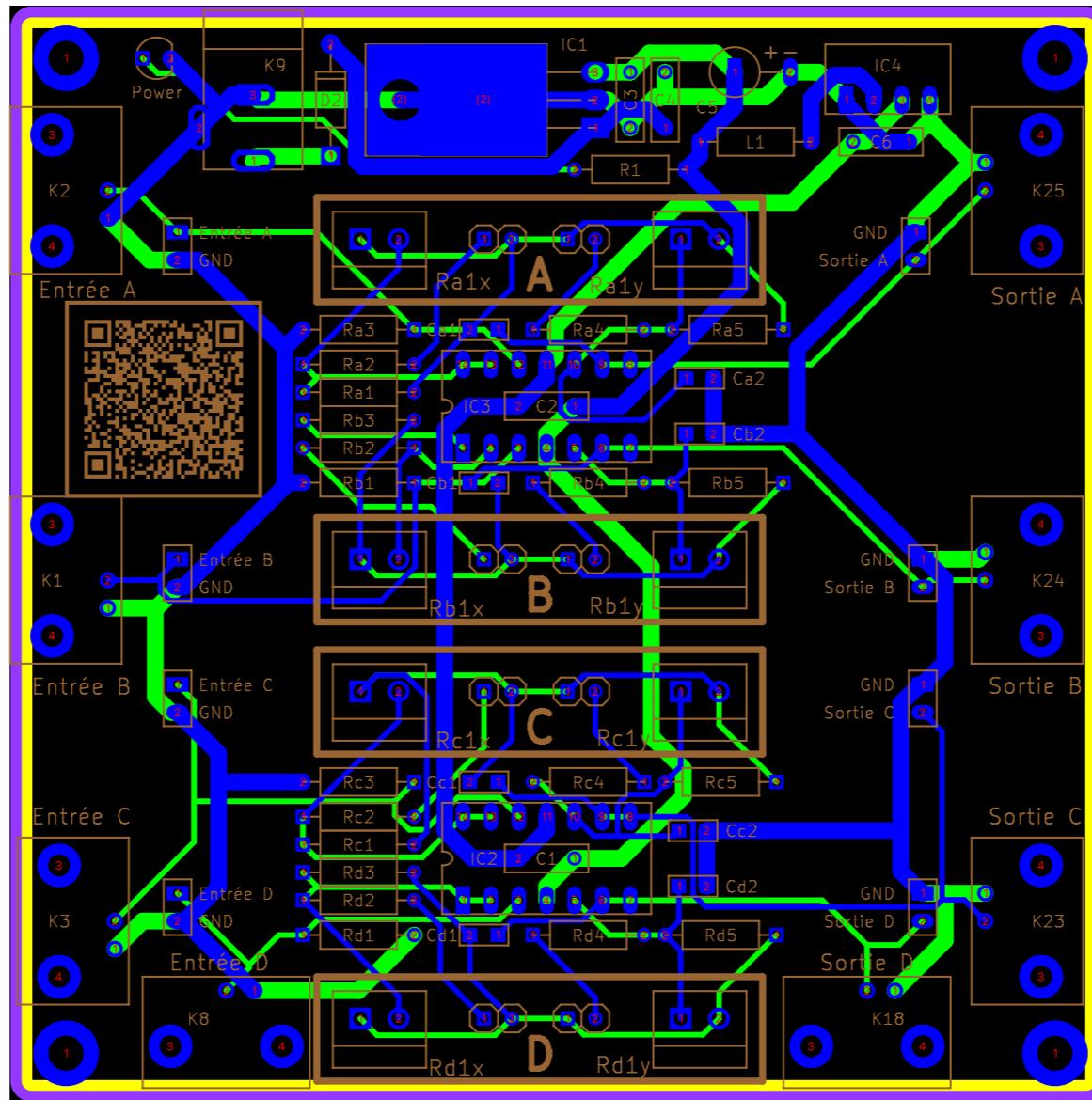


# Carte 4 filtres passe-bas



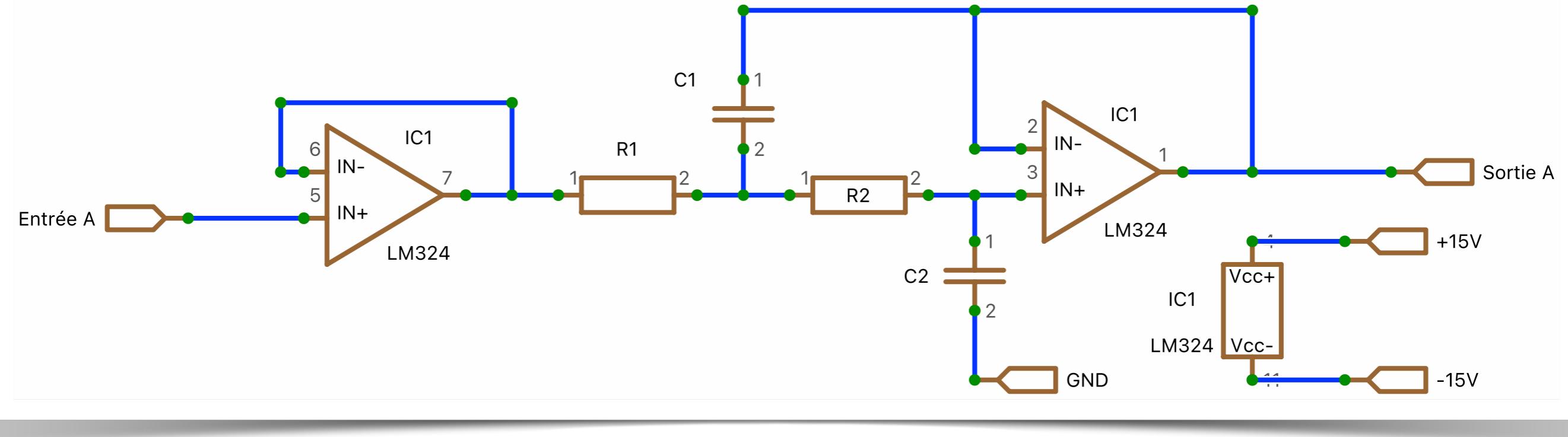
Pierre Molinaro

5 mai 2023

A

# Filtre Sallen-Key

# Filtre Sallen-Key



Le filtre choisi est un filtre passe-bas de type Sallen-Key dont le gain statique est 1. Il est conduit par un suiveur. Le document *Analysis of the Sallen-Key Architecture* de Texas Instruments (<https://www.ti.com/lit/an/sloa024b/sloa024b.pdf>) donne la fonction de transfert de ce filtre (page 4, avec  $K = 1$ ) :

$$H = \frac{1}{s^2 \cdot (R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2) + s \cdot (R_1 + R_2) \cdot C_1 + 1}$$

# Filtre Sallen-Key

En posant  $s = j \cdot \omega$  et  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ , on écrit la fonction de transfert sous la forme :

$$H(f) = \frac{1}{-4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot (R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2) + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (R_1 + R_2) \cdot C_1 + 1}$$

Que l'on peut présenter sous la forme :

$$H(f) = \frac{1}{-\frac{f^2}{f_c^2} + j \cdot \frac{f}{Q \cdot f_c} + 1}$$

Avec :

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}} \text{ et } Q = \frac{\sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}}{(R_1 + R_2) \cdot C_1}$$

**Attention,  $f_c$  n'est pas la fréquence de coupure !** Le document de Texas précise : *Where  $f_c$  is the corner frequency (note that  $f_c$  is the breakpoint between the pass band and stop band, and is not necessarily the  $-3$  dB point) [...].*

Simplification (non utilisée par la suite) : si on pose  $R_1 = m \cdot R$ ,  $R_2 = R$  et  $C_1 = C_2 = C$  (les condensateurs ont même valeur sur notre montage), on obtient :

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C \cdot \sqrt{m}} \text{ et } Q = \frac{\sqrt{m}}{1 + m}$$

# Calcul de la fréquence de coupure (1/2)

La fréquence de coupure  $f_{COUPURE}$  est obtenue en résolvant l'équation :

$$|H(f_{COUPURE})| = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Soit :

$$\frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{f_{COUPURE}^2}{f_c^2})^2 + (\frac{f_{COUPURE}}{Q \cdot f_c})^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

D'où :

$$(1 - \frac{f_{COUPURE}^2}{f_c^2})^2 + (\frac{f_{COUPURE}}{Q \cdot f_c})^2 = 2$$

En multipliant par  $Q^2 \cdot f_c^2$  :

$$\frac{Q^2}{f_c^2} \cdot f_{COUPURE}^4 + f_{COUPURE}^2 \cdot (1 - 2 \cdot Q^2) - Q^2 \cdot f_c^2 = 0$$

C'est une équation du second degré en  $x = f_{COUPURE}^2$ , de la forme  $A \cdot x^2 + B \cdot x + C = 0$ , où :

$$A = \frac{Q^2}{f_c^2}, B = 1 - 2 \cdot Q^2 \text{ et } C = -Q^2 \cdot f_c^2$$

# Calcul de la fréquence de coupure (2/2)

Comme le produit  $A \cdot C$  est négatif, il y a deux solutions réelles, l'une positive, l'autre négative. En éliminant la solution négative, la solution en  $x$  est :

$$x = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A}$$

Soit :

$$x = \frac{2 \cdot Q^2 - 1 + \sqrt{(1 - 2 \cdot Q^2)^2 + 4 \cdot Q^4}}{2 \cdot \frac{Q^2}{f_c^2}}$$

D'où :

$$x = f_c^2 \cdot \frac{2 \cdot Q^2 - 1 + \sqrt{1 - 4 \cdot Q^2 + 8 \cdot Q^4}}{2 \cdot Q^2}$$

D'où la valeur de la fréquence de coupure :

$$f_{COUPURE} = f_c \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot Q^2 - 1 + \sqrt{1 - 4 \cdot Q^2 + 8 \cdot Q^4}}}{Q \cdot \sqrt{2}}$$

# Quel est le gain à $f_c$ ?

Comme  $f_c$  n'est pas la fréquence de coupure, on peut se demander la valeur du gain à cette fréquence. En partant de :

$$H(f) = \frac{1}{-\frac{f^2}{f_c^2} + j \cdot \frac{f}{Q \cdot f_c} + 1}$$

il vient :

$$H(f_c) = \frac{1}{-1 + \frac{j}{Q} + 1} = -j \cdot Q$$

D'où :

$$|H(f_c)| = Q$$

Et la phase à  $f_c$  est  $-90^\circ$ .

# Choix des composants

L'amplificateur opérationnel est un LM324, il accepte une tension d'alimentation [-15V, +15V].

Les valeurs des résistances fixes à 1% sont :  $R_1 = 91 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 82 \text{ k}\Omega$  et  $C_1 = C_2 = 4,7 \text{ nF}$ .

Ceci permet de calculer les valeurs théoriques suivantes :

$$f_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{91 \text{ k}\Omega \cdot 82 \text{ k}\Omega \cdot 4,7 \text{ nF} \cdot 4,7 \text{ nF}}} = 392,0 \text{ Hz}$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}}{(R_1 + R_2) \cdot C_1} = \frac{\sqrt{91 \text{ k}\Omega \cdot 82 \text{ k}\Omega \cdot 4,7 \text{ nF} \cdot 4,7 \text{ nF}}}{(91 \text{ k}\Omega + 82 \text{ k}\Omega) \cdot 4,7 \text{ nF}} = 0,499$$

On en déduit la fréquence de coupure à -3 dB :

$$f_{COUPURE} = f_c \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot Q^2 - 1 + \sqrt{1 - 4 \cdot Q^2 + 8 \cdot Q^4}}}{Q\sqrt{2}} = 392 \text{ Hz} \cdot 0,642 = 251,8 \text{ Hz}$$

Et le gain à  $f_c$  est  $|H(f_c)| = Q = 0,499 = -6,03 \text{ dB}$

**B**

# **Simulation avec MacSpice**

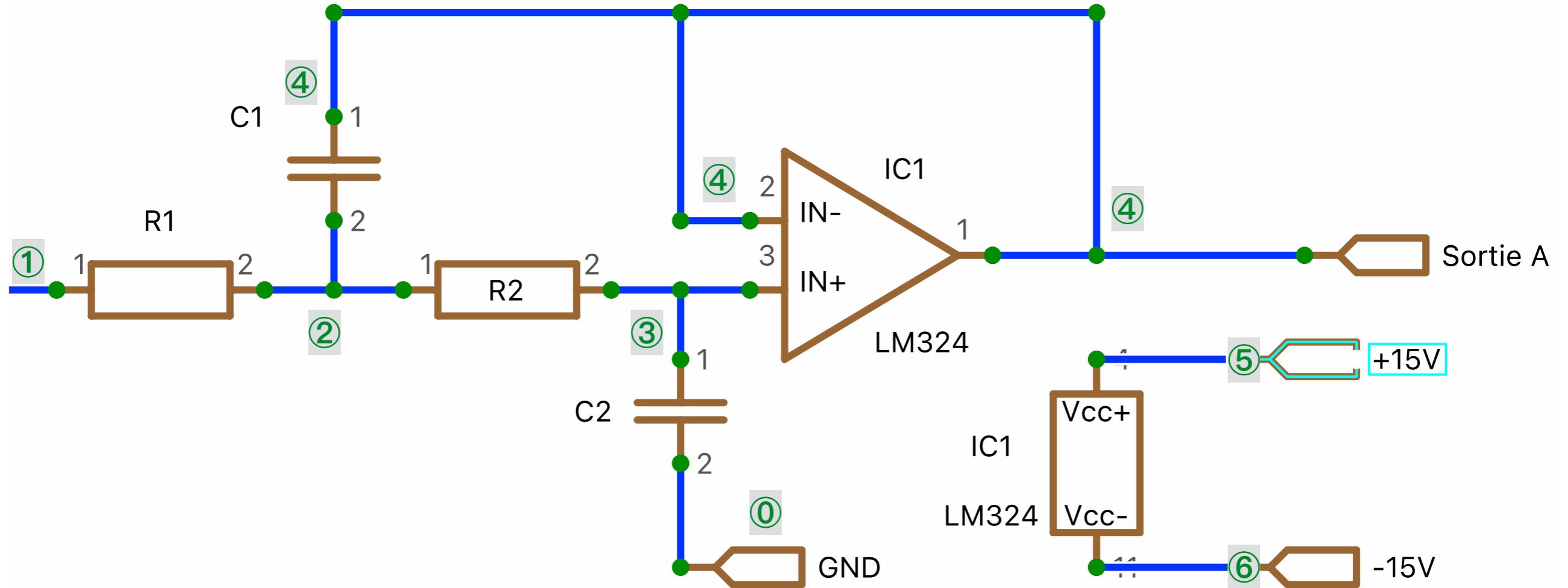
# MacSpice

**MacSpice** (<http://www.macspice.com/>) est un simulateur de montages électroniques basé sur Spice.

Le code présenté ici est dans le fichier `simulations-spice/sallen-key-réponse-frequentielle.cir`

L'amplificateur opérationnel est un TL074, je n'ai pas trouvé de modèle du LM324 qui est placé sur la carte qui soit compatible avec MacSpice.

# Le montage simulé



La simulation est réalisée avec un TL074 alimenté en  $\pm 15V$ .

Les valeurs choisies sont les valeurs réelles :  $R1 = 91 \text{ k}\Omega$ ,  $R2 = 82 \text{ k}\Omega$ ,  $C1 = C2 = 4,7 \text{ nF}$ .

La fréquence de coupure théorique est 251,8 Hz, on effectue un balayage entre 100 Hz et 1 kHz.

# Modèle du TL074

```
* TL074 OPERATIONAL AMPLIFIER "MACROMODEL"
SUBCIRCUIT
* CREATED USING PARTS RELEASE 4.01 ON 06/16/89 AT
13:08
* (REV N/A)      SUPPLY VOLTAGE: +/-15V
* CONNECTIONS:   NON-INVERTING INPUT
*                  | INVERTING INPUT
*                  | | POSITIVE POWER SUPPLY
*                  | | | NEGATIVE POWER SUPPLY
*                  | | | | OUTPUT
*                  | | | |
.SUBCKT TL074    1 2 3 4 5
*
C1    11 12 3.498E-12
C2    6 7 15.00E-12
DC    5 53 DX
DE    54 5 DX
DLP   90 91 DX
DLN   92 90 DX
DP    4 3 DX
EGND 99 0 POLY(2) (3,0) (4,0) 0 .5 .5
FB    7 99 POLY(5) VB VC VE VLP VLN 0 4.715E6
-5E6 5E6 5E6 -5E6
```

```
GA    6 0 11 12 282.8E-6
GCM   0 6 10 99 8.942E-9
ISS   3 10 DC 195.0E-6
HLIM  90 0 VLIM 1K
J1    11 2 10 JX
J2    12 1 10 JX
R2    6 9 100.0E3
RD1   4 11 3.536E3
RD2   4 12 3.536E3
R01   8 5 150
R02   7 99 150
RP    3 4 2.143E3
RSS   10 99 1.026E6
VB    9 0 DC 0
VC    3 53 DC 2.200
VE    54 4 DC 2.200
VLIM  7 8 DC 0
VLP   91 0 DC 25
VLN   0 92 DC 25
.MODEL DX D(IS=800.0E-18)
.MODEL JX PJF(IS=15.00E-12 BETA=270.1E-6 VT0=-1)
.ENDS
```

# Code de la simulation

```
* Alimentations de l'AOP
Vcc+ 5 0 DC 15
Vcc- 6 0 DC -15

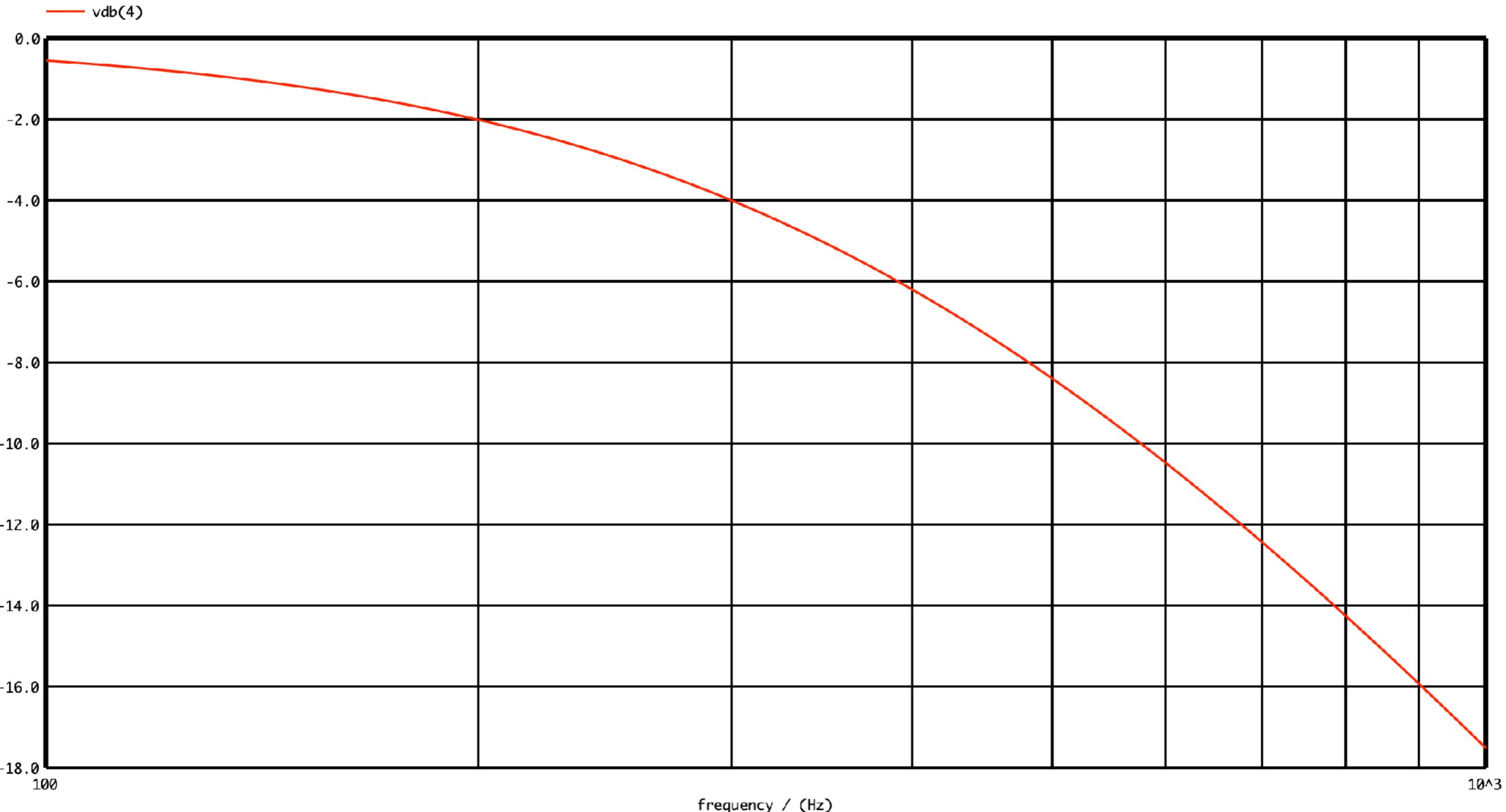
XOP 3 4 5 6 4 TL074

R1 1 2 91k
R2 2 3 82k
C1 2 4 4.7n
C2 3 0 4.7n

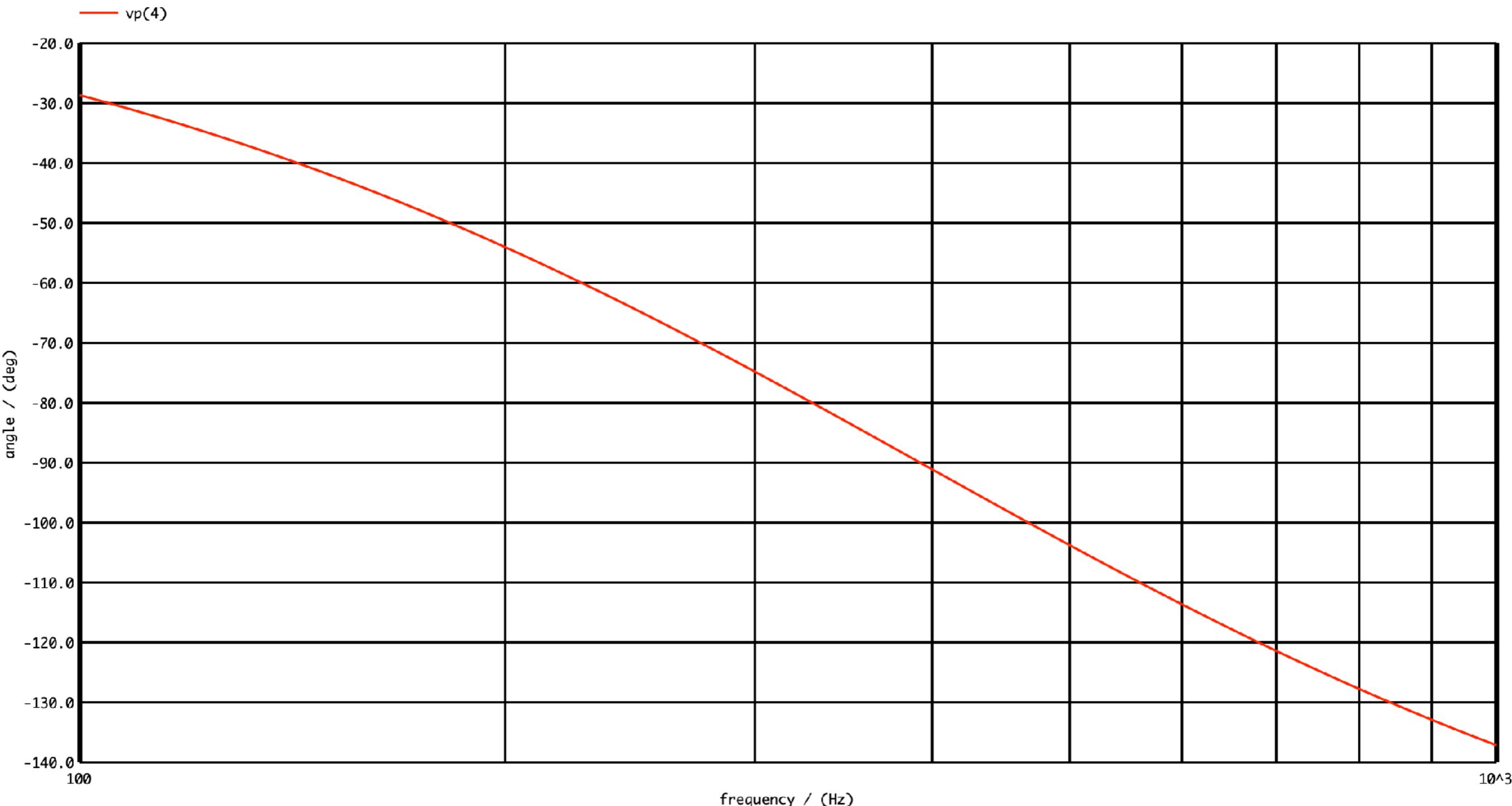
* Sur l'entrée, une source sinusoïdale
VIN 1 0 AC 1

.control
ac dec 100 100 1000
plot vdb(4)
plot vp(4)
.endc
.end
```

# Courbe du gain



# Courbe de phase



# Discussion des résultats

**MacSpice** (<http://www.macspice.com/>) est un simulateur de montages électroniques basé sur Spice.

La simulation est réalisée avec  $R_1 = 91 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 82 \text{ k}\Omega$  et  $C_1 = C_2 = 4,7 \text{ nF}$ .

Sur les courbes précédentes, on peut vérifier :

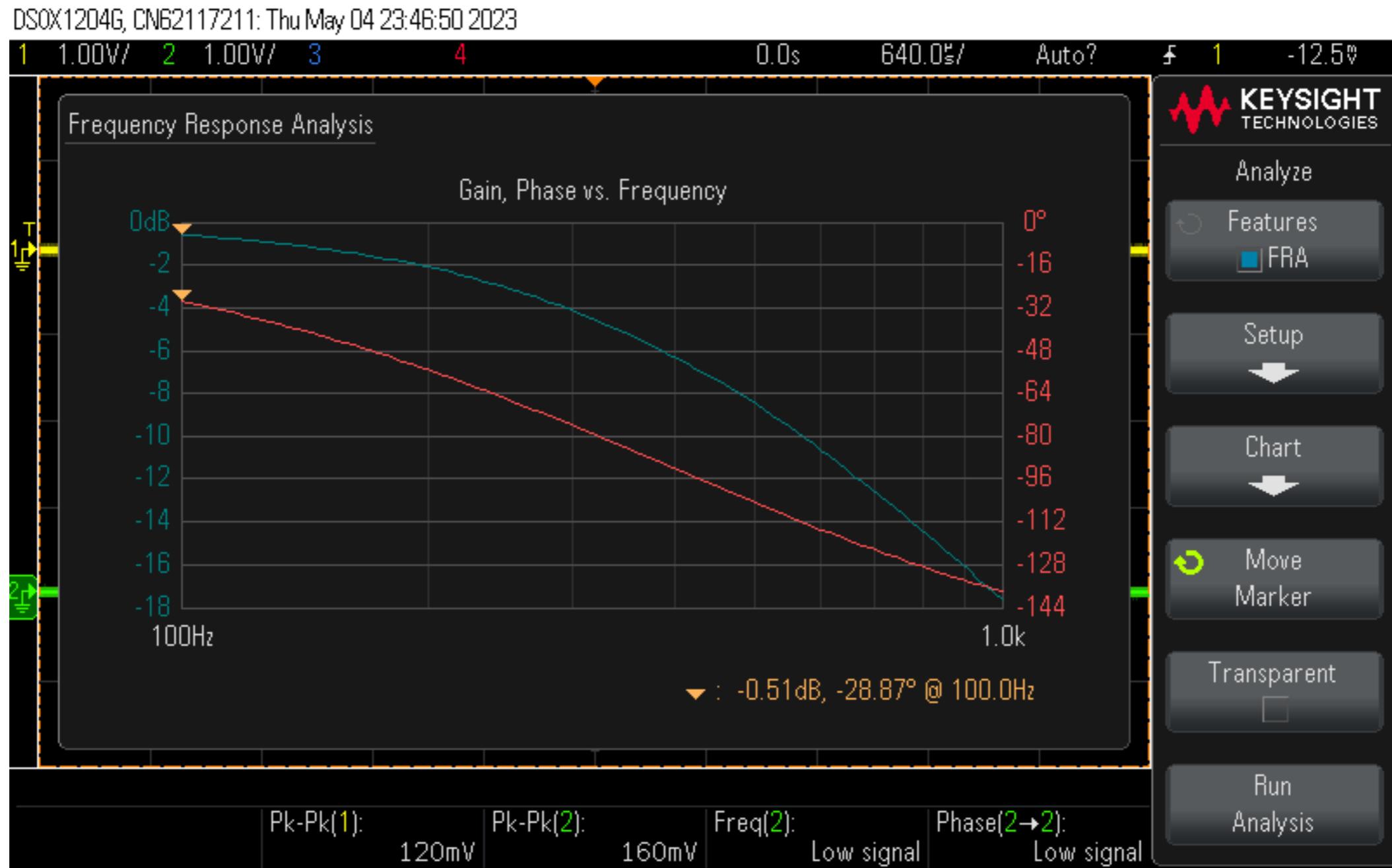
- la fréquence de coupure (à -3 dB) est bien vers 250 Hz (en théorie 251,8 Hz) ;
- à la fréquence « corner »  $f_c$  (en théorie 392 Hz), le gain est proche de -6 dB, et la phase proche de -90°.

C

**Essai avec le montage réel**

# Courbes de gain et de phase

L'oscilloscope Keysight DSOX1204G permet de tracer directement les courbes de gain et de phase du montage réel, et de récupérer le tableau des points de mesure (page suivante). Avec avec  $R_1 = 91 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 82 \text{ k}\Omega$  et  $C_1 = C_2 = 4,7 \text{ nF}$ , on obtient :



# Liste des points de mesure

#	Frequency (Hz)	Amplitude (Vpp)	Gain (dB)	Phase (°)
1	100.0	10.0000	-0.51	-28.87
2	102.3	10.0000	-0.53	-29.49
3	104.7	10.0000	-0.56	-30.18
4	107.2	10.0000	-0.59	-30.87
5	109.6	10.0000	-0.63	-31.55
6	112.2	10.0000	-0.65	-32.23
7	114.8	10.0000	-0.68	-32.95
8	117.5	10.0000	-0.71	-33.65
9	120.2	10.0000	-0.76	-34.41
10	123.0	10.0000	-0.78	-35.16
11	125.9	10.0000	-0.83	-35.91
12	128.8	10.0000	-0.86	-36.71
13	131.8	10.0000	-0.90	-37.50
14	134.9	10.0000	-0.95	-38.32
15	138.0	10.0000	-0.99	-39.12
16	141.3	10.0000	-1.04	-39.98
17	144.5	10.0000	-1.08	-40.84
18	147.9	10.0000	-1.14	-41.70
19	151.4	10.0000	-1.19	-42.61
20	154.9	10.0000	-1.25	-43.48
21	158.5	10.0000	-1.31	-44.41
22	162.2	10.0000	-1.35	-45.30
23	166.0	10.0000	-1.41	-46.28
24	169.8	10.0000	-1.48	-47.23
25	173.8	10.0000	-1.55	-48.23
26	177.8	10.0000	-1.64	-49.24
27	182.0	10.0000	-1.68	-50.24
28	186.2	10.0000	-1.76	-51.27
29	190.5	10.0000	-1.84	-52.28
30	195.0	10.0000	-1.92	-53.33
31	199.5	10.0000	-2.01	-54.41
32	204.2	10.0000	-2.10	-55.46
33	208.9	10.0000	-2.18	-56.59

34	213.8	10.0000	-2.26	-57.69
35	218.8	10.0000	-2.37	-58.82
36	223.9	10.0000	-2.45	-59.94
37	229.1	10.0000	-2.57	-61.07
38	234.4	10.0000	-2.68	-62.24
39	239.9	10.0000	-2.77	-63.38
40	245.5	10.0000	-2.89	-64.63
41	251.2	10.0000	-3.00	-65.84
42	257.0	10.0000	-3.13	-66.98
43	263.0	10.0000	-3.25	-68.21
44	269.2	10.0000	-3.40	-69.46
45	275.4	10.0000	-3.52	-70.68
46	281.8	10.0000	-3.65	-71.92
47	288.4	10.0000	-3.79	-73.18
48	295.1	10.0000	-3.94	-74.43
49	302.0	10.0000	-4.08	-75.69
50	309.0	10.0000	-4.22	-76.98
51	316.2	10.0000	-4.38	-78.28
52	323.6	10.0000	-4.55	-79.59
53	331.1	10.0000	-4.71	-80.81
54	338.8	10.0000	-4.89	-82.12
55	346.7	10.0000	-5.07	-83.44
56	354.8	10.0000	-5.23	-84.76
57	363.1	10.0000	-5.43	-86.02
58	371.5	10.0000	-5.62	-87.38
59	380.2	10.0000	-5.80	-88.71
60	389.0	10.0000	-6.00	-89.99
61	398.1	10.0000	-6.21	-91.35
62	407.4	10.0000	-6.40	-92.65
63	416.9	10.0000	-6.62	-93.98
64	426.6	10.0000	-6.83	-95.29
65	436.5	10.0000	-7.01	-96.57
66	446.7	10.0000	-7.22	-97.87
67	457.1	10.0000	-7.46	-99.16

68	467.7	10.0000	-7.68	-100.42
69	478.6	10.0000	-7.93	-101.74
70	489.8	10.0000	-8.16	-103.04
71	501.2	10.0000	-8.42	-104.30
72	512.9	10.0000	-8.66	-105.62
73	524.8	10.0000	-8.92	-106.84
74	537.0	10.0000	-9.17	-108.14
75	549.5	10.0000	-9.44	-109.29
76	562.3	10.0000	-9.71	-110.56
77	575.4	10.0000	-9.99	-111.77
78	588.8	10.0000	-10.27	-113.00
79	602.6	10.0000	-10.54	-114.22
80	616.6	10.0000	-10.83	-115.37
81	631.0	10.0000	-11.17	-116.57
82	645.7	10.0000	-11.47	-117.78
83	660.7	10.0000	-11.76	-118.92
84	676.1	10.0000	-12.05	-120.07
85	691.8	10.0000	-12.35	-121.22
86	707.9	10.0000	-12.65	-122.32
87	724.4	10.0000	-12.95	-123.41
88	741.3	10.0000	-13.27	-124.53
89	758.6	10.0000	-13.59	-125.62
90	776.2	10.0000	-13.91	-126.65
91	794.3	10.0000	-14.23	-127.69
92	812.8	10.0000	-14.56	-128.73
93	831.8	10.0000	-14.88	-129.81
94	851.1	10.0000	-15.21	-130.77
95	871.0	10.0000	-15.54	-131.75
96	891.3	10.0000	-15.88	-132.67
97	912.0	10.0000	-16.21	-133.66
98	933.3	10.0000	-16.55	-134.62
99	955.0	10.0000	-16.89	-135.55
100	977.2	10.0000	-17.24	-136.45
101	1000.0	10.0000	-17.57	-137.33

# Discussion des résultats

La fréquence de coupure théorique est 251,8 Hz -> sur les points de la page précédente, on atteint -3 dB à 251,2 Hz.

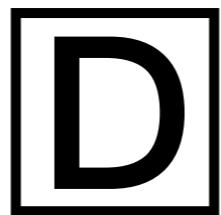
La fréquence « corner » théorique est 392 Hz, le gain théorique est -6,04 dB,

La fréquence à -6 dB est 389 Hz, et sa phase est -89,99°.

On affine la plage de balayage en fréquence autour de ces fréquences.

Frequency (Hz)	Amplitude (Vpp)	Gain (dB)	Phase (°)
249.3	10.0000	-2.97	-65.40
249.5	10.0000	-2.97	-65.45
249.7	10.0000	-2.97	-65.49
249.9	10.0000	-2.98	-65.56
250.1	10.0000	-2.98	-65.56
250.2	10.0000	-2.99	-65.60
250.4	10.0000	-2.98	-65.63
250.6	10.0000	-3.01	-65.68
250.8	10.0000	-2.99	-65.68
251.0	10.0000	-3.01	-65.78
251.2	10.0000	-3.02	-65.84
251.4	10.0000	-3.02	-65.86
251.6	10.0000	-3.02	-65.88
251.7	10.0000	-3.01	-65.90
251.9	10.0000	-3.02	-65.91

Frequency (Hz)	Amplitude (Vpp)	Gain (dB)	Phase (°)
391.0	10.0000	-6.02	-90.26
391.1	10.0000	-6.02	-90.27
391.2	10.0000	-6.01	-90.27
391.3	10.0000	-6.02	-90.32
391.4	10.0000	-6.04	-90.32
391.5	10.0000	-6.03	-90.36
391.6	10.0000	-6.02	-90.38
391.7	10.0000	-6.03	-90.38
391.8	10.0000	-6.03	-90.38
391.9	10.0000	-6.04	-90.43
392.0	10.0000	-6.03	-90.43
392.1	10.0000	-6.04	-90.42
392.2	10.0000	-6.04	-90.44
392.3	10.0000	-6.05	-90.45
392.4	10.0000	-6.04	-90.49
392.5	10.0000	-6.04	-90.55
392.6	10.0000	-6.05	-90.48
392.7	10.0000	-6.06	-90.55
392.8	10.0000	-6.05	-90.55
392.9	10.0000	-6.05	-90.61
393.0	10.0000	-6.06	-90.59



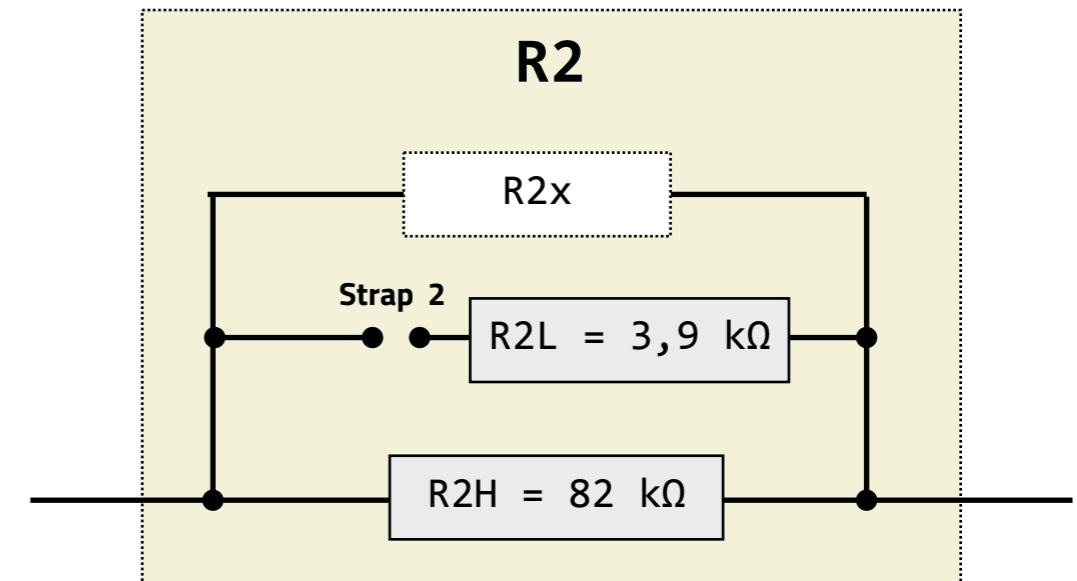
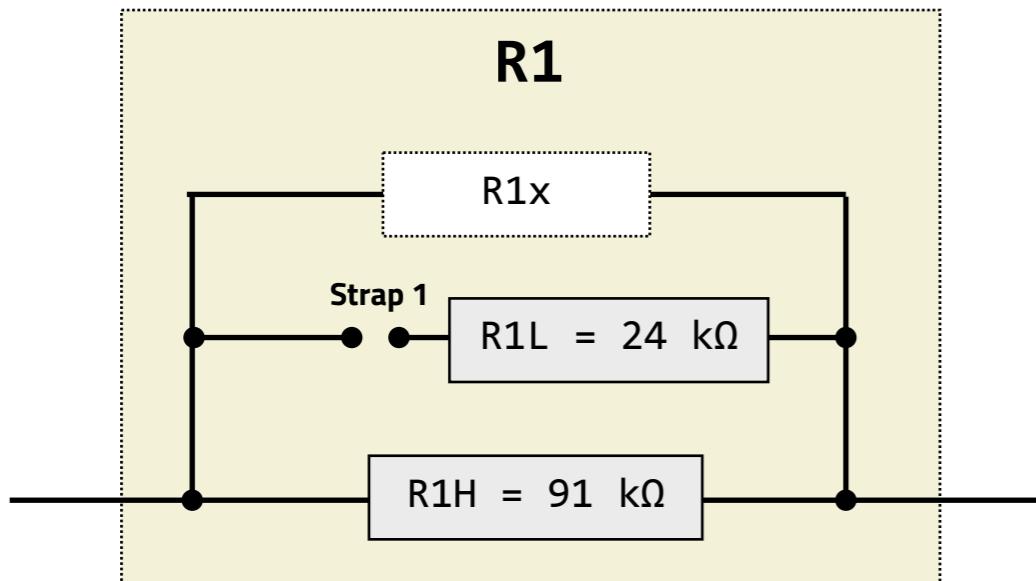
# Réglage de la fréquence de coupure

# Principe de la réglage de la fréquence de coupure

Pour changer la fréquence de coupure, les valeurs des résistances R1 et R2 sont modifiables. On combine quatre choix :

- placer ou non une résistance **R1x** ;
- placer ou non un strap sur **Strap 1** ;
- placer ou non une résistance **R2x** ;
- placer ou non un strap sur **Strap 2**.

Les résistances R1L, R1H, R2L et R2H sont soudées. Elles sont dans la gamme à 1%.



Les résistances à 1% candidates pour R1X et R2X sont prises dans les valeurs suivantes :

- 1 kΩ, 2 kΩ, 2,7 kΩ, 3,9 kΩ, 4,7 kΩ ;
- 24 kΩ, 30 kΩ, 47 kΩ, 68 kΩ, 82 kΩ, 91 kΩ ;
- 150 kΩ, 180 kΩ, 270 kΩ, 510 kΩ, 680 kΩ.

# Réglage pour atteindre une fréquence de coupure

*Entre 350 Hz et 900 Hz*

F_COUPURE	Écart	R1X	Strap 1	R2X	Strap 2	fc	Gain à fc	Gain à fc
350 Hz	0.073 %	270 000 Ω	OFF	180 000 Ω	OFF	546.866 Hz	0.498	-6.059 dB
375 Hz	0.492 %	180 000 Ω	OFF	180 000 Ω	OFF	580.307 Hz	0.5	-6.025 dB
400 Hz	0.015 %	91 000 Ω	OFF	270 000 Ω	OFF	632.994 Hz	0.494	-6.133 dB
425 Hz	0.321 %	180 000 Ω	OFF	82 000 Ω	OFF	680.234 Hz	0.491	-6.183 dB
450 Hz	0.052 %	24 000 Ω	OFF	510 000 Ω	OFF	924.515 Hz	0.409	-7.773 dB
475 Hz	0.637 %	3 900 Ω	OFF	510 000 Ω	OFF	2083.394 Hz	0.219	-13.21 dB
500 Hz	0.053 %	680 000 Ω	ON	270 000 Ω	OFF	993.365 Hz	0.419	-7.557 dB
525 Hz	0.177 %	24 000 Ω	ON	270 000 Ω	OFF	1311.331 Hz	0.352	-9.085 dB
550 Hz	0.013 %	510 000 Ω	ON	180 000 Ω	OFF	1054.367 Hz	0.431	-7.325 dB
575 Hz	0.06 %	24 000 Ω	OFF	150 000 Ω	OFF	1067.177 Hz	0.441	-7.117 dB
600 Hz	0.147 %	3 900 Ω	ON	180 000 Ω	OFF	2508.161 Hz	0.227	-12.893 dB
625 Hz	0.656 %	91 000 Ω	OFF	30 000 Ω	OFF	1071.17 Hz	0.469	-6.584 dB
650 Hz	0.072 %	30 000 Ω	OFF	91 000 Ω	OFF	1085.499 Hz	0.475	-6.468 dB
675 Hz	0.233 %	30 000 Ω	OFF	82 000 Ω	OFF	1113.376 Hz	0.479	-6.402 dB
700 Hz	0.587 %	68 000 Ω	OFF	30 000 Ω	OFF	1158.21 Hz	0.481	-6.371 dB
725 Hz	0.054 %	150 000 Ω	ON	82 000 Ω	OFF	1288.071 Hz	0.455	-6.851 dB
750 Hz	0.547 %	47 000 Ω	ON	82 000 Ω	OFF	1437.962 Hz	0.432	-7.292 dB
775 Hz	0.359 %	270 000 Ω	ON	68 000 Ω	OFF	1318.529 Hz	0.468	-6.601 dB
800 Hz	0.286 %	82 000 Ω	ON	68 000 Ω	OFF	1414.374 Hz	0.456	-6.835 dB
825 Hz	0.346 %	30 000 Ω	OFF	47 000 Ω	OFF	1304.286 Hz	0.496	-6.105 dB
850 Hz	0.149 %	24 000 Ω	ON	68 000 Ω	OFF	1705.744 Hz	0.416	-7.627 dB
875 Hz	0.797 %	68 000 Ω	OFF	3 900 Ω	ON	3933.072 Hz	0.211	-13.518 dB
900 Hz	0.217 %	3 900 Ω	OFF	68 000 Ω	OFF	2872.015 Hz	0.289	-10.806 dB

# Vérification pour la fréquence de coupure 350 Hz (1/2)

DSOX1204G, CN62117211: Fri May 05 02:41:55 2023



# Vérification pour la fréquence de coupure 350 Hz (2/2)

#	Frequency (Hz)	Amplitude (Vpp)	Gain (dB)	Phase (°)
1	340.0	10.0000	-2.88	-64.28
2	340.6	10.0000	-2.89	-64.38
3	341.3	10.0000	-2.90	-64.48
4	341.9	10.0000	-2.91	-64.58
5	342.6	10.0000	-2.93	-64.66
6	343.3	10.0000	-2.93	-64.82
7	343.9	10.0000	-2.95	-64.88
8	344.6	10.0000	-2.95	-64.98
9	345.2	10.0000	-2.96	-65.05
10	345.9	10.0000	-2.96	-65.17
11	346.5	10.0000	-2.97	-65.26
12	347.2	10.0000	-3.00	-65.34
13	347.9	10.0000	-3.00	-65.49
14	348.5	10.0000	-3.01	-65.60
15	349.2	10.0000	-3.02	-65.67
16	349.9	10.0000	-3.02	-65.78
17	350.5	10.0000	-3.03	-65.85
18	351.2	10.0000	-3.05	-65.95
19	351.9	10.0000	-3.06	-66.07
20	352.5	10.0000	-3.07	-66.17
21	353.2	10.0000	-3.08	-66.24
22	353.9	10.0000	-3.10	-66.36
23	354.6	10.0000	-3.10	-66.47
24	355.2	10.0000	-3.11	-66.57
25	355.9	10.0000	-3.11	-66.65
26	356.6	10.0000	-3.12	-66.72
27	357.3	10.0000	-3.14	-66.88
28	357.9	10.0000	-3.14	-66.94
29	358.6	10.0000	-3.16	-67.06
30	359.3	10.0000	-3.16	-67.11
31	360.0	10.0000	-3.17	-67.27

$f_c = 546,866 \text{ Hz}$

#	Frequency (Hz)	Amplitude (Vpp)	Gain (dB)	Phase (°)
1	540.0	10.0000	-5.96	-89.69
2	540.5	10.0000	-5.97	-89.77
3	541.0	10.0000	-5.97	-89.76
4	541.5	10.0000	-5.97	-89.85
5	542.0	10.0000	-6.00	-89.91
6	542.5	10.0000	-6.00	-89.93
7	543.0	10.0000	-6.00	-89.99
8	543.5	10.0000	-6.02	-90.08
9	544.0	10.0000	-6.03	-90.08
10	544.5	10.0000	-6.03	-90.15
11	545.0	10.0000	-6.04	-90.20
12	545.5	10.0000	-6.04	-90.26
13	546.0	10.0000	-6.05	-90.31
14	546.5	10.0000	-6.06	-90.33
15	547.0	10.0000	-6.06	-90.38
16	547.5	10.0000	-6.07	-90.48
17	548.0	10.0000	-6.09	-90.50
18	548.5	10.0000	-6.09	-90.54
19	549.0	10.0000	-6.10	-90.62
20	549.5	10.0000	-6.11	-90.67
21	550.0	10.0000	-6.11	-90.73

# Vérification pour la fréquence de coupure 550 Hz

#	Frequency (Hz)	Amplitude (Vpp)	Gain (dB)	Phase (°)
1	540.0	10.0000	-2.94	-58.60
2	541.0	10.0000	-2.95	-58.67
3	542.0	10.0000	-2.97	-58.78
4	543.0	10.0000	-2.97	-58.85
5	543.9	10.0000	-2.98	-58.94
6	544.9	10.0000	-2.98	-59.01
7	545.9	10.0000	-3.00	-59.13
8	546.9	10.0000	-3.00	-59.18
9	547.9	10.0000	-3.01	-59.26
10	548.9	10.0000	-3.02	-59.35
11	549.9	10.0000	-3.03	-59.41
12	550.9	10.0000	-3.02	-59.50
13	551.9	10.0000	-3.05	-59.58
14	552.9	10.0000	-3.05	-59.65
15	553.9	10.0000	-3.07	-59.74
16	554.9	10.0000	-3.06	-59.81
17	555.9	10.0000	-3.07	-59.93
18	557.0	10.0000	-3.09	-59.98
19	558.0	10.0000	-3.10	-60.10
20	559.0	10.0000	-3.10	-60.16
21	560.0	10.0000	-3.11	-60.22

$f_c = 1054 \text{ Hz}$ , gain -7.325 dB

#	Frequency (Hz)	Amplitude (Vpp)	Gain (dB)	Phase (°)
1	1045.0	10.0000	-7.26	-89.97
2	1046.0	10.0000	-7.28	-90.03
3	1047.0	10.0000	-7.28	-90.03
4	1048.0	10.0000	-7.29	-90.08
5	1049.0	10.0000	-7.29	-90.15
6	1050.0	10.0000	-7.31	-90.16
7	1051.0	10.0000	-7.32	-90.26
8	1052.0	10.0000	-7.32	-90.26
9	1053.0	10.0000	-7.33	-90.33
10	1054.0	10.0000	-7.32	-90.37
11	1055.0	10.0000	-7.34	-90.43
12	1056.0	10.0000	-7.34	-90.48
13	1057.0	10.0000	-7.36	-90.54
14	1058.0	10.0000	-7.37	-90.56
15	1059.0	10.0000	-7.38	-90.60
16	1060.0	10.0000	-7.38	-90.67
17	1061.0	10.0000	-7.41	-90.71
18	1062.0	10.0000	-7.41	-90.74
19	1063.0	10.0000	-7.42	-90.79
20	1064.0	10.0000	-7.42	-90.85
21	1065.0	10.0000	-7.42	-90.89

# Vérification pour la fréquence de coupure 800 Hz

$f_c = 1414 \text{ Hz}$ , gain -6,835 dB

#	Frequency (Hz)	Amplitude (Vpp)	Gain (dB)	Phase (°)
1	790.0	10.0000	-2.95	-61.07
2	791.0	10.0000	-2.97	-61.19
3	792.0	10.0000	-2.99	-61.19
4	793.0	10.0000	-2.98	-61.24
5	794.0	10.0000	-3.01	-61.36
6	795.0	10.0000	-3.02	-61.41
7	795.9	10.0000	-3.01	-61.47
8	796.9	10.0000	-3.00	-61.47
9	797.9	10.0000	-3.00	-61.58
10	798.9	10.0000	-3.04	-61.64
11	799.9	10.0000	-3.04	-61.70
12	800.9	10.0000	-3.05	-61.76
13	801.9	10.0000	-3.05	-61.81
14	802.9	10.0000	-3.05	-61.87
15	803.9	10.0000	-3.06	-61.93
16	805.0	10.0000	-3.06	-62.01
17	806.0	10.0000	-3.07	-62.05
18	807.0	10.0000	-3.06	-62.10
19	808.0	10.0000	-3.10	-62.16
20	809.0	10.0000	-3.10	-62.21
21	810.0	10.0000	-3.10	-62.28

#	Frequency (Hz)	Amplitude (Vpp)	Gain (dB)	Phase (°)
1	1405.0	10.0000	-6.76	-90.08
2	1406.0	10.0000	-6.77	-90.10
3	1407.0	10.0000	-6.78	-90.14
4	1408.0	10.0000	-6.79	-90.18
5	1409.0	10.0000	-6.80	-90.24
6	1410.0	10.0000	-6.80	-90.22
7	1411.0	10.0000	-6.82	-90.31
8	1412.0	10.0000	-6.80	-90.31
9	1413.0	10.0000	-6.81	-90.39
10	1414.0	10.0000	-6.81	-90.41
11	1415.0	10.0000	-6.83	-90.43
12	1416.0	10.0000	-6.83	-90.45
13	1417.0	10.0000	-6.85	-90.49
14	1418.0	10.0000	-6.84	-90.55
15	1419.0	10.0000	-6.85	-90.59
16	1420.0	10.0000	-6.86	-90.60
17	1421.0	10.0000	-6.87	-90.64
18	1422.0	10.0000	-6.87	-90.70
19	1423.0	10.0000	-6.88	-90.76
20	1424.0	10.0000	-6.88	-90.73
21	1425.0	10.0000	-6.88	-90.77

# Réglage pour atteindre une fréquence de coupure

**Entre 1 kHz et 10 kHz**

À noter les écarts importants pour les fréquences en 3 500 Hz et 5 000 Hz. On diminuerait l'écart en élargissant le jeu des valeurs possibles des résistances R1X et R2X.

F_COUPURE	Écart	R1X	Strap 1	R2X	Strap 2	fc	Gain à fc	Gain à fc
1000 Hz	0.548 %	30000 Ω	ON	47000 Ω	OFF	1816.699 Hz	0.45	-6.953 dB
1500 Hz	0.002 %	3900 Ω	OFF	30000 Ω	OFF	3736.319 Hz	0.353	-9.054 dB
2000 Hz	0.099 %	150000 Ω	ON	1000 Ω	OFF	8297.812 Hz	0.229	-12.815 dB
2500 Hz	0.196 %	47000 Ω	ON	1000 Ω	ON	10370.569 Hz	0.229	-12.836 dB
3000 Hz	0.815 %	24000 Ω	ON	2700 Ω	OFF	6432.54 Hz	0.399	-7.995 dB
3500 Hz	9.241 %	24000 Ω	ON	1000 Ω	ON	11713.667 Hz	0.254	-11.91 dB
4000 Hz	20.586 %	24000 Ω	ON	1000 Ω	ON	11713.667 Hz	0.254	-11.91 dB
4500 Hz	8.658 %	4700 Ω	OFF	4700 Ω	OFF	7597.354 Hz	0.5	-6.02 dB
5000 Hz	2.209 %	4700 Ω	OFF	4700 Ω	OFF	7597.354 Hz	0.5	-6.02 dB
5500 Hz	0.268 %	4700 Ω	OFF	47000 Ω	ON	8624.209 Hz	0.496	-6.093 dB
6000 Hz	0.084 %	3900 Ω	OFF	68000 Ω	ON	9320.395 Hz	0.5	-6.024 dB
6500 Hz	0.287 %	3900 Ω	ON	47000 Ω	ON	10135.81 Hz	0.5	-6.025 dB
7000 Hz	0.046 %	2700 Ω	OFF	91000 Ω	ON	11057.418 Hz	0.495	-6.124 dB
7500 Hz	0.059 %	3900 Ω	OFF	2000 Ω	OFF	12531.992 Hz	0.475	-6.471 dB
8000 Hz	0.229 %	2000 Ω	ON	68000 Ω	ON	13399.282 Hz	0.474	-6.496 dB
8500 Hz	0.148 %	3900 Ω	OFF	1000 Ω	OFF	17617.104 Hz	0.407	-7.817 dB
9000 Hz	0.005 %	1000 Ω	ON	68000 Ω	ON	18492.574 Hz	0.409	-7.77 dB
9500 Hz	0.056 %	2000 Ω	OFF	2700 Ω	OFF	14972.04 Hz	0.495	-6.111 dB
10000 Hz	0.784 %	3900 Ω	ON	1000 Ω	ON	21203.674 Hz	0.397	-8.026 dB

# Vérification pour la fréquence de coupure 8 kHz

$f_c = 13\ 399\ Hz$ , gain -6,496 dB

#	Frequency (Hz)	Amplitude (Vpp)	Gain (dB)	Phase (°)
1	7800.0	10.0000	-2.85	-63.41
2	7819.5	10.0000	-2.86	-63.54
3	7839.1	10.0000	-2.87	-63.66
4	7858.7	10.0000	-2.88	-63.79
5	7878.4	10.0000	-2.89	-63.95
6	7898.1	10.0000	-2.88	-64.08
7	7917.9	10.0000	-2.91	-64.20
8	7937.7	10.0000	-2.93	-64.31
9	7957.6	10.0000	-2.94	-64.47
10	7977.5	10.0000	-2.95	-64.60
11	7997.5	10.0000	-2.95	-64.75
12	8017.5	10.0000	-2.98	-64.82
13	8037.6	10.0000	-2.98	-64.98
14	8057.7	10.0000	-3.00	-65.09
15	8077.9	10.0000	-3.02	-65.22
16	8098.1	10.0000	-3.03	-65.38
17	8118.4	10.0000	-3.03	-65.49
18	8138.7	10.0000	-3.05	-65.61
19	8159.1	10.0000	-3.06	-65.78
20	8179.5	10.0000	-3.08	-65.94
21	8200.0	10.0000	-3.09	-66.01

#	Frequency (Hz)	Amplitude (Vpp)	Gain (dB)	Phase (°)
1	13200.0	10.0000	-6.14	-97.15
2	13219.7	10.0000	-6.16	-97.26
3	13239.5	10.0000	-6.16	-97.42
4	13259.2	10.0000	-6.17	-97.59
5	13279.0	10.0000	-6.19	-97.71
6	13298.9	10.0000	-6.19	-97.87
7	13318.7	10.0000	-6.22	-98.03
8	13338.6	10.0000	-6.22	-98.16
9	13358.6	10.0000	-6.26	-98.33
10	13378.5	10.0000	-6.26	-98.46
11	13398.5	10.0000	-6.28	-98.62
12	13418.5	10.0000	-6.28	-98.80
13	13438.6	10.0000	-6.31	-98.98
14	13458.6	10.0000	-6.29	-99.14
15	13478.7	10.0000	-6.30	-99.26
16	13498.9	10.0000	-6.33	-99.45
17	13519.0	10.0000	-6.33	-99.55
18	13539.2	10.0000	-6.36	-99.73
19	13559.5	10.0000	-6.35	-99.90
20	13579.7	10.0000	-6.37	-100.11
21	13600.0	10.0000	-6.39	-100.22

E

# Réalisation de la carte

# Alimentation

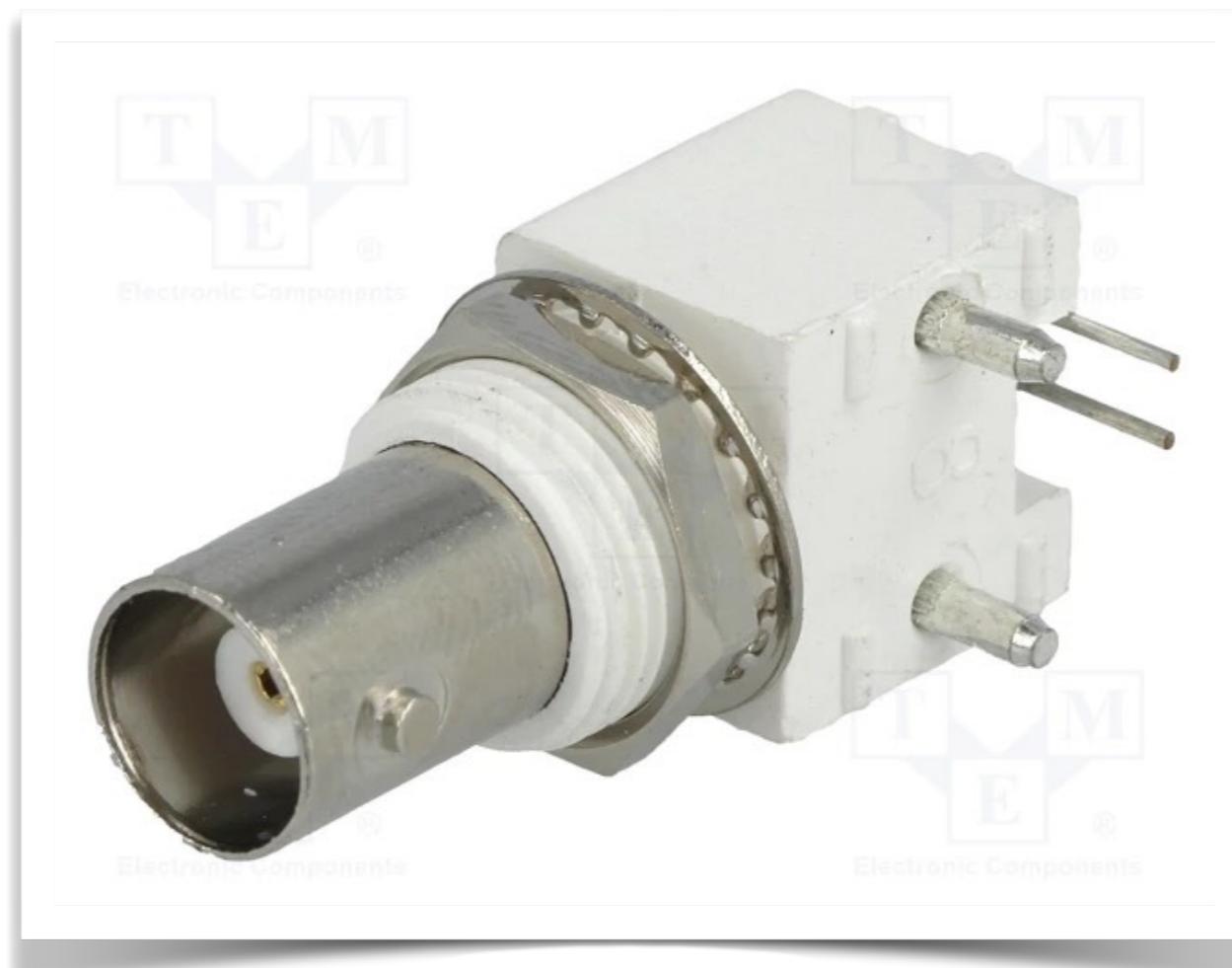
La carte est alimentée en +18V :

<https://www.tme.eu/fr/details/gs06e-5p1j/blocs-d'alimentation-a-prise/mean-well/>



# Connectique BNC

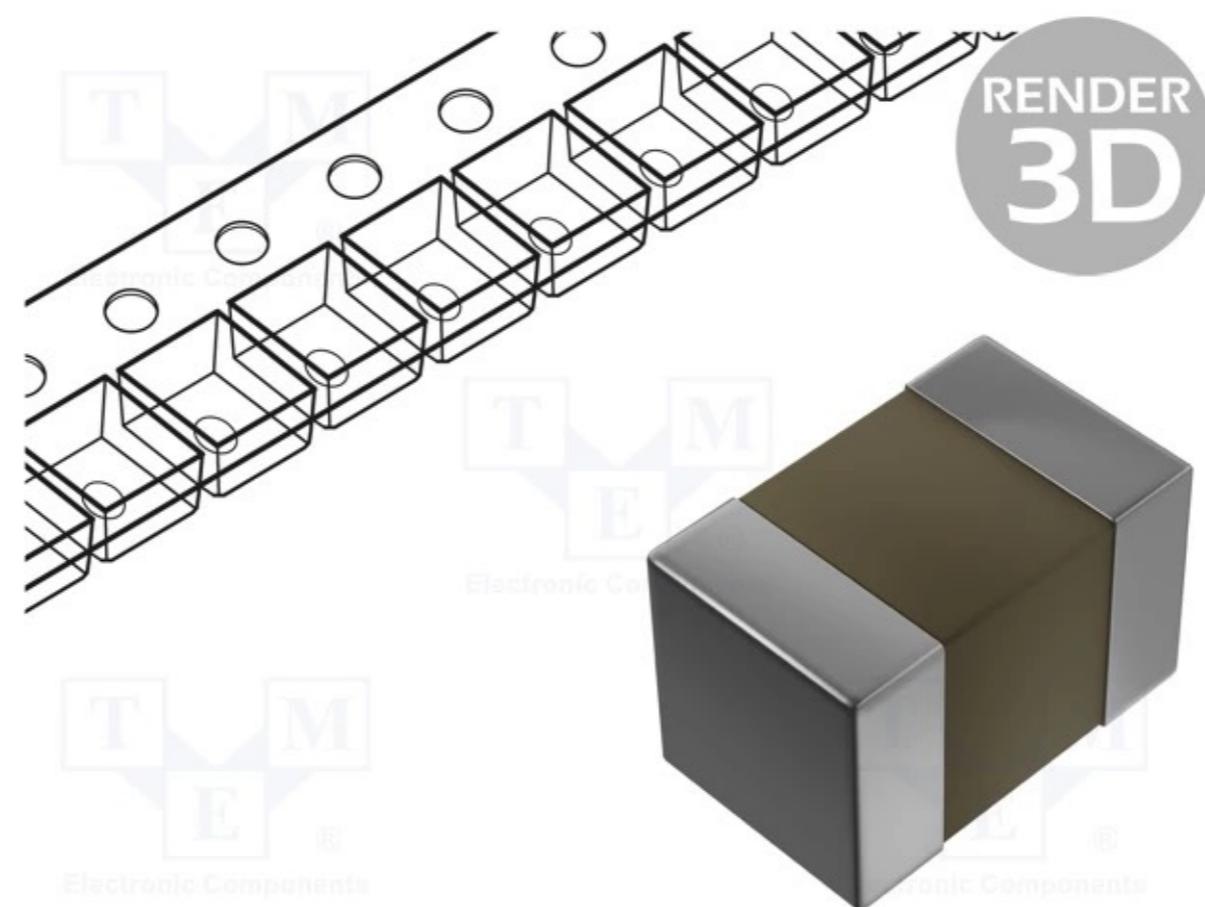
Connecteur angulaire, 50 Ω : <https://www.tme.eu/fr/details/bnc-123/connecteurs-bnc/>



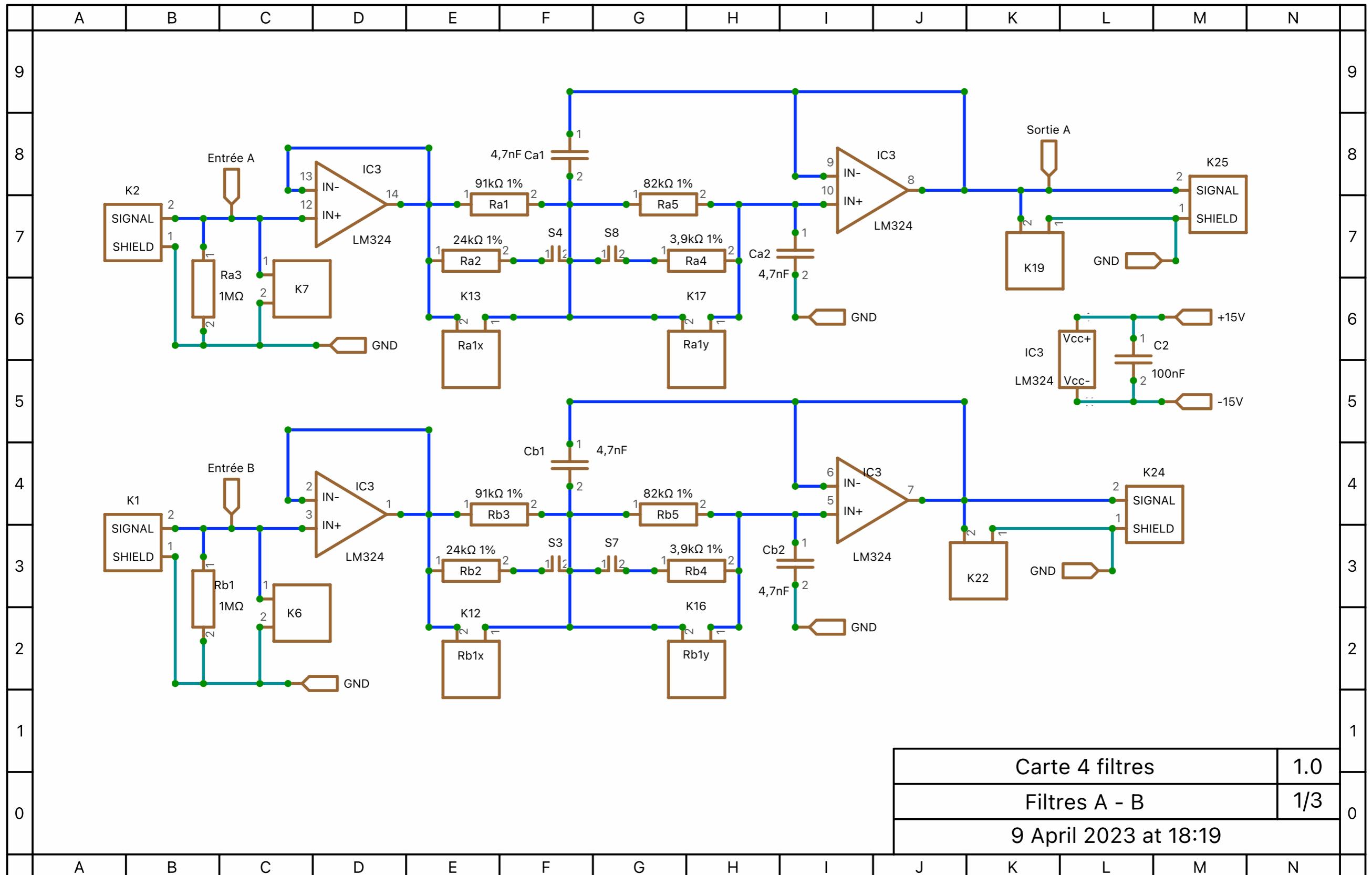
# Condensateurs 1%

Condensateur céramique 4,7 nF 1%, boîtier 2,0 mm \* 1,2 mm.

<https://www.tme.eu/fr/details/0805n472f500ct/condensateurs-mlcc-smd-0805/walsin/>



# Schéma (1/3)

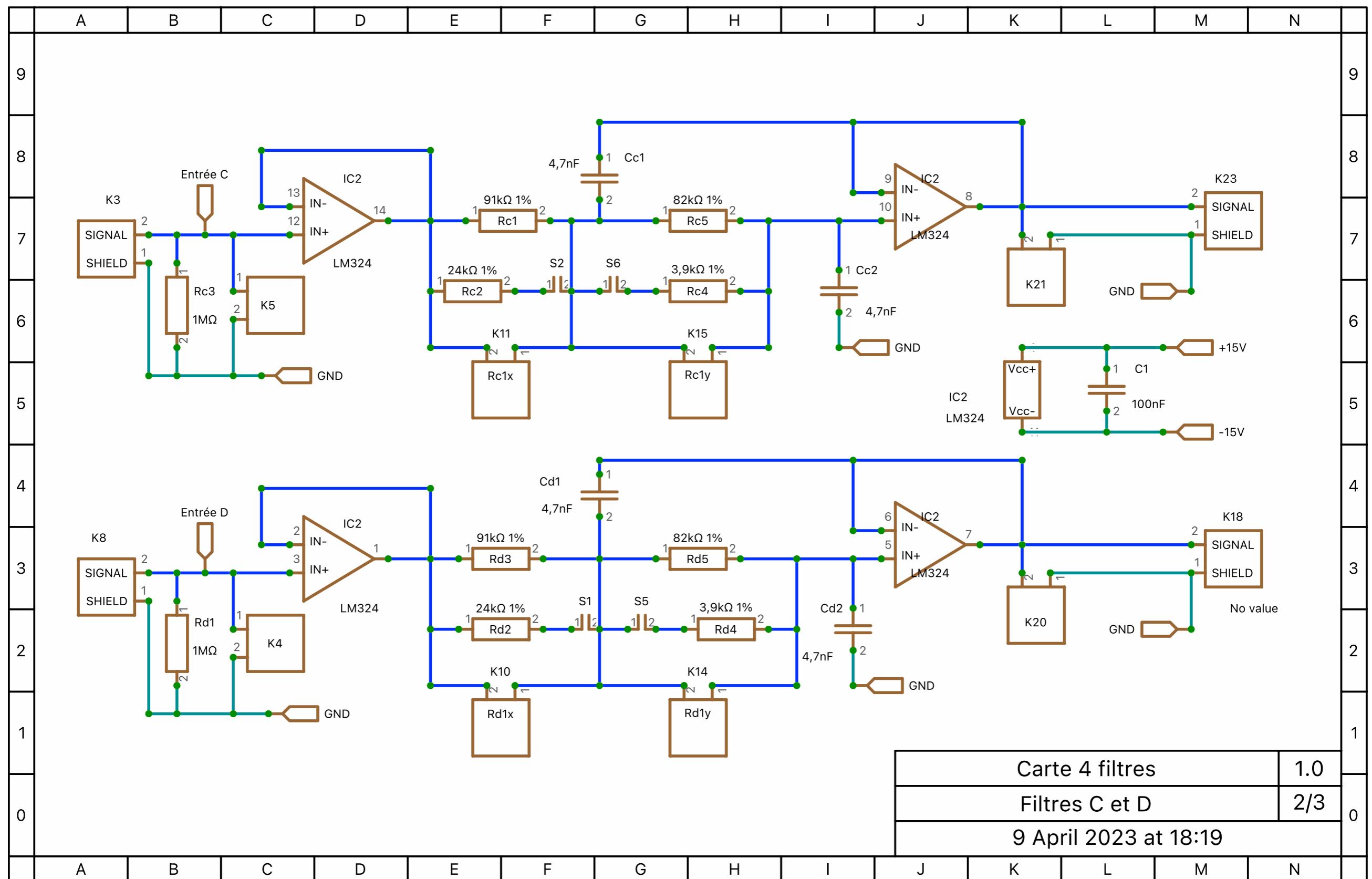


Carte 4 filtres

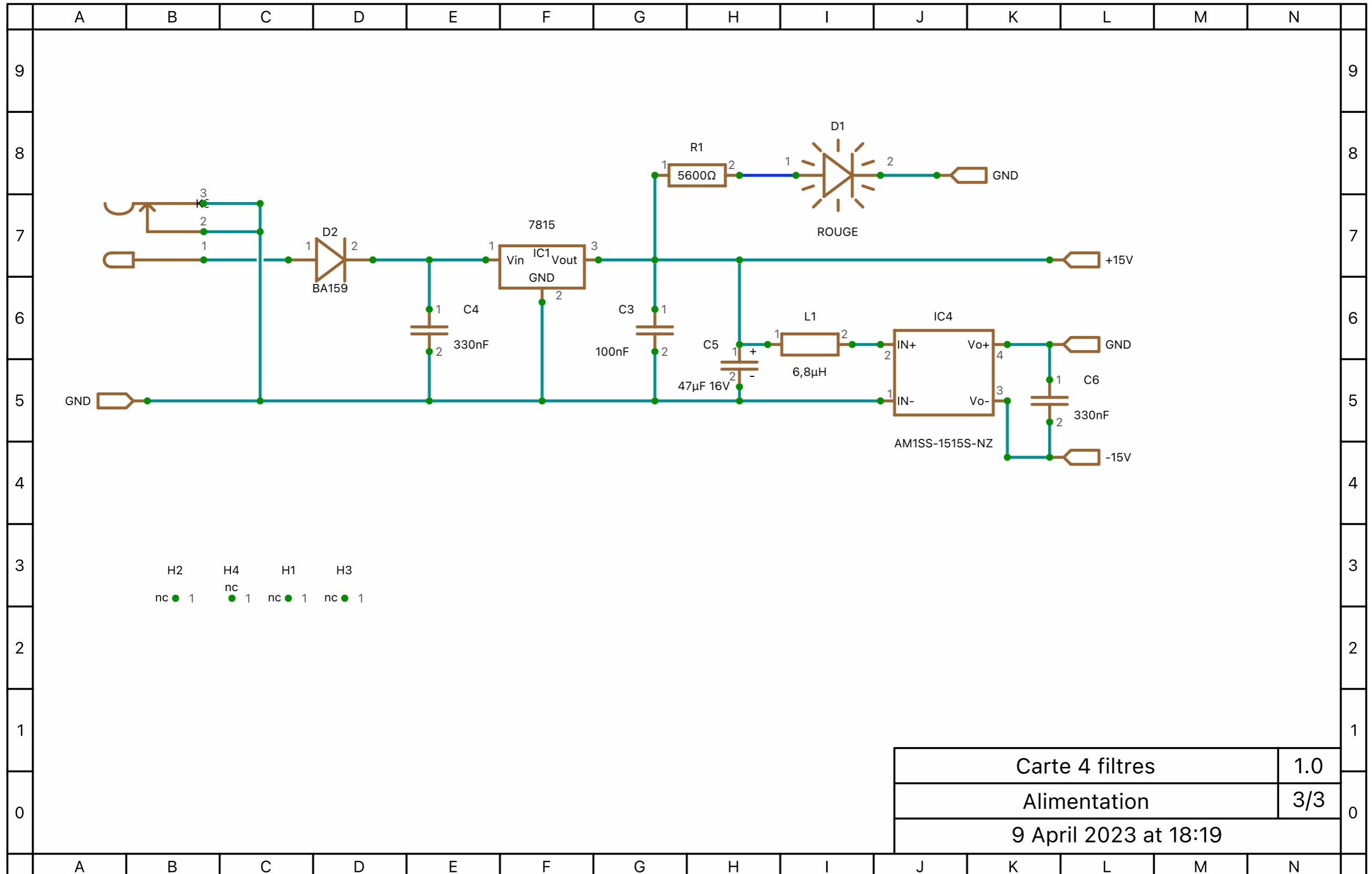
Filtres A - B

9 April 2023 at 18:19

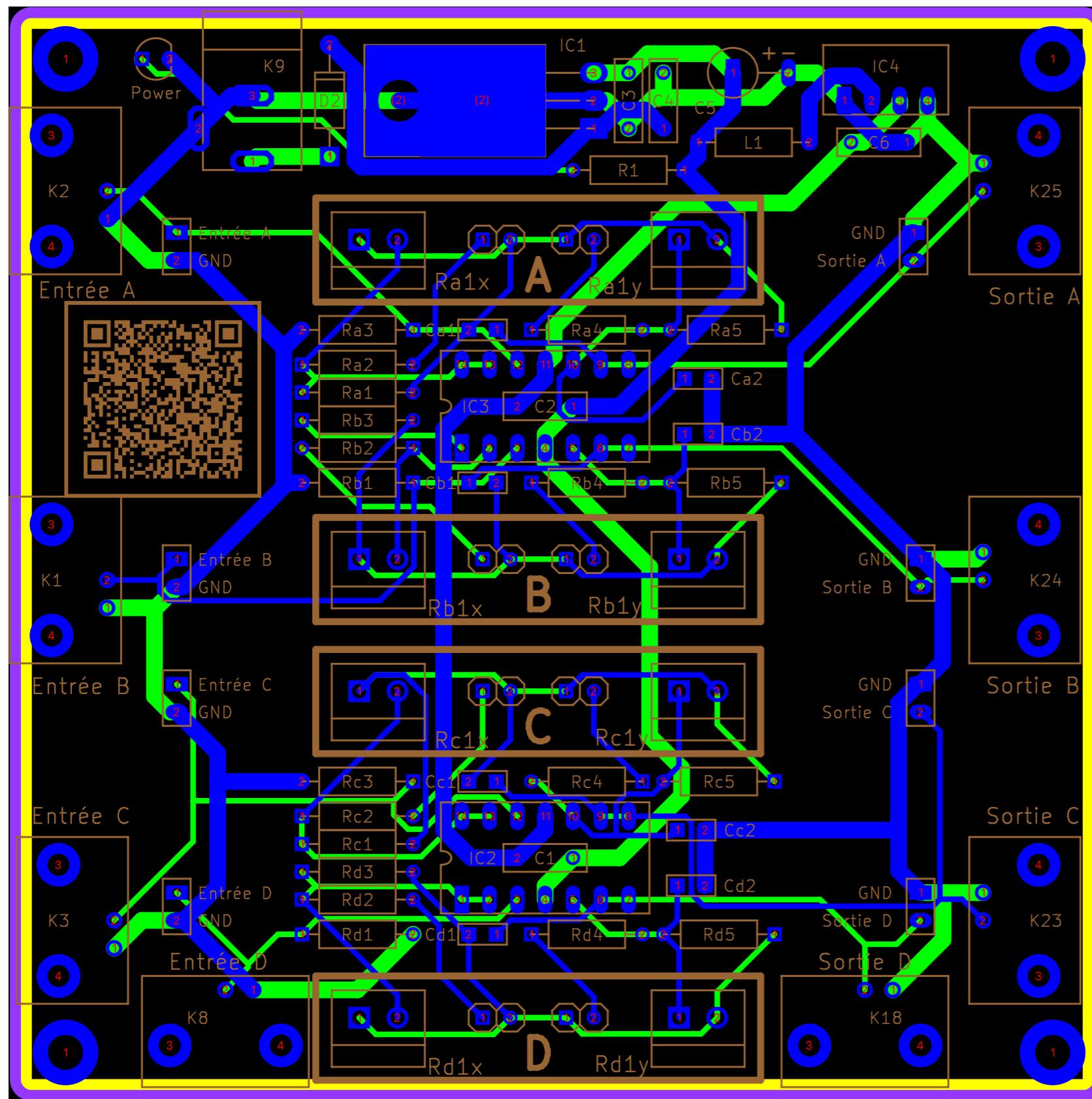
# Schéma (2/3)



# Schéma (3/3)



# Circuit imprimé



La carte contient 4 voies identiques, **A**, **B**, **C** et **D**.

Le QR Code est un lien vers la page de description de la carte.

# Réglage de la fréquence

Les réglages pour les 4 voies sont identiques. Par exemple, pour la voie **A**, fréquence de coupure 800 Hz :

F_COUPURE	Écart	R1X	Strap 1	R2X	Strap 2	fc	Gain à fc	Gain à fc
800 Hz	0.286 %	82 000 $\Omega$	ON	68 000 $\Omega$	OFF	1414.374 Hz	0.456	-6.835 dB

