

# Projet d'électronique Débruitage de Vuvuzela



Kenji Sevik  
Jean Lepers

# 1 Sommaire

<b>1 Sommaire</b>	<b>2</b>
<b>2 Introduction</b>	<b>3</b>
2.1 Problématique et contexte	3
2.2 Présentation générale du projet	3
2.3 Objectifs	3
<b>3 Méthodologie</b>	<b>4</b>
3.1 Analyse spectrale du signal	4
3.2 Étude et comparaison des filtres réjecteurs	6
3.2.1 Pourquoi le circuit RLC ne convient pas ?	7
3.2.2 Pourquoi le circuit Twin T ne convient pas ?	7
3.2.3 Pourquoi le circuit Twin T actif convient ?	7
3.3 Mise en cascade	7
<b>4 Résultats et analyse</b>	<b>8</b>
<b>5 Conclusion</b>	<b>8</b>
<b>6 Annexes</b>	<b>9</b>
6.1 Calcul des fonctions de transfert	9
6.1.1 Fonction de transfert du filtre RLC	9
6.1.2 Fonction de transfert du Twin T	10
6.1.3 Fonction de transfert du Twin T actif	10
6.2 Réponse du Programme component calculation	11
6.3 Simulations LTspice	13
6.4 Câblages sur plaque labdec	16
6.5 Relevés Oscilloscope	18

## 2 Introduction

### 2.1 Problématique et contexte

Lors de la Coupe du Monde de football 2010, organisée en Afrique du Sud, le bruit continu des vuvuzelas a constitué une nuisance sonore notable pour les spectateurs, les joueurs et les auditeurs. Ces instruments produisent un son monotone et puissant à des fréquences spécifiques, perturbant les retransmissions audio des matchs. Cette situation a soulevé une problématique technique majeure : comment isoler efficacement les fréquences indésirables sans altérer le contenu sonore utile ?

Le projet propose de répondre à cette question en utilisant des approches basées sur les filtres analogiques, offrant ainsi une solution applicable non seulement dans ce contexte, mais également dans d'autres scénarios de traitement audio.

### 2.2 Présentation générale du projet

Dans le cadre de ce projet, nous explorons les principes fondamentaux du traitement des signaux appliqués à une problématique concrète : l'amélioration de la qualité sonore d'un enregistrement contenant des nuisances. Plus précisément, le projet consiste à analyser et traiter un signal sonore capturé lors de la Coupe du Monde 2010, un événement mondialement célèbre, mais également marqué par l'omniprésence du bruit des vuvuzelas. Ce travail met en œuvre des concepts avancés en électronique, notamment la conception, la simulation et la validation expérimentale de filtres analogiques.

### 2.3 Objectifs

L'objectif principal de ce projet est d'atténuer ou de supprimer les bruits indésirables générés par les vuvuzelas tout en préservant la qualité des commentaires sportifs présents dans le signal sonore. Pour atteindre cet objectif, nous devons :

- Identifier les fréquences caractéristiques des vuvuzelas grâce à une analyse spectrale.
- Étudier et concevoir des filtres réjecteurs capables d'éliminer ces fréquences spécifiques.
- Comparer les performances des filtres conçus, à la fois en simulation et en laboratoire.

## 3 Méthodologie

### 3.1 Analyse spectrale du signal

Pour analyser l'enregistrement sonore et identifier les composantes fréquentielles caractéristiques des vuvuzelas, il est nécessaire de charger le fichier audio, qui est fourni au format .wav. En Python, cette opération peut être réalisée à l'aide de la fonction load.

Lorsque le fichier est chargé, Python retourne deux variables principales :

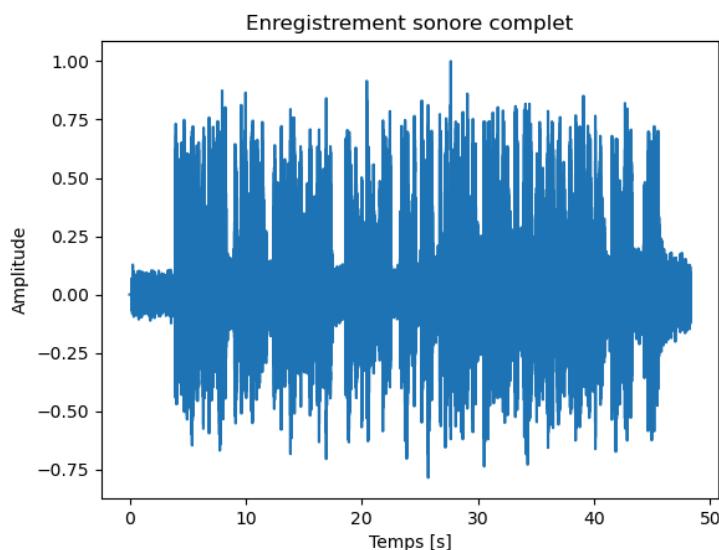
fs : la fréquence d'échantillonnage du signal audio, exprimée en Hertz (Hz).  
data : un tableau numpy contenant les échantillons sonores  
 $x[n]=x(t) | t=n/fs$   $x[n]=x(t) | t=n/fs$ .

Les échantillons peuvent ensuite être normalisés pour avoir des valeurs comprises entre -1 et 1, ce qui est une étape essentielle pour assurer une manipulation et une analyse cohérentes des données.

```
# ====== Chargement du son et normalisation de la valeur des échantillons
=====

fs, data = wavfile.read("../wav/vuvuzela.wav")
t = np.arange(len(data))/fs
data_normalized = data/np.max(np.abs(data))

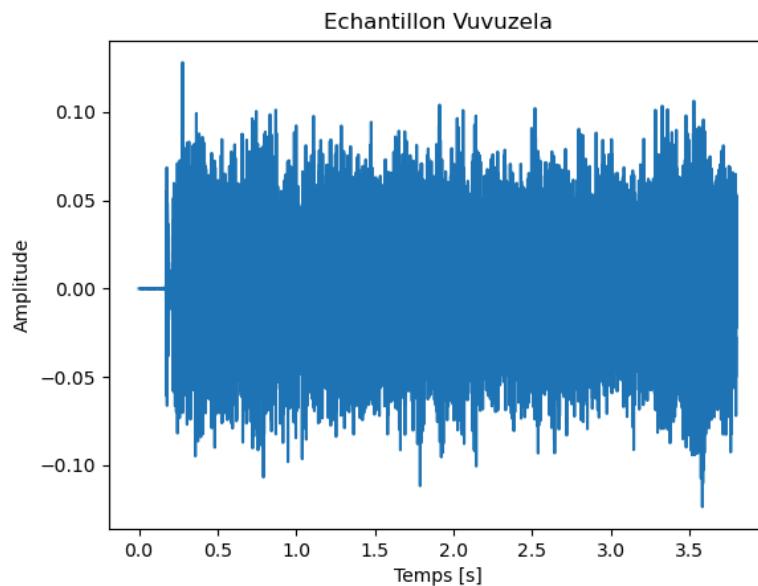
tools.affichage_graph(t, data_normalized, "Temps [s]", "Amplitude",
None, None, "Enregistrement sonore complet")
```



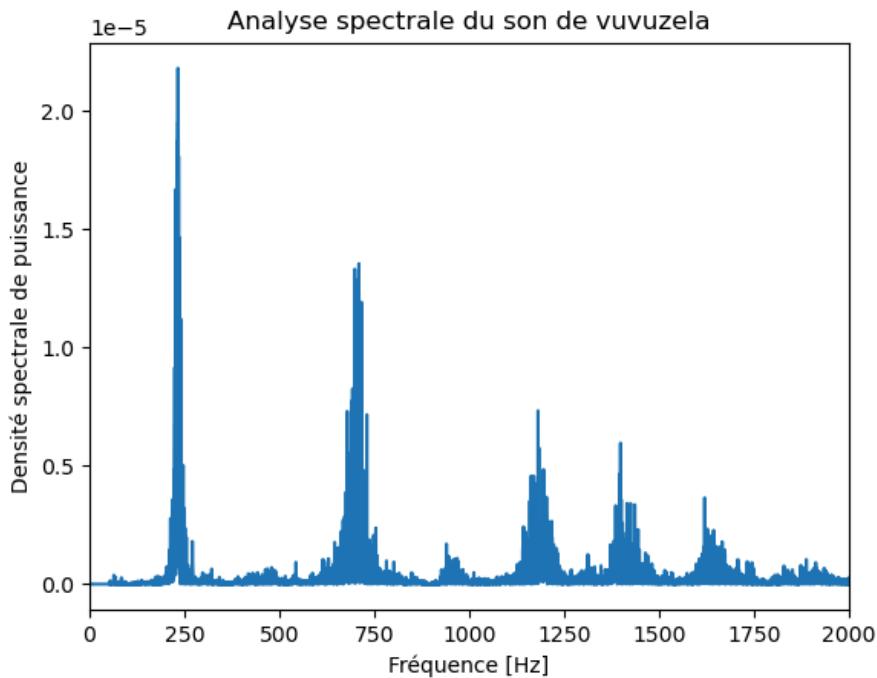
Maintenant que nous avons chargé le fichier audio avec les commentaires sportifs inclus nous allons isoler une partie où l'on entend que du vuvuzela et ainsi identifier ses composantes fréquentielles.

Nous avons choisi d'isoler le début de l'enregistrement, de 0 à 3.8s, car c'est la section avec du vuvuzela exclusivement la plus longue.

On pourrait faire plusieurs sections et les superposer ensuite, mais nous n'avons pas trouvé ça très utile dans le cadre du vuvuzela car les composantes fréquentielles sont clairement distinctes et identifiables seulement avec cette première section.



Sur cet échantillon de vuvuzela seul, nous avons fait une analyse spectrale pour identifier ses différentes composantes fréquentielles.



Ici nous avons choisi de prendre en compte les 4 premières fréquences ce qui nous paraît être raisonnable. Si en testant nous nous rendons compte qu'il faut plus de filtre nous aviserons.

On voit 4 principales fréquences :

$$\begin{aligned}f_{01} &= 235 \text{ Hz} \\f_{02} &= 710 \text{ Hz} \\f_{03} &= 1181 \text{ Hz} \\f_{04} &= 1402 \text{ Hz}\end{aligned}$$

Les pulsations propres correspondantes sont :

$$\begin{aligned}\omega_{01} &= 1476,55 \text{ rad.s}^{-1} \\\omega_{02} &= 4461,06 \text{ rad.s}^{-1} \\\omega_{03} &= 7420,44 \text{ rad.s}^{-1} \\\omega_{04} &= 8809,02 \text{ rad.s}^{-1}\end{aligned}$$

Nous allons à présent calculer les facteurs d'amortissement m nécessaires pour chaque filtre, le but étant de couper au maximum les sons de vuvuzela en perturbant au minimum le signal audio pour continuer à entendre distinctement les commentaires.

Nous mesurons les largeurs de bande, ici 25, 51, 60, 64 (en Hz). Et nous utilisons cette formule pour trouver le coefficient d'amortissement.

$$m = \frac{\text{largeur bande}}{2 \times \text{fréquence}}$$

Ce programme python nous permet de les calculer pour les 4 filtres.

```
bands = [25, 51, 60, 64]
frequencies = [235, 710, 1181, 1402]
for idx in range (0, 4):
```

```

m = bands[idx] / (2 * frequencies[idx])
print("band : " + str(bands[idx]) + ", frequency : " +
str(frequencies[idx]) + ", m : " + str(m) + "\n")

```

On obtient:

```

band : 25, frequency : 235, m : 0.05319148936170213
band : 51, frequency : 710, m : 0.03591549295774648
band : 60, frequency : 1181, m : 0.02540220152413209
band : 64, frequency : 1402, m : 0.02282453637660485

```

## 3.2 Étude et comparaison des filtres réjecteurs

Pour mener à bien le projet il nous faudra donc une cascade de 4 filtres réjecteurs. 3 topologies de filtres réjecteurs nous sont proposées (2 passifs, 1 actif), nous allons donc devoir déterminer lesquels nous utiliserons pour notre besoin.

Nous devons tout d'abord trouver les fonctions de transfert de ces filtres pour avoir les composants en fonction des paramètres  $T_0$ ,  $w_0$  et  $m$ . (cf. [6.1 Calcul des fonctions de transfert](#))

Après avoir calculé les composants en fonction des paramètres nous avons fait un programme python qui calcule les composants pour les 3 circuits et les 4 fréquences précédemment identifiés. (cf. [6.2 Réponse du Programme component calculation](#))

### 3.2.1 Pourquoi le circuit RLC ne convient pas ?

Nous voyons que le filtre RLC ne peut pas être utilisé car les valeurs de résistances sont trop basses pour pouvoir avoir une bonne précision, avec ce genre de circuit nous arriverons très difficilement à la bonne fréquence en câblage.

### 3.2.2 Pourquoi le circuit Twin T ne convient pas ?

D'après nos simulations LTspice, (cf.[6.3 Simulations LTspice](#)) on voit que le circuit à une bande trop large et qu'il va trop détruire le signal audio. Ce filtre n'est donc pas adapté pour notre cahier des charges.

### 3.2.3 Pourquoi le circuit Twin T actif convient ?

Le circuit Twin T actif convient car il possède des valeurs possibles à câbler avec une certaine précision et sa simulation LTspice valide de cahier des charges. (cf.[6.3 Simulations LTspice](#))

Nous avons donc câblé deux filtres réjecteurs Twin-T actifs (cf. [6.4 Câblages sur plaque labdec](#)) en cascade et nous avons obtenu ces résultats plutôt satisfaisants : une réduction de -30dB en 261 Hz et une réduction de -13dB en 814 Hz. (cf.[6.5 Relevés Oscilloscope](#))

### 3.3 Mise en cascade

Comme vu précédemment, le seul filtre qui convient est le Rejecteur Twin-T Actif. Nous avons donc décidé d'en mettre 4 en cascade pour répondre au cahier des charges.

Notre simulation Ltspice confirme le bon fonctionnement théorique de la mise en cascade des 4 filtres Twin T actifs. (cf [6.3 Simulations LTspice](#))

Comme nous ne pouvons que câbler 4 AOP sur la plaque labdec nous avons décidé de nous associer à M. Bonvarlet et Mme Viguier afin de faire une cascade de 4 filtres. Nous avons donc mis notre cascade de deux Twin T actifs en cascade avec les deux Twin T actifs de nos collaborateurs pour rejeter ainsi les 4 fréquences identifiées précédemment.

Les filtres en cascade fonctionnent plutôt bien. Nous sommes assez proches des valeurs théoriques. (cf.[6.5 Relevés Oscilloscope](#))

## 4 Résultats et analyse

Les résultats obtenus par calcul théorique et par simulation se révèlent être cohérents et identiques. Cette correspondance valide l'exactitude des calculs de fonction de transfert utilisés pour définir les caractéristiques des filtres. Les diagrammes de Bode générés en simulation concordent parfaitement avec les courbes théoriques, en termes de fréquence propre, de coefficient d'amortissement, et de gain.

Les mesures réalisées en laboratoire sur les filtres physiques présentent des valeurs très proches de celles prédictes théoriquement. Bien que de légères variations aient été observées, ces écarts sont sûrement dues aux tolérances des composants électroniques utilisés notamment des résistances.

Les différences mineures relevées lors des expérimentations soulignent l'importance de prendre en compte les tolérances des composants dans les calculs théoriques. Ces résultats renforcent la robustesse des filtres conçus et valident leur efficacité dans la suppression des fréquences indésirables tout en préservant les signaux utiles.

## 5 Conclusion

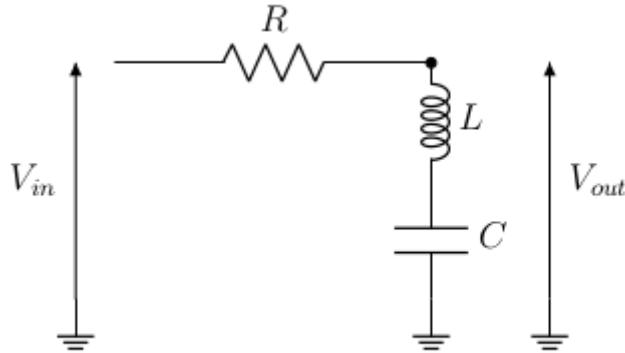
En conclusion, les résultats obtenus confirment la concordance globale entre les approches théorique, simulée et expérimentale, tout en mettant en lumière des aspects pratiques à considérer lors de la mise en œuvre réelle des filtres. Ces observations appuient la fiabilité des solutions développées pour atténuer le bruit des vuvuzelas.

Cependant des améliorations pourraient être mises en place, notamment l'utilisation de potentiomètres sur la valeur de R des Twin T actifs. Cela permettra de régler finement la fréquence de cassure de ces filtres.

# 6 Annexes

## 6.1 Calcul des fonctions de transfert

### 6.1.1 Fonction de transfert du filtre RLC



(a) Filtre Rejecteur RLC

On fait une impédance équivalente avec:

$$Z_{eq} = Z_L + Z_C$$

Pont diviseur de tension:

$$\begin{aligned} V_{out} &= V_{in} \times \frac{Z_{eq}}{Z_R + Z_{eq}} \\ V_{out} &= V_{in} \times \frac{Z_L + Z_C}{Z_R + Z_L + Z_C} \\ H(p) &= \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Lp + \frac{1}{Cp}}{R + Lp + \frac{1}{Cp}} \\ H(p) &= \frac{LCp^2 + 1}{LCp^2 + RCp + 1} \\ H(p) &= \frac{T_0(\frac{1}{w_0^2}p^2 + 1)}{\frac{1}{w_0^2}p^2 + \frac{2m}{w_0}p + 1} \end{aligned}$$

On a donc les relations suivantes entre les composants et les paramètres  $T_0$ ,  $w_0$  et  $m$

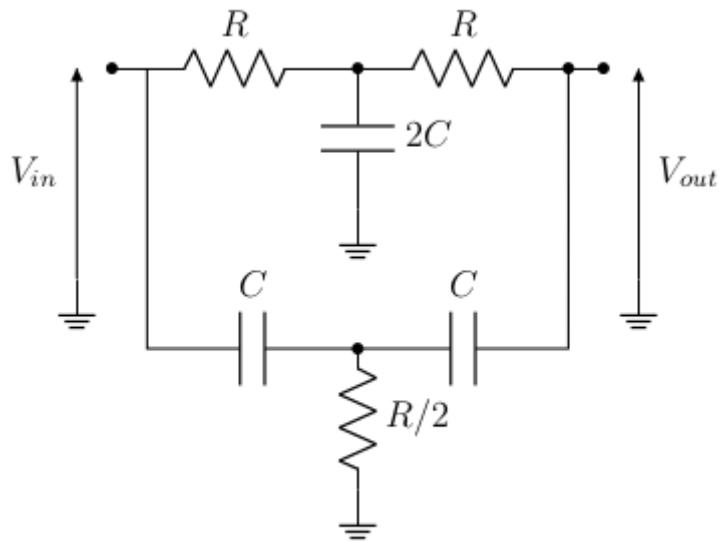
$$T_0 = 1$$

$$\frac{1}{w_0^2} = LC$$

$$\frac{2m}{w_0} = RC$$

$$\left[ \frac{s^2 + \frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} \right]$$

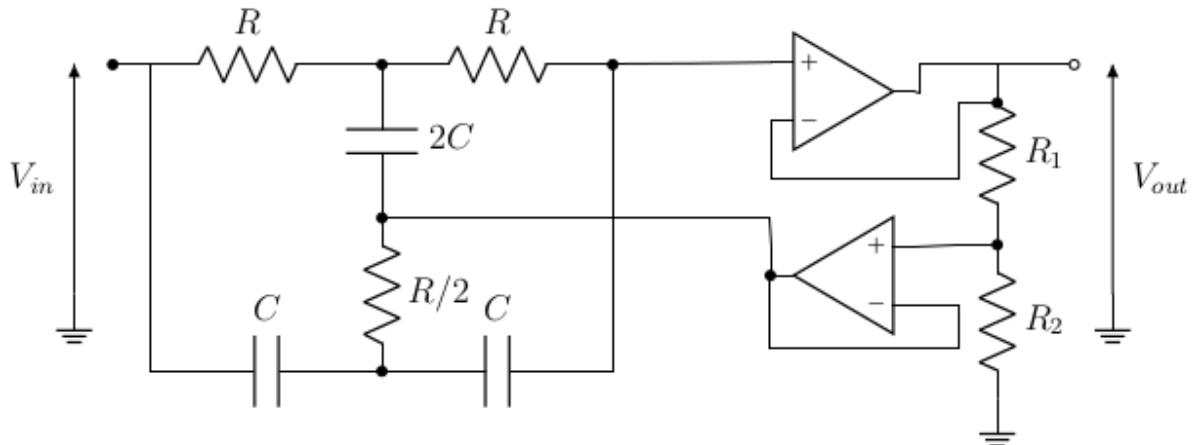
### 6.1.2 Fonction de transfert du Twin T



(b) Filtre Rejecteur Twin-T Passif

$$\left[ \frac{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{R^2C^2}}{s^2 + \frac{3}{2RC}s + \frac{1}{R^2C^2}} \right]$$

### 6.1.3 Fonction de transfert du Twin T actif



(c) Filtre Rejecteur Twin-T Actif

$$\left[ \frac{(RC)^2 s^2 + 1}{(RC)^2 s^2 + \frac{RC}{1+\frac{R_5}{R_4}} s + 1} \right]$$

## 6.2 Réponse du Programme component calculation

```
(base) jean@laptop:~/Documents/ENIB/S4/ELEC/Projet_vuvuzela/src$ python3  
componant_calculation.py
```

Filtre RLC Notch

Pour la fréquence 235 Hz :

$$R = 65.26 \Omega$$

$$L = 4.17e-01 H$$

$$C = 1.10e-06 F$$

Pour la fréquence 710 Hz :

$$R = 14.26 \Omega$$

$$L = 4.57e-02 H$$

$$C = 1.10e-06 F$$

Pour la fréquence 1181 Hz :

$$R = 6.13 \Omega$$

$$L = 1.65e-02 H$$

$$C = 1.10e-06 F$$

Pour la fréquence 1402 Hz :

$$R = 4.75 \Omega$$

$$L = 1.17e-02 H$$

$$C = 1.10e-06 F$$

Filtre TwinT Notch

Pour la fréquence 235 Hz :

$$R = 615.69 \Omega$$

$$C = 1.10e-06 F$$

Pour la fréquence 710 Hz :

$$R = 203.78 \Omega$$

$$C = 1.10e-06 F$$

Pour la fréquence 1181 Hz :

$$R = 122.51 \Omega$$

$$C = 1.10e-06 F$$

Pour la fréquence 1402 Hz :

$$R = 103.20 \Omega$$

$$C = 1.10e-06 F$$

## Filtre ActiveTwinT Notch

Pour la fréquence 235 Hz :

R = 615.69 Ω  
C = 1.10e-06 F  
R1 = 10000.00 Ω  
R2 = 84339.62 Ω

Pour la fréquence 710 Hz :

R = 203.78 Ω  
C = 1.10e-06 F  
R1 = 10000.00 Ω  
R2 = 132857.14 Ω

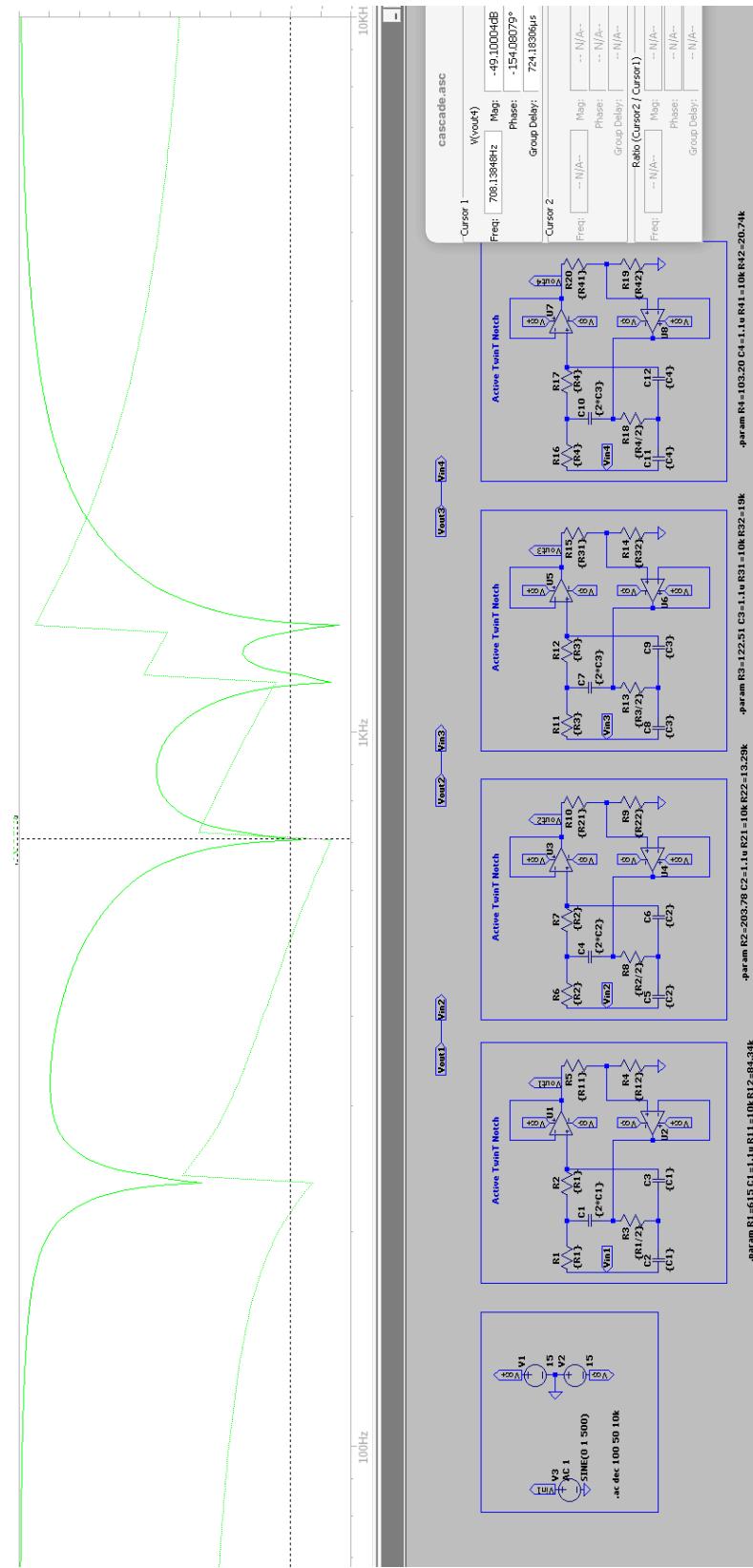
Pour la fréquence 1181 Hz :

R = 122.51 Ω  
C = 1.10e-06 F  
R1 = 10000.00 Ω  
R2 = 190000.00 Ω

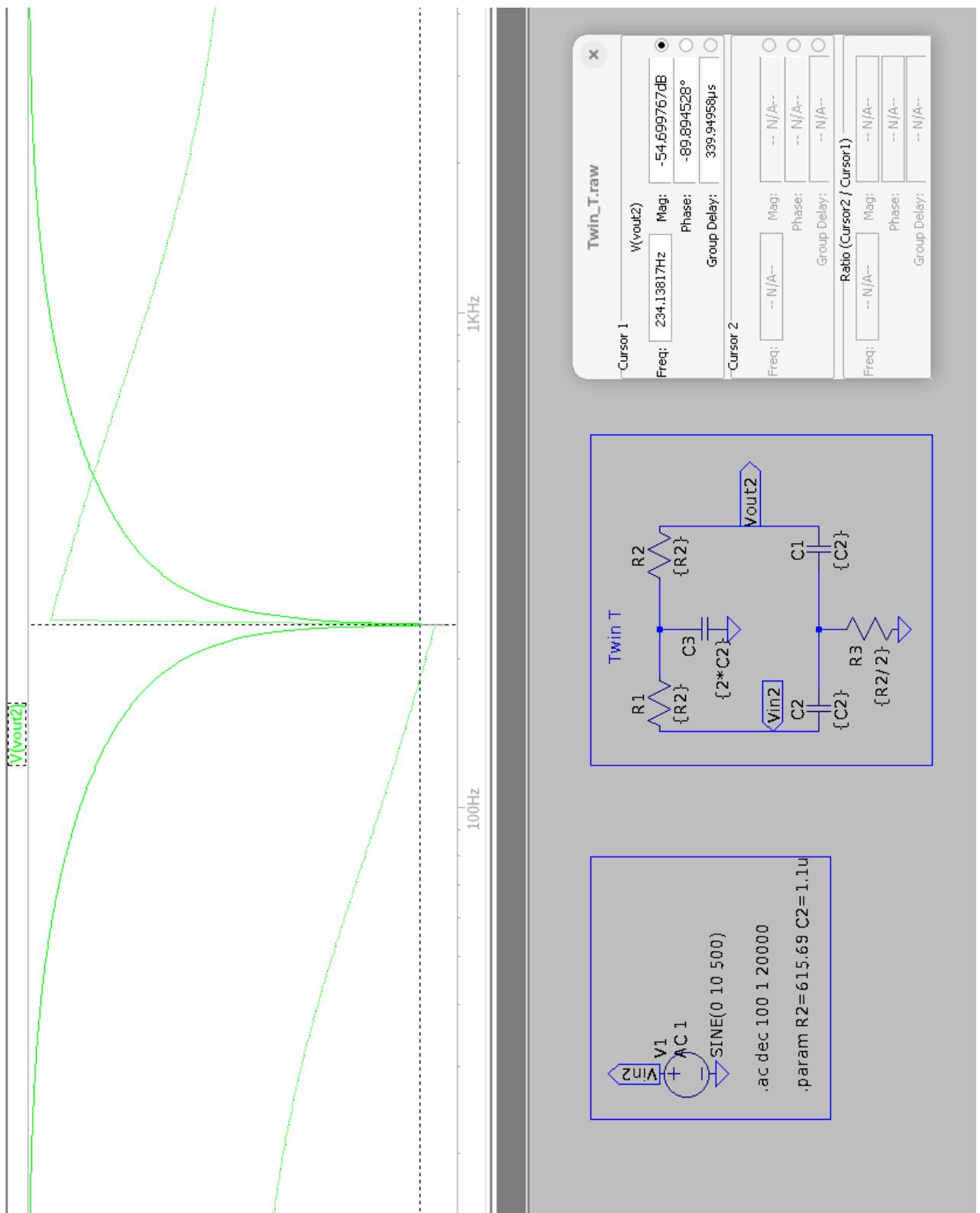
Pour la fréquence 1402 Hz :

R = 103.20 Ω  
C = 1.10e-06 F  
R1 = 10000.00 Ω  
R2 = 207391.30 Ω

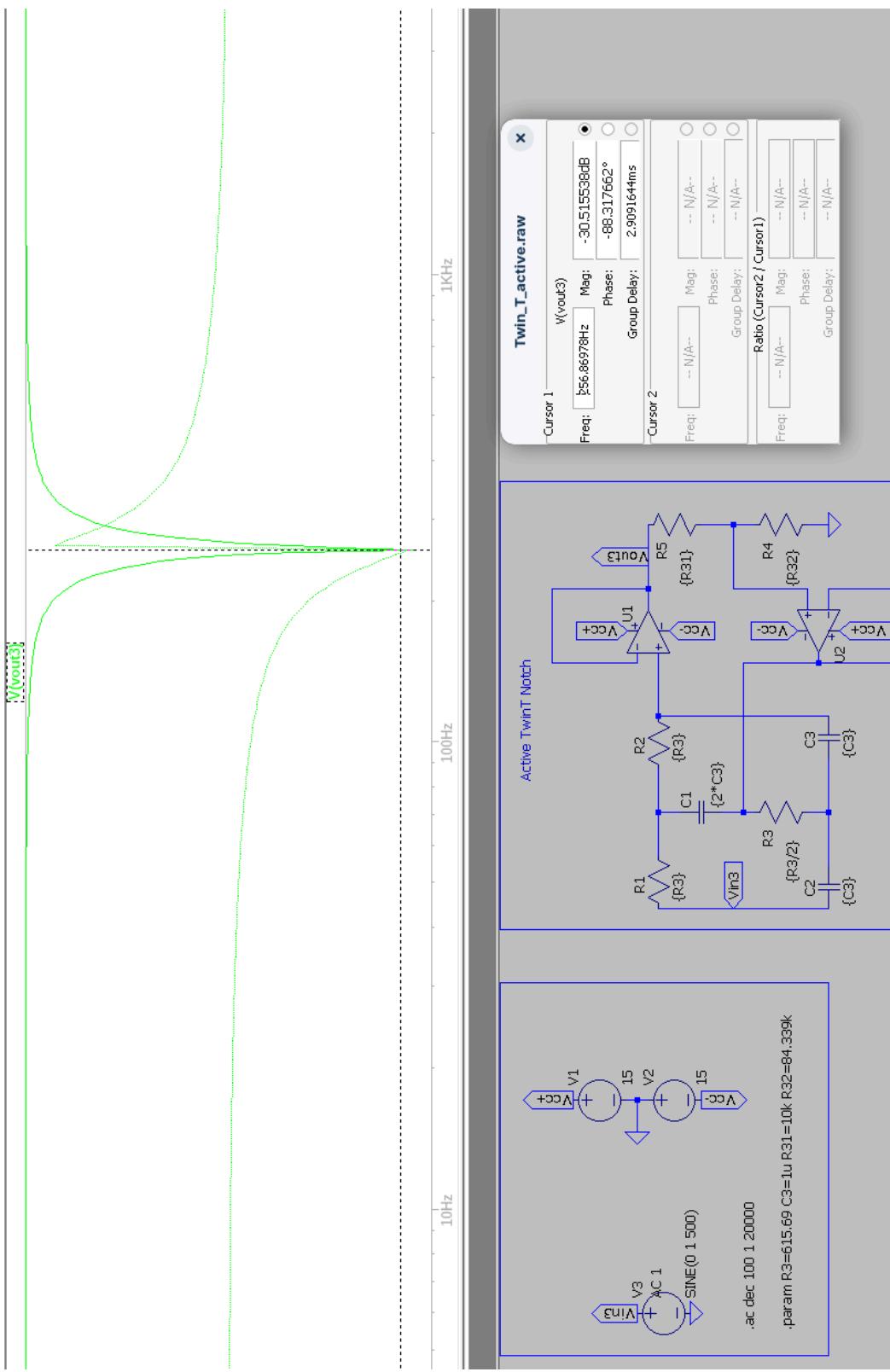
## 6.3 Simulations LTspice



Simulation LTspice de 4 Twin T actifs en cascade

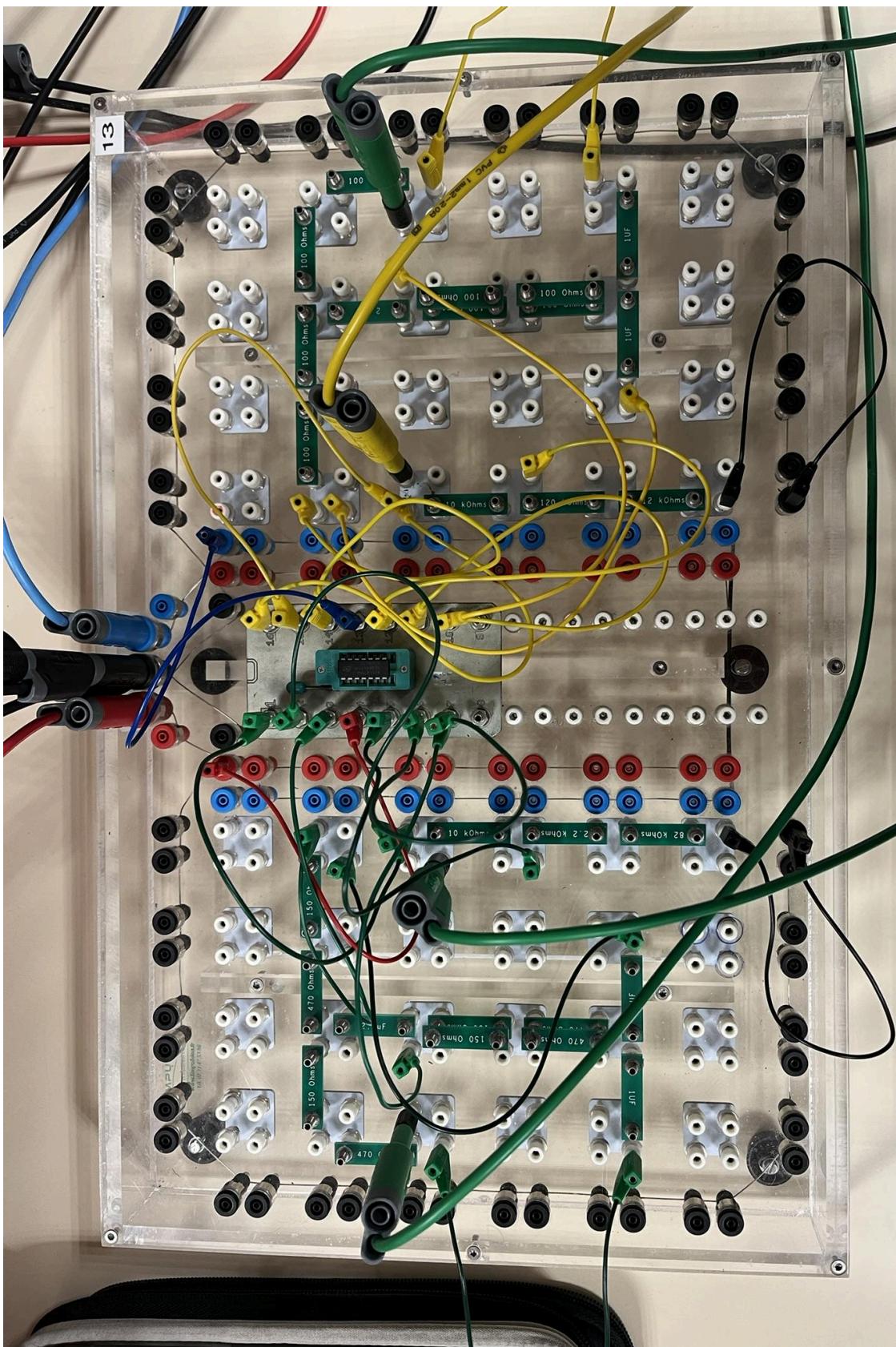


Simulation LTSpice Twin T

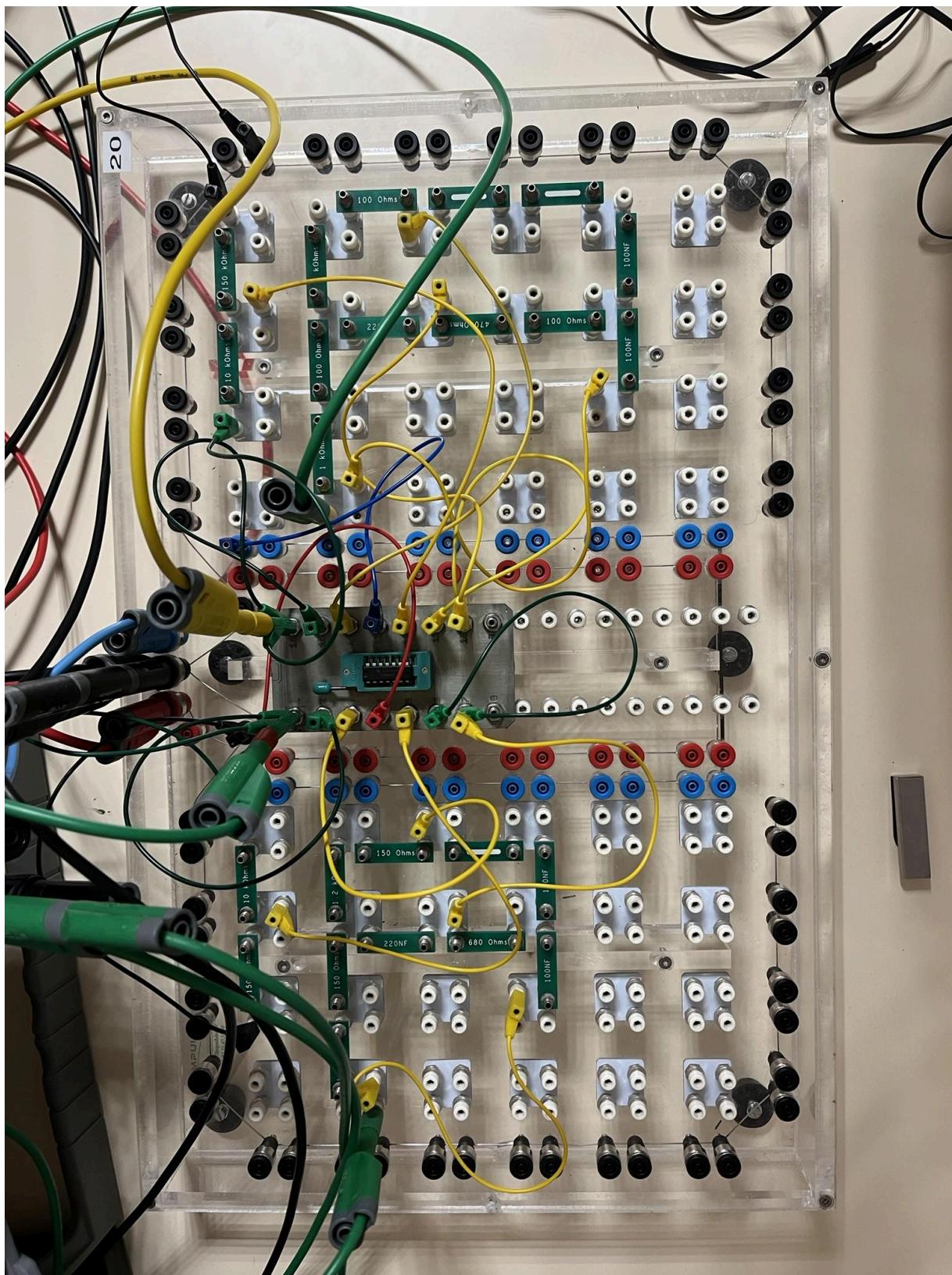


Simulation LTspice Twin T actif

## 6.4 Câblages sur plaque labdec

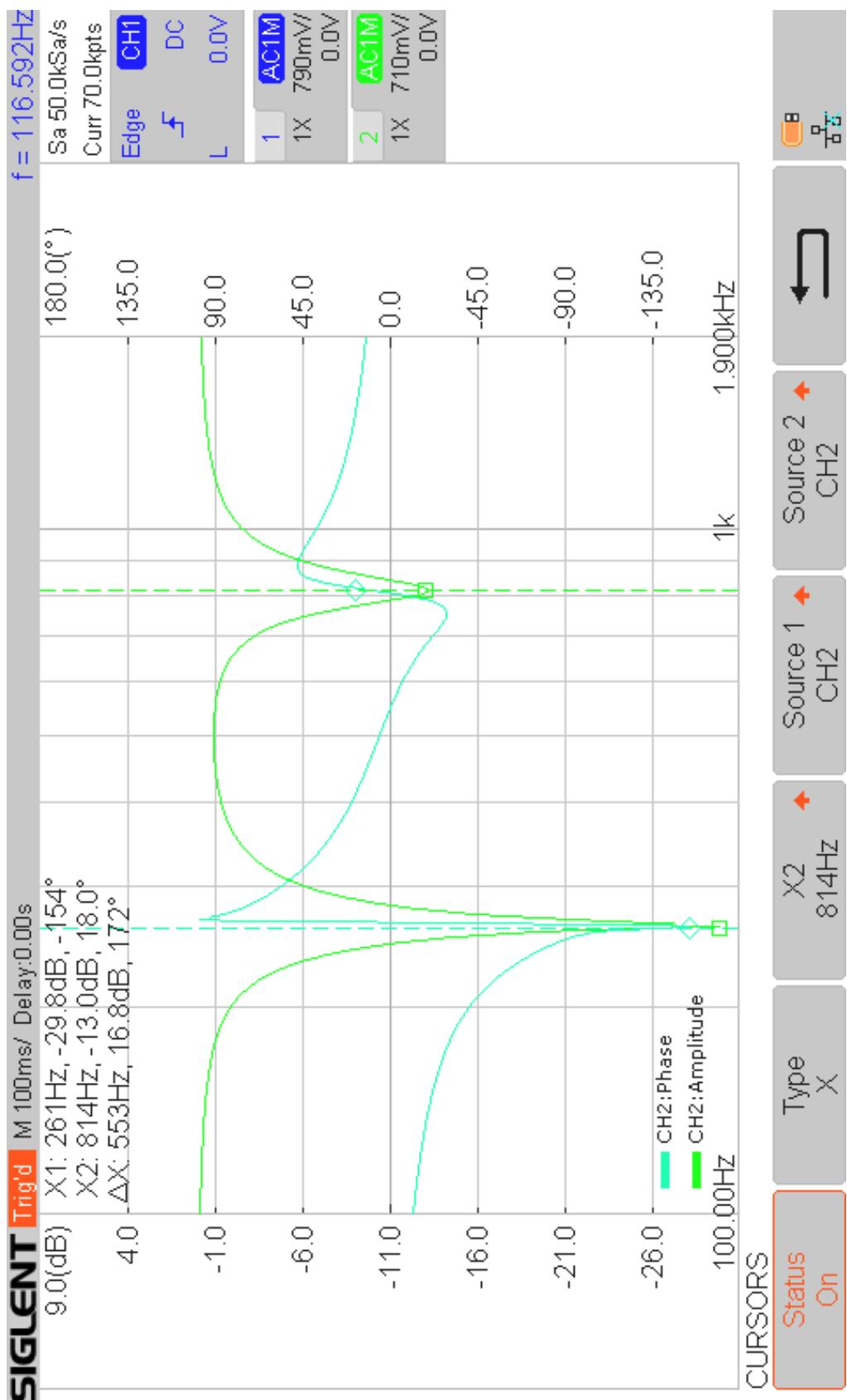


Câblage de 2 Twin T actifs en cascade pour les fréquences 235 Hz et 710 Hz, réalisé par notre équipe.

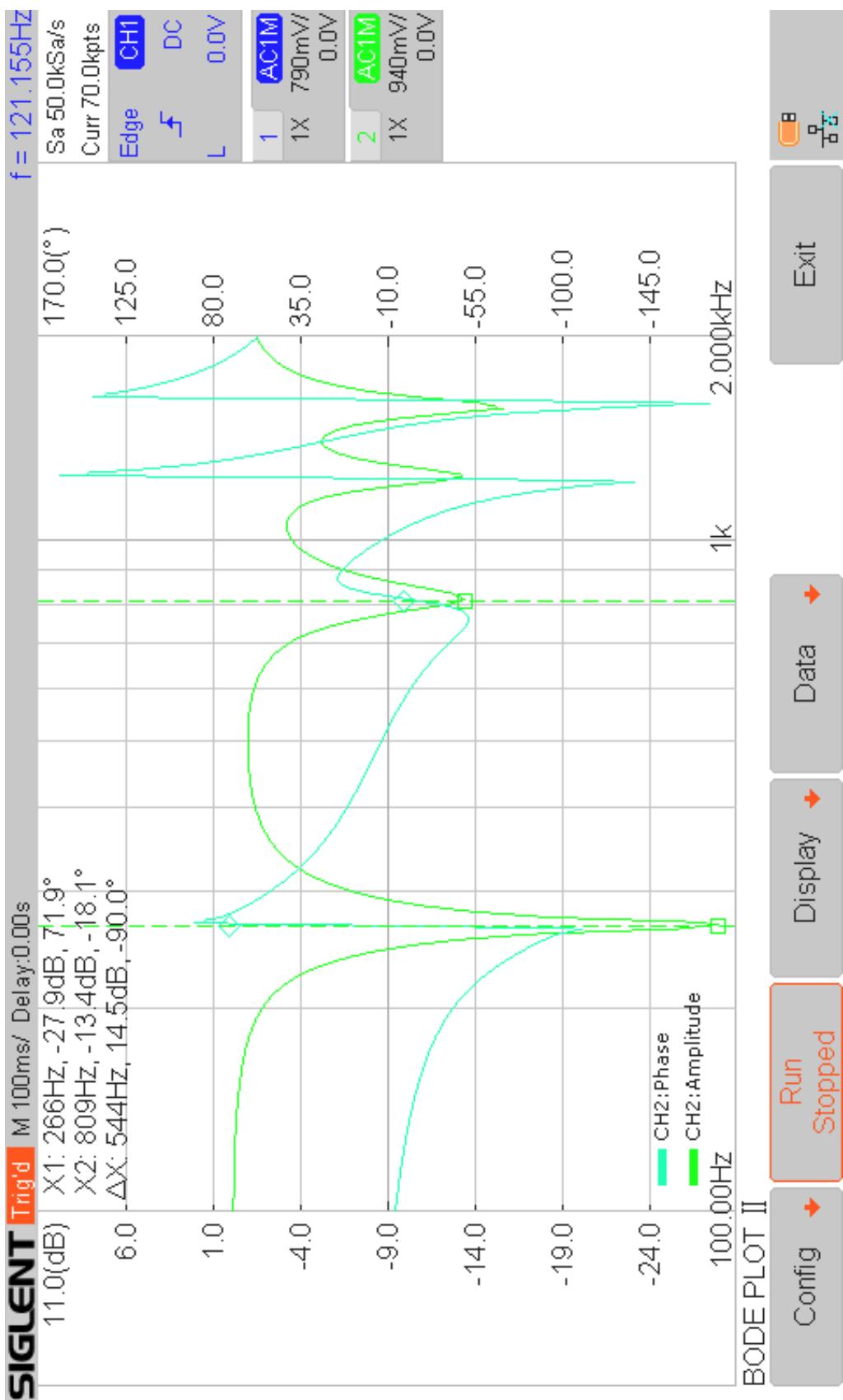


Câblage de 2 Twin T actifs en cascade pour les fréquences 1181 Hz et 1402 Hz, réalisé par nos collaborateurs.

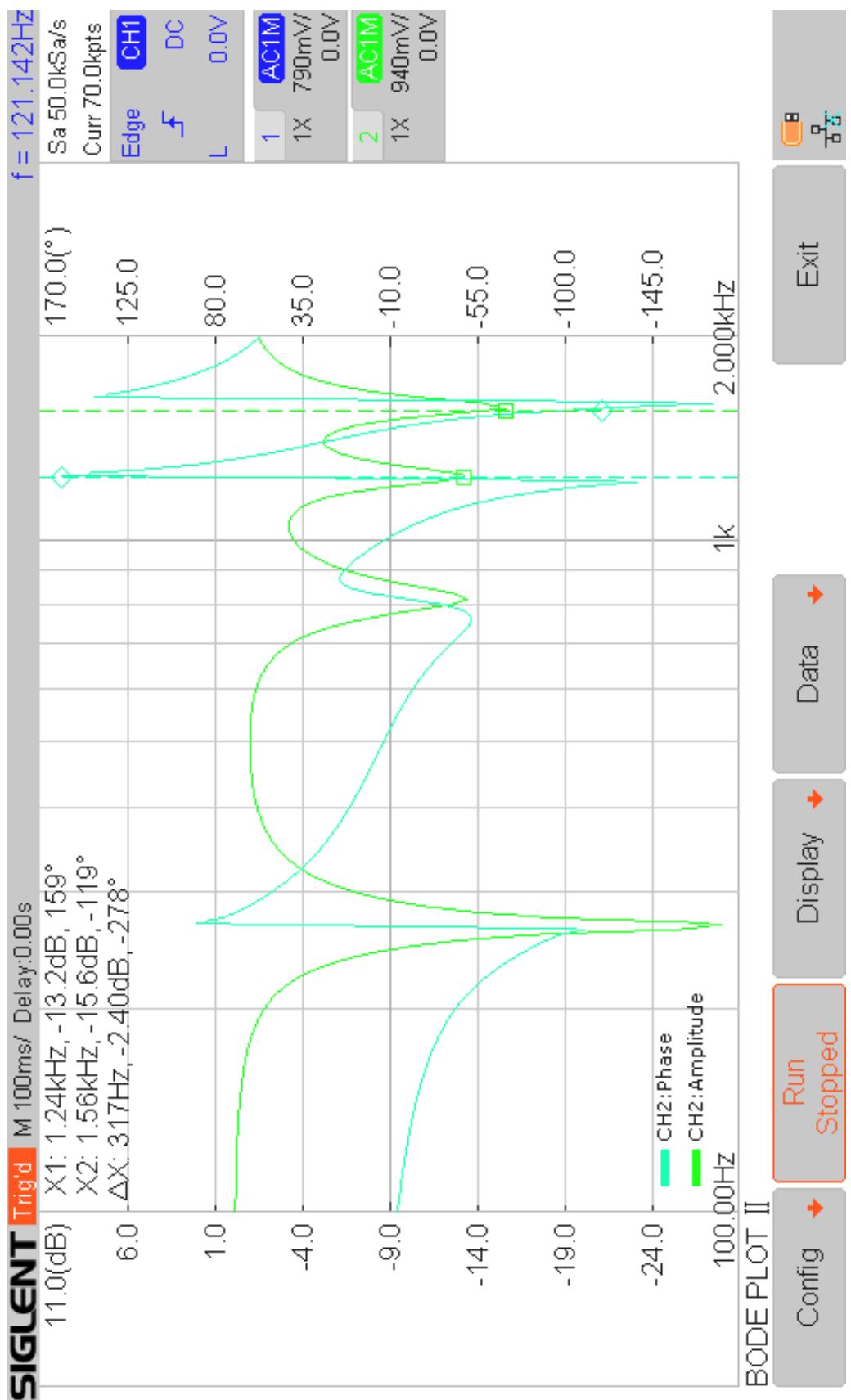
## 6.5 Relevés Oscilloscope



Relevé du câblage de 2 Twin T actifs en cascade



Relevé oscilloscope de 4 Twin T actifs en cascade avec le curseur sur les deux premières fréquences de coupure



Relevé oscilloscope de 4 Twin T actifs en cascade avec le curseur sur les deux dernières fréquences de coupure