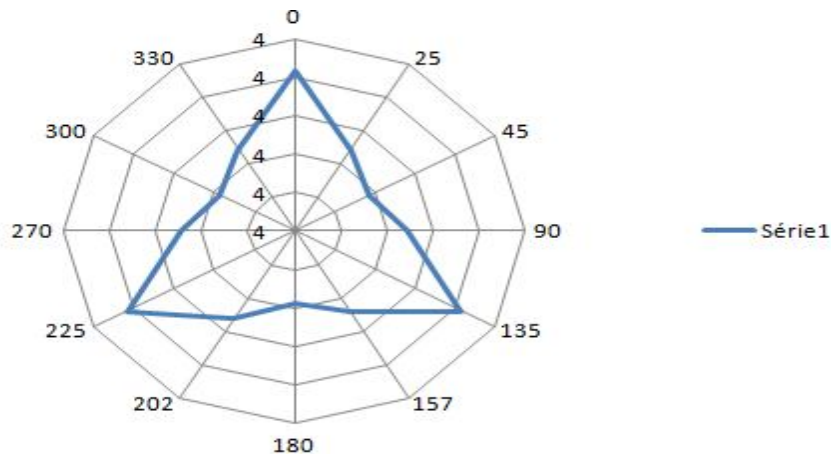


Figure 15. Diagramme de directivité du forme en triangle, plus un microphone au centre.

Partie Pratique

Remarque:

On déduit de la simulation et de réponse directivité, array proposé comportement broadside ,parce que la directivité est omnidirectionnelle. mais la différence entre la forme en triangle, et en triangle plus un microphone au centre: L'amplitude de réponse est la puissance sont supérieurs nous cherchons une directivité cardioïde il faut donc proposer une autre forme.

Troisième forme en triangle, plus un microphone au centre avec Mic3 présente un retard Δh avec inversion et Mic4 présente aussi un retard $\Delta h/2$ avec inversion:

On place trois microphones en forme de triangle équilatéral plus un microphone au centre et la distance entre les trois microphones **2cm** et une hauteur **h**, les signaux des microphones (1 et 2) sont directes alors que le microphone 3 présente un retard Δh avec inversion de sa sortie, le microphone 4 présente aussi un retard $\Delta h/2$ avec inversion, comme indiqué dans la figure suivante:

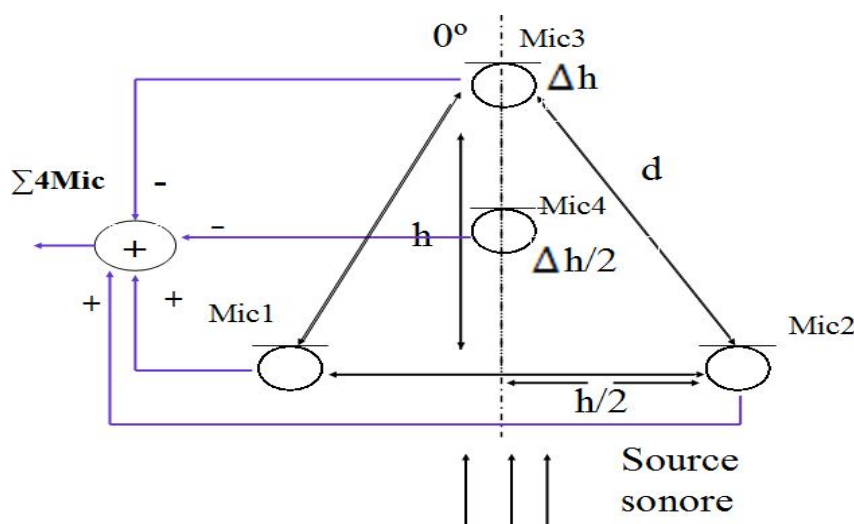


Figure 16. Array proposé avec géométrie en triangle, plus un microphone au centre avec Mic3 présente un retard Δh avec inversion et Mic4 présente aussi un retard $\Delta h/2$ avec inversion.

Partie Pratique

✓ Les calculs:

- Distance (**d**): $d = 2cm.$

- Hauteur (**h**):

$$d^2 = h^2 + \frac{h^2}{2}$$

$$d^2 = \frac{5h^2}{4}$$

$$d = \frac{h}{2}\sqrt{5} \quad \text{Donc : } h = \frac{d}{\sqrt{5}} ; h = 1.78 \text{ cm.}$$

- Delay (Δ) : C'est le retard de distance qui change avec l'angle.

- $\Delta = \frac{h}{2} * \cos\alpha.$

- $2 * \Delta = h * \cos\alpha.$

- Equation de la réponse du signal du microphone: $s(t) = A * \sin(\omega t + \Delta).$

- L'amplitude de la grandeur, appelée aussi valeur de crête, dans l'unité de la grandeur mesurée (**A**)=1v.

- Phase instantanée (mt) = 90°.

❖ Chaque microphone a quatre positions :

Par exemple:

En plan (x, y) $\alpha = 0$

De l'angle 0° a 90° le premier microphone est la référence.

Partie Pratique

En angle 0°:

$$s(t)=A * \sin(\omega t + \Delta).$$

microphone 1: $s(t) = 1 * \sin(90 + 0).$

microphone 2: $s(t) = 1 * \sin(90 + 0).$

microphone 3: $s(t) = -(1 * \sin(90 + 2 * h)).$

microphone 4: $s(t) = -(1 * \sin(90 + h)).$

En angle 25°:

microphone 1: $s(t) = 1 * \sin(90 + 0).$

microphone 2: $s(t) = 1 * \sin(90 + d/2).$

microphone 3: $s(t) = -(1 * \sin(90 + d + h)).$

microphone 4: $s(t) = -(1 * \sin(90 + d/2 + h/2)).$

En angle 45°:

microphone 1: $s(t) = 1 * \sin(90 + 0).$

microphone 2: $s(t) = 1 * \sin(90 + h).$

microphone 3: $s(t) = -(1 * \sin(90 + 2 * h)).$

microphone 4: $s(t) = -(1 * \sin(90 + h)).$

En angle 90°:

microphone 1: $s(t) = 1 * \sin(90 + 0).$

microphone 2: $s(t) = 1 * \sin(90 + h).$

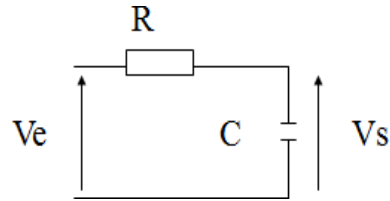
microphone 3: $s(t) = -(1 * \sin(3h/2)).$

microphone 4: $s(t) = -(1 * \sin(90 + h)).$

❖ Circuit de retard RC:

Delay dans le Schéma de Simulation ou la pratique réelle que nous utilisons un filtre passe bas (RC) Premier Ordre.

Partie Pratique



- **fonction de transfert :**

$$T = \frac{V_s}{V_e}$$

$$T = \frac{Z_C}{Z_R + Z_C} \Rightarrow T = \frac{1/jC\omega}{R + 1/jC\omega} \Rightarrow T = \frac{1}{1 + jRC\omega} \Rightarrow T = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$$

avec: $\omega_0 = \frac{1}{RC}$; $\omega = 2\pi F$ $\Rightarrow F = \frac{\omega}{2\pi}$ \Rightarrow

$$F_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$$

F_0 : fréquence de coupure .

- **Argument de T :**

$$T = \frac{1}{(1 + j\frac{\omega}{\omega_0})} ; \quad T = \frac{1 + j0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$$

$$\varphi = \frac{\text{arc tang}(0/1)}{\text{arc tang}((\omega/\omega_0)/1)} \Rightarrow \varphi = \frac{\text{arc tang}(0)}{\text{arc tang}(\omega/\omega_0)}$$

$$\varphi = 0 - \text{arc tang}(\omega/\omega_0) \Rightarrow \varphi = -\text{arc tang}(\omega/\omega_0)$$

Les calculs :

$$\Delta_\varphi \equiv \Delta_h \quad , \quad \Delta_h = \frac{2d}{\sqrt{5}} \quad , \quad \Delta t_h = \frac{2d}{\sqrt{5} \cdot c}$$

$$\Delta_\varphi = \frac{\Delta t_h \cdot 360}{T}$$

$$\Rightarrow \Delta_\varphi = \frac{1,8 \cdot 10^{-2} \cdot 360}{340 \cdot 10^{-3}} = 19,05^\circ \Rightarrow \text{Donc: } \varphi = 19,05^\circ ;$$

- Nous mettons en valeur du fréquence de coupure : 5000 kHz.

Calcul les valeurs RC:

$$F_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$$

Partie Pratique

$$F_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$C = 100nF$$

$$R = \frac{1}{2\pi F_0}$$

$$R = 318\Omega$$

❖ Simulation en OrCAD PSpice de circuit de retard RC:

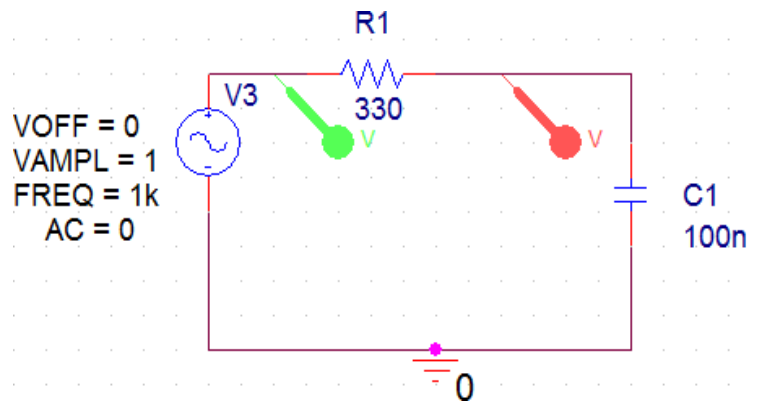


Figure 17. Schéma de Simulation circuit de retard RC.

✓ Résultat de Simulation:

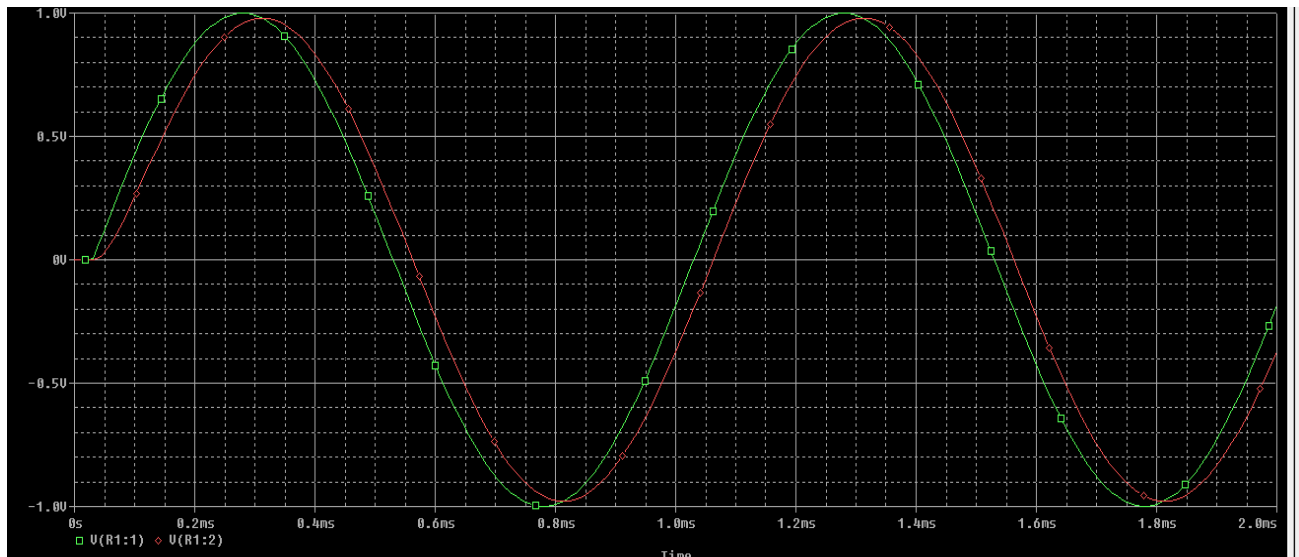


Figure 18. Résultat de simulation circuit de retard RC.

Partie Pratique

- De la courbe: $\Delta t=0.05\text{ms}$, $T=1\text{ms}$.
- Nous comptons le déphasage:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta t \cdot 360}{T} = 18^\circ.$$

$$\Delta\varphi = \frac{0.05 \cdot 10^{-3} \cdot 360}{10^{-3}} = 18^\circ.$$

$$\Delta t = 0.05/2 = 0.025\text{ms}.$$

$$\Delta\varphi = \frac{0.025 \cdot 10^{-3} \cdot 360}{10^{-3}} = 9^\circ.$$

- **Simulation en OrCAD PSpice de forme en triangle, plus un microphone au centre avec Mic3 présente un retard Δh avec inversion et Mic4 présente aussi un retard $\Delta h/2$ avec inversion:**

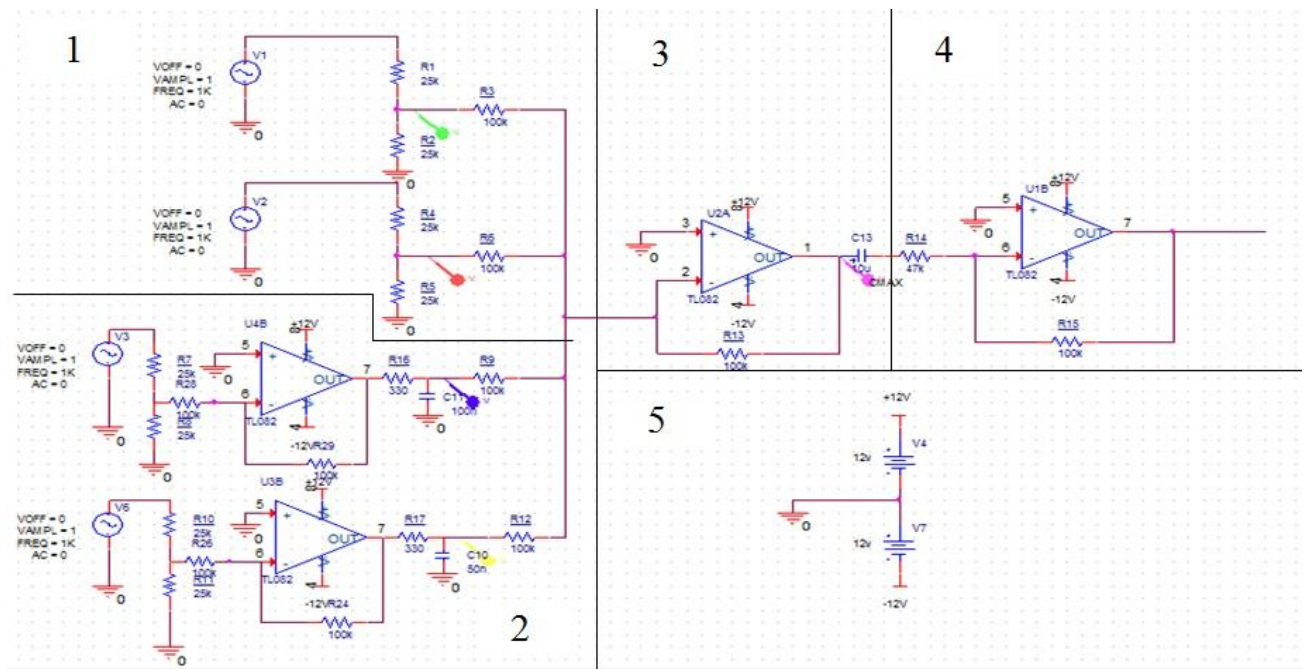


Figure 19. Schéma de simulation de forme en triangle, plus un microphone au centre avec Mic3 présente un retard Δh avec inversion et Mic4 présente aussi un retard $\Delta h/2$ avec inversion.

Partie Pratique

➤ DESCRIPTION:

- (1) Deux entrées à niveau réglable .
- (2) Deux entrées avec inverseur et circuit de retard RC à niveau réglable .
- (3) Circuit sommateur avec un gain=1.
- (4) Circuit Inverseur (vers l'amplificateur de puissance).
- (5) L'alimentation symétrique du circuit mélangeur.

✓ Résultats de Simulation:

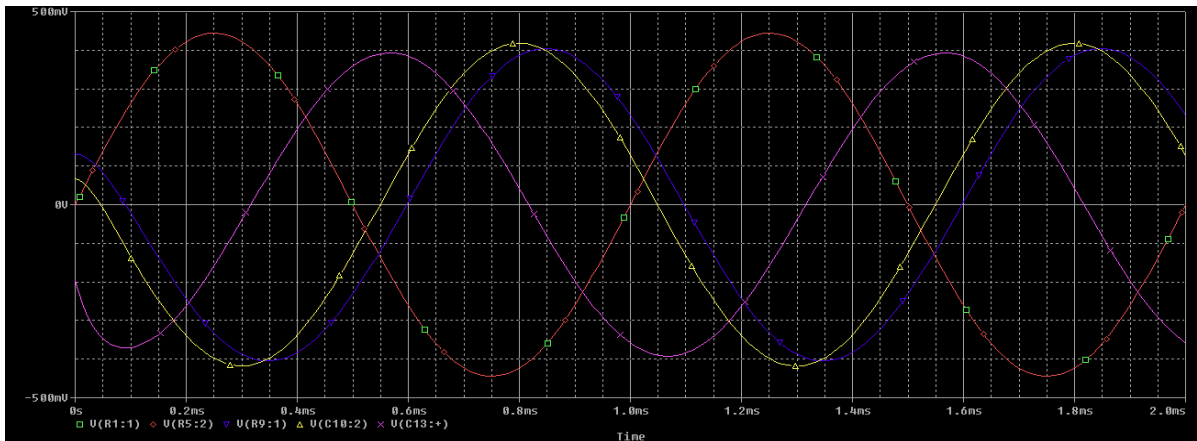


Figure 20. Résultats de simulation en Angle 0°.

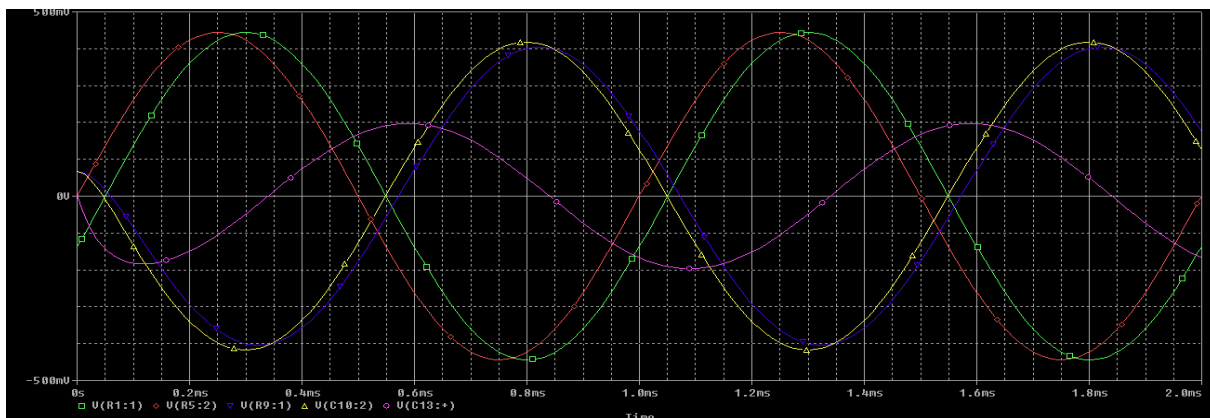


Figure 21. Résultats de simulation en Angle 90°.

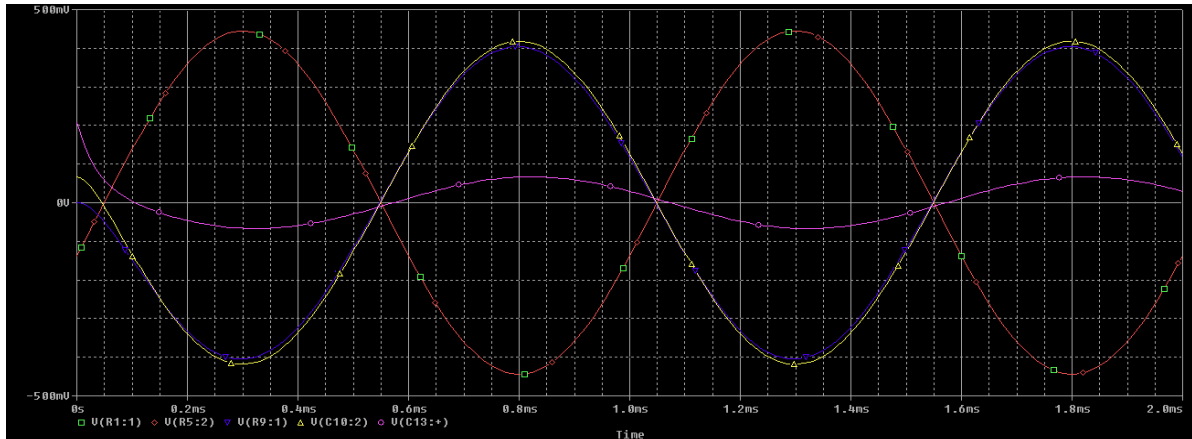


Figure 22. Résultats de simulation en Angle 180°.

✓ **Description du résultats de simulation :**

- La couleur est verte signal du la première entrée.
- La couleur est rouge signal du la deuxième entrée.
- La couleur est bleu signal du le troisième entrée .
- La couleur est jaune signal du le quatrième entrée .
- La couleur est violet signal du sortie .

L'amplitude maximale du signal de sortie par laquelle nous définissons la réponse de directivité.

✓ **Réponse directivité de forme en triangle, plus un microphone au centre avec Mic3 présente un retard Δh avec inversion et Mic4 présente aussi un retard $\Delta h/2$ avec inversion.**

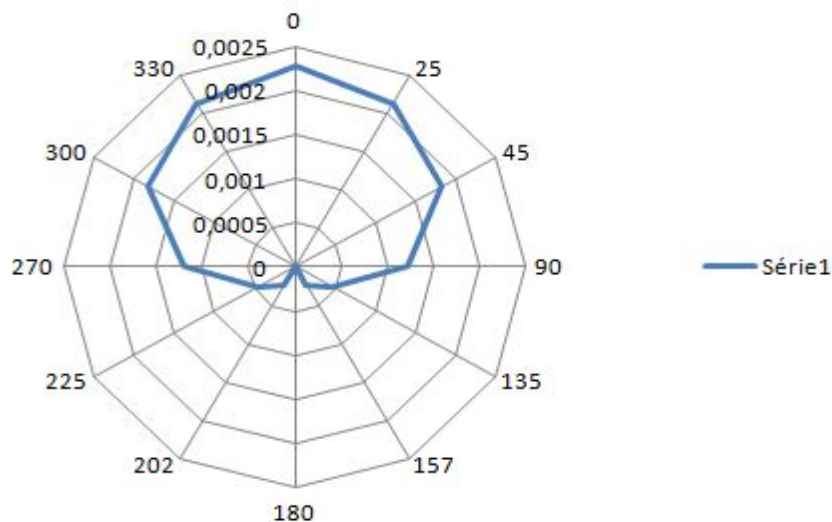


Figure 23. Diagramme de directivité de forme en triangle, plus un microphone au centre avec Mic3 présente un retard Δh avec inversion et Mic4 présente aussi un retard $\Delta h/2$ avec inversion.

Partie Pratique

Remarque:

On déduit de la simulation et de réponse directivité, array proposé comportement endfire parce que la directivité est cardioïdes.

1.3.Les testes

Les caractéristiques principales du teste :

Les valeurs du générateur de signaux la fréquence d'utilisation 1KH et l'amplitude du tensions 1V.

La méthode du teste :

La distance enter le microphone et la source sonore 20 cm, ensuite nous changeons l'angle et lisons la valeur d'amplitude maximale du signal de sortie pour chaque angle dans le soli scope pour connaitre la directivité du microphone.

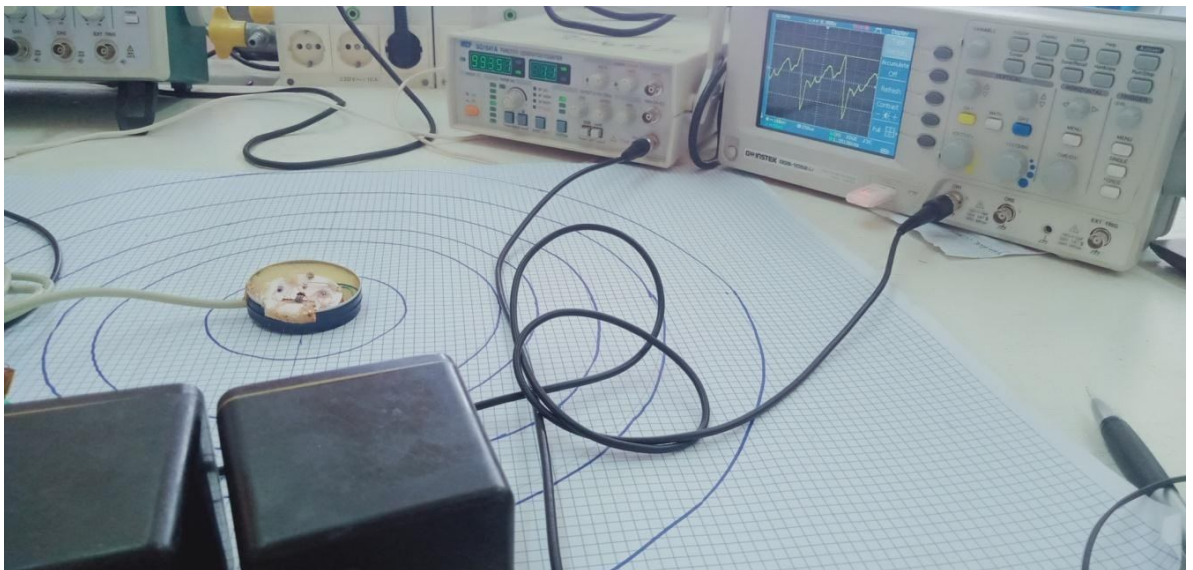


Figure 24. Teste en angle 0°.

Partie Pratique

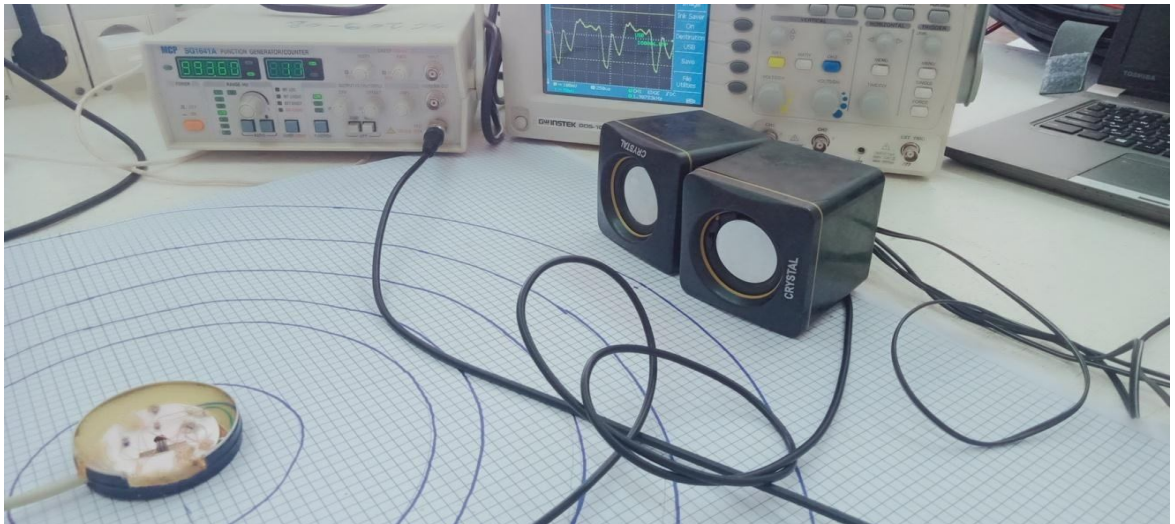


Figure 25. Teste en angle 90° .

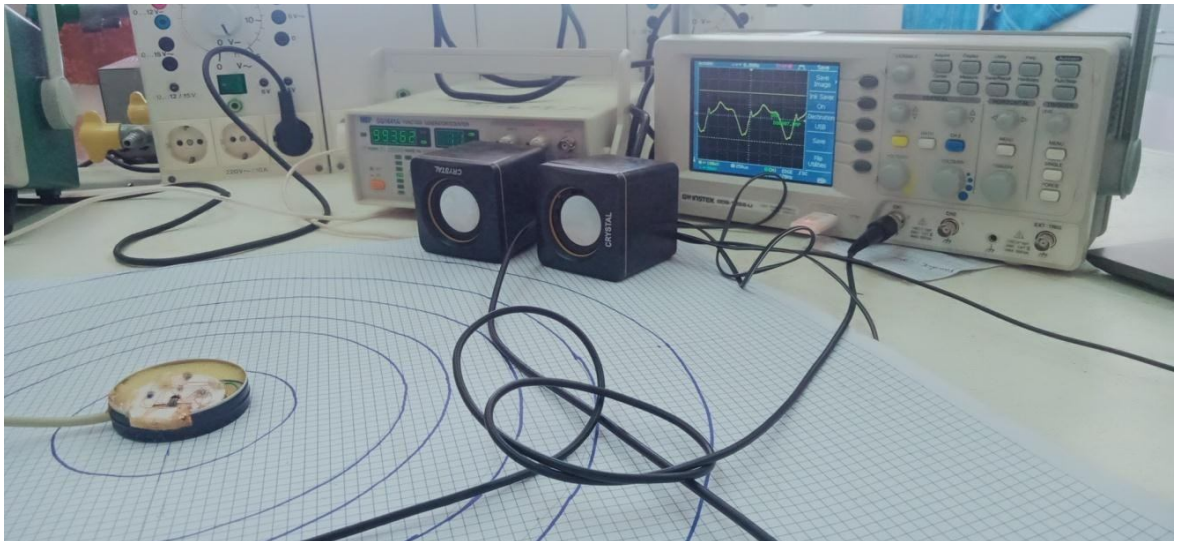


Figure 26. Teste en angle 135° .

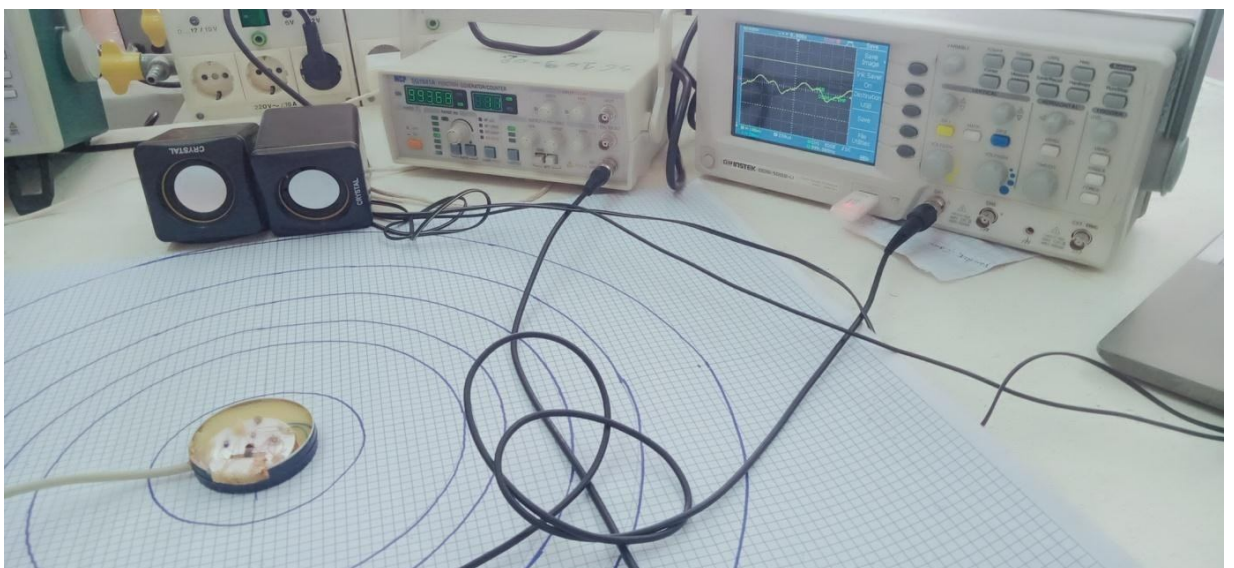


Figure 27. Teste en angle 180° .

Partie Pratique

Résultats du les testes:

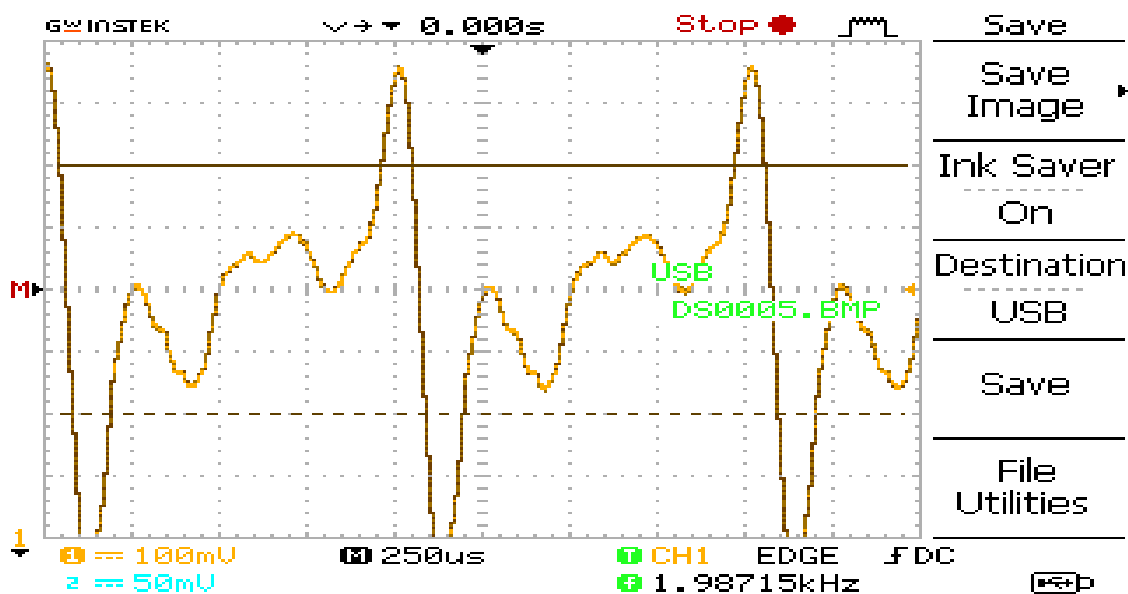


Figure 28. Résultats du teste en angle 0°.

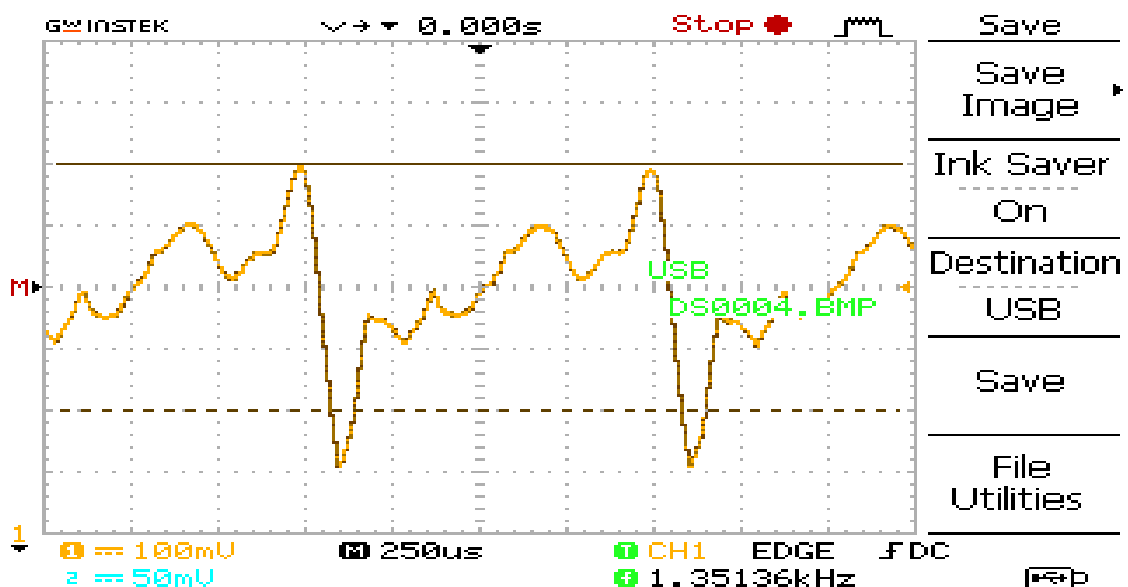


Figure 29. Résultats du teste en angle 90°.

Partie Pratique

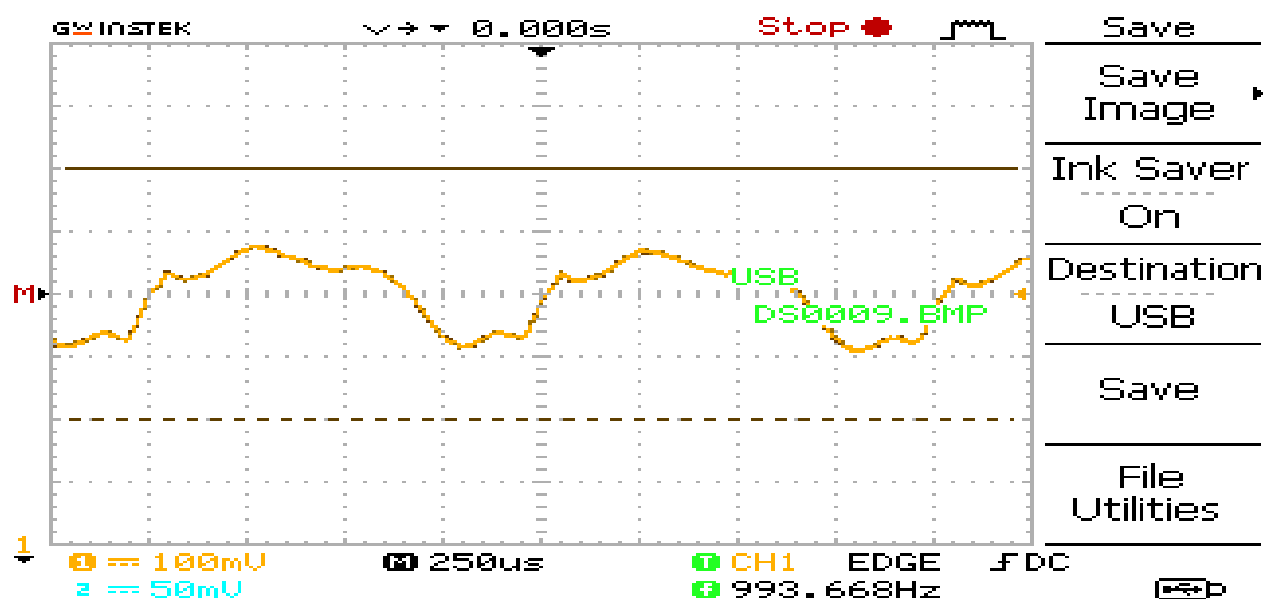


Figure 30. Résultats du teste en angle 135°.

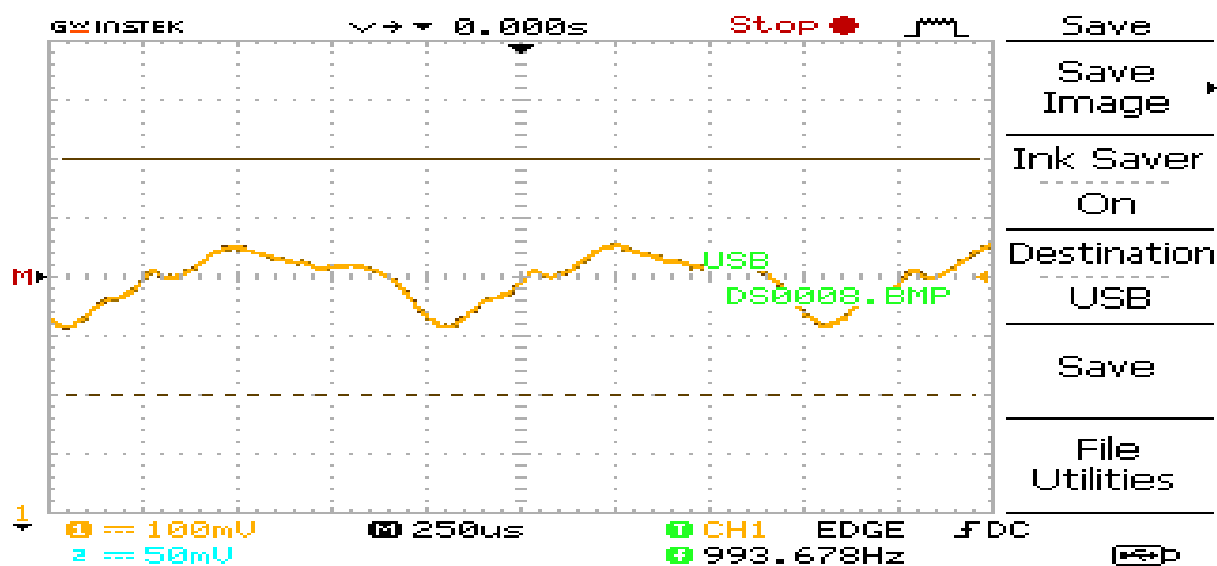


Figure 31. Résultats du teste en angle 180°.

Partie Pratique

✓ **Description du résultats du teste:**

L'amplitude maximale du signal de sortie est grande en angle en angle 0° , et diminue en les deux angles 90° , 135° jusqu'a ce qu'il soit presque inexistantes en angle 180° .

L'amplitude maximale du signal de sortie par laquelle nous définissons la réponse de directivité.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, on conclure principe de fonctionnement du microphone est selon de la directivité du capte sonore. Selon le principe proposer une nouvelle façon de créer une forme d'un prototype de microphone à directivité contrôlable et orientable de 0 à 360°, on à étudié trois forme, que nous montrons dans les points suivants:

- Le premier forme en triangle les trois microphones(Mic1, Mic2 et Mic3) sans delay et sans inverseur ils n'ont qu'un delay de distance et la deuxième forme en triangle plus un microphone au centre les quartes microphones(Mic1, Mic2, Mic3 et Mic4) sans delay et sans inverseur ils n'ont qu'un delay de distance, les résultats du les testes directivité omnidirectionnel dans les deux forme, ce type de microphone est utilisé dans des lieux ouverts tels que des festivals et des fêtes.
- Troisième forme en triangle, plus un microphone au centre avec Mic3 présente un retard Δh avec inversion et Mic4 présente aussi un retard $\Delta h/2$ avec inversion,le résultante du le teste directivité cardioïde, ce type de microphone est utilisé dans des lieux fermés tels que les salles de réunion, les conférences, la radio et la télévision.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

[1] <https://www.ens.psl.eu/agenda/memoires-de-la-guerre-d-algerie/2019-02-21t190000>

- Déconnecté du site 23 mai 2023 à 22:25.

[2] <https://zestedesavoir.com/tutoriels/pdf/1575/le-fonctionnement-dun-microphone.pdf>

- Déconnecté du site 23 mai 2023 à 22:14.

[3] [Outreach_ProjCircElectretuPhone.pdf](#)

- Déconnecté du site 20 Avril 2023 à 10:56.

[4] <https://www.arrow.com/fr-fr/research-and-events/articles/mems-vs-electret-condenser-which-microphone-technology-should-you-use>

- Déconnecté du site 23 mai 2023 à 22:14.

[5] <http://www.audio-technica.com/fr-ca/support/guide-sur-les-bases-des-microphones-quest-ce-que-la-directivite/>

- Déconnecté du site 5 mai 2023 à 14:01.

[6] <http://www.invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/Microphone-Array-Beamforming.pdf>

- Déconnecté du site 28 mai 2023 à 20:37.

[7] <https://www.digikey.com/en/articles/an-introduction-to-beamforming-with-mems-microphones>

- Déconnecté du site 8 mai 2023 à 15:40.

[8] <https://www.techno-science.net/definition/11664.html>

- Déconnecté du site 30 mai 2023 à 11:30.