



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de d'Électronique et Télécommunications



# MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

**Filière : Electronique**

**Spécialité : Instrumentation**

Par :

- Chergui Hiba
- Ghezil Safa

## THEME

**Réalisation d'un microphone cardioïde à  
compensation des retards par filtre passe-tout.**

Présenté et évalué, le **12 / 06 / 2024** , par le jury composé de :

Nom et prénom	Grade	Qualité
M. Dhaouadi GUIZA	MCA	Président
M. Mahmoud MAAMRI	Prof.	Rapporteur
M. Seddik BOUABIDA	MAB	Examineur

**Promotion : 2023/2024**

"وان ليس للإنسان الا ما سعى وان سعيه سوف يرى ثم يجزاه الجزاء الاوفى "

اهدي ثمرة سعيي...

...

الى من كلله الله بالهبة والوقار ... الى من علمني العطاء بدون انتظار

الى من احمل اسمه بكل افتخار ...

الى من تعب وبذل ورحل قبل ان يقطف... ابي الغالي رحمه الله

الى بسمة الحياة ونورها وسندها ... الى من رسمت طريقي

الى سر نجاحي وداعمتي بعد الله...

الى امي الحبيبة ...

الى من قيل " فيهم سنشد عضدك بأخيك "

الى من وفقهم في دروب الحياة سرت الى من كانوا معي على طريق النجاح...

الى الاخوة والاخوات...

الى من أشرف على هذا العمل بكل اخلاص... الأستاذ الفاضل "محمود معمرى"

الى التي بوجودها ورفقتها سعد الرب ... الى صديقتي "صفاء"

الى من عرفت كيف اجدهم وعلموني ان لا اضيعهم... الى صديقات السنين

وفي الختام ان الحمد لله حتى يبلغ الحمد منتهاه

" واخر دعواهم ان الحمد لله رب العالمين "

هبة

لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي لها ان تكون، لم يكن الحلم قريباً ولا الطريق كان محفوظاً بالتسهيلات لكني فعلتها  
اهدي فرحة تخرجي إلى من علمني كيف يمكنني ان أحقق ما أريد إلى من حفنتي دعواته إلى أبي الغالي  
وإلى من علمتني وساندتني في كل الظروف إلى من رافقتني دعواتها في جميع الخطى إلى العظيمة أمي

إلى روح جدتي الطاهرة رحمك الله واسكنك فسيح جناته يا صاحبة القلب الطيب

إلى من قيل فيهم: "سنشد عضدك بأخيك"

إلى اخوتي بدرالدين ويعقوب يا من كنتم ولازتم السند والكتف حفظكم الله ورعاكم

إلى من تذكركني بقوتي وامنت بقدراتي إلى اختي أكرم حفظك الله وادامك ضلعا ثابتا لي

إلى من ساندتني بكل حب عند ضعفي وزرعت في نفسي الثقة والاصرار ومن تسمعني دون ملل

إلى توأمي ادامك الله سنندا أميرتي

إلى من كان فضلهم عليا كبيرا إلى جميع اهلي حفظكم الله وادامكم يا خير السند

إلى من رافقتني في هذه الرحلة والنجاح إلى صديقتي هيبه ادام الله صداقتنا

إلى اصدقاء السنين واصحاب الشدائد إلى كل من مد لي يد العون يوما

إلى الاستاذ الفاضل "محمود معمرى" الذي أشرف على هذه المذكرة شكرا لمجهوداتك

وفي الختام الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، الحمد لله حبا وشكرا وامتنانا على البدء والختام

" وآخر دعواهم أن الحمد لله رب العالمين "

**Table des matières**

**Liste des figures**

**Liste des abréviations**

**الملخص**

**Résumé**

**Abstract**

**Introduction générale .....1**

**Chapitre I : Généralités sur les microphones**

I.1. Introduction :.....3

I.2. Définition d'un microphone :.....3

I.3. Les différents types de microphones :.....3

    I.3.1. Microphones dynamiques : .....3

    I.3.2. Les microphones MEMS :.....4

    I.3.3. Microphone électrostatique :.....6

    I.3.4. Microphone à électret :.....6

I.4. Représentation de la directivité :.....7

    I.4.1. Les microphones omnidirectionnels : .....7

    I.4.2. Les microphones bidirectionnels :.....7

    I.4.3. Les microphones cardioïdes :.....8

I.5. Configuration des microphones :.....8

    I.5.1. Microphone Endfire array : .....8

    I.5.2. Microphone broadside array : .....10

I.6. Conclusion : .....12

**Chapitre II: Filtrage analogique**

II.1. Introduction : .....14

II.2. Amplificateur de tension inverseur :.....14

II.3. Amplificateur sommateur : .....	15
II.4. Le filtrage analogique : .....	16
II.4.1. Filtre actif passe bas du 1 <sup>er</sup> ordre : .....	17
II.4.2. Filtre passe-tout : .....	18
II.5. La comparaison entre le filtre passe tout circuit RC et circuit CR : .....	21
II.5.1. Circuit RC : .....	21
II.5.2. Circuit CR : .....	22
II.6. Diagramme de Bode du filtre passe bas et de filtre passe-tout : .....	23
II.7. Conclusion : .....	23

### **Chapitre III: Simulation et Réalisation du projet**

III.1. Introduction : .....	24
III.2. Simulation : .....	24
III.2.1. Cas broadside : .....	24
III.2.2. Cas endfire différentiel : .....	26
III.2.3. Cas endfire différentiel 1 <sup>er</sup> ordre : .....	28
III.3. La directivité avec la variation de distance et de fréquence : .....	30
III.3.1. La directivité pour 1KHz avec variation sur la distance : .....	30
III.3.2. La directivité pour 17 mm et différentes fréquences : .....	31
III.4. Géométrie des microphones forme triangulaire : .....	31
III.4.1. Géométrie des quatre microphones : .....	31
III.4.2. Géométrie de trois microphones : .....	34
III.5. Mélangeur à trois entrées : .....	36
III.6. Préparation du circuit imprimé : .....	43
III.7. Test final : .....	44
III.8. Conclusion : .....	56
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>58</b>

### **Références Bibliographiques**

# Liste des figures :

## Chapitre I

Figure I. 1 : Microphone dynamique. ....	4
Figure I. 2: Microphone MEMS. ....	4
Figure I. 3: Sortie analogique de microphone MEMS .....	6
Figure I. 4: Microphone électrostatique. ....	6
Figure I. 5: Microphone à électret 2 broches 9*7mm. ....	7
Figure I.6: Directivité omnidirectionnels .....	7
Figure I.7: Directivité bidirectionnelle . ....	8
Figure I. 8: Directivité cardioïdes .....	8
Figure I. 9 : Microphone endfire array.....	9
Figure I. 10 : Réponse de 2 microphones endfire cardioïde. ....	9
Figure I. 11 : Variation de la distance en endfire. ....	10
Figure I. 12 : Microphone broadside array.....	10
Figure I. 13 : Réponse de 2 microphones broadside array avec distance de 75 mm . ....	11
Figure I. 14 : Trois microphones broadside array .....	11
Figure I. 15 : Réponse d'un réseau large de 3 microphones avec un espacement de 75 mm entre chaque microphone .....	12

## Chapitre II

Figure II. 1 : Circuit amplificateur inverseur . ....	14
Figure II. 2 : Circuit amplificateur sommateur . ....	15
Figure II. 3 : Montage d'un filtre actif passe bas .....	17
Figure II. 4 : Schéma d'un filtre passe bas sous ORCAD.....	18

Figure II. 5 : Résultat de simulation du filtre passe bas.....	18
Figure II. 6 : Filtre passe-tout du premier ordre [12]. .....	19
Figure II. 7 : Filtre passe tout circuit RC. ....	21
Figure II. 8 : Résultat de simulation du filtre passe-tout RC. ....	21
Figure II. 9 : Filtre passe tout circuit CR. ....	22
Figure II. 10 : Résultat de simulation du filtre passe-tout CR. ....	22
Figure II. 11 : Diagramme de Bode du filtre passe bas et du filtre passe-tout.....	23

### **Chapitre III**

Figure III. 1 : Schéma des 2 microphones broadside.....	24
Figure III. 2 : Résultat de simulation de 2 microphones broadside. ....	24
Figure III. 3 : Résultat de simulation de 2 microphones broadside angle 45°.....	25
Figure III. 4 : Résultat de simulation de 2 microphones broadside angle 90°.....	25
Figure III. 5 : Directivité de 2 microphones broadside sur Excel.....	25
Figure III. 6 : Schéma de 2 microphones endfire différentiel.....	26
Figure III. 7 : Résultat de simulation en angle 0°.....	26
Figure III. 8 : Résultat de simulation en angle 45°.....	26
Figure III. 9 : Résultat de simulation en angle 90° et 270°.....	27
Figure III. 10 : Directivité de 2 microphones endfire différentiel sur Excel. ....	27
Figure III. 11 : Schéma de 2 microphones endfire différentiel de 1er ordre.....	28
Figure III. 12 : Résultat de simulation en angle 0°.....	28
Figure III. 13 : Résultat de simulation en angle 45°.....	28
Figure III. 14 : Résultat de simulation en angle 90° et 270°.....	29
Figure III. 15 : Résultat de simulation en angle 180°.....	29
Figure III. 16 : Directivité cardioïde pour 1KHz. ....	30
Figure III. 17 : Directivité cardioïde pour 1KHz de 17mm ,25mm et 30mm.....	30
Figure III. 18 : Directivité cardioïde pour différents fréquences. ....	31

Figure III. 19 : Géométrie des quatre microphones. ....	32
Figure III. 20 : Réponse cardioïde géométrie 4 microphones sur EXCEL.....	33
Figure III. 21 : Géométrie de trois microphones.....	34
Figure III. 22 : Réponse cardioïde géométrie 3 microphones sur EXCEL.....	35
Figure III. 23 Schéma complet descriptif du mélangeur à trois microphones. ....	36
Figure III. 24 : Schéma de simulation de trois microphones. ....	36
Figure III. 25 : Structure de TL082.....	37
Figure III. 26 : Résultat de simulation en angle 0°. ....	38
Figure III. 27 : Résultat de simulation en angles 90° et 270°. ....	38
Figure III. 28 : Résultat de simulation en angle 180°. ....	39
Figure III. 29 : Résultat de simulation en angle 0°. ....	39
Figure III. 30 : Résultat de simulation en angle 90° et 270°. ....	40
Figure III. 31 : Résultat de simulation en angle 180°. ....	40
Figure III. 32 : Réalisation de circuit mélangeur sur la plaque d'essai.....	41
Figure III. 33 : Signal d'entrée et sortie du filtre passe tout sur l'oscilloscope. ....	41
Figure III. 34 : les signaux totaux inverses. ....	42
Figure III. 35 : Sortie finale de circuit mélangeur.....	42
Figure III. 36 : Schéma de circuit mélangeur. ....	43
Figure III. 37 : Schéma de placement des composants du mélangeur. ....	43
Figure III. 38 : Schéma des dispositions straps.....	43
Figure III. 39 : Dispositif de mesure de la réponse de l'array de 3 microphones.....	44
Figure III. 40 : Résultat de test avec une source sonore 200 Hz à un angle 0°.....	45
Figure III. 41 : Résultat de test avec une source sonore 200 Hz à un angle 45°.....	45
Figure III. 42 : Résultat de test avec une source sonore 200 Hz à un angle 90°.....	46
Figure III. 43 : Résultat de test avec une source sonore 200 Hz à un angle 135°.....	46
Figure III. 44 : Résultat de test avec une source sonore 200 Hz à un angle 180°.....	46



Figure III. 45 : Résultat de test avec une source sonore 500 Hz à un angle 0°.....	47
Figure III. 46 : Résultat de test avec une source sonore 500 Hz à un angle 45°.....	47
Figure III. 47 : Résultat de test avec une source sonore 500 Hz à un angle 90°.....	47
Figure III. 48 : Résultat de test avec une source sonore 500 Hz à un angle 135°.....	48
Figure III. 49 : Résultat de test avec une source sonore 500 Hz à un angle 180°.....	48
Figure III. 50 : Résultat de test avec une source sonore 1KHz à un angle 0°.....	48
Figure III. 51 : Résultat de test avec une source sonore 1KHz à un angle 45°.....	49
Figure III. 52 : Résultat de test avec une source sonore 1KHz à un angle 90°.....	49
Figure III. 53 : Résultat de test avec une source sonore 1KHz à un angle 135°.....	49
Figure III. 54 : Résultat de test avec une source sonore 1KHz à un angle 180°.....	50
Figure III. 55 : Résultat de test avec une source sonore 2KHz à un angle 0°.....	50
Figure III. 56 : Résultat de test avec une source sonore 2KHz à un angle 0°.....	50
Figure III. 57 : Résultat de test avec une source sonore 2KHz à un angle 90°.....	51
Figure III. 58 : Résultat de test avec une source sonore 2KHz à un angle 135°.....	51
Figure III. 59 : Résultat de test avec une source sonore 2KHz à un angle 180°.....	51
Figure III. 60 : Résultat de test avec une source sonore 3KHz à un angle 0°.....	52
Figure III. 61 : Résultat de test avec une source sonore 3KHz à un angle 45°.....	52
Figure III. 62 : Résultat de test avec une source sonore 3KHz à un angle 90°.....	52
Figure III. 63 : Résultat de test avec une source sonore 3KHz à un angle 135°.....	53
Figure III. 64 : Résultat de test avec une source sonore 3KHz à un angle 180°.....	53
Figure III. 65 : Résultat de test avec une source sonore 5KHz à un angle 0°.....	53
Figure III. 66 : Résultat de test avec une source sonore 5KHz à un angle 45°.....	54
Figure III. 67 : Résultat de test avec une source sonore 5KHz à un angle 90°.....	54
Figure III. 68 : Résultat de test avec une source sonore 5KHz à un angle 135°.....	54
Figure III. 69 : Résultat de test avec une source sonore 5KHz à un angle 180°.....	55
Figure III. 70 : Réponse cardioïde (mv) en fonction de variation des fréquences.....	55

## Liste des abréviations:

**MEMS:** Micro-Electro-Mechanical Systems

**IC:** Circuits Intégrés

**ESD:** Electro Static Discharge

**CC :** Courant Continu

**$\Delta T$  :** Le retard

**$\Phi$  :** Le décalage de phase

**$\Delta\Phi$  :** Le déphasage

**$\alpha$  :** L'angle de la source sonore

**D :** la distance entre les microphones de la base de triangle

**C :** vitesse du son

**$\lambda$  :** Longueur d'onde

## الملخص:

### العنوان: تحقيق ميكروفون قلبي مع تعويض التأخير بواسطة مرشح التمرير الكلي

الميكروفونات هي أجهزة أساسية في تحويل الموجات الصوتية إلى إشارات كهربائية، مما يتيح التضخيم والتسجيل والنقل للصوت والأصوات الأخرى في مجموعة متنوعة من التطبيقات.

هذا العمل يقوم على وضع 3 ميكروفونات من نوع أنظمة ميكرو إلكترو ميكانيكية في تكوين هندسي ثلاثي الأضلاع (الميكروفون الأول والميكروفون الثاني يتم وضعهما على قاعدة المثلث بمسافة محددة بينهما، والميكروفون الثالث يوضع عند قمة المثلث)، وجميع الميكروفونات الثلاثة ذات اتجاهية شاملة.

يتم استخدام هذا التكوين مع دائرة خلط لتضخيم وتطبيق تأثيرات على الميكروفونات المختلفة. يقوم المخلط بضبط مستويات الإشارات الصادرة من الميكروفونات بضرب قيمة إشارة الميكروفون الواقع في الأعلى، ويستخدم أيضًا لعكس الإشارة وتوفير تأخير متغير في الطور بواسطة مرشح التمرير الكلي يتوافق مع المسافة بين الميكروفونين في القاعدة والميكروفون في القمة.

النتيجة من هذا التكوين مع المخلط والتأثيرات التي يضيفها إلى إشارات الميكروفونات تنتج ميكروفونًا افتراضيًا يتميز بتوجيه قلبي. هذه النوعية من التوجيه تتمتع بقوة وتستخدم على نطاق واسع في مجال الصوت وفي العديد من التطبيقات، وتكون صعبة التحقيق باستخدام الميكروفونات التقليدية.

### الكلمات المفتاحية :

MEMS، ميكروفون قلبي، مرشح التمرير الكلي، استجابة قلبية، استجابة شاملة، دائرة خلط، التأخير

# Résumé

## **Titre : Réalisation d'un microphone cardioïde à compensation des retards par filtre passe-tout**

Les microphones sont des dispositifs fondamentaux dans la conversion des ondes sonores en signaux électriques, permettant ainsi l'amplification, l'enregistrement et la transmission de la voix et d'autres sons dans diverses applications.

Ce travail basé sur placer 3 microphones MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) de la géométrie forme triangulaire (Mic1 et Mic2 placer sur la base triangle sépare avec une certaine distance et le Mic3 a la hauteur du triangle), tandis que les 3 microphones sont omnidirectionnels.

La combinaison ainsi construite est utilisée avec un circuit de mixage (mix) pour amplifier et mettre en œuvre des effets sur différents microphones. Le mélangeur est utilisé pour ajuster les niveaux des signaux provenant des microphones en multipliant la valeur du signal du microphone en haut, et est également utilisé pour réfléchir son signal et fournir un retard variable en phase par le filtre passe-tout correspondant à la distance entre les deux Microphones à la base et le microphone en haut.

Le résultat de cette combinaison avec le mixeur et les effets qu'il ajoute aux signaux du microphone donne un microphone virtuel dont la directivité est cardioïde. Cette forme de directivité est robuste, utilisée dans le domaine audio et dans de nombreuses applications, est difficile à réaliser avec des microphones ordinaires.

### **Les mots clés :**

MEMS, Microphone cardioïde, Filtre passe-tout, Directivité cardioïde, Directivité omnidirectionnelles, Mélangeur, Retard.

# **Abstract**

## **Title: Realization of a cardioid microphone with delay compensation by All-pass filter**

Microphones are fundamental devices in converting sound waves into electrical signals, enabling amplification, recording, and transmission of voice and other sounds across various applications.

This project involves placing 3 MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) microphones in a triangular geometry (Mic1 and Mic2 positioned at the triangle base separated by a certain distance, and Mic3 at the triangle apex), with all 3 microphones being omnidirectional. The constructed combination is used with a mixing circuit (mix) to amplify and implement effects on different microphones.

The mixer adjusts signal levels from the microphones by multiplying the signal value of the microphone at the top, and is also used to reflect its signal and provide a variable phase delay by all-passe filtre corresponding to the distance between the two microphones at the base and the microphone at the top.

The result of this combination with the mixer and its added effects on microphone signals yields a virtual microphone with cardioid directivity. This directivity pattern is robust, widely used in audio engineering and numerous applications, and challenging to achieve with ordinary microphones.

### **Keywords:**

MEMS, Cardioid Microphone, All-Pass Filter, Cardioid Polar Pattern, Omnidirectional Polar Pattern, Mixer, Delay.



# **Partie théorique**

## **Introduction générale :**

Les microphones sont des dispositifs fondamentaux dans la conversion des ondes sonores en signaux électriques, permettant ainsi l'amplification, l'enregistrement et la transmission de la voix et d'autres sons dans diverses applications. Les microphones sont classés selon leurs types ainsi que leurs directivités notamment la directivité omnidirectionnelle, bidirectionnelle et la directivité cardioïde.

Les microphones cardioïdes sont largement utilisés pour leur capacité à capter les sons provenant de l'avant tout en rejetant les bruits de l'arrière. Cependant, la réalisation d'une directivité cardioïde précise présente plusieurs défis techniques comme l'optimisation de la Directivité, réduction du Bruit Ambiant, les configurations traditionnelles comme les réseaux endfire et broadside et les tailles des Microphones Traditionnels.

Le but de notre projet est d'obtenir une directivité cardioïde précise en disposant trois microphones MEMS en forme de triangle. Cela vise à améliorer la capacité de capture précisément les sons provenant de sources proches et à réduire l'impact du bruit ambiant.

Notre travail est structuré en deux parties, la partie théorique se compose de trois chapitres et une partie pratique.

Dans la partie théorique nous avons commencé par le premier chapitre, nous rappelons une définition d'un microphone, les différents types de microphones, y compris les microphones dynamiques, électrostatiques, MEMS, et à électret, Parmi ces types, nous parlons en détail sur les microphones MEMS, puis de la représentation de la directivité.

Ensuite, Dans le deuxième chapitre, nous examinerons les configurations de microphones, en particulier les réseaux de microphones (endfire array et broadside array), puis nous parlons comment faire un ensemble Broadside avec plus d'éléments.

Enfin, Dans le troisième chapitre, nous traiterons des techniques de filtrage analogique appliquées aux microphones puis en donnant un aperçu de l'amplificateur inverseur et le sommateur, puis nous parlons de filtre passe bas, filtre passe-tout et nous faisons une comparaison entre eux à partir de diagramme de Bode.

Dans la partie pratique, tout d'abord, nous avons extrait la réponse aux angles principaux dans le logiciel OrCAD PSpice pour les cas suivants (broadside, endfire différentiel et endfire différentiel du 1<sup>er</sup> ordre) ainsi que dans le logiciel Excel.



Ensuite, nous avons proposé de placer trois microphones MEMS en forme triangulaire, deux microphones sont placés à la base et le troisième au sommet. Le signal de ce dernier est inversé et retardé par le filtre passe-tout. Le retard correspond relativement à la distance entre les microphones. Pour obtenir une réponse cardioïde en utilisant cette géométrie, le microphone du sommet doit avoir une amplitude double de celles de la base.

**Chapitre I :**  
**Généralités sur les**  
**microphones**

## **I.1. Introduction :**

Un microphone est un appareil qui convertit les ondes sonores en signaux électriques. Il est utilisé pour amplifier la voix ou les sons dans diverses applications. Il existe différents types de microphones (les microphones dynamiques, les microphones électrostatiques, les microphones MEMS et les microphones à électrets) et sont classés selon leur directivité, on distingue plusieurs types : les microphones omnidirectionnels, les microphones cardioïdes et les microphones bidirectionnels.

En plus des microphones individuels, un réseau de microphones en ligne est un dispositif qui utilise plusieurs microphones positionnés côte à côte pour améliorer la directivité et obtenir une capture sonore plus ciblée. Cette technique, appelée "Beamforming array", consiste à espacer stratégiquement les microphones pour amplifier le signal provenant d'une direction spécifique. Il existe deux types principaux de réseaux de microphones : les microphones endfire array et les microphones broadside array.

Ces deux approches permettent de capturer le son de manière plus efficace et ciblée, en fonction des besoins spécifiques de l'application.

## **I.2. Définition d'un microphone :**

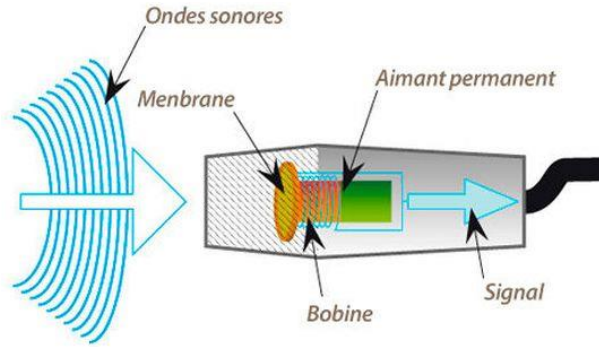
Un microphone est un dispositif qui capte et transforme l'onde sonore en signal électrique. Le son capté par le microphone est amplifié et transmis aux haut-parleurs ou au casque d'écoute, sortant du transducteur sans modifications importantes. [1]

## **I.3. Les différents types de microphones :**

Il existe plusieurs types de microphones différents disponibles sur le marché :

### **I.3.1. Microphones dynamiques :**

Les microphones dynamiques fonctionnent sur le principe de l'induction électromagnétique. Les ondes sonores déplacent un diaphragme, qui entraîne une bobine mobile dans un champ magnétique, générant un signal électrique. Ces microphones sont robustes, moins coûteux à fabriquer, et idéaux pour une utilisation sur scène. [2]



**Figure I. 1 :** Microphone dynamique. [2]

### **I.3.2. Les microphones MEMS :**

Les microphones MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) en silicium sont présents dans tout, des téléphones portables aux appareils auditifs, en passant par les haut-parleurs intelligents, les ordinateurs et les véhicules. Apprenez les bases de leur fonctionnement, de leur utilisation et de ce qui est disponible.



**Figure I. 2:** Microphone MEMS.

#### **I.3.2.1. La technologie des microphones MEMS :**

La majorité des microphones MEMS utilisent la technologie des capteurs capacitifs. Une fine membrane plaquée dans la structure en silicium vibre avec le son, créant une capacité variable. La deuxième plaque du condensateur se trouve sur une surface fixe dans le silicium. Une pompe de charge dans le circuit intégré crée une tension continue élevée pour le condensateur. Les circuits IC convertissent les changements de capacité en un signal électrique représentatif du signal audio sur la membrane MEMS.

Plus récemment, certains fabricants ont créé des microphones utilisant des éléments de détection piézoélectriques. Le mouvement de l'élément piézoélectrique produit la tension

audio. Ces sociétés revendiquent certains avantages par rapport au capacitif, mais pour la plupart des applications, la technologie que vous utilisez n'a pas d'importance. [3]

### **I.3.2.2. Les dimensions d'un microphone MEMS :**

Les microphones MEMS sont disponibles en plusieurs tailles. Voici quelques exemples de dimensions pour différents types de microphones MEMS :

- Les appareils à port inférieur sont conçus dans un boîtier métallique de **3,5 x 2,65 x 0,98 mm** pour améliorer la robustesse et la fiabilité du produit.
- Les appareils à port supérieur sont conçus dans un boîtier en plastique de **3 x 4 x 1 mm** avec un anneau de masse dédié autour du trou de port pour la robustesse de l'ESD [4].

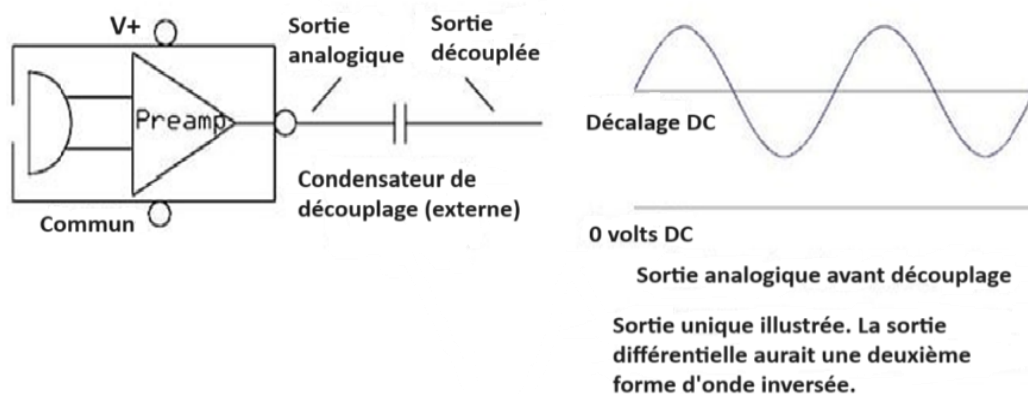
### **I.3.2.3. Fonctionnement du microphone MEMS :**

Tous les microphones commencent par un signal audio analogique et utilisent un préamplificateur pour augmenter l'audio à un niveau utilisable, mais toujours faible. Beaucoup utilisent la technologie des capteurs capacitifs, qui sera abordée dans la section suivante. Ils comprennent des circuits supplémentaires pour convertir la variation de capacité en signal électrique.

### **I.3.2.4. Sortie analogique du microphone MEMS :**

Les microphones analogiques envoient le signal amplifié directement à la sortie. Il existe deux styles de sortie : asymétrique et différentielle. Les systèmes différentiels ont deux sorties déphasées de 180 degrés l'une par rapport à l'autre. Les microphones analogiques ont trois ou quatre broches : alimentation, commune (masse) et une ou deux sorties, selon que la sortie est asymétrique ou différentielle.

L'alimentation est toujours fournie par une seule alimentation positive. Cela crée un décalage CC sur la sortie, qui doit être découplé par un condensateur, comme le montre la **figure I.3.**

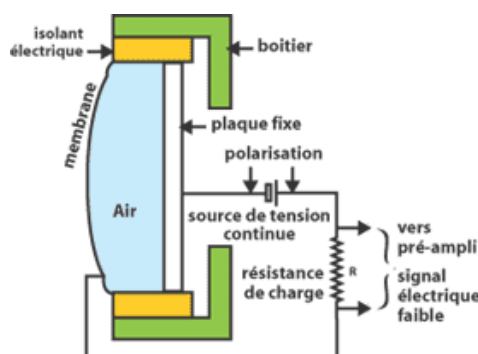


**Figure I. 3:** Sortie analogique de microphone MEMS [3].

Les tensions d'alimentation sont généralement comprises entre 1,8 et 3,5 V, avec des décalages CC typiques de 0,8 à 1,5 V.

### I.3.3. Microphone électrostatique :

Le microphone électrostatique utilise quant à lui les propriétés de charge d'un condensateur. Ce dernier est constitué d'une fine membrane (électrode) en plastique, revêtue d'une couche métallique et d'une pièce de métal (contre-électrode) fixe. Les variations de l'air vont faire vibrer la membrane qui fera varier la capacité du condensateur, pour finir en tension électrique. Ce système électronique requiert une alimentation de 48V en tension continue.



**Figure I. 4:** Microphone électrostatique [5].

### I.3.4. Microphone à électret :

Le microphone à électret fonctionne de la même manière que le micro électrostatique, peut être alimenté par une pile de 1,5V à 9V, mais appliquée de manière permanente lors de sa fabrication. L'inconvénient est que la polarisation de la membrane n'est pas réellement

définitive et aura tendance à s'estomper avec le temps. Certains modèles ont aussi tendance à avoir un bruit de fond qui peut être gênant dans certaines applications [5].



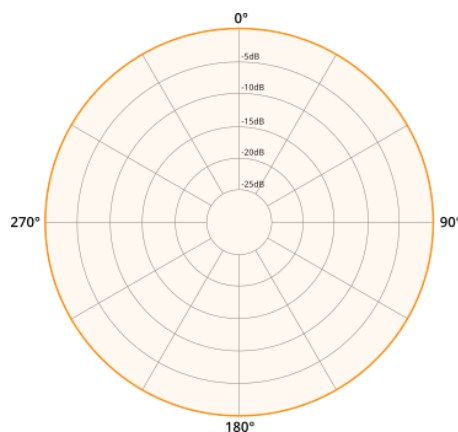
**Figure I. 5:** Microphone à électret 2 broches 9\*7mm.

#### **I.4. Représentation de la directivité :**

La directivité est la sensibilité d'un microphone au son par rapport à la direction ou à l'angle d'où provient le son. Il existe plusieurs types de directivité :

##### **I.4.1. Les microphones omnidirectionnels :**

Les microphones omnidirectionnels fonctionnent comme des capteurs de pression. Ils se caractérisent par une sensibilité égale dans toutes les directions, quelle que soit la position de la source sonore enregistrée.

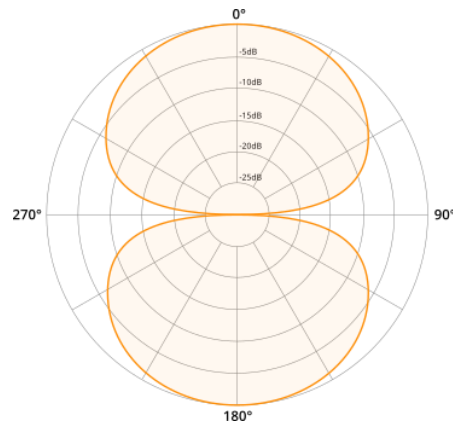


**Figure I.6:** Directivité omnidirectionnels [6].

##### **I.4.2. Les microphones bidirectionnels :**

Les micros bidirectionnelles fonctionnent comme des capteurs de gradient de pression. Ils sont sensibles aux sources sonores situées devant et derrière le micro, tandis que les sons provenant des côtés se retrouvent dans un angle mort. C'est ce que l'on constate sur le diagramme polaire ci-contre.

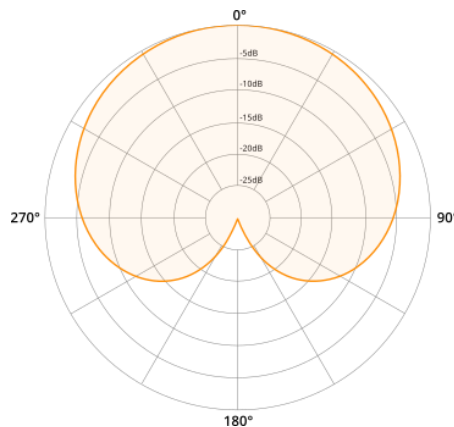
A noter que généralement, le diagramme polaire correspondant est identique quelles que soient les fréquences, ce qui n'est pas le cas de tous les microphones.



**Figure I.7:** Directivité bidirectionnelle [6].

### I.4.3. Les microphones cardioïdes :

Les microphones cardioïdes possèdent un diagramme polaire en forme de cœur. Ceci s'explique par le fait qu'ils sont uniquement sensibles aux sons provenant de l'avant, ce qui simplifie grandement leur utilisation. On peut facilement les isoler de sources sonores qu'on ne souhaiterait pas enregistrer. [6]



**Figure I. 8:** Directivité cardioïdes [6].

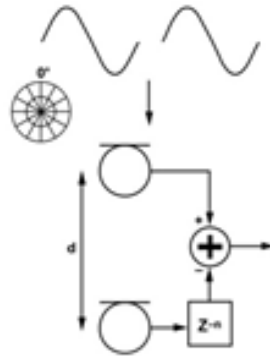
## I.5. Configuration des microphones :

### I.5.1. Microphone Endfire array :

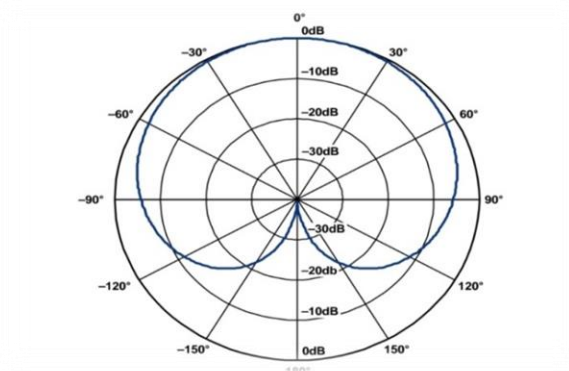
Un réseau Endfire se compose de plusieurs microphones disposés conformément à la direction souhaitée de propagation du son. Lorsque le microphone avant du réseau est additionné à un signal inversé et retardé provenant des microphones arrière, cette configuration est appelée réseau différentiel. La **figure I.9** montre un réseau différentiel à 2



microphones avec distance ( $d$ ) entre les microphones et le microphone arrière retardée des échantillons avant le bloc de soustraction (ou d'inversion et de somme). Cela peut être utilisé pour créer des directivités cardioïdes, dans lesquelles le son provenant de l'arrière de la matrice est considérablement atténué.



**Figure I. 9 :** Microphone endfire array.



**Figure I. 10 :** Réponse de 2 microphones endfire cardioïde [7].

Lorsque la distance entre les microphones et le délai sont correctement sélectionnés, pour les fréquences inférieures à la fréquence de repliement, la réponse d'un formateur de faisceau à retard et somme est un motif cardioïde ou en forme de cœur. Une directivité cardioïde n'a aucune atténuation du signal à l'avant du réseau et annule théoriquement complètement le son incident au réseau à 180°. Les signaux sur les côtés d'un formateur de faisceau à retard et somme de premier ordre (2 microphones) sont atténués de 6 dB.

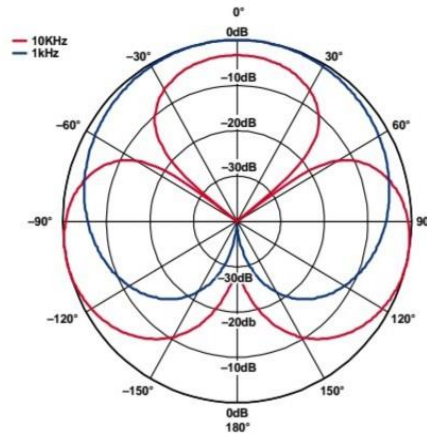


Figure I. 11 : Variation de la distance en endfire [7].

### I.5.2. Microphone broadside array :

Un réseau de microphones latéraux est un réseau dans lequel une ligne de microphones est disposée perpendiculairement à la direction préférée des ondes sonores (voir Figure 4). Dans cette figure,  $d$  la distance entre les deux microphones. Le son provenant de la largeur du réseau est ce qui est habituellement désiré d'être ramassé.

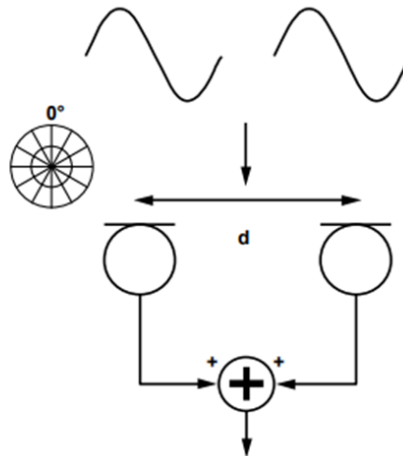
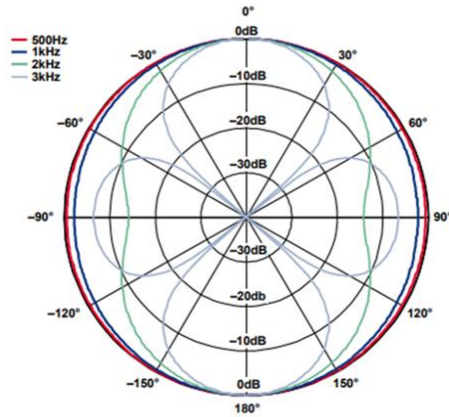


Figure I. 12 : Microphone broadside array [7].

Les baies Broadside peuvent être implémentées avec un traitement de base ; les microphones du réseau sont simplement additionnés. L'inconvénient de ce type de réseau est qu'il ne peut atténuer que le son provenant du côté du réseau.

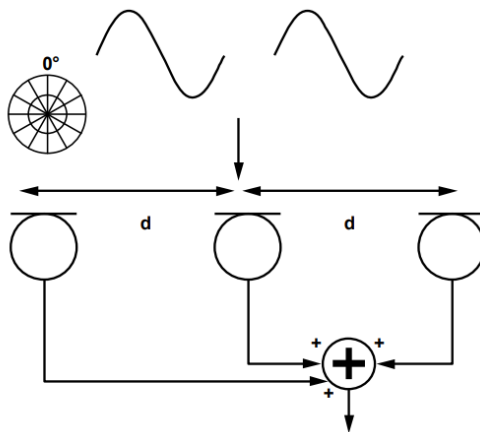
Dans un broadside de 2 microphones, il y a deux minima dans la réponse à  $90^\circ$  et  $270^\circ$ . L'atténuation du signal à ces points est très dépendante de la fréquence.



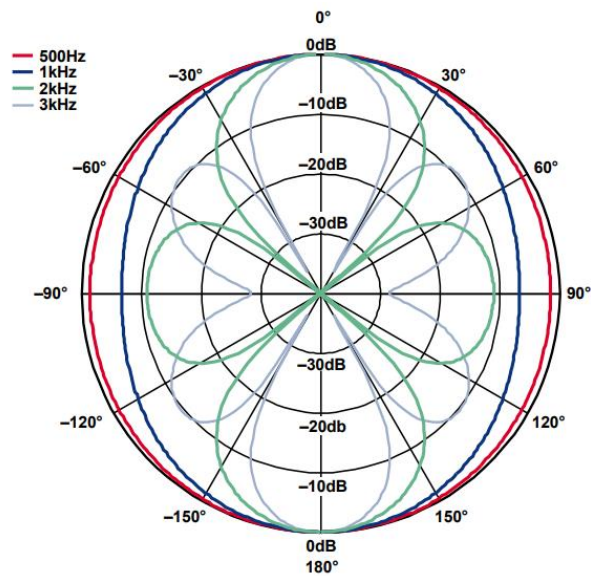
**Figure I. 13 :** Réponse de 2 microphones broadside array avec distance de 75 mm [7].

**Ensemble Broadside avec plus d'éléments :**

Des réseaux larges comportant plus de deux éléments peuvent également être construits en ajoutant simplement des microphones supplémentaires en ligne avec les deux originaux, comme le montre la figure 6 et la figure 7 montre la réponse d'un broadside de 3 microphones avec une distance de 75 mm entre les éléments. Dans cette configuration, le son provenant des côtés est atténué de 6 dB, alors qu'il n'était atténué que de 3 dB dans le système à 2 microphones broadside. [7]



**Figure I. 14 :** Trois microphones broadside array [7].



**Figure I. 15 :** Réponse d'un réseau large de 3 microphones avec un espacement de 75 mm entre chaque microphone [7].

## I.6. Conclusion :

Dans ce travail, nous avons abordé les microphones en général, en donnant une définition simple et en mentionnant les types les plus importants, notamment les microphones MEMS qui sont une partie essentielle de notre projet en raison de leur petite taille. Nous avons également discuté de la directivité des microphones

Ensuite, nous avons présenté les réseaux de microphones endfire et broadside, soulignant leur rôle dans l'amélioration de la capture sonore par formation de faisceau. Les réseaux endfire offrent une directivité unidirectionnelle pour capter les sons ciblés et atténuer les bruits arrière, tandis que les réseaux broadside capturent uniformément les sons de l'avant et de l'arrière, avec une meilleure atténuation latérale en ajoutant des microphones.

Ces configurations optimisent les performances des systèmes audio pour diverses applications, améliorant ainsi la qualité et la précision de la capture sonore.

# **Chapitre II :**

## **Le filtrage analogique**

## II.1. Introduction :

Le filtrage permet de séparer ou modifier les composantes fréquentielles d'un signal, nous examinerons également des configurations de circuits utilisant des amplificateurs opérationnels, tels que (amplificateur inverseur, amplificateur sommateur).

Les filtres actifs, comme le filtre passe-bas du premier ordre, jouent un rôle crucial en définissant la fréquence de coupure et en modifiant le signal selon des besoins spécifiques. Enfin, le filtre passe-tout sera étudié pour ses capacités à gérer les déphasages sans affecter l'amplitude du signal.

Ce chapitre fournira une compréhension claire des bases du filtrage et des applications pratiques des amplificateurs opérationnels dans ces circuits.

## II.2. Amplificateur de tension inverseur :

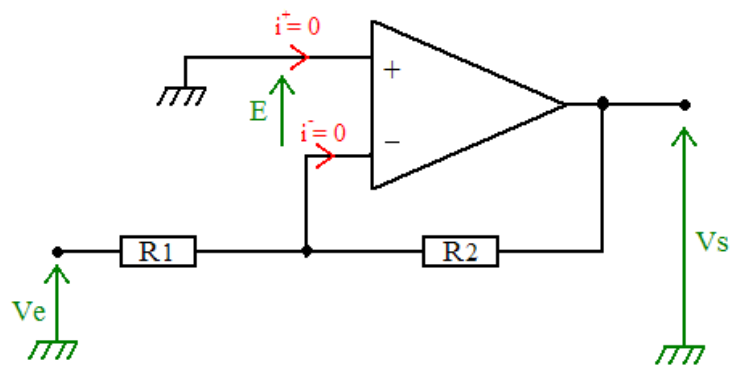


Figure II. 1 : Circuit amplificateur inverseur [8].

$V_s$  Peut-être soit :

- Amplifiée : lorsque  $R_1 > R_2$
- Atténuée : lorsque  $R_1 < R_2$

**Calcul de  $V_s$  en fonction de  $V_e$  :**

Puisque nous sommes en fonctionnement linéaire de cet AOP, et qu'on le considère comme parfait, alors on peut dire que :  $E = 0V$

$$V_+ = V_- = 0$$

Calculons maintenant  $V_+$  et  $V_-$  :

- $V_+ = 0V$

- Pour calculer  $V_-$  de cet amplificateur inverseur, il faut savoir utiliser le théorème de Millman :

$$V_- = \frac{(V_e * R_2 + V_s * R_1)}{(R_1 + R_2)}$$

Puisque :  $V_+ = V_-$

$$\frac{(V_e * R_2 + V_s * R_1)}{(R_1 + R_2)} = 0$$

$$V_e * R_2 + V_s * R_1 = 0$$

$$V_s * R_1 = -V_e * R_2$$

La formule de l'amplificateur inverseur est celle-ci :

$$V_s = V_e * \left(-\frac{R_2}{R_1}\right)$$

### II.3. Amplificateur sommateur :

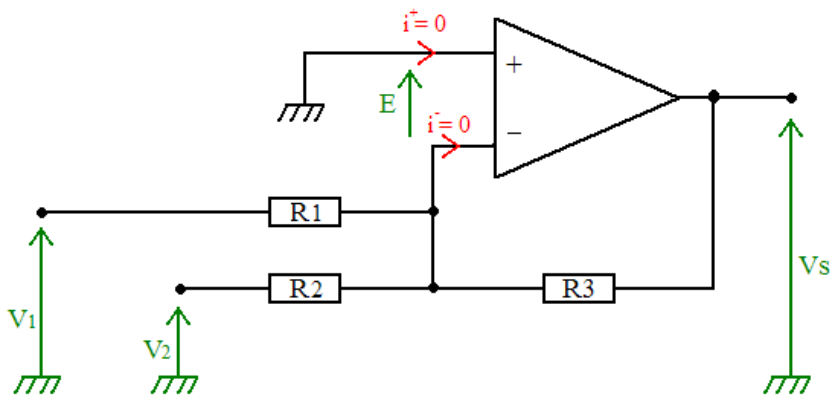


Figure II. 2 : Circuit amplificateur sommateur [8].

La formule :

$$V_s = V_1 * \left(-\frac{R_3}{R_1}\right) - V_2 * \left(\frac{R_3}{R_2}\right)$$

$$R_1 = R_2 = R_3 \quad \text{Alors} \quad V_s = -(V_1 + V_2)$$

Calculer  $V_s$  en fonction de  $V_e$  :

L'AOP fonctionne en linéaire et est considéré comme parfait, ainsi  $E = 0V$ .

Ainsi

$$V_+ = V_-$$

$V_+ = 0V$ , alors  $V_-$  est virtuellement à la masse (puisque :  $V_+ = V_- = 0V$ ).

Pour calculer  $V_-$ , il faut bien savoir utiliser le théorème de Millman :

$$V_- = \frac{\left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_S}{R_3}\right)}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right)} = 0$$

$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_S}{R_3} = 0$$

$$\frac{V_S}{R_3} = -\frac{V_1}{R_1} - \frac{V_2}{R_2}$$

Voici enfin la formule de l'amplificateur sommateur :

$$V_S = -R_3 * \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}\right)$$

$$V_S = -V_1 * \frac{R_3}{R_1} - V_2 * \frac{R_3}{R_2}$$

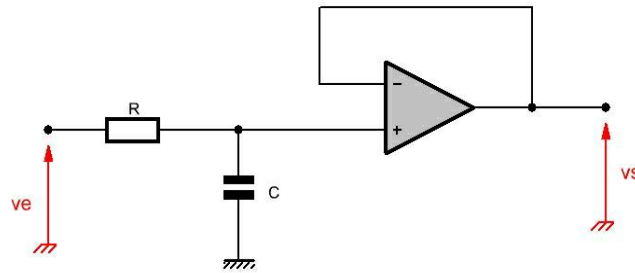
## II.4. Le filtrage analogique :

Le filtrage analogique est l'opération qui consiste à séparer les composantes fréquentielles d'un signal selon leur fréquence. Suivant la valeur des fréquences transmises, on distingue essentiellement : [9]

- **Passe-bas** : Laisse passer les basses fréquences, atténue les hautes.
- **Passe-haut** : Laisse passer les hautes fréquences, atténue les basses.
- **Passe-bande** : Laisse passer une bande spécifique de fréquences.
- **Coupe-bande** : Atténue une bande spécifique de fréquences.
- **Passe-tout** : Modifie le déphasage sans affecter l'amplitude.



### II.4.1. Filtre actif passe bas du 1 er ordre :



**Figure II. 3 :** Montage d'un filtre actif passe bas [10].

La fonction de transfert de ce filtre :

$$Z_c = \frac{1}{jC\omega} \quad \text{Et} \quad Z_r = R$$

$$V_s = V_e \frac{Z_c}{Z_r + Z_c} = V_e \frac{1/jC\omega}{R + 1/jC\omega} = V_e \frac{1}{1 + jRC\omega}$$

$$G(j\omega) = \frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 + \omega/( \omega_0 )} \quad \text{avec} \quad \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

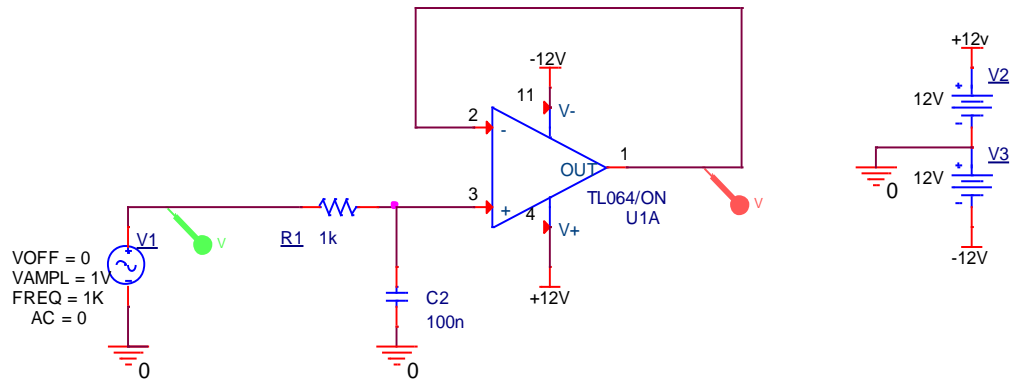
Fréquence de coupure :  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$

Déphasage :  $\Phi(\omega) = \arg(G(j\omega)) = -\arctan(RC\omega)$

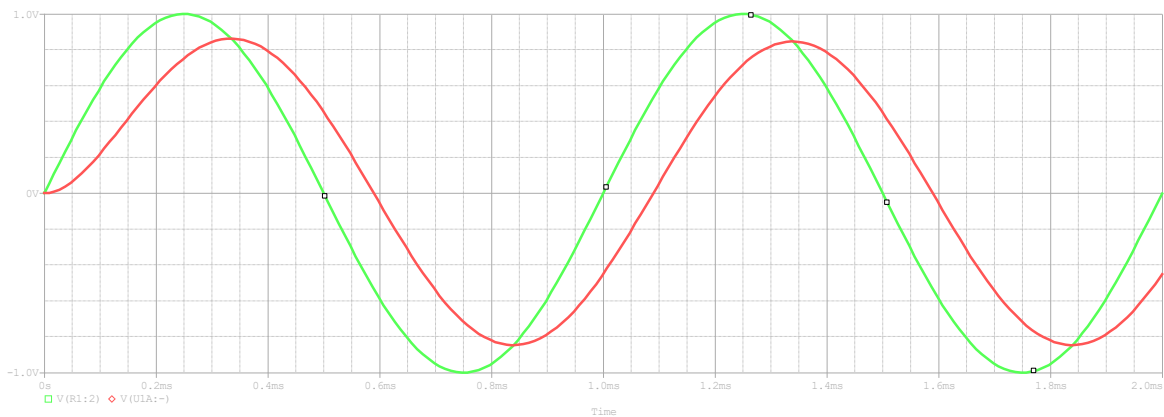
$$0 \text{ rad} \quad \text{si} \quad \omega \rightarrow 0$$

$$-\frac{\pi}{2} \text{ rad} \quad \text{si} \quad \omega \rightarrow +\infty$$

La fonction de transfert  $G(j\omega)$  a la forme classique d'un filtre passe-bas du 1er ordre et la fréquence de coupure est déterminée par les valeurs des éléments  $R$  et  $C$ . [10]



**Figure II. 4 :** Schéma d'un filtre passe bas sous ORCAD.



**Figure II. 5 :** Résultat de simulation du filtre passe bas.

- La courbe en vert indique le signal d'entrée.
- La courbe en rouge indique le signal de sortie.
- Ce filtre crée un déphasage de **0.1ms** entre la sortie et l'entrée avec une domination dans l'amplitude

## II.4.2. Filtre passe-tout :

Dans la plupart des cas, la réponse en amplitude d'un filtre est la principale préoccupation. Un autre type de filtre qui laisse l'amplitude du signal intact, mais introduit un décalage de phase est appelé un filtre passe-tout. Le but de ce filtre est d'ajouter un décalage de phase (retard) à la réponse du circuit. L'amplitude d'un passe-tout est unitaire pour toutes les fréquences. Le filtre est décrit avec la fréquence à laquelle le déplacement de phase est de  $90^\circ$ .

### II.4.2.1. Utilisation :

Normalement, le signal à laquelle est appliqué un filtre passe-tout est utilisé pour :

- Compenser un décalage de phase indésirable en raison du système dans lequel le signal passe.
- Être mélangé avec une version non modifiée du signal à mettre en œuvre un filtre en peigne type entaille.
- Convertir un filtre à phase mixte dans un filtre de phase minimale avec un module équivalent.
- Convertir un filtre instable dans une étale avec un module équivalent.

#### II.4.2.2. Filtre passe-tout du premier ordre :

La forme générale d'un filtre passe-tout du premier ordre est montré dans la figure (III. 1).

Si la fonction est un simple passe-haut RC (figure III.6 A), le circuit a un déphasage qui va de  $-180^\circ$  à 0 Hz et  $0^\circ$  à haute fréquence. Il est de  $-90^\circ$  à  $\omega = \frac{1}{RC}$ .

La résistance peut être rendue variable pour permettre l'ajustement du retard à une fréquence particulière

Si la fonction est changée en une fonction passe-bas (figure III.6 B), le filtre reste un passe-tout du premier ordre et les équations de retard restent valables, mais le signal est inversé, passant de  $0^\circ$  en continu à  $-180^\circ$  à haute fréquence [12].

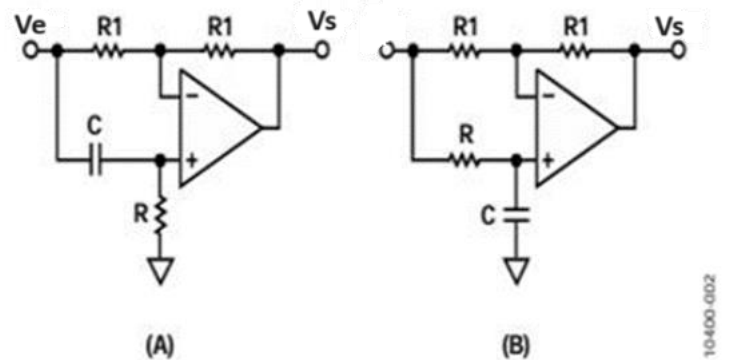


Figure II. 6 : Filtre passe-tout du premier ordre [12].

Pour obtenir la fonction de transfert de ce filtre, on applique la formule du pont diviseur de tensions :

$$V_{-} = \frac{V_s - V_e}{2}$$

$$V_+ = \frac{1}{1 + jRC\omega} * V_e$$

On a:  $V_+ = V_- \Rightarrow \frac{V_e + V_s}{2} = \frac{1}{1 + jRC\omega} * V_e$

$$H(j\omega) = \frac{V_s}{V_e} = \frac{1 - j \frac{\omega}{\omega_0}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}$$

Avec :  $\omega_0 = \frac{1}{RC}$

Donc :  $|H(j\omega)|=1$  et  $\text{Hdb} = 0$

Et le déphasage s'écrit :

$$\Phi(\omega) = \arg(H(j\omega)) = \arg(1 - jRC\omega) - \arg(1 + jRC\omega)$$

$$\Phi(\omega) = -\arctan\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) - \arctan\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) = -2\arctan\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)$$

$$\Phi(\omega) \xrightarrow{\omega=0} 0$$

$$\Phi(\omega) \xrightarrow{\omega=\infty} -\pi$$

$$\Phi(\omega) = -2 \tan^{-1}(2\pi fRC)$$

$$\Phi(\omega) = -2 \tan^{-1}\left(\frac{f}{f_0}\right)$$

Avec :  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$

$$\Delta T = \frac{2RC}{(2\pi RfC)^2 + 1}$$

Pour :  $f=0 \Rightarrow \Delta T = 2RC$

Un décalage de phase  $\varphi$  à une fréquence  $f$  :

$$\frac{\Phi}{2} = \tan^{-1}(2\pi fRC)$$

$$\tan\left(\frac{\Phi}{2}\right) = 2\pi fRC$$

Donc :

$$RC = \frac{\tan\left(\frac{\Phi}{2}\right)}{2\pi f}$$

## II.5. La comparaison entre le filtre passe tout circuit RC et circuit CR :

### II.5.1. Circuit RC :

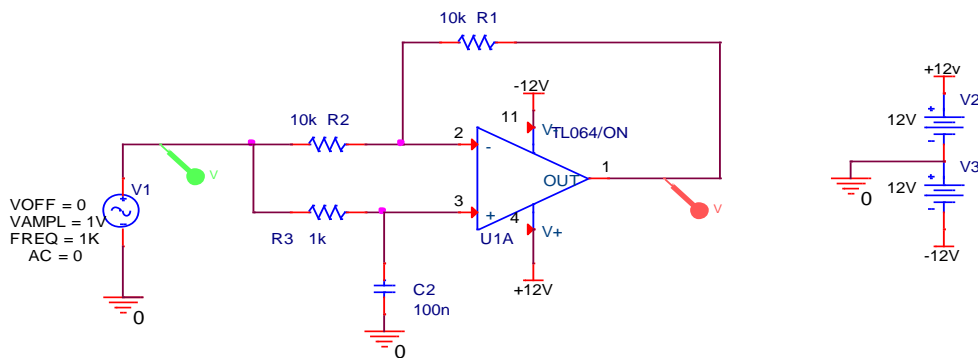


Figure II. 7 : Filtre passe tout circuit RC.

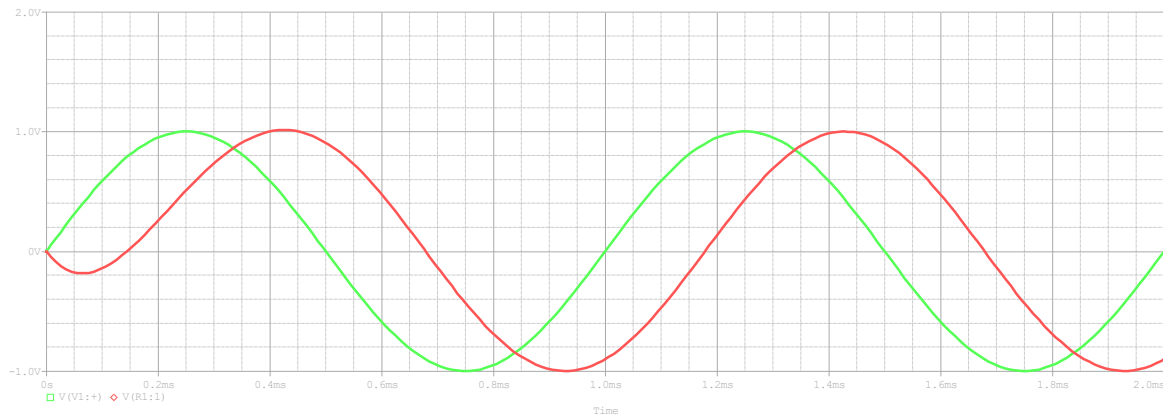
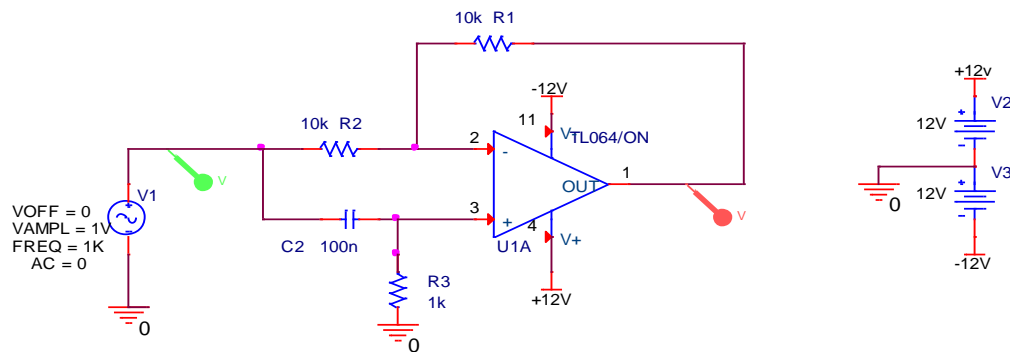


Figure II. 8 : Résultat de simulation du filtre passe-tout RC.

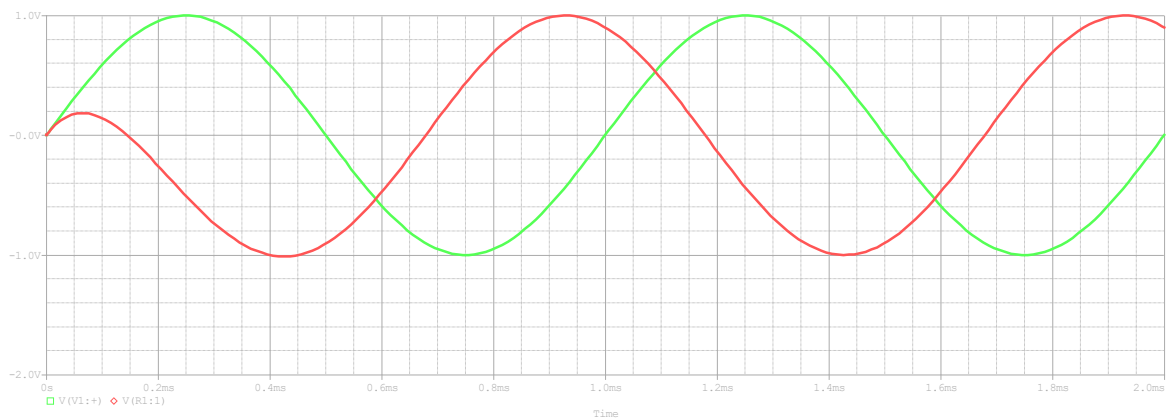
- Le panneau de signalisation en vert indique le signal d'entrée.
- Le panneau en rouge indique le signal de sortie.

On constate un déphasage temporel du signal de sortie par rapport au signal d'entrée d'une valeur de 0,175ms avec la même amplitude 1V.

## II.5.2. Circuit CR :



**Figure II. 9 :** Filtre passe tout circuit CR.



**Figure II. 10 :** Résultat de simulation du filtre passe-tout CR.

- Le panneau de signalisation en vert indique le signal d'entrée.
- Le panneau en rouge indique le signal de sortie.

On observe un décalage temporel estimé à 0,325 ms, où le signal de sortie est inversé par rapport le signal d'entrée.

## II.6. Diagramme de Bode du filtre passe bas et du filtre passe-tout :

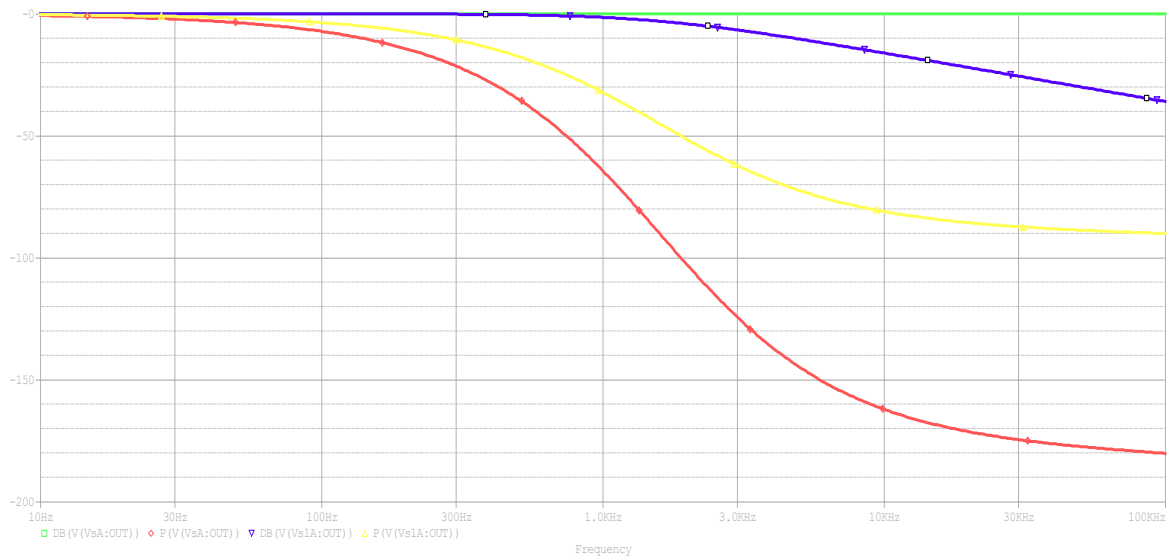


Figure II. 11 : Diagramme de Bode du filtre passe bas et du filtre passe-tout.

- — Le gain du filtre passe-tout.
- — Le gain du filtre passe bas.
- — La phase du filtre passe bas.
- — La phase de filtre passe-tout.

## II.7. Conclusion :

Le filtre passe bas effectue un décalage temporel mais souffre d'une diminution d'amplitude. c'est pourquoi nous n'avons pas opté pour ce type de filtres dans notre projet et avons préféré utiliser le filtre passe tout car il préserve le gain.

En ce qui concerne le circuit à avance de phase et le circuit à retard de phase, nous pouvons conclure qu'il existe une différence entre les deux.

Le circuit de filtre passe tout retard de phase induit un décalage temporel tout en préservant la même amplitude de signal d'entrée, tandis que l'autre circuit de filtre avance de phase il joue le rôle d'inverseur qui inverse le signal tout en générant simultanément un décalage temporel.

# **Partie pratique**



**Chapitre III :**  
**Simulation et Réalisation du**  
**projet**

### III.1. Introduction :

Dans cette étude pratique, nous sommes concentrés sur l'extraction des réponses directionnelles des microphones MEMS à travers diverses configurations et simulations. Nous avons analysé les réponses aux angles principaux pour plusieurs cas, notamment les configurations broadside, endfire différentiel, et endfire différentiel du premier ordre. Pour démontrer l'efficacité des arrangements triangulaires de microphones MEMS pour obtenir des réponses cardioïdes précises. Pour cela, nous avons simulé ces configurations en utilisant un mélangeur pour combiner les signaux des microphones. Nous avons également exploré des modifications géométriques et d'amplitude pour améliorer la précision de la réponse cardioïde.

### III.2. Simulation :

#### III.2.1. Cas broadside :

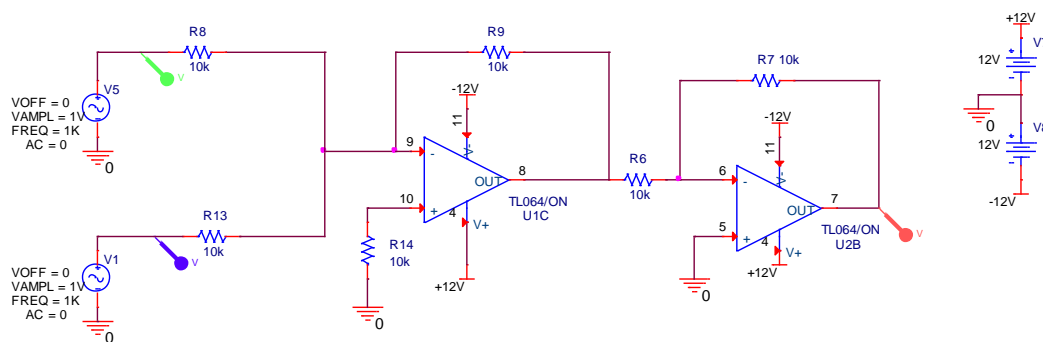


Figure III. 1 : Schéma des 2 microphones broadside.

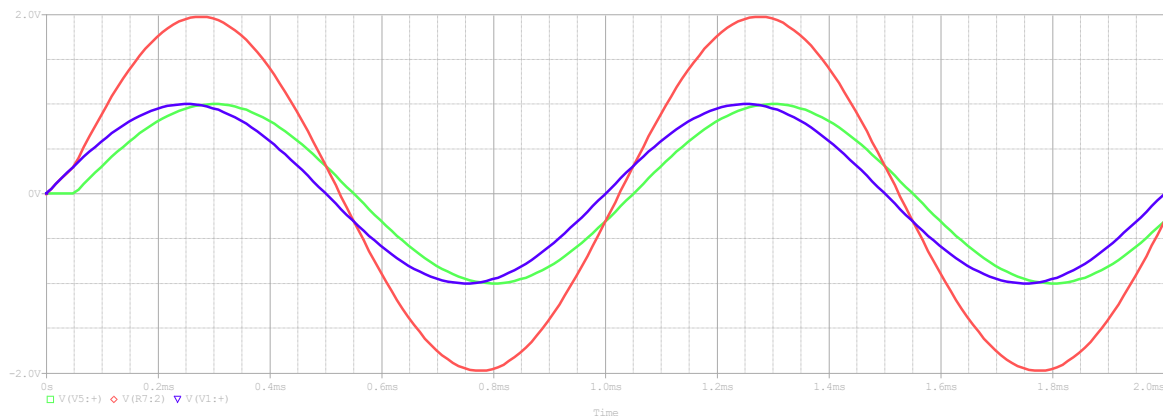
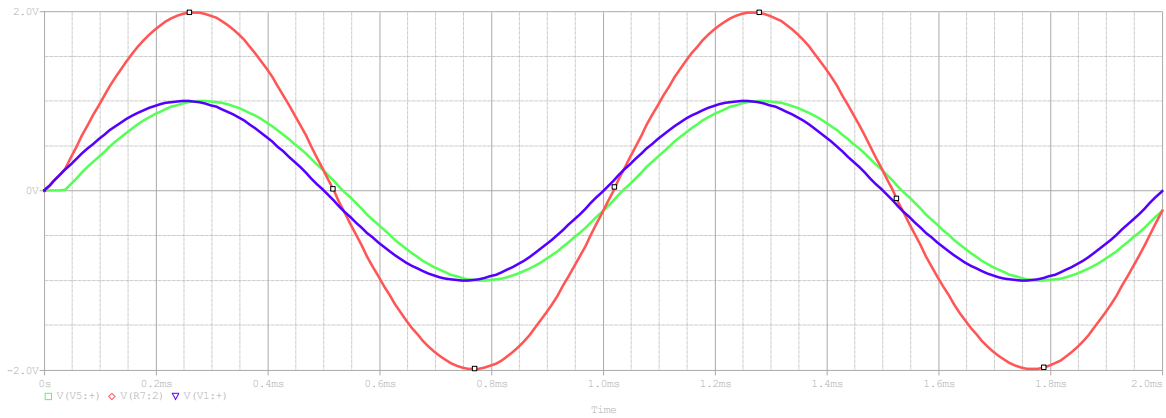
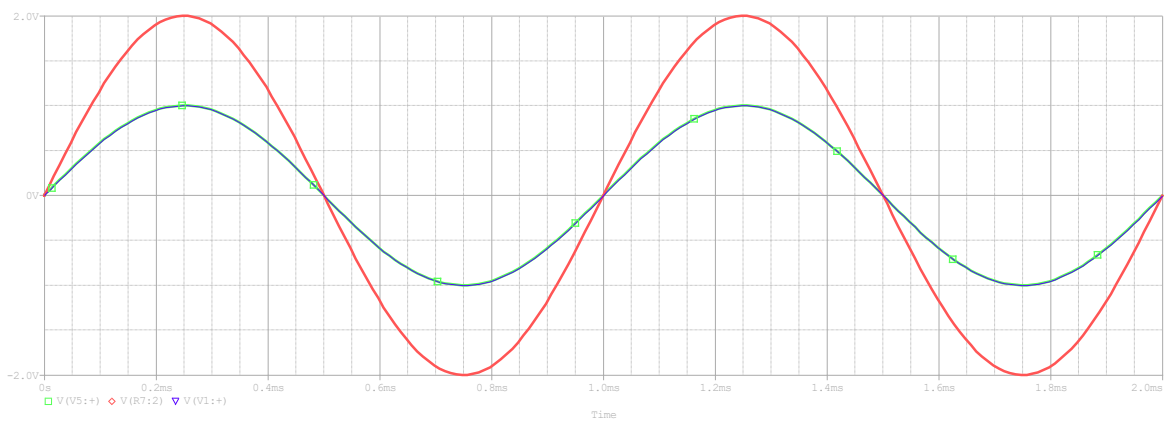


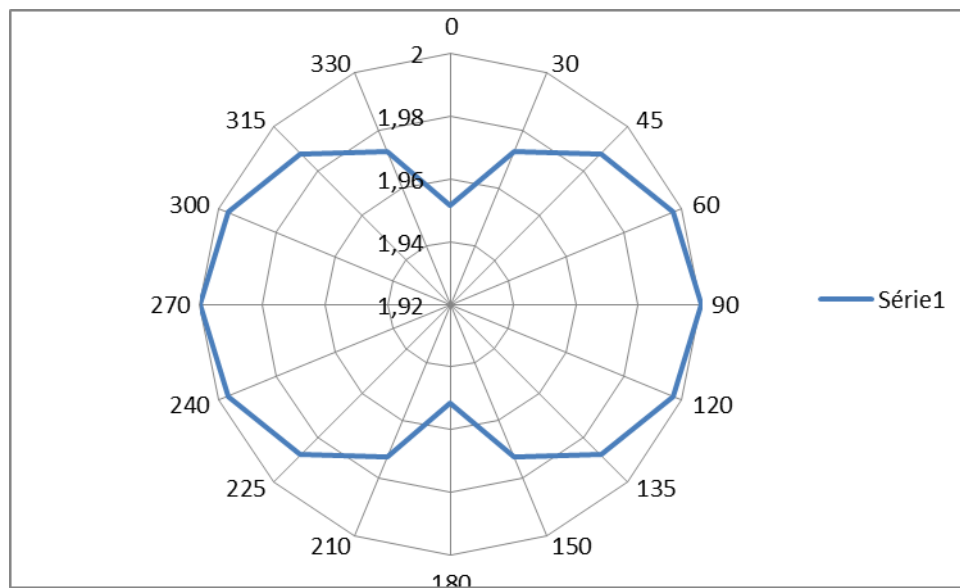
Figure III. 2 : Résultat de simulation de 2 microphones broadside.



**Figure III. 3 :** Résultat de simulation de 2 microphones broadside angle  $45^\circ$ .



**Figure III. 4 :** Résultat de simulation de 2 microphones broadside angle  $90^\circ$ .



**Figure III. 5 :** Directivité de 2 microphones broadside sur Excel.

### III.2.2. Cas endfire différentiel :

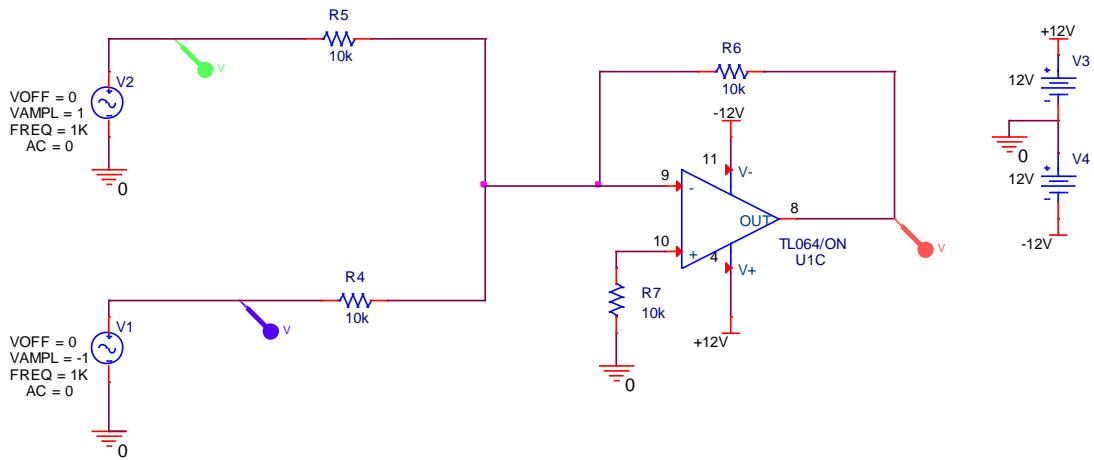


Figure III. 6 : Schéma de 2 microphones endfire différentiel.

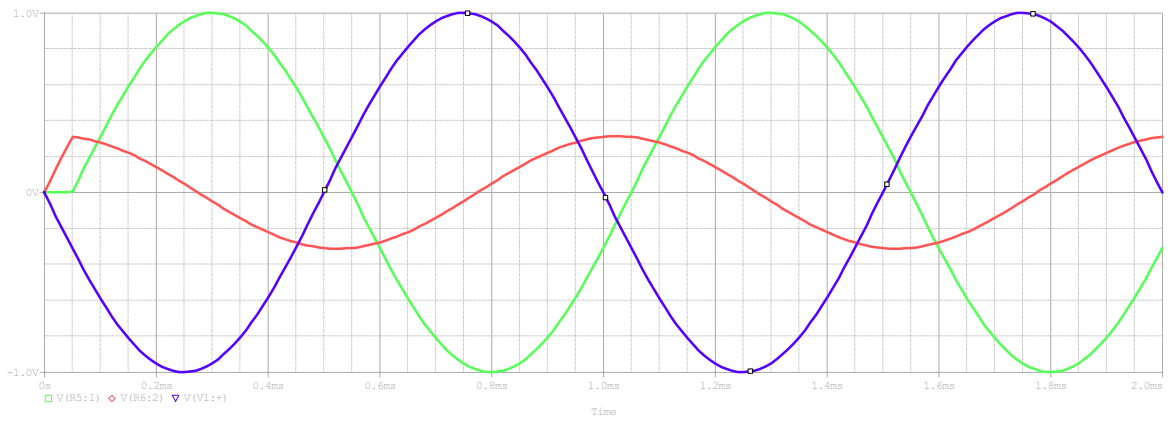


Figure III. 7 : Résultat de simulation en angle 0°.

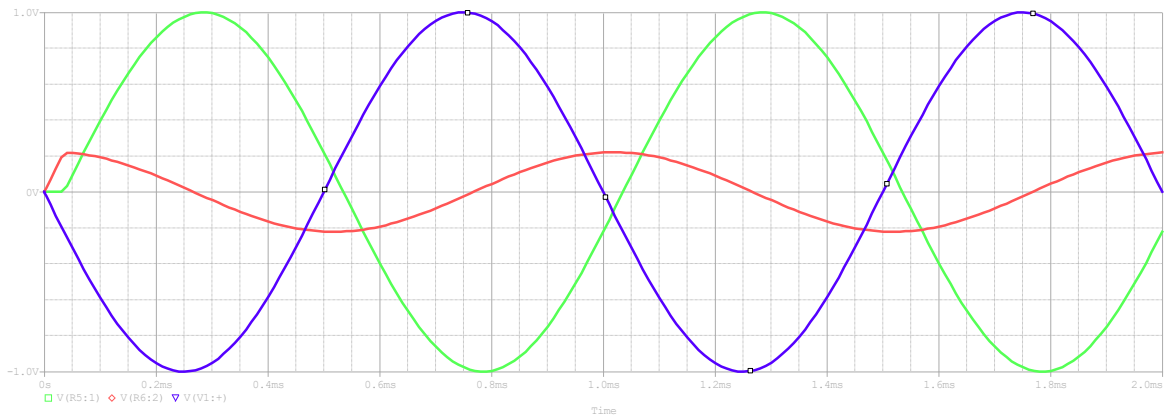
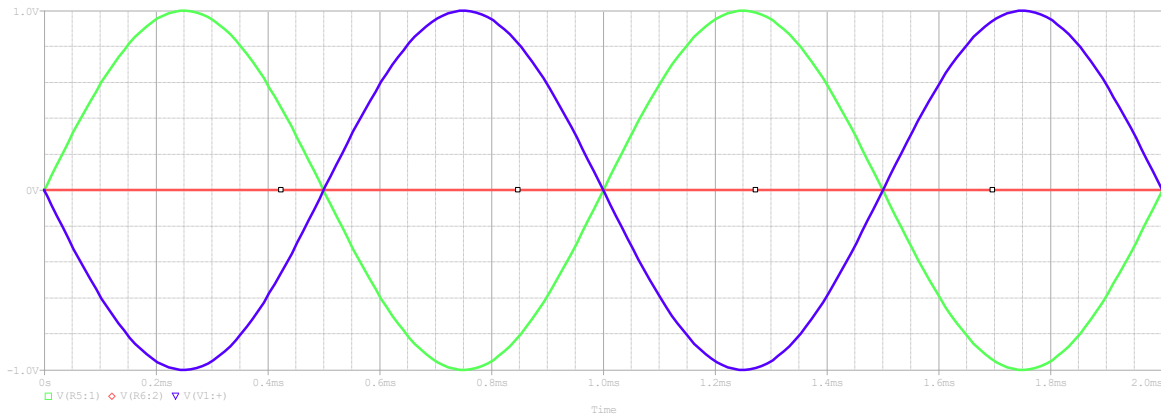
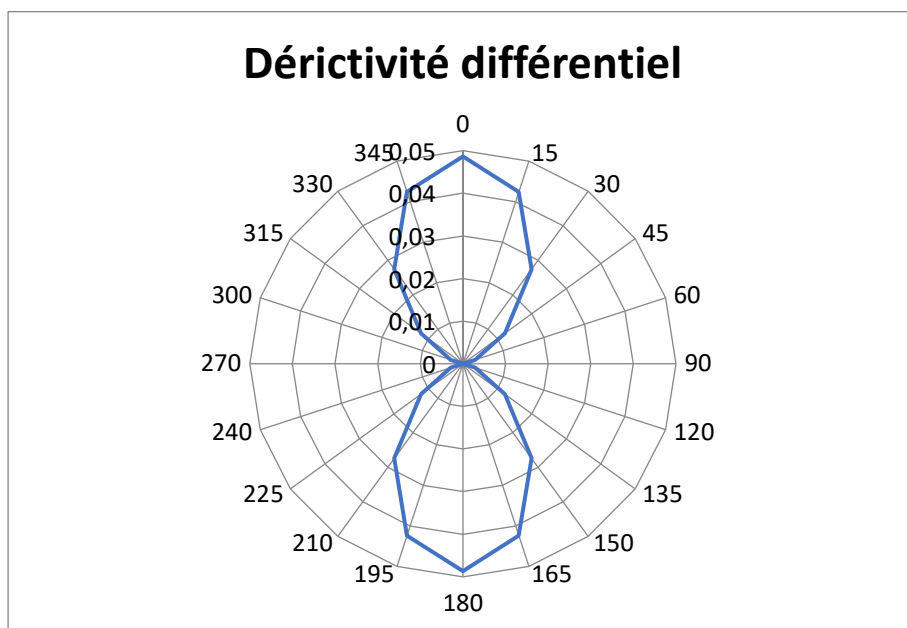


Figure III. 8 : Résultat de simulation en angle 45°.



**Figure III. 9 :** Résultat de simulation en angle  $90^\circ$  et  $270^\circ$ .

- La courbe en vert indique le signal d'entrée de microphone 1 à une amplitude de 1V.
- La courbe en bleu indique un autre signal d'entre de microphone 2 à même amplitude mais il est inversé ( $V_{amp}=-1$  théoriquement).
- La courbe en rouge est la somme de 2 signaux d'entrées égal 0.



**Figure III. 10 :** Directivité de 2 microphones endfire différentiel sur Excel.

### III.2.3. Cas endfire différentiel 1<sup>er</sup> ordre :

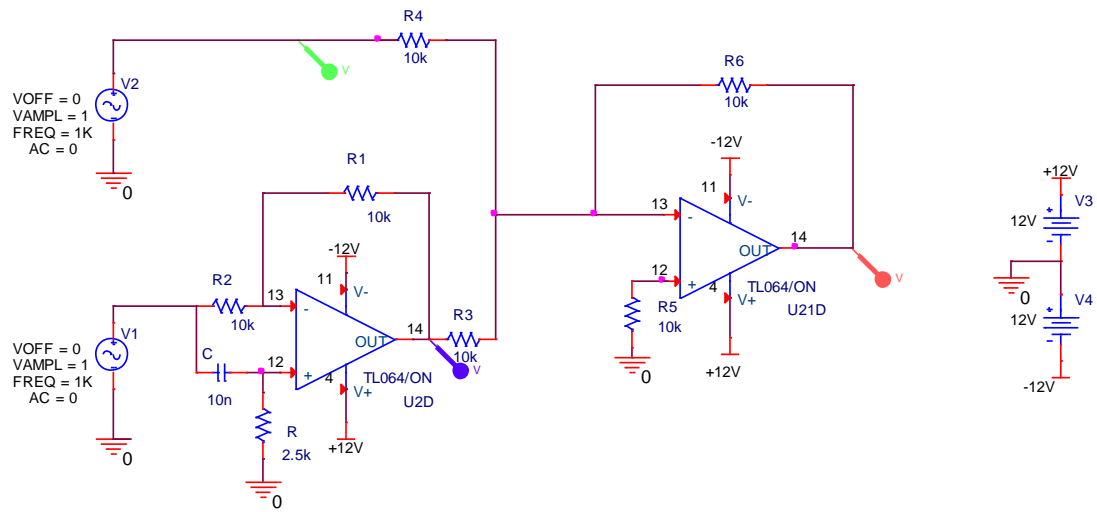


Figure III. 11 : Schéma de 2 microphones endfire différentiel de 1er ordre.

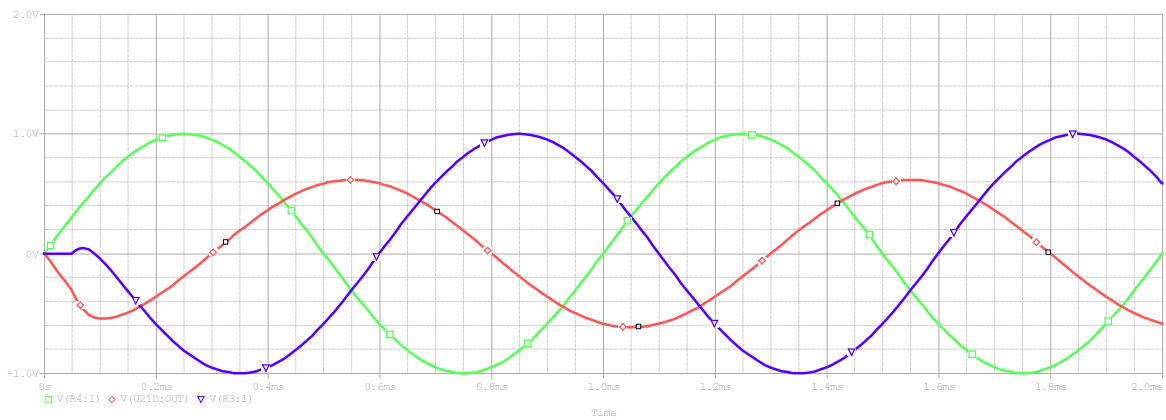
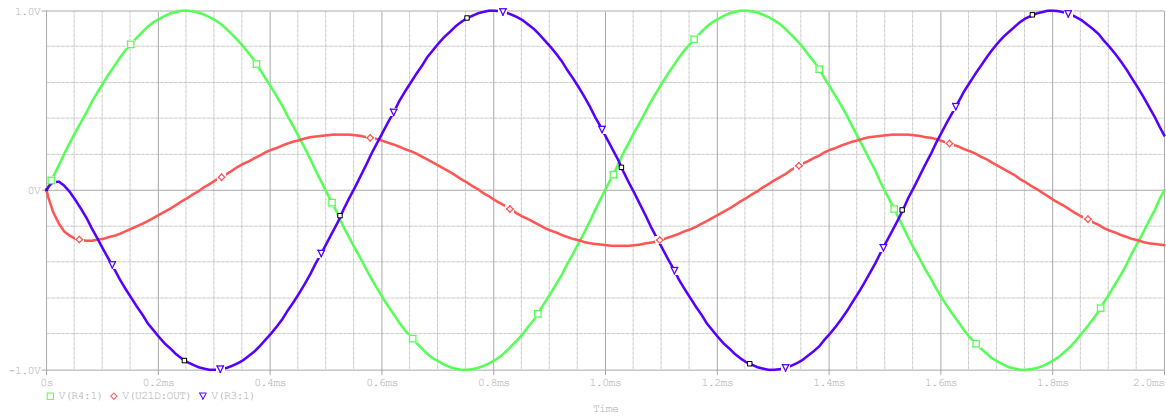


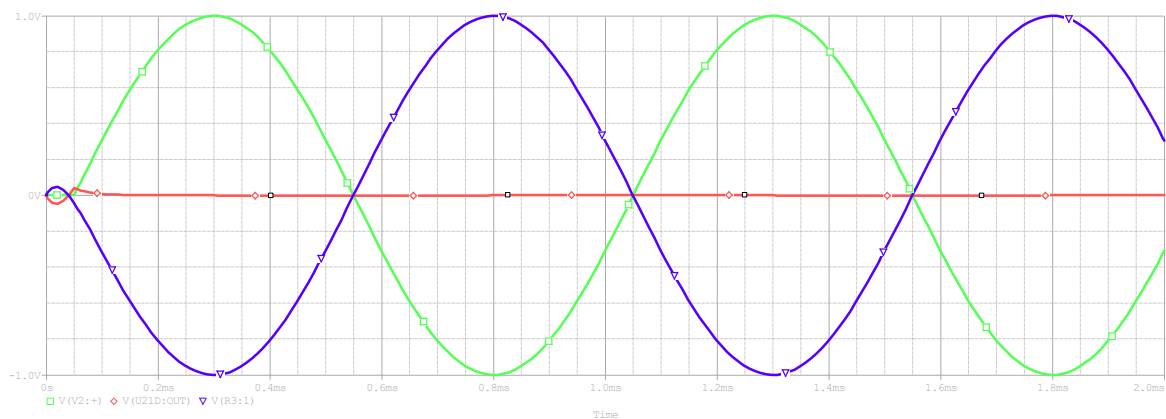
Figure III. 12 : Résultat de simulation en angle 0°.



Figure III. 13 : Résultat de simulation en angle 45°.



**Figure III. 14 : Résultat de simulation en angle 90° et 270°.**



**Figure III. 15 : Résultat de simulation en angle 180°.**

- La courbe en vert indique le signal d'entrée de microphone 1 à une amplitude de 1V.
- La courbe en bleu indique un autre signal d'entre de microphone 2 à même amplitude Mais il y a une inversion plus un décalage temporel de 0,325 ms.
- La courbe en rouge est la somme de 2 signaux d'entrées supérieur à 0 et garde la même amplitude.

**Calculer le retard pour une distance de 17 mm en angle 45° :**

On a : 
$$\Delta T = \frac{D}{C} = \frac{17 \cdot 10^{-3}}{340} = 5 \cdot 10^{-5} = 0,05 \text{ ms}$$

Avec : 
$$\Delta T' = \frac{D'}{C} = \frac{D}{C} * \cos \alpha$$

Donc : 
$$\Delta T' = \Delta T * \cos \alpha = 0,05 * \cos(45^\circ) = 0,035 \text{ ms}$$

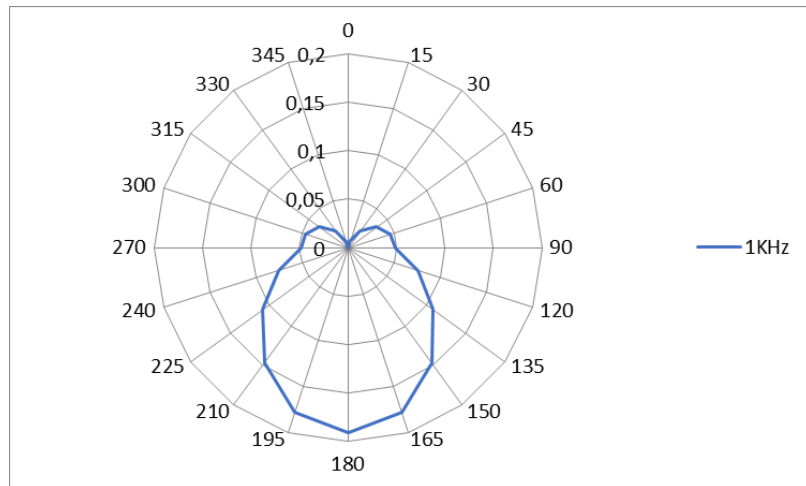
**Calcule le déphasage à partir du graphe :**

On a :

Chaque carreau 0.05ms, T = 1ms et  $\Delta T = 6,5 * 0,05 = 0,325ms$

Donc :  $\Delta\Phi = 360^\circ * \frac{\Delta T}{T}$

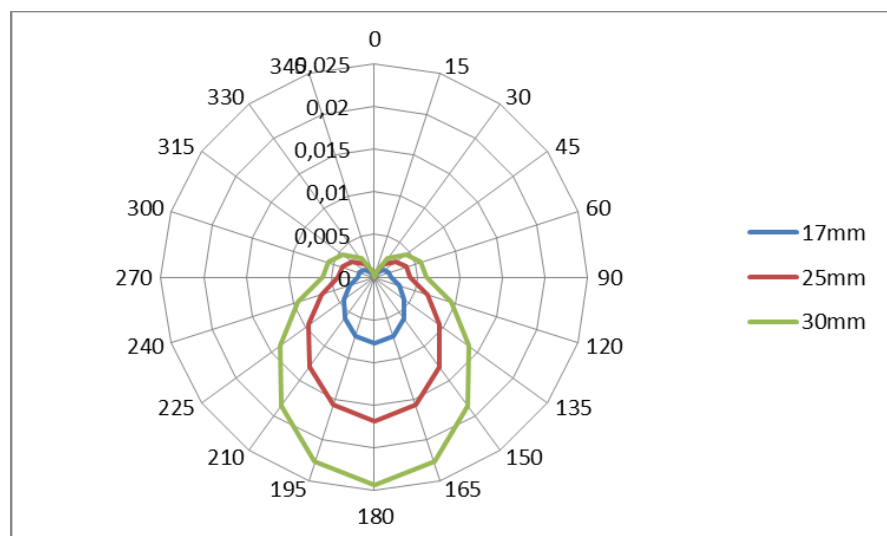
$$\Delta\Phi = 117^\circ$$



**Figure III. 16 :** Directivité cardioïde pour 1KHz.

### III.3. La directivité avec la variation de distance et de fréquence :

#### III.3.1. La directivité pour 1KHz avec variation sur la distance :



**Figure III. 17 :** Directivité cardioïde pour 1KHz de 17mm, 25mm et 30mm.



### III.3.2. La directivité pour 17 mm et différentes fréquences :

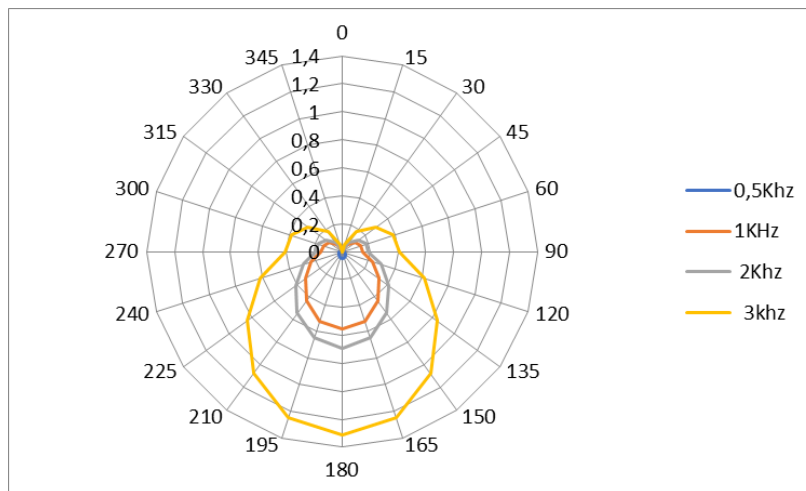


Figure III. 18 : Directivité cardioïde pour différentes fréquences.

### III.4. Géométrie des microphones forme triangulaire :

#### III.4.1. Géométrie des quatre microphones :

Nous allons proposer cette géométrie fabriquée avec 4 microphones formant un triangle et nous calculons la somme des réponses des microphones en fonction de la variation de la source sonore selon les changements d'angles.

Et nous représentons le microphone par l'équation suivante :

$$\text{Mic} = A * \sin(\omega t + \phi)$$

**Remarque :** Nous avons mis les microphones n° 3 et 4 avec un signe négatif, et le microphone n°4 porte un déphasage  $\phi$  et mic3 porte un déphasage de  $\phi/2$ .

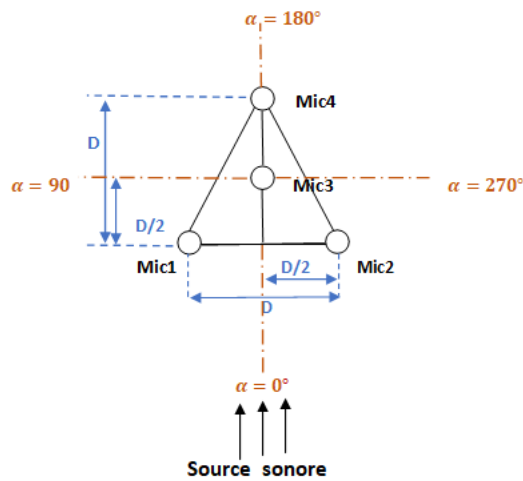


Figure III. 19 : Géométrie des quatre microphones.

- Les calculs :

$$D = 20\text{mm} \quad , \quad C = 340 \text{ m/s}$$

$$\Delta t = \frac{D}{C} = \frac{D}{340 \cdot 1000} = 58,82 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 58,82 \text{ } \mu\text{s}$$

Avec :  $\phi = \Delta t * \text{COS}(\alpha) * \frac{2\pi}{T} = 0,3694117 \quad / \quad F = 1\text{k} \Rightarrow T = 0,001 \text{ ms}$

**Pour  $\alpha=0$  :**  $\text{Mic1} = 1 * \sin\left(0 + \frac{\pi}{2}\right) = 0,99999968$

$$\text{Mic2} = 1 * \sin\left(0 + \frac{\pi}{2}\right) = 0,9999996$$

$$\text{Mic3} = -1 * \sin\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) = -0,9328271$$

$$\text{Mic4} = -1 * \sin\left(\phi + \phi + \frac{\pi}{2}\right) = -0,7397974$$

La somme :  $\text{Mic1} + \text{Mic2} + \text{Mic3} + \text{Mic4} = 0,32737488$

**Pour  $\alpha=90$ ° :**  $\text{Mic1} = 1 * \sin\left(0 + \frac{\pi}{2}\right) = 0,99999968$

$$\text{Mic2} = 1 * \sin\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) = 0,93282713$$

$$\text{Mic3} = -1 * \sin\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) = -0,932827$$

$$\text{Mic4} = -1 * \sin\left(\frac{\phi}{2} + \phi + \frac{\pi}{2}\right) = -0,8507838$$

La somme :  $\text{Mic1} + \text{Mic2} + \text{Mic3} + \text{Mic4} = 0,14921587$

**Pour  $\alpha=180^\circ$  :**  $\text{Mic1} = 1 * \sin\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) = 0,93282713$

$\text{Mic2} = 1 * \sin\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) = 0,93282713$

$\text{Mic3} = -1 * \sin\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) = -0,9328271$

$\text{Mic4} = -1 * \sin\left(0 + \phi + \frac{\pi}{2}\right) = -0,9328271$

La somme :  $\text{Mic1} + \text{Mic2} + \text{Mic3} + \text{Mic4} = 0$

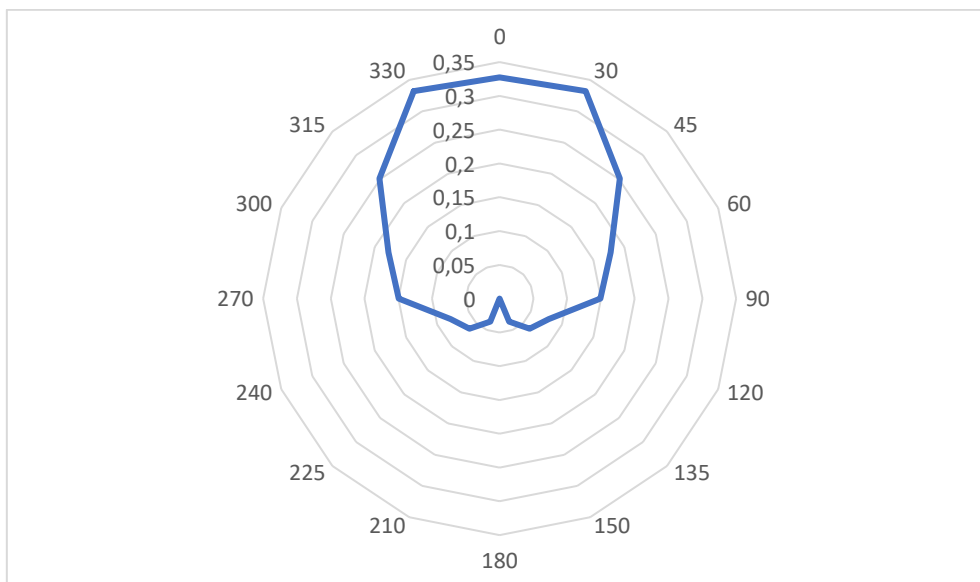
**Pour  $\alpha=270^\circ$  :**  $\text{Mic1} = 1 * \sin\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) = 0,93282713$

$\text{Mic2} = 1 * \sin\left(0 + \frac{\pi}{2}\right) = 0,99999968$

$\text{Mic3} = -1 * \sin\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) = -0,9328271$

$\text{Mic4} = -1 * \sin\left(\frac{\phi}{2} + \phi + \frac{\pi}{2}\right) = -0,8507838$

La somme :  $\text{Mic1} + \text{Mic2} + \text{Mic3} + \text{Mic4} = 0,14921587$



**Figure III. 20 :** Réponse cardioïde géométrie 4 microphones sur EXCEL.

- Sur les nous concluons que la géométrie du quatre microphone format en triangle donne une réponse de forme cœur.

### III.4.2. Géométrie de trois microphones :

- Pour obtenir une réponse cardioïde plus précise nous allons proposer une géométrie format triangulaire fabriquée en trois microphones comme cela :

Nous avons placé théoriquement dans microphone n°3 double amplitude (2V) avec signale négative et déphasage estimé par  $\phi/2$  et en pratique nous réaliserons un circuit de filtrage passe-tout (CR).

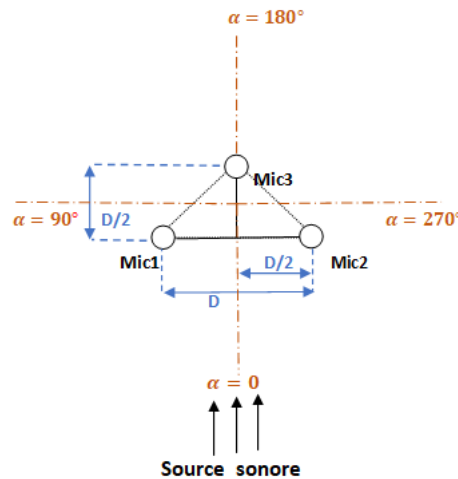


Figure III. 21 : Géométrie de trois microphones.

Pour  $\alpha=0$  :  $\text{Mic1} = 1 * \sin\left(0 + \frac{\pi}{2}\right) = 0,99999968$

$$\text{Mic2} = 1 * \sin\left(0 + \frac{\pi}{2}\right) = 0,99999968$$

$$\text{Mic3} = -2 * \sin\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) = -1,8656543$$

La somme :  $\text{Mic1} + \text{Mic2} + \text{Mic3} = 0,1343451$

Pour  $\alpha=90^\circ$  :  $\text{Mic1} = 1 * \sin\left(0 + \frac{\pi}{2}\right) = 0,99999968$

$$\text{Mic2} = 1 * \sin\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) = 0,93282713$$

$$\text{Mic3} = -2 * \sin\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) = -1,8656543$$

La somme :  $\text{Mic1} + \text{Mic2} + \text{Mic3} = 0,06717255$

Pour  $\alpha=180^\circ$  :  $\text{Mic1} = 1 * \sin\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) = 0,98313625$

$$\text{Mic2} = 1 * \sin\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) = 0,98313625$$

$$\text{Mic3} = -2 * \sin\left(0 + \frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) = -1,9662725$$

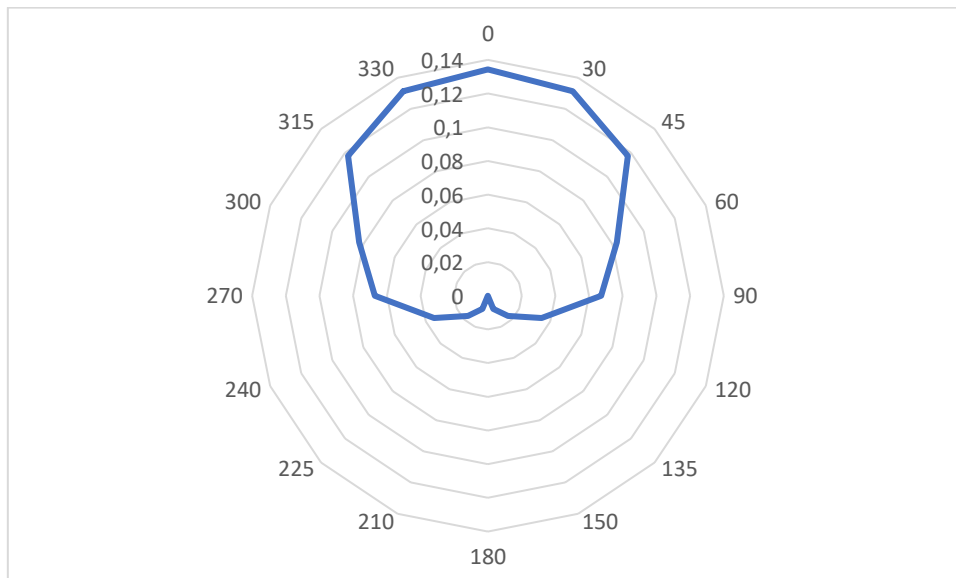
La somme :  $\text{Mic1} + \text{Mic2} + \text{Mic3} = 0$

**Pour  $\alpha=270^\circ$  :**  $\text{Mic1} = 1 * \sin\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) = 0,93282713$

$$\text{Mic2} = 1 * \sin\left(0 + \frac{\pi}{2}\right) = 0,99999968$$

$$\text{Mic3} = -2 * \sin\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) = -1,8656543$$

La somme :  $\text{Mic1} + \text{Mic2} + \text{Mic3} = 0,06717255$



**Figure III. 22 :** Réponse cardioïde géométrie 3 microphones sur EXCEL.

- On observe la géométrie à trois microphones donnait une réponse cardioïde plus optimisée que la réponse de géométrie à quatre microphones.

### III.5. Mélangeur à trois entrées :

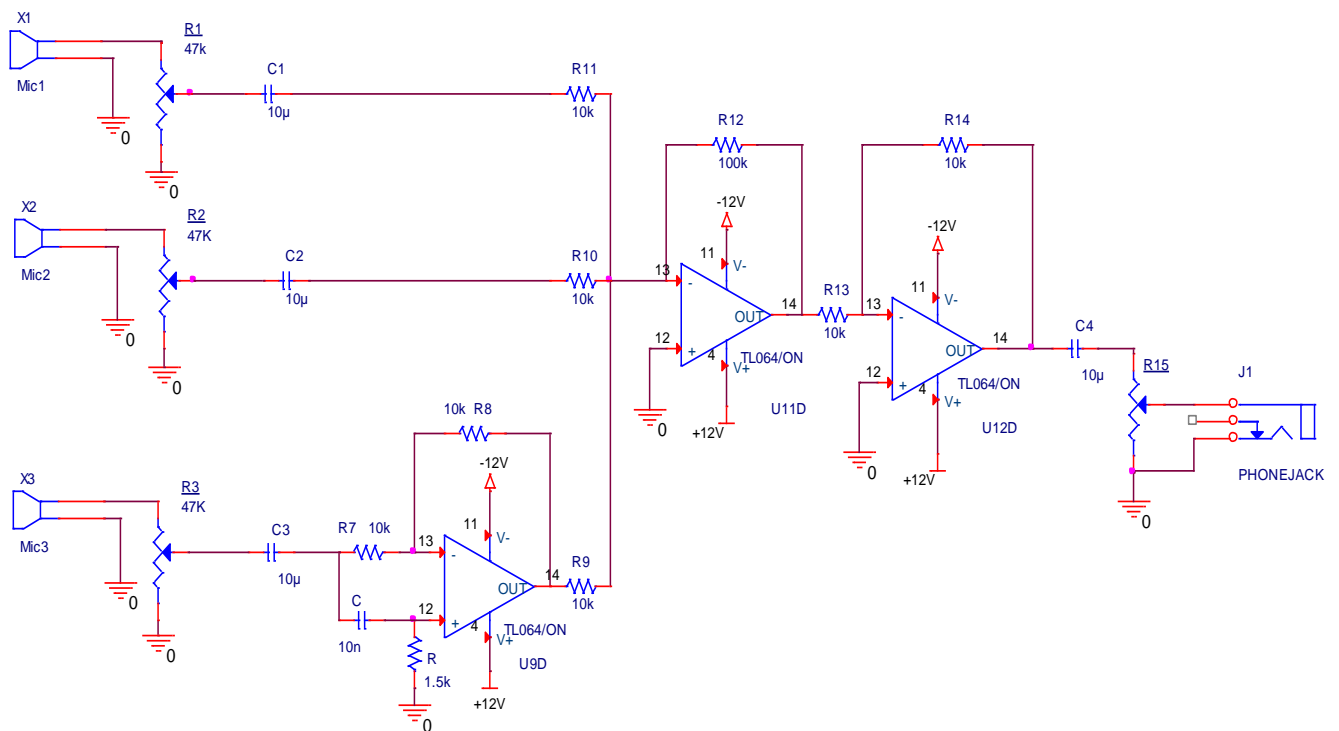


Figure III. 23 Schéma complet descriptif du mélangeur à trois microphones.

### Cas de 3 microphones pour les 2 distances (D et D /2) :

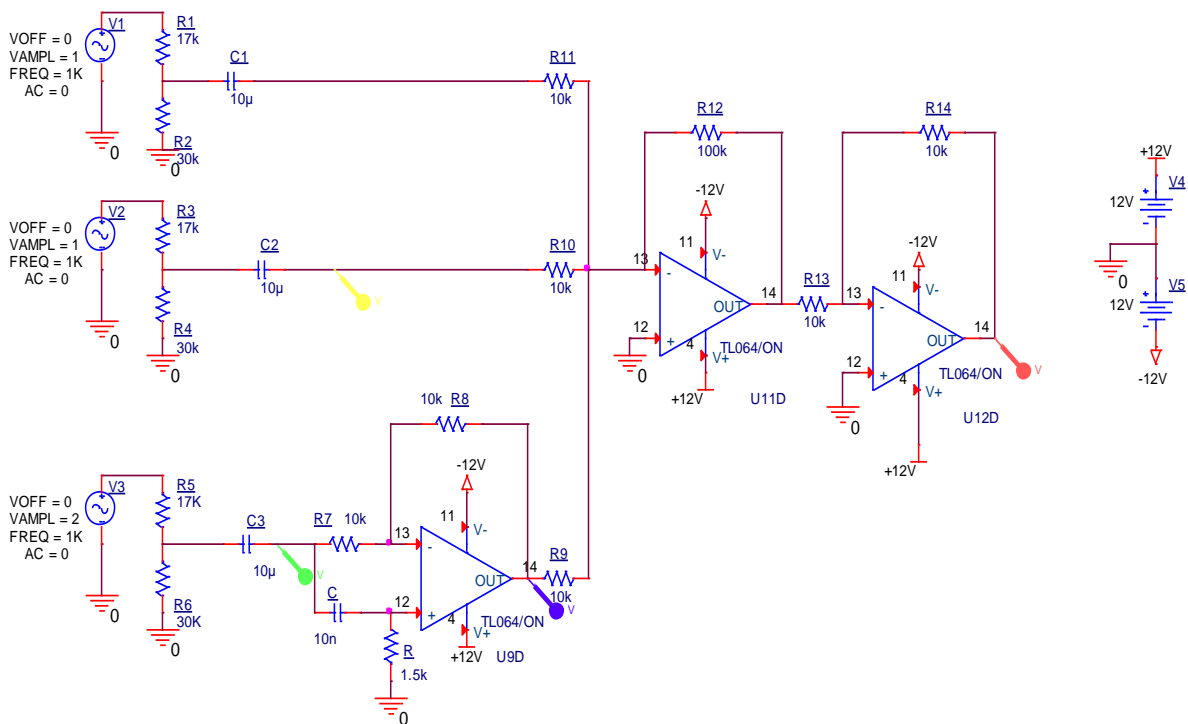


Figure III. 24 : Schéma de simulation de trois microphones.

## Fiche de données de TL082 (il joue le même rôle de TL064) :

### L'alimentation de TL082 :

- Large plage de mode commun (jusqu'à  $V_{cc+}$ ) et de tensions différentielles.
- Faible biais d'entrée et courant de décalage.
- Protection contre les court-circuits de sortie.
- Étage d'entrée J-Fet à haute impédance d'entrée.
- Compensation de fréquence interne.
- Fonctionnement libre de verrouillage.
- Taux de slow levé :  $16 \text{ V}/\mu\text{s}$ .

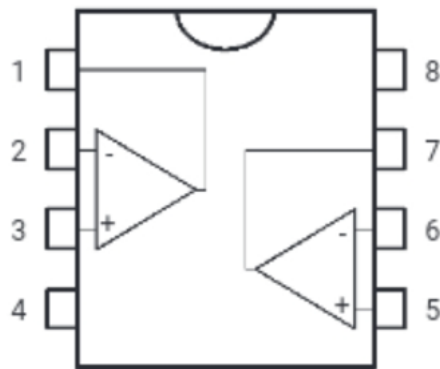


Figure III. 25 : Structure de TL082.

### Les pins de connections :

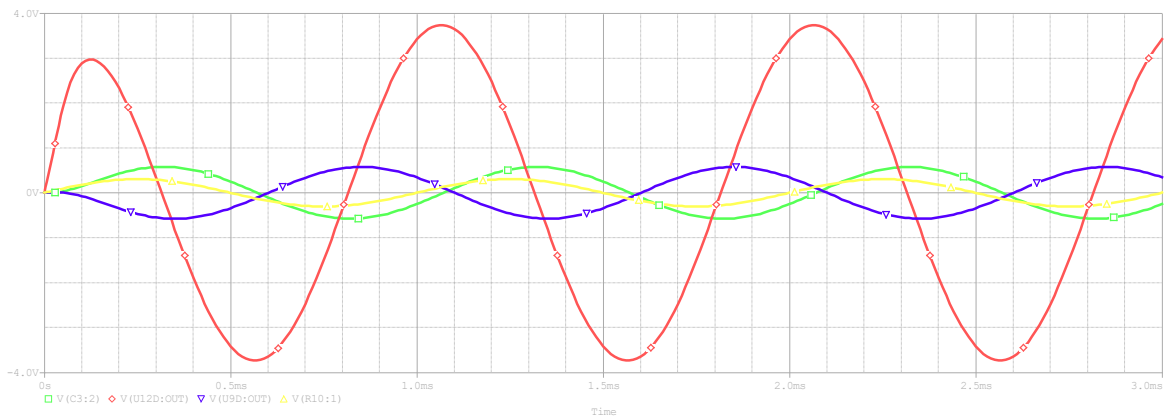
1. Décalage nul 1
2. Entrée inverseur 1
3. Entrée non inverseur 1
4.  $V_{cc-}$
5. Entrée non inverseur 2
6. Entrée inverseur 2
7. Sortie 2
8.  $V_{cc+}$

Il y a deux options de triangle format à trois microphones :

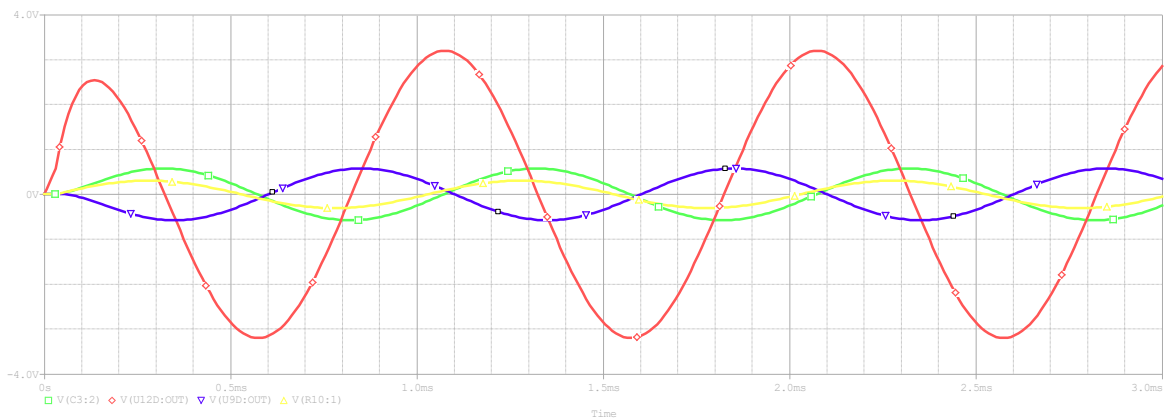
**Option n°1 :**

Un triangle composé de 3 microphones, dont la base a une longueur  $D$ , qui est la distance entre les microphones Mic1 et Mic2. La hauteur est égale  $D/2$ , où se trouve le microphone Mic3.

Ces figures de simulation à traitement de cette proposition délai de filtre ( $C=10\text{nF}$ ,  $R=1,5\text{khom}$ ).

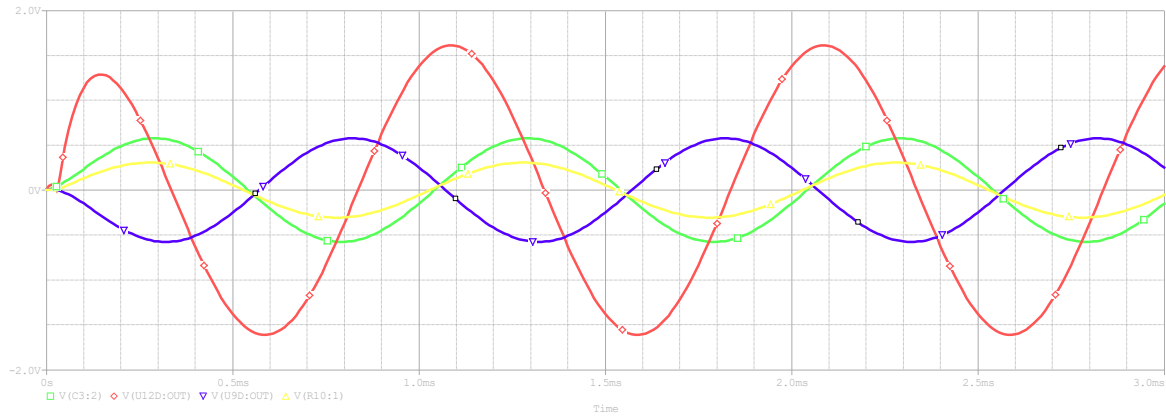


**Figure III. 26 :** Résultat de simulation en angle 0°.



**Figure III. 27 :** Résultat de simulation en angles 90° et 270°.





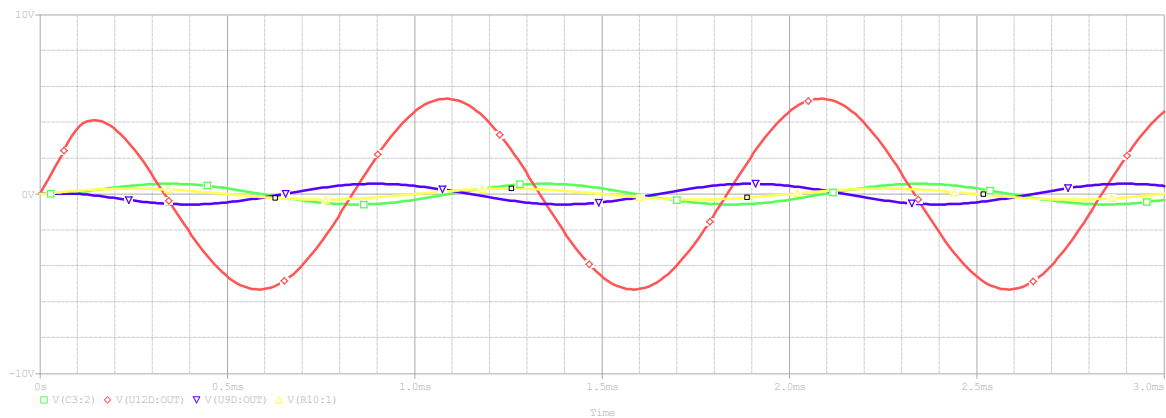
**Figure III. 28 :** Résultat de simulation en angle  $180^\circ$ .

- La courbe jaune indique le signal de sortie microphone 2.
- La courbe verte indique le signal d'entrée de filtre passe tout CR.
- La courbe bleue indique le signal de sortie de filtre passe tout CR.
- La courbe rouge indique le signal de sortie final.

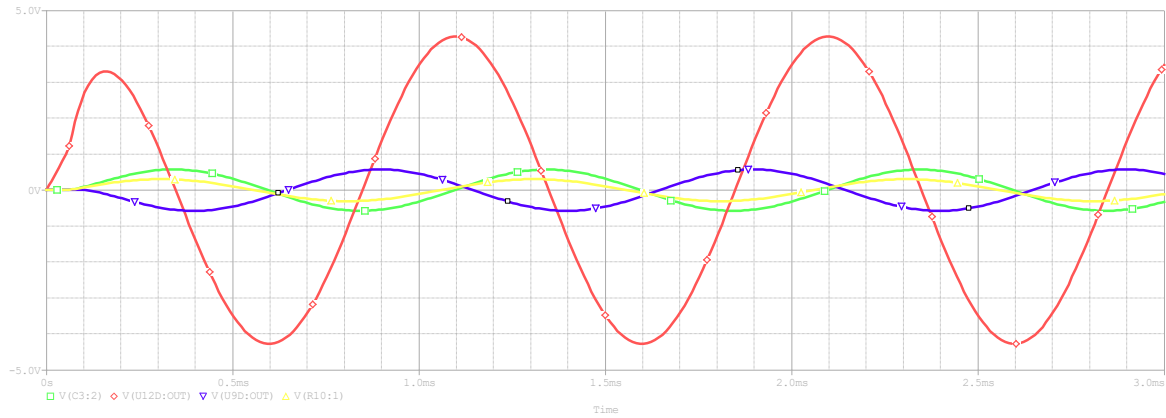
**Option n°2 :**

Un triangle composé de 3 microphones, dont la base a une longueur  $D$ , qui est la distance entre les microphones Mic1 et Mic2. La hauteur  $h$  est égale  $D$ , où se trouve le microphone Mic3.

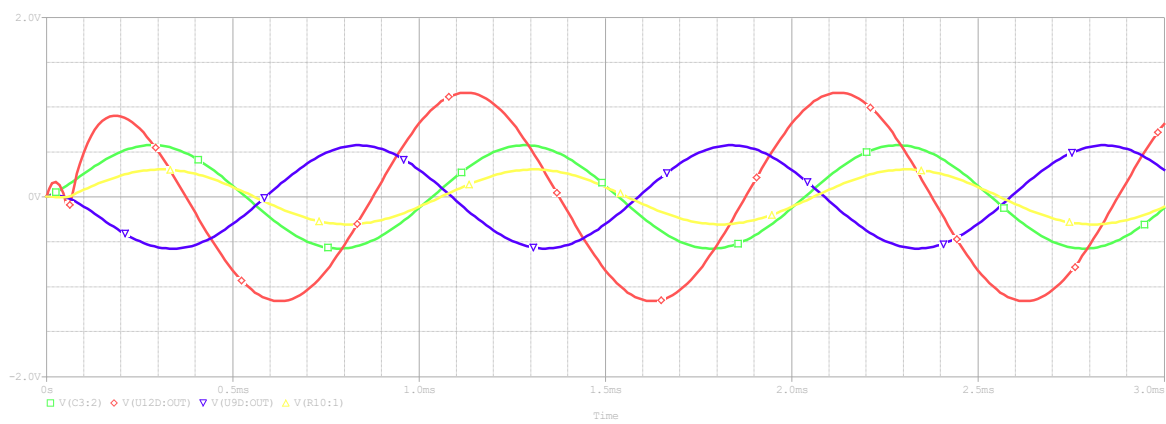
Ces figures de simulation à traitement de cette proposition délai de filtre ( $C=10\text{nF}$ ,  $R=2,7\text{k}$ ).



**Figure III. 29 :** Résultat de simulation en angle  $0^\circ$ .



**Figure III. 30 :** Résultat de simulation en angle  $90^\circ$  et  $270^\circ$ .



**Figure III. 31 :** Résultat de simulation en angle  $180^\circ$ .

- La courbe jaune indique le signal de sortie microphone 2.
- La courbe verte indique le signal d'entrée de filtre passe tout CR.
- La courbe bleue indique le signal de sortie de filtre passe tout CR.
- La courbe rouge indique le signal de sortie final.

**Remarque :**

On observe les figures de la distance **D** pour les quatre angles principaux sont plus précises que les figures de la distance **D/2**.

- Nous avons réalisé le projet sur une plaque d'essai afin d'extraire et de lire les signaux des plusieurs parties différentes comme indiqué sur l'image suivante.

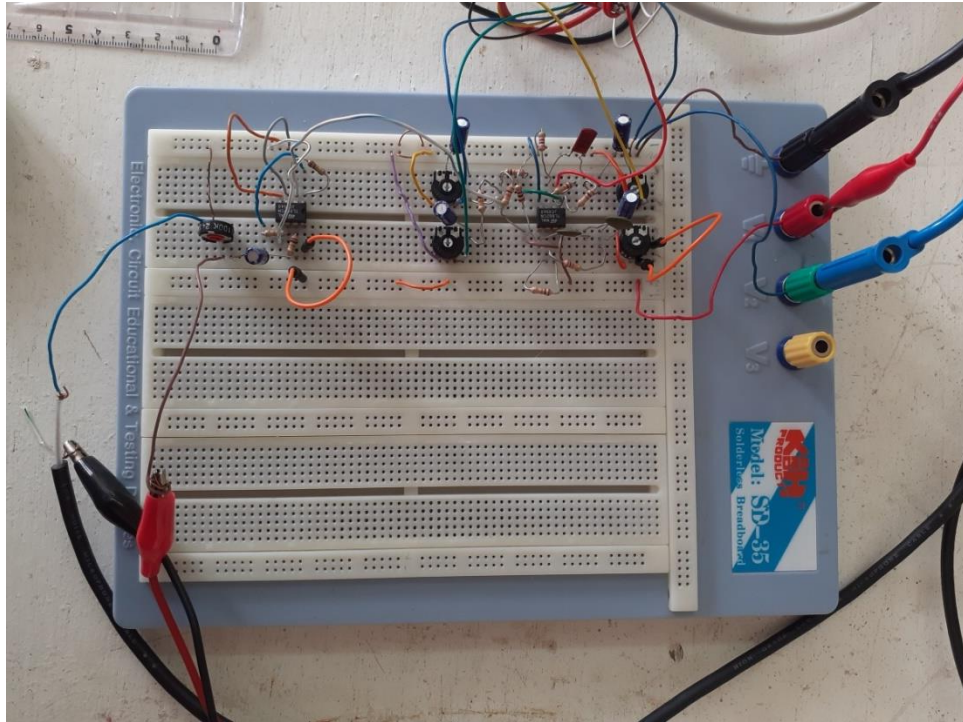


Figure III. 32 : Réalisation de circuit mélangeur sur la plaque d'essai.

**Remarque :**

L'amplitude du microphone  $4=0V$  parce que nous avons choisi la géométrie des 3 microphones sur lesquels continuer à travailler.

- Nous faisons le schéma au-dessous 3 microphones mélanger pratiquement et placée les signaux des 3 microphones à générateur des signaux pour voire le rôle de quelque partie du ce circuit sur l'oscilloscope : (le panneau jaune indique au signal d'entrée, le panneau bleu indique au signal de sortie).

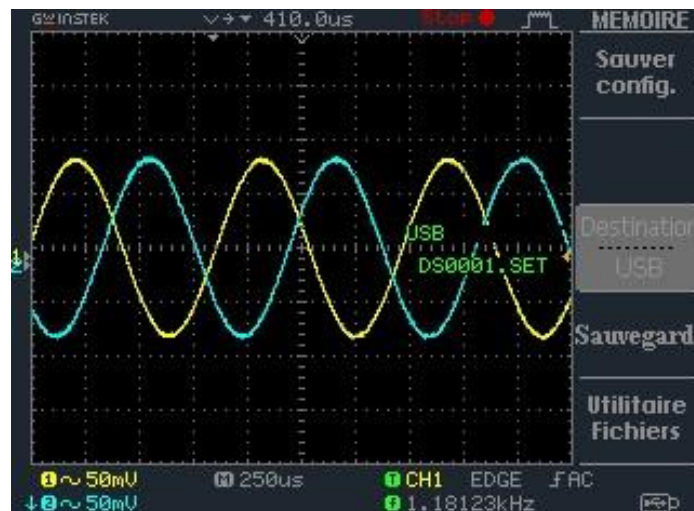


Figure III. 33 : Signal d'entrée et sortie du filtre passe tout sur l'oscilloscope.

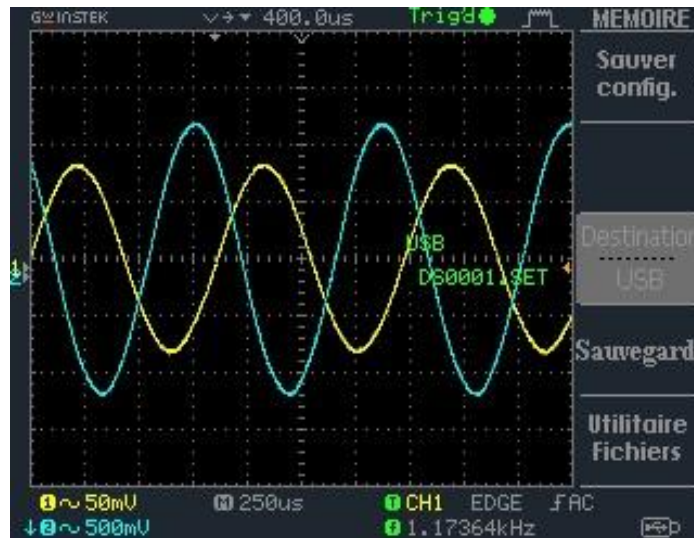


Figure III. 34 : les signaux totaux inverses.

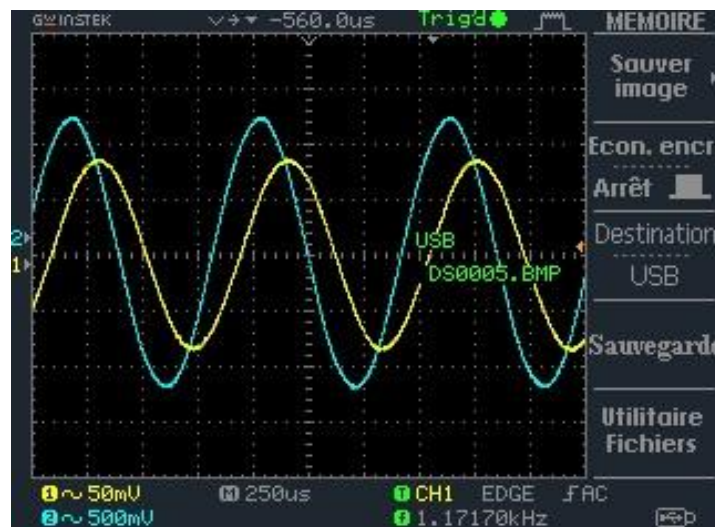


Figure III. 35 : Sortie finale de circuit mélangeur.

- La courbe jaune indique le signal d'entrée.
- La courbe bleue indique le signal de sortie.

### III.6. Préparation du circuit imprimé :

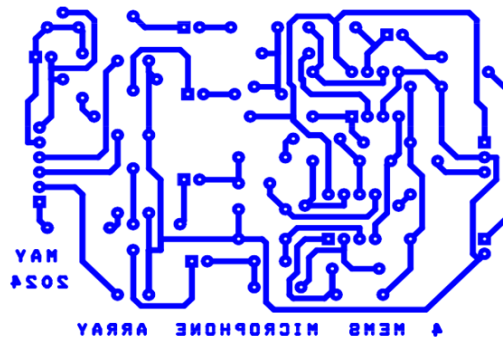


Figure III. 36 : Schéma de circuit mélangeur.

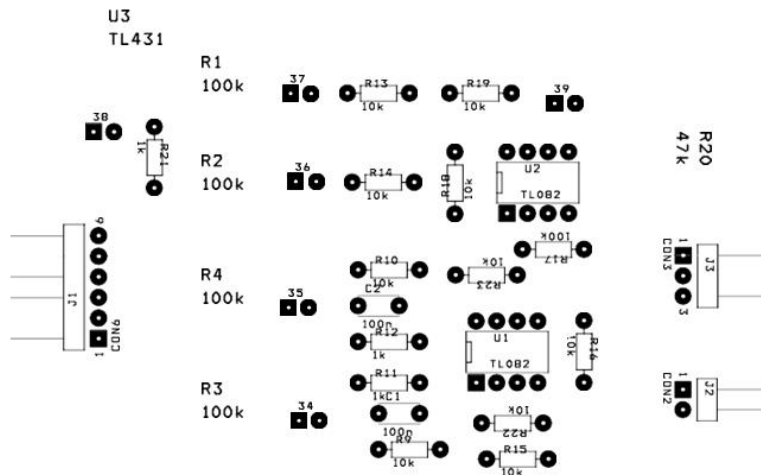


Figure III. 37 : Schéma de placement des composants du mélangeur.

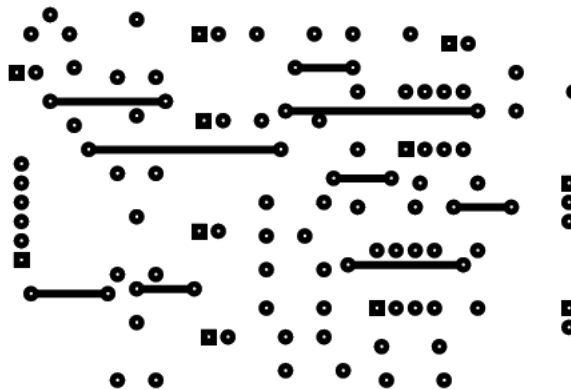


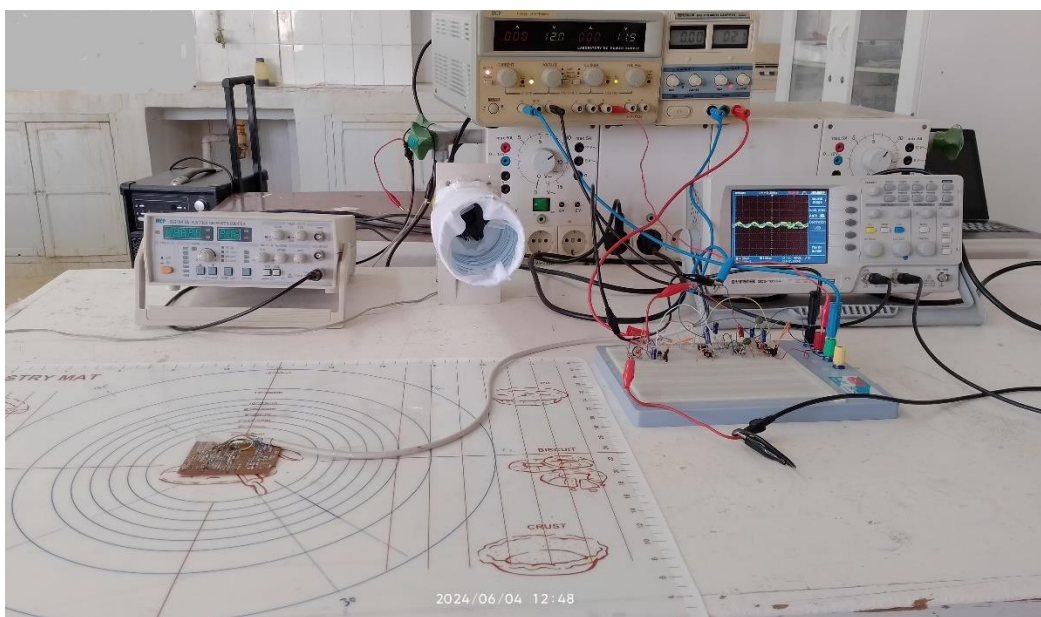
Figure III. 38 : Schéma des dispositions straps.

### III.7. Test final :

Ce système a été réalisé en réalité sur la plaque d'essai (circuit mélangeur). La connexion du circuit du mélangeur sur la plaque d'essai avec le microphone (chaque microphone de la forme triangulaire est connecté avec son propre traitement dans le circuit du mélangeur). Nous plaçons un oscilloscope pour lire le signal de sortie de Mic3 et la sortie finale de l'ensemble des trois microphones.

Le test a été effectué en représentant une source sonore par un générateur de signaux qui génère un signal sinusoïdal et en le connectant à un haut-parleur situé à une distance de 40 cm du microphone, puis en l'orientant vers le microphone à différents angles de base ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ) dans les valeurs de fréquences (200hz, 500hz, 1khz, 2khz, 3khz, 5khz).

Chaque signal de somme apparaît sur l'oscilloscope en fonction de la variation de la direction et des angles de la source sonore.



**Figure III. 39** : Dispositif de mesure de la réponse de l'array de 3 microphones.

Dans la fréquence de source sonore 200hz :

- Pour  $\alpha=0^\circ$  :

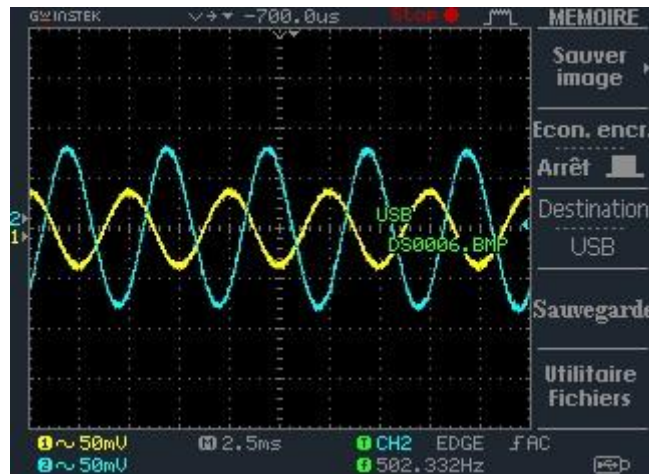


Figure III. 40 : Résultat de test avec une source sonore 200 Hz à un angle  $0^\circ$ .

- Le signal bleu montre la sortie du mélangeur.
- Le signal jaune montre la sortie du Mic3.
- Pour  $\alpha=45^\circ$  :

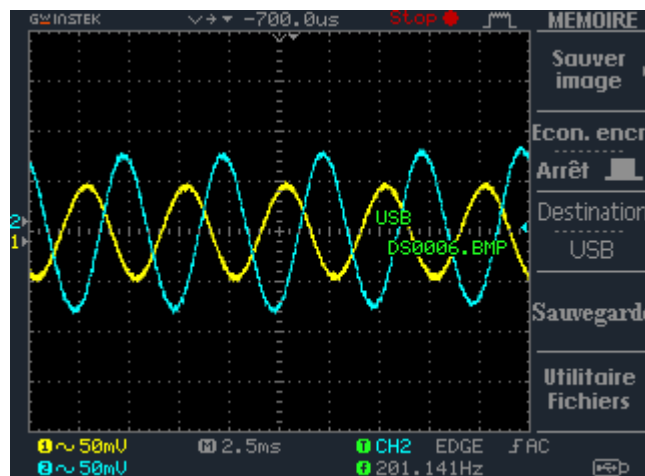


Figure III. 41 : Résultat de test avec une source sonore 200 Hz à un angle  $45^\circ$ .

- Pour  $\alpha=90^\circ$  :

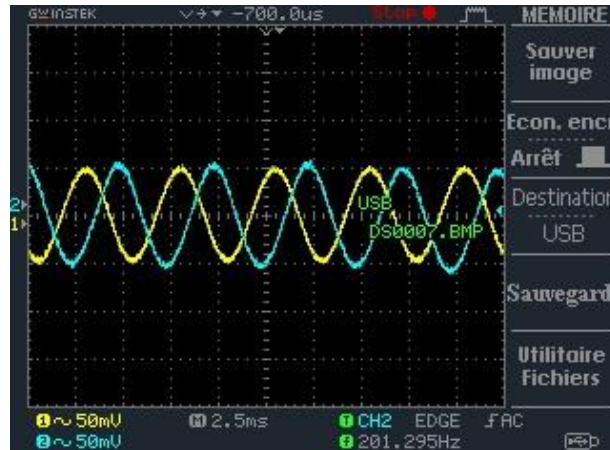


Figure III. 42 : Résultat de test avec une source sonore 200 Hz à un angle  $90^\circ$ .

- Pour  $\alpha=135^\circ$  :

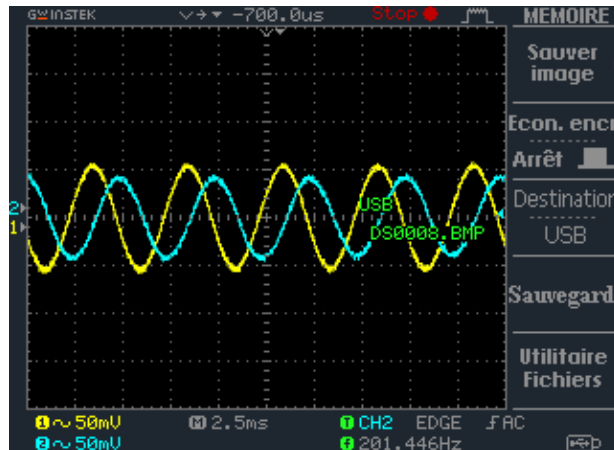


Figure III. 43 : Résultat de test avec une source sonore 200 Hz à un angle  $135^\circ$ .

- Pour  $\alpha=180^\circ$  :

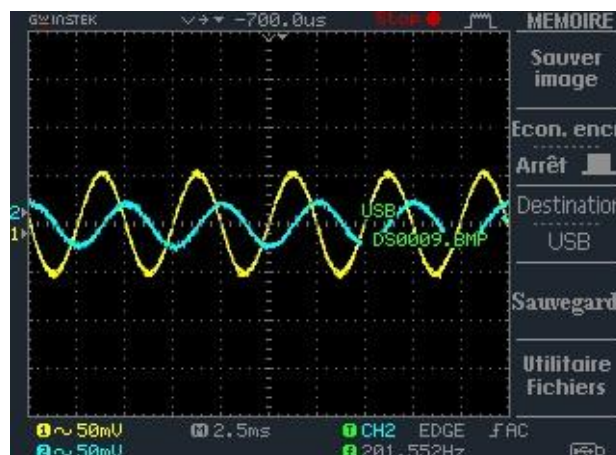


Figure III. 44 : Résultat de test avec une source sonore 200 Hz à un angle  $180^\circ$ .



Dans la fréquence de source sonore 500hz :

- Pour  $\alpha=0^\circ$  :

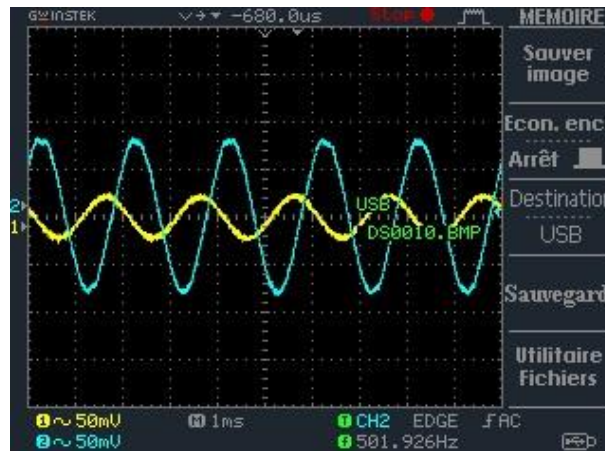


Figure III. 45 : Résultat de test avec une source sonore 500 Hz à un angle  $0^\circ$ .

- Pour  $\alpha=45^\circ$  :

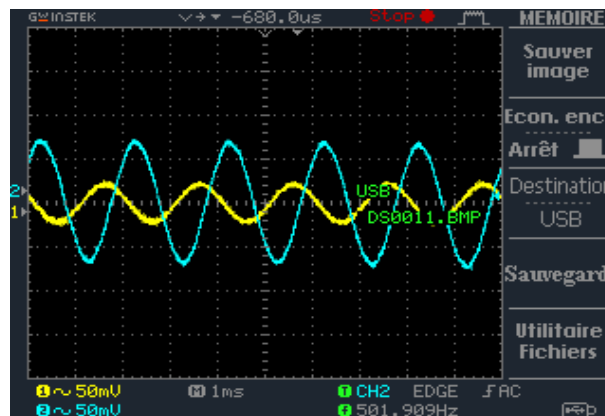


Figure III. 46 : Résultat de test avec une source sonore 500 Hz à un angle  $45^\circ$ .

- Pour  $\alpha=90^\circ$  :

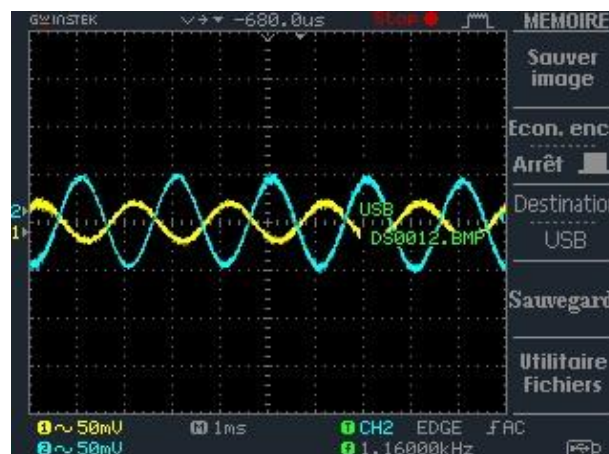


Figure III. 47 : Résultat de test avec une source sonore 500 Hz à un angle  $90^\circ$ .

- Pour  $\alpha=135^\circ$  :

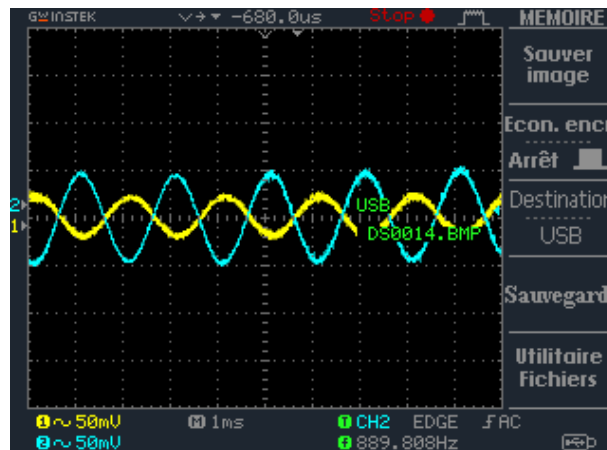


Figure III. 48 : Résultat de test avec une source sonore 500 Hz à un angle 135°.

- Pour  $\alpha=180^\circ$  :

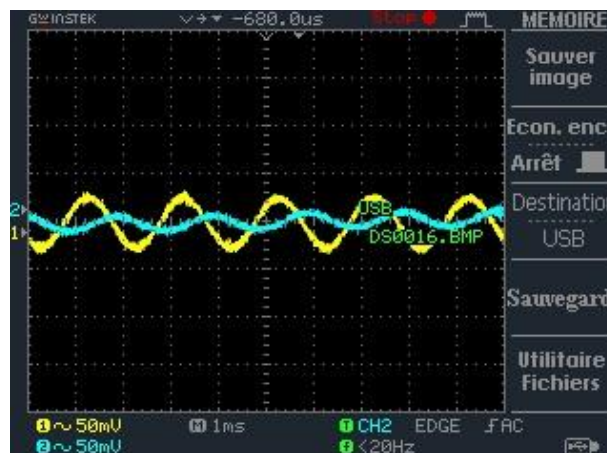


Figure III. 49 : Résultat de test avec une source sonore 500 Hz à un angle 180°.

Dans la fréquence de source sonore 1kHz :

- Pour  $\alpha=0^\circ$  :

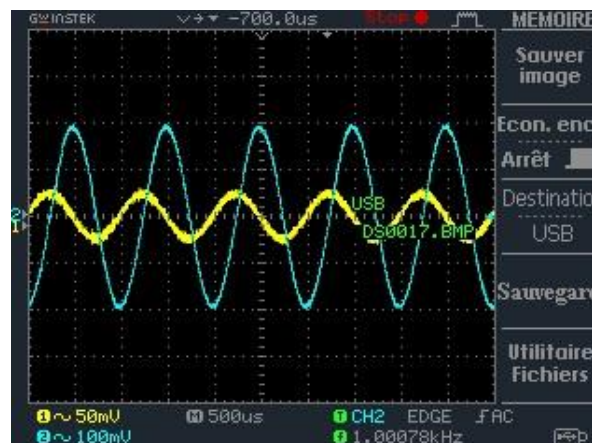


Figure III. 50 : Résultat de test avec une source sonore 1KHz à un angle 0°.

- Pour  $\alpha=45^\circ$  :

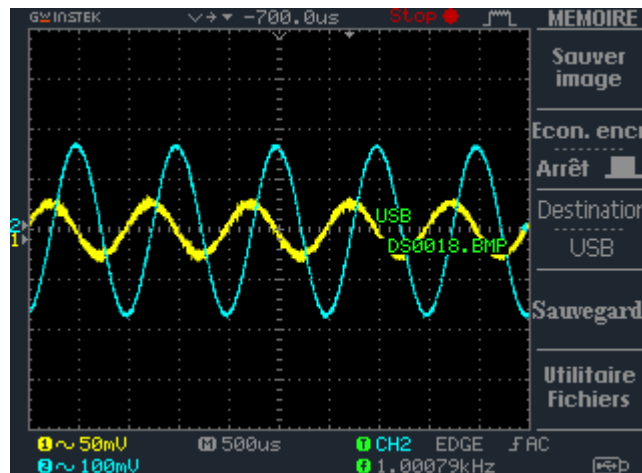


Figure III. 51 : Résultat de test avec une source sonore 1KHz à un angle  $45^\circ$ .

- Pour  $\alpha=90^\circ$  :

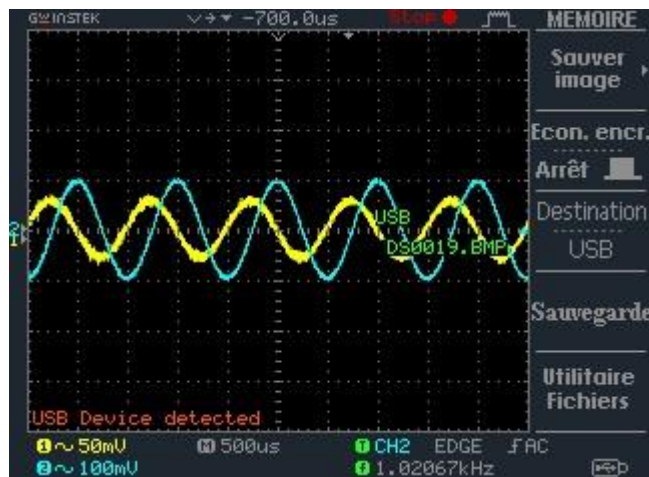


Figure III. 52 : Résultat de test avec une source sonore 1KHz à un angle  $90^\circ$ .

- Pour  $\alpha=135^\circ$  :

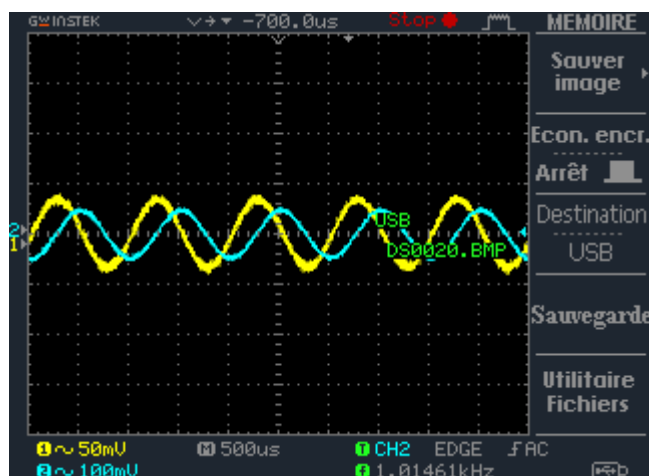


Figure III. 53 : Résultat de test avec une source sonore 1KHz à un angle  $135^\circ$

- Pour  $\alpha=180^\circ$  :

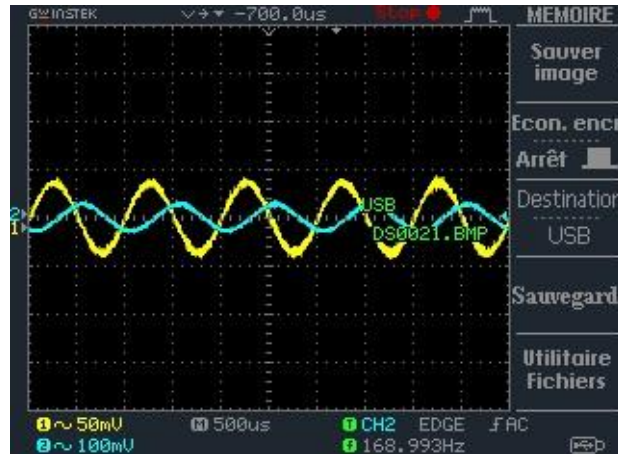


Figure III. 54 : Résultat de test avec une source sonore 1KHz à un angle  $180^\circ$ .

Dans la fréquence de source sonore 2khz :

- Pour  $\alpha=0^\circ$  :

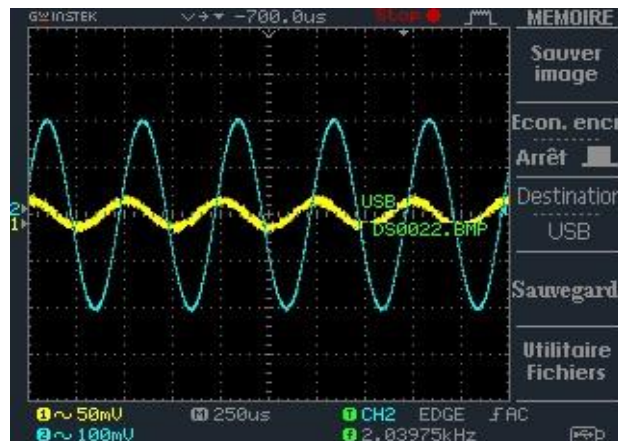


Figure III. 55 : Résultat de test avec une source sonore 2KHz à un angle  $0^\circ$ .

- Pour  $\alpha=45^\circ$  :

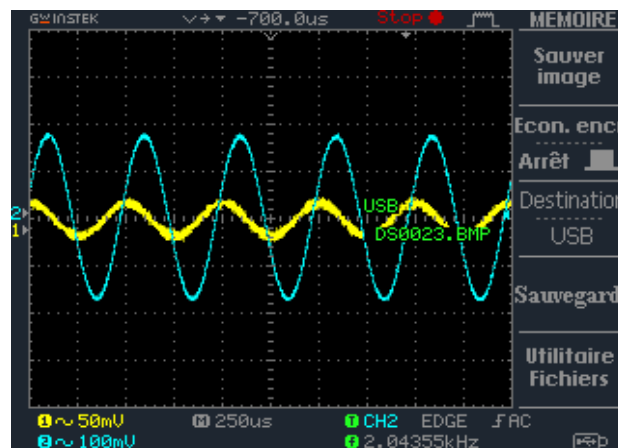


Figure III. 56 : Résultat de test avec une source sonore 2KHz à un angle  $0^\circ$ .

- Pour  $\alpha=90^\circ$  :

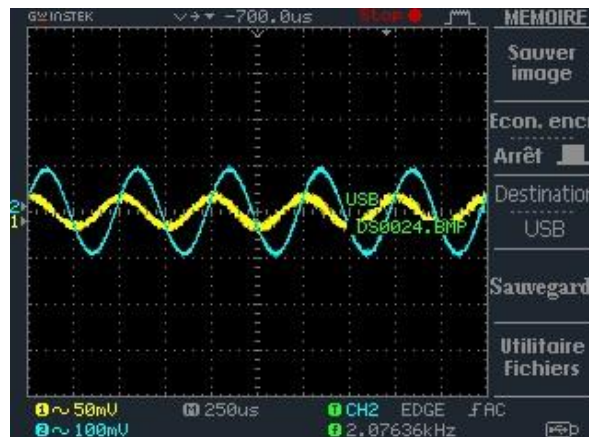


Figure III. 57 : Résultat de test avec une source sonore 2KHz à un angle  $90^\circ$ .

- Pour  $\alpha=135^\circ$  :

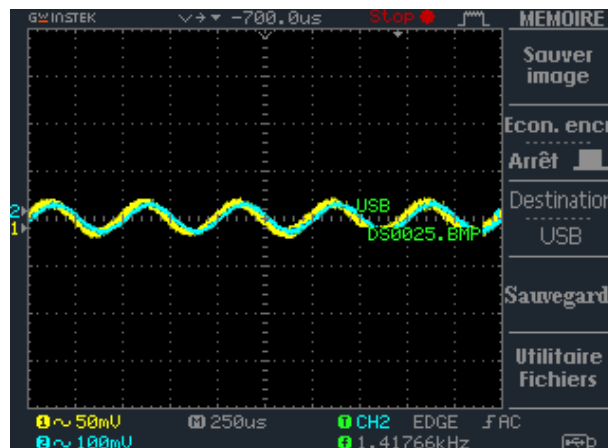


Figure III. 58 : Résultat de test avec une source sonore 2KHz à un angle  $135^\circ$ .

- Pour  $\alpha=180^\circ$  :

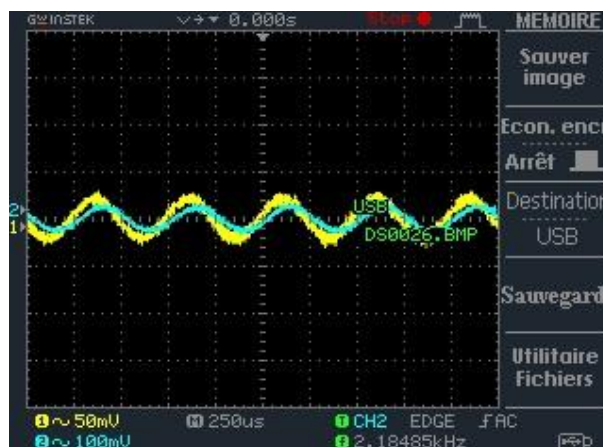


Figure III. 59 : Résultat de test avec une source sonore 2KHz à un angle  $180^\circ$ .

Dans la fréquence de source sonore 3khz :

- Pour  $\alpha=0^\circ$  :

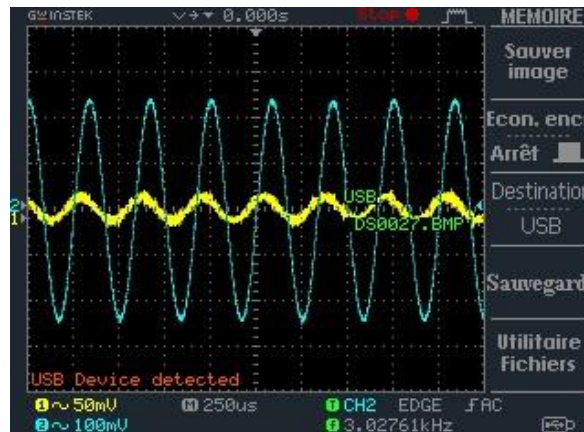


Figure III. 60 : Résultat de test avec une source sonore 3KHz à un angle  $0^\circ$ .

- Pour  $\alpha=45^\circ$  :

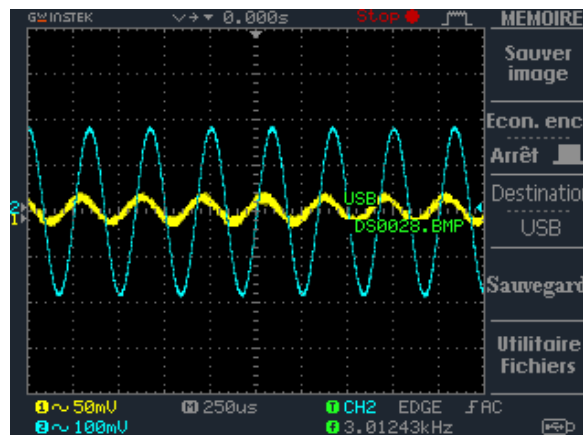


Figure III. 61 : Résultat de test avec une source sonore 3KHz à un angle  $45^\circ$ .

- Pour  $\alpha=90^\circ$  :

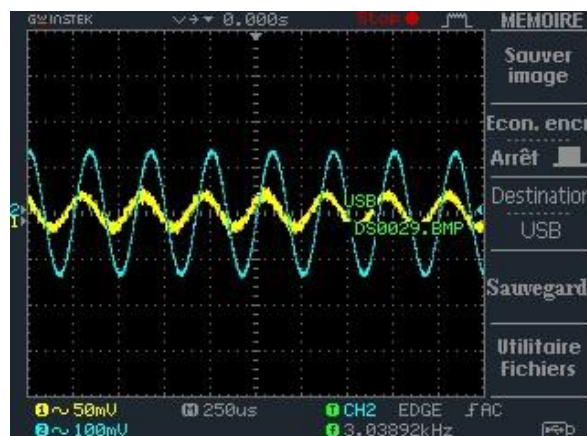


Figure III. 62 : Résultat de test avec une source sonore 3KHz à un angle  $90^\circ$ .

- Pour  $\alpha=135^\circ$  :

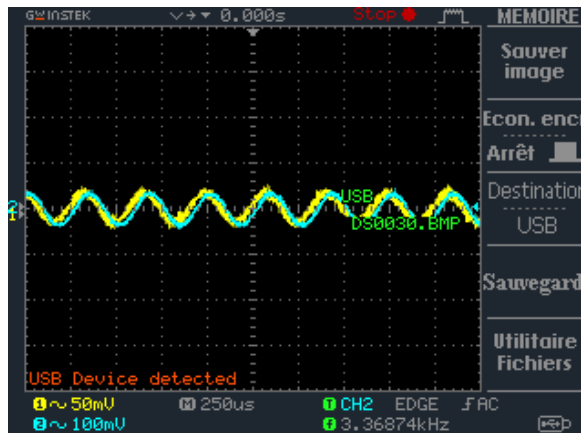


Figure III. 63 : Résultat de test avec une source sonore 3KHz à un angle 135°.

- Pour  $\alpha=180^\circ$  :

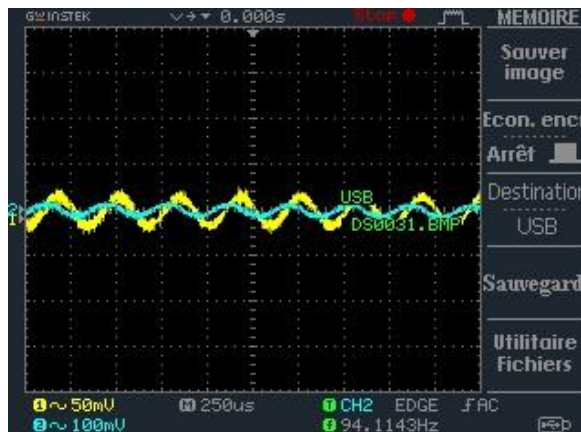


Figure III. 64 : Résultat de test avec une source sonore 3KHz à un angle 180°.

Dans la fréquence de source sonore 5KHz :

- Pour  $\alpha=0^\circ$  :

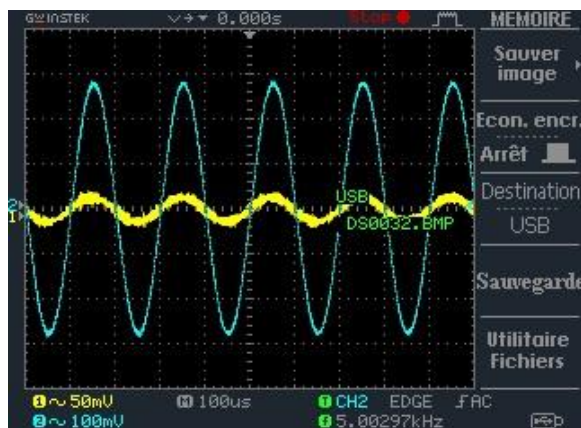


Figure III. 65 : Résultat de test avec une source sonore 5KHz à un angle 0°.

- Pour  $\alpha=45^\circ$  :

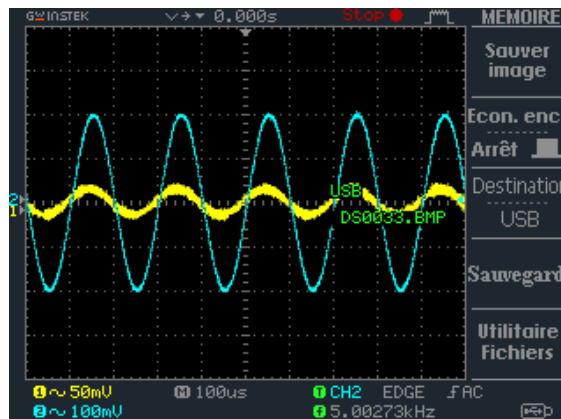


Figure III. 66 : Résultat de test avec une source sonore 5KHz à un angle  $45^\circ$ .

- Pour  $\alpha=90^\circ$  :

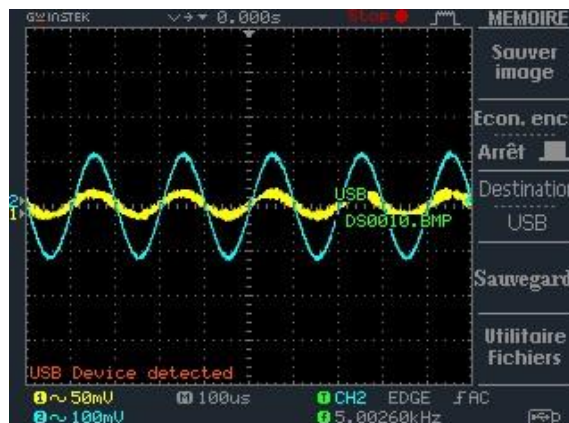


Figure III. 67 : Résultat de test avec une source sonore 5KHz à un angle  $90^\circ$ .

- Pour  $\alpha=135^\circ$  :

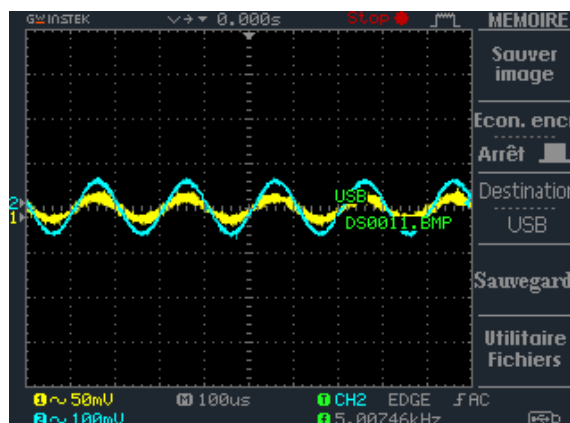


Figure III. 68 : Résultat de test avec une source sonore 5KHz à un angle  $135^\circ$ .



- Pour  $\alpha=180^\circ$  :

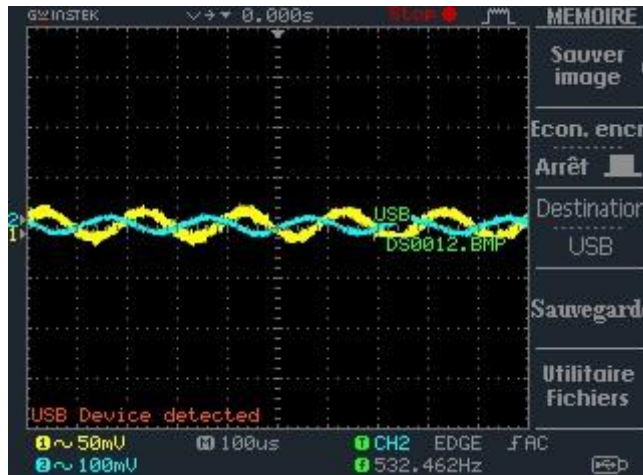


Figure III. 69 : Résultat de test avec une source sonore 5KHz à un angle 180°.



Figure III. 70 : Réponse cardioïde (mv) en fonction de variation des fréquences

### Remarque :

La fréquence de repliement est une certaine valeur qui permet à la réponse d'être amortie vers zéro.

Après avoir fait le calcul, nous avons trouvé qu'elle était de 5kHz (dans la réponse parfaite) énoncé suivant

Pour calculer la fréquence de repliement il faut voir la longueur d'onde  $\lambda$  :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$D = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow D = \frac{c}{2f}$$

Application numérique :

$$f = \frac{c}{2D} = \frac{340}{2 \times 34 \times 10^{-3}} = 5\text{kHz}$$

- C : vitesse de son 340m/s AIR.
- D : 34mm (la distance réelle de la base de triangle et la hauteur de triangle est D).

Nous avons remarqué après le test de microphone cardioïde, la réponse ne diminuait pas dans les angles principaux du microphone cardioïde (avant et arrière). La réduction n'a pas été observée dans les résultats finaux pour les angles fondamentaux du microphone cardioïde, mais il est probable qu'il mémorise à des angles inconnus, ce qui aide à négliger les sons non désirés aux côtés.

### III.8. Conclusion :

Après faire toutes les études et la simulation de partie pratique et après avoir atteint à la représentation appliquée, le succès du projet et l'obtenir des résultats attendus du microphone cardioïde nous calculons que :

Dans le design il faut exister plusieurs microphones pour permettre la fonction au microphone cardioïde, l'amélioration de la performance du microphone à partir de 1kHz jusqu'à une réponse parfaite à 5kHz.

La distance entre les microphones doit être comprise entre [17, 20, 34 et 70 mm] et ne doit pas dépasser ces limites raisonnables. La distance acceptable à partir de 17 mm, Distance supérieure à 70 millimètres la taille plus encombrement n'est pas acceptable.

Quant entre les microphones qui composent le microphone la distance c'est trop petit qui donne un déphasage très faible et la réponse ne donne pas réponse cardioïde est donne une forme omnidirectionnelle.

La distance entre la source sonore et le microphone cardioïde n'affecte pas la forme de la réponse cardioïde.

## **Conclusion générale :**

La réalisation du projet s'est concentrée sur la mise en œuvre d'un système composé d'un mélangeur et de module des microphones MEMS. Les configurations de microphones ont été simulées et testées afin de vérifier leur réponse directionnelle. Le système a ensuite été réalisé sur une plaque d'essai, permettant des tests en conditions réelles

Les mesures ont été effectuées dans le laboratoire de génie électrique alors qu'il devrait être dans une chambre anéchoïque pour minimiser les interférences et les bruits externes. Le dispositif de mesure comprenait un générateur de signaux, un haut-parleur, et un oscilloscope pour lire le signal de sortie de microphone 3 et la sortie finale. La configuration triangulaire des microphones et le mélangeur ont été testés à différentes fréquences et angles pour évaluer la performance directionnelle.

Les tests ont montré que le système réalisé montre que la réponse cardioïde est efficace.

En particulier à partir de 1 kHz et plus. Les résultats obtenus pour les fréquences allant de 200 Hz à 5 kHz ont été analysés, et il a été observé que la réponse cardioïde devient plus précise et performante à des fréquences proches de 1 kHz. À cette fréquence, la directivité est bien définie, et le système est capable de discriminer efficacement les sons provenant de différentes directions.

Les résultats attendus ont été confirmés par les tests pratiques. Les configurations testées ont montré que les géométries triangulaires de trois microphones obtiennent une directivité cardioïde nette avec des microphones MEMS et atteignant les objectifs visés par le projet.

L'idée de configurer un microphone cardioïde avec une compensation des retards par un filtre passe-tout constitue une nouvelle idée que nous pourrions inclure comme un brevet.

## Références Bibliographiques :

[1]. "Guide sur les bases des microphones : Que fait un microphone ?". Audio-Technica, <https://www.audio-technica.com/fr-ca/support/guide-sur-les-bases-des-microphones-que-fait-un-microphonedyna>.

-Déconnecter de site 17 Mai 2024.

[2]. "Les types de microphones." Audiofanzine, n.d. <https://fr.audiofanzine.com/microphone/editorial/dossiers/les-types-de-microphones.html>

-Déconnecter de site 17 Mai 2024.

[3]. Levy, Max Maxfield. "Introduction to Microelectromechanical Systems (MEMS) Microphone Technology." All About Circuits, 19 Avril .2018, <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-microelectromechanical-systems-microphone-technology/>.

-Déconnecter de site 2 juin 2024.

[4]. "MEMS Microphones." STMicroelectronics, n.d., <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/mems-microphones.html>.

-Déconnecter de site 12 mai 2024.

[5]. "Le Microphone." Devenir Ingé Son, n.d., [https://deveniringeson.com/le-microphone/#:~:text=Microphone%20%C3%A9lectrostatique%20%3A,\(contre%2D%C3%A9lectrode\)%20fixe](https://deveniringeson.com/le-microphone/#:~:text=Microphone%20%C3%A9lectrostatique%20%3A,(contre%2D%C3%A9lectrode)%20fixe).

-Déconnecter de site 17 mai 2024.

[6]. "Directivité des microphones." Projet Home Studio, n.d., <https://www.projethomestudio.fr/directivite-microphones/>.

-Déconnecter de site 18 mai 2024.

[7]. Beamforming, Microphone Array. "Application Note AN-1140." InvenSense Inc., Dec 31 (2013) : 12.

[8]. "AOP :Montages de Base." Électronique.fr, n.d., [http://www.elektronique.fr/cours/AOP/aop-montages-de-base.php#aop\\_1-05](http://www.elektronique.fr/cours/AOP/aop-montages-de-base.php#aop_1-05).

Déconnecter de site 18 mai 2024.

[9]. Houam, Lotfi. Fonction Électronique. Document de cours, 12 oct. 2021.

[10]. "Filtre passe-bas du 2ème ordre." électronique.aop.free.fr, n.d.,  
[http://electronique.aop.free.fr/AOP\\_lineaire\\_F/Filtre\\_PBas\\_2.html](http://electronique.aop.free.fr/AOP_lineaire_F/Filtre_PBas_2.html).

-Déconnecter de site 10 mai 2024.

[11]. Zumbahlen, Hank. "Allpass filters." Analog Devices (2012).

-Déconnecter de site 18 mai 2024.