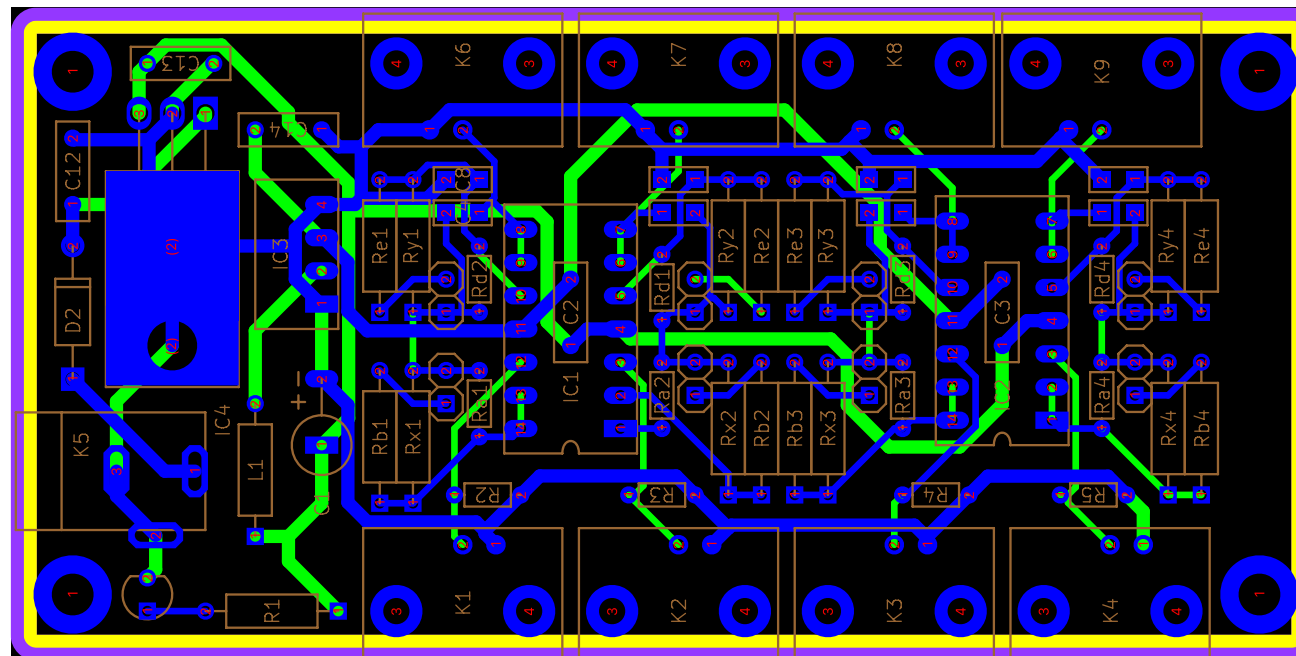
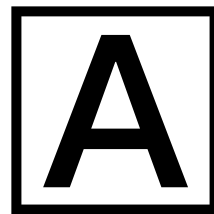


# Carte 4 filtres passe-bas



**Pierre Molinaro**

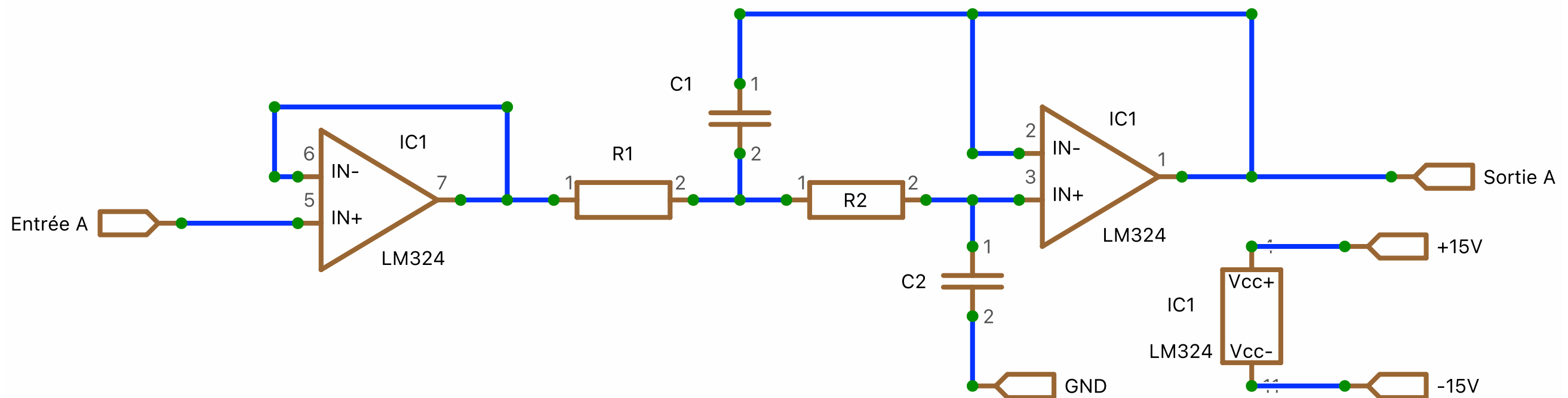
**10 juillet 2022**



# Filtre Sallen-Key

# Filtre Sallen-Key

Le filtre choisi est un filtre passe-bas de type Sallen-Key dont le gain statique est 1.



Le filtre choisi est un filtre passe-bas de type Sallen-Key dont le gain statique est 1. Il est conduit par un suiveur.

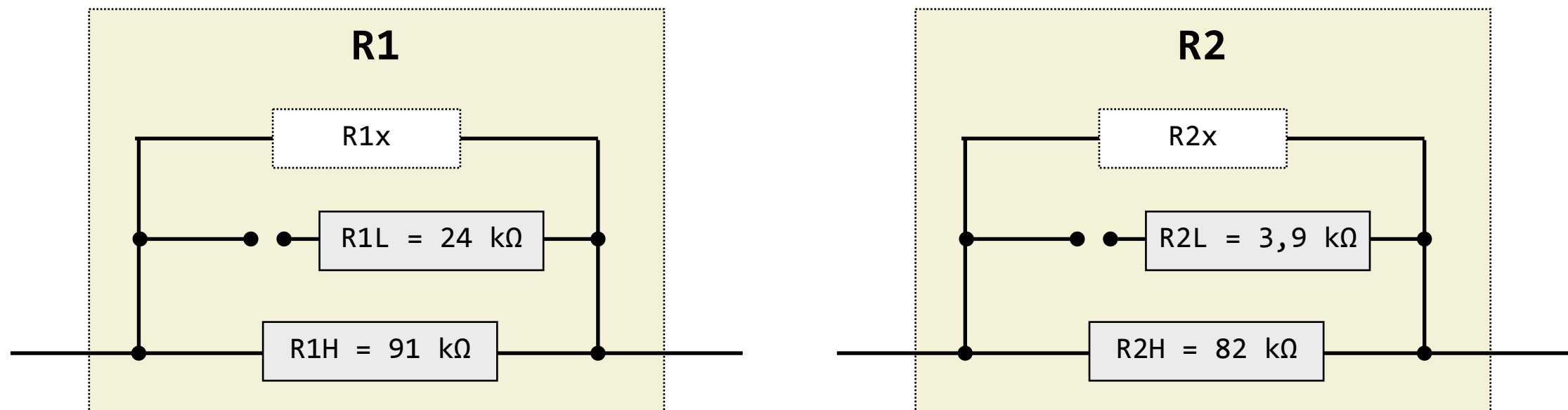
C'est un filtre d'ordre 2 dont la fréquence de coupure est :

$$f_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}}$$

# Principe de la réglage de la fréquence de coupure

Les résistances R1x et R2x sont optionnelles, montées sur support : on peut donc choisir leur présence et leur valeur.

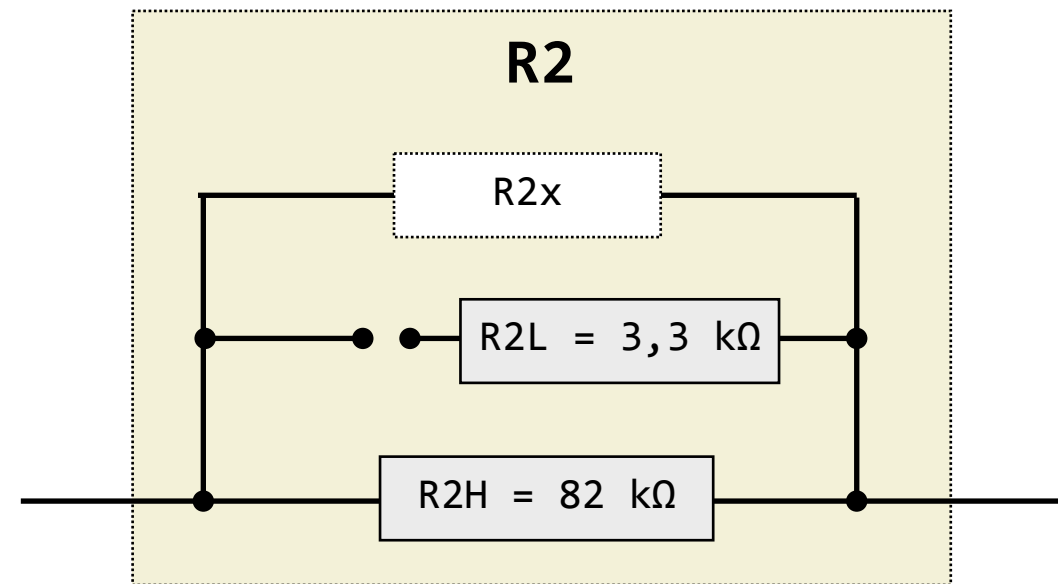
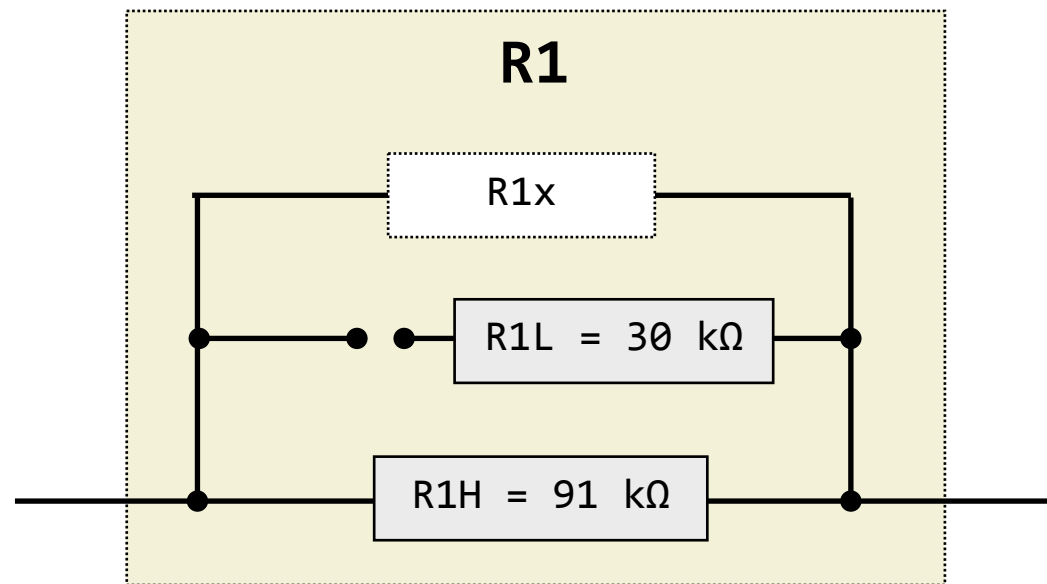
Deux straps, en l'absence de R1X et de R2X, qui permettent d'atteindre directement 4 fréquences de coupure.



Pour atteindre une fréquence de coupure donnée, on a les possibilités suivantes :

- mettre une résistance R1x, strap R1L ouvert, strap R2L ouvert ;
- mettre une résistance R1x, strap R1L ouvert, strap R2L fermé ;
- mettre une résistance R1x, strap R1L fermé, strap R2L ouvert ;
- mettre une résistance R1x, strap R1L fermé, strap R2L fermé ;
- mettre une résistance R2x, strap R1L ouvert, strap R2L ouvert ;
- mettre une résistance R2x, strap R1L ouvert, strap R2L fermé ;
- mettre une résistance R2x, strap R1L fermé, strap R2L ouvert ;
- mettre une résistance R2x, strap R1L fermé, strap R2L fermé ;
- mettre une résistance R1x et R2X, strap R1L ouvert, strap R2L ouvert ;
- mettre une résistance R1x et R2X, strap R1L ouvert, strap R2L fermé ;
- mettre une résistance R1x et R2X, strap R1L fermé, strap R2L ouvert ;
- mettre une résistance R1x et R2X, strap R1L fermé, strap R2L fermé.

# Fréquences de coupures en fonction des straps (1/2)



Strap R1L	Strap R2L	Fréquence de coupure
OFF	OFF	392 Hz
ON	OFF	787 Hz
OFF	ON	1 993Hz
ON	ON	4 003 Hz

# Fréquences de coupures en fonction des straps (2/2)

Le code C++ `codes-c++/calcul-resistances-pour-2-frequences.cpp` calcule les meilleures valeurs de résistances pour atteindre deux fréquences. Elles y sont spécifiées par des constantes :

```
static const double FREQUENCE_CIBLE_BASSE = 400.0 ;  
static const double FREQUENCE_CIBLE_HAUTE = 4000.0 ;
```

Les valeurs de résistances sont choisies parmi les résistances de la série E24, entre 1 k $\Omega$  et 100 k $\Omega$ .

L'exécution dure quelques secondes et affiche les 10 meilleurs choix, par ordre décroissant :

*-----*									
Écart	F0	F1	F2	F3	R1H	R1L	R2H	R2L	
*-----*									
0.000400	392.0	787.3	1993.0	4002.6	91000	30000	82000	3300	
0.000400	392.0	819.5	1911.5	3996.1	91000	27000	82000	3600	
0.000401	392.0	1768.9	885.3	3994.7	91000	4700	82000	20000	
0.000401	392.0	2551.5	615.4	4005.3	91000	2200	82000	56000	
0.000404	392.0	715.7	2195.6	4008.6	91000	39000	82000	2700	
0.000404	392.0	615.8	2540.5	3990.9	91000	62000	82000	2000	
0.000405	392.0	1013.7	1550.4	4009.4	91000	16000	82000	5600	
0.000407	392.0	1701.7	924.0	4010.8	91000	5100	82000	18000	
0.000409	392.0	1845.5	852.3	4012.5	91000	4300	82000	22000	
0.000411	392.0	964.7	1620.0	3986.5	91000	18000	82000	5100	
*-----*									

# Choix de R1x et R2x pour atteindre une fréquence donnée

Le code C++ `codes-c++/calcul-pontage-pour-une-frequence-donnee.cpp` calcule les meilleures valeurs des résistances R1X et R2X, associées à la présence ou à l'absence des straps, pour atteindre une fréquence donnée.

La fréquence recherchée est spécifiée par une constante :

```
static const double FREQUENCE_CIBLE = 550.0 ;
```

Le nombre des meilleurs résultats qui sont affichés :

```
static const int NOMBRE_RESULTATS = 5 ;
```

Enfin, on indique si on veut effectuer le calcul incluant ou en excluant la prise en compte de la présence simultanée de R1X et R2X :

```
static const bool CALCULER_POUR_R1X_ET_R2X = false ;
```

L'exécution dure moins d'une seconde et affiche les meilleurs choix, par ordre décroissant (une valeur 0 pour R1X ou R2X signifie que la résistance est en fait absente) :

```
*-----*
| Écart |   Fc | Strap R1L | Strap R2L | R1x | R2x |
*-----*
| 0.797% | 554.4 | off       | off       | 91000 | 0   |
| 0.797% | 554.4 | off       | off       | 0     | 82000 |
| 1.497% | 541.8 | off       | off       | 100000 | 0   |
| 1.727% | 540.5 | off       | off       | 0     | 91000 |
| 3.122% | 567.2 | off       | off       | 0     | 75000 |
*-----*
```

# Meilleur choix de R1x et R2x pour atteindre plusieurs fréquences données (1/3)

Le code C++ `codes-c++/calcul-pontage-pour-plusieurs-frequences.cpp` calcule les meilleures valeurs des résistances R1X et R2X, associées à la présence ou à l'absence des straps, pour atteindre les fréquences 400 Hz, 450 Hz, 500 Hz, ... 950 Hz, 100 Hz, 1500 Hz, 2000 Hz, ..., 4000 Hz. Pour chaque fréquence, seul le meilleur choix est affiché.

On indique si on veut effectuer le calcul incluant ou en excluant la prise en compte de la présence simultanée de R1X et R2X :

```
static const bool CALCULER_POUR_R1X_ET_R2X = false ;
```

*Suite page suivante...*



# Meilleur choix de R1x et R2x pour atteindre plusieurs fréquences données (2/3)

...suite de la page précédente

L'exécution dure moins d'une seconde et affiche le meilleur choix pour chaque fréquence (une valeur 0 pour R1X ou R2X signifie que la résistance est en fait absente) :

*-----*														
	F Cible		Écart		F réel		Strap R1L		Strap R2L		R1x		R2x	
*-----*														
	400 Hz		0.645%		402.6 Hz		off		off		0		150000	
	450 Hz		0.535%		447.6 Hz		off		off		0		270000	
	500 Hz		0.623%		496.9 Hz		off		off		150000		0	
	550 Hz		0.797%		554.4 Hz		off		off		91000		0	
	600 Hz		0.095%		599.4 Hz		off		off		68000		0	
	650 Hz		0.086%		649.4 Hz		off		off		0		47000	
	700 Hz		1.141%		692.0 Hz		off		off		43000		0	
	750 Hz		0.991%		757.4 Hz		off		off		0		30000	
	800 Hz		0.029%		800.2 Hz		on		off		680000		0	
	850 Hz		0.211%		848.2 Hz		on		off		0		510000	
	900 Hz		0.121%		898.9 Hz		on		off		0		270000	
	950 Hz		0.019%		949.8 Hz		on		off		0		180000	
	1000 Hz		0.314%		996.9 Hz		off		off		0		15000	
	1500 Hz		0.890%		1486.7 Hz		off		off		6800		0	
	2000 Hz		0.013%		1999.7 Hz		off		on		0		470000	
	2500 Hz		0.150%		2496.3 Hz		off		on		160000		0	
	3000 Hz		0.593%		2982.2 Hz		off		off		1600		0	
	3500 Hz		0.094%		3503.3 Hz		on		off		1200		0	
	4000 Hz		0.065%		4002.6 Hz		on		on		0		0	
*-----*														

Ce tableau a été construit avec CALCULER\_POUR\_R1X\_ET\_R2X égal à **false**, ce qui signifie que les solutions ne comportent pas à la fois R1x et R2x.

Suite page suivante...

# Meilleur choix de R1x et R2x pour atteindre plusieurs fréquences données (3/3)

...suite de la page précédente

L'exécution dure moins d'une seconde et affiche le meilleur choix pour chaque fréquence (une valeur 0 pour R1X ou R2X signifie que la résistance est en fait absente) :

*-----*														
	F Cible		Écart		F réel		Strap R1L		Strap R2L		R1x		R2x	
*-----*														
	400 Hz		0.645%		402.6 Hz		off		off		0		1500000	
	450 Hz		0.006%		450.0 Hz		off		off		390000		1200000	
	500 Hz		0.010%		500.1 Hz		off		off		300000		330000	
	550 Hz		0.047%		550.3 Hz		off		off		120000		680000	
	600 Hz		0.043%		600.3 Hz		off		off		390000		91000	
	650 Hz		0.020%		650.1 Hz		off		off		82000		270000	
	700 Hz		0.032%		700.2 Hz		off		off		560000		47000	
	750 Hz		0.006%		750.0 Hz		off		off		43000		470000	
	800 Hz		0.029%		800.2 Hz		on		off		680000		0	
	850 Hz		0.002%		850.0 Hz		on		off		560000		680000	
	900 Hz		0.002%		900.0 Hz		off		off		24000		820000	
	950 Hz		0.005%		949.9 Hz		off		off		47000		82000	
	1000 Hz		0.000%		1000.0 Hz		on		off		47000		910000	
	1500 Hz		0.002%		1500.0 Hz		off		off		8200		390000	
	2000 Hz		0.001%		2000.0 Hz		off		off		4300		470000	
	2500 Hz		0.003%		2499.9 Hz		off		on		200000		39000	
	3000 Hz		0.005%		3000.2 Hz		on		off		39000		10000	
	3500 Hz		0.014%		3500.5 Hz		off		off		1800		150000	
	4000 Hz		0.002%		4000.1 Hz		on		off		1200		270000	
*-----*														

Ce tableau a été construit avec CALCULER\_POUR\_R1X\_ET\_R2X égal à **true**, ce qui signifie que les solutions peuvent comporter à la fois R1x et R2x.

# Peut-on atteindre toute fréquence ? (1/2)

Question subsidiaire : peut-on atteindre n'importe quelle fréquence entre 400 Hz et 4 000 Hz par le jeu des straps et des résistances R1x et R2x que l'on ajoute ? C'est la question à laquelle répond le code `codes-c++/calcul-meilleurs-pontages-pour-gamme-frequences.cpp`. Le code calcule pour chaque fréquence entre 400 Hz et 4000 Hz, par pas de 1 Hz, le meilleur choix de straps et de résistances R1x et R2X. Puis il classe ces résultats par écart décroissant, et retient les plus mauvais scores.

Si on examine le cas où l'on ne rajoute qu'une seule résistance (R1x ou R2x) :

*-----*														
	F Cible		Écart		F réel		Strap R1L		Strap R2L		R1x		R2x	
*-----*														
	400 Hz		1.941%		407.8 Hz		off		off		0		1000000	
	3933 Hz		1.770%		4002.6 Hz		on		on		0		0	
	3932 Hz		1.745%		3863.4 Hz		off		on		33000		0	
	3934 Hz		1.744%		4002.6 Hz		on		on		0		0	
	3931 Hz		1.720%		3863.4 Hz		off		on		33000		0	
	3935 Hz		1.718%		4002.6 Hz		on		on		0		0	
	774 Hz		1.715%		787.3 Hz		on		off		0		0	
	773 Hz		1.696%		759.9 Hz		off		off		33000		0	
	3930 Hz		1.695%		3863.4 Hz		off		on		33000		0	
	3936 Hz		1.693%		4002.6 Hz		on		on		0		0	
	401 Hz		1.687%		407.8 Hz		off		off		0		1000000	
	3929 Hz		1.670%		3863.4 Hz		off		on		33000		0	
	3937 Hz		1.667%		4002.6 Hz		on		on		0		0	
	3928 Hz		1.645%		3863.4 Hz		off		on		33000		0	
	3938 Hz		1.641%		4002.6 Hz		on		on		0		0	
	3927 Hz		1.620%		3863.4 Hz		off		on		33000		0	
	3939 Hz		1.615%		4002.6 Hz		on		on		0		0	
	3926 Hz		1.595%		3863.4 Hz		off		on		33000		0	
	3940 Hz		1.589%		4002.6 Hz		on		on		0		0	
	775 Hz		1.584%		787.3 Hz		on		off		0		0	
*-----*														

Ce tableau a été construit avec `CALCULER_POUR_R1X_ET_R2X` égal à **false**, ce qui signifie que les solutions ne comportent pas à la fois R1x et R2x.

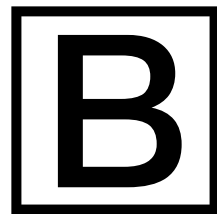
# Peut-on atteindre toute fréquence ? (2/2)

...suite de la page précédente

Si on autorise la présence des deux résistances R1x et R2x :

*-----*							
F Cible	Écart	F réel	Strap R1L	Strap R2L	R1x	R2x	
*-----*							
400 Hz	1.941%	407.8 Hz	off	off	0	1000000	
401 Hz	1.687%	407.8 Hz	off	off	0	1000000	
402 Hz	1.434%	407.8 Hz	off	off	0	1000000	
403 Hz	1.182%	407.8 Hz	off	off	0	1000000	
404 Hz	0.932%	407.8 Hz	off	off	0	1000000	
405 Hz	0.682%	407.8 Hz	off	off	0	1000000	
406 Hz	0.434%	407.8 Hz	off	off	0	1000000	
421 Hz	0.287%	419.8 Hz	off	off	620000	0	
416 Hz	0.214%	415.1 Hz	off	off	750000	0	
412 Hz	0.208%	411.1 Hz	off	off	910000	0	
414 Hz	0.196%	413.2 Hz	off	off	820000	0	
424 Hz	0.196%	424.8 Hz	off	off	0	470000	
407 Hz	0.188%	407.8 Hz	off	off	0	1000000	
419 Hz	0.174%	419.7 Hz	off	off	0	560000	
589 Hz	0.153%	588.1 Hz	off	off	270000	120000	
559 Hz	0.150%	559.8 Hz	off	off	430000	120000	
706 Hz	0.141%	705.0 Hz	off	off	510000	47000	
418 Hz	0.140%	417.4 Hz	off	off	680000	0	
410 Hz	0.133%	409.5 Hz	off	off	1000000	0	
530 Hz	0.122%	529.4 Hz	off	off	360000	180000	
*-----*							

Ce tableau a été construit avec CALCULER\_POUR\_R1X\_ET\_R2X égal à **true**, ce qui signifie que les solutions peuvent comporter à la fois R1x et R2x.



# Réalisation de la carte

# Carte envisagée

La carte contient 4 voies identiques.

Elle est alimentée en +18V :

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

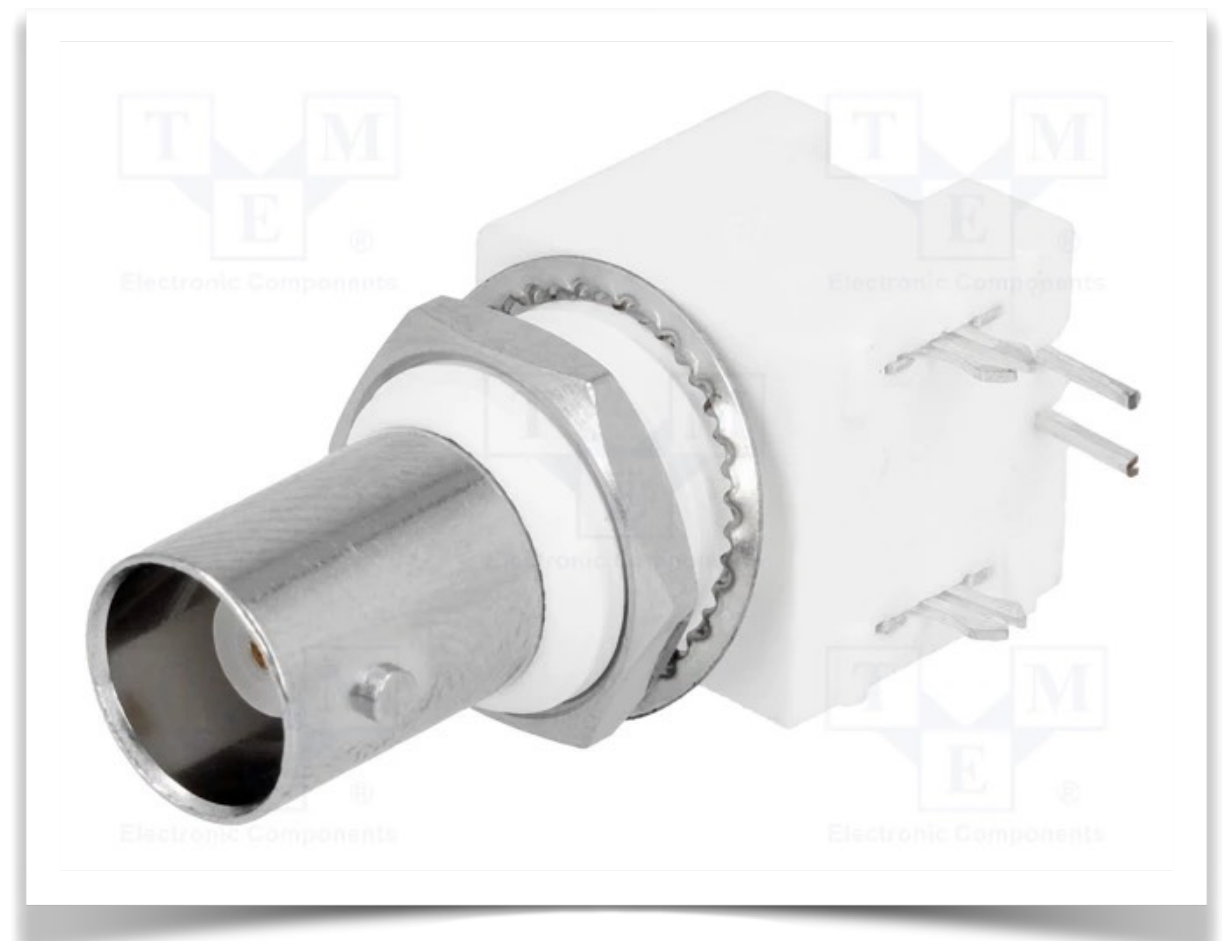
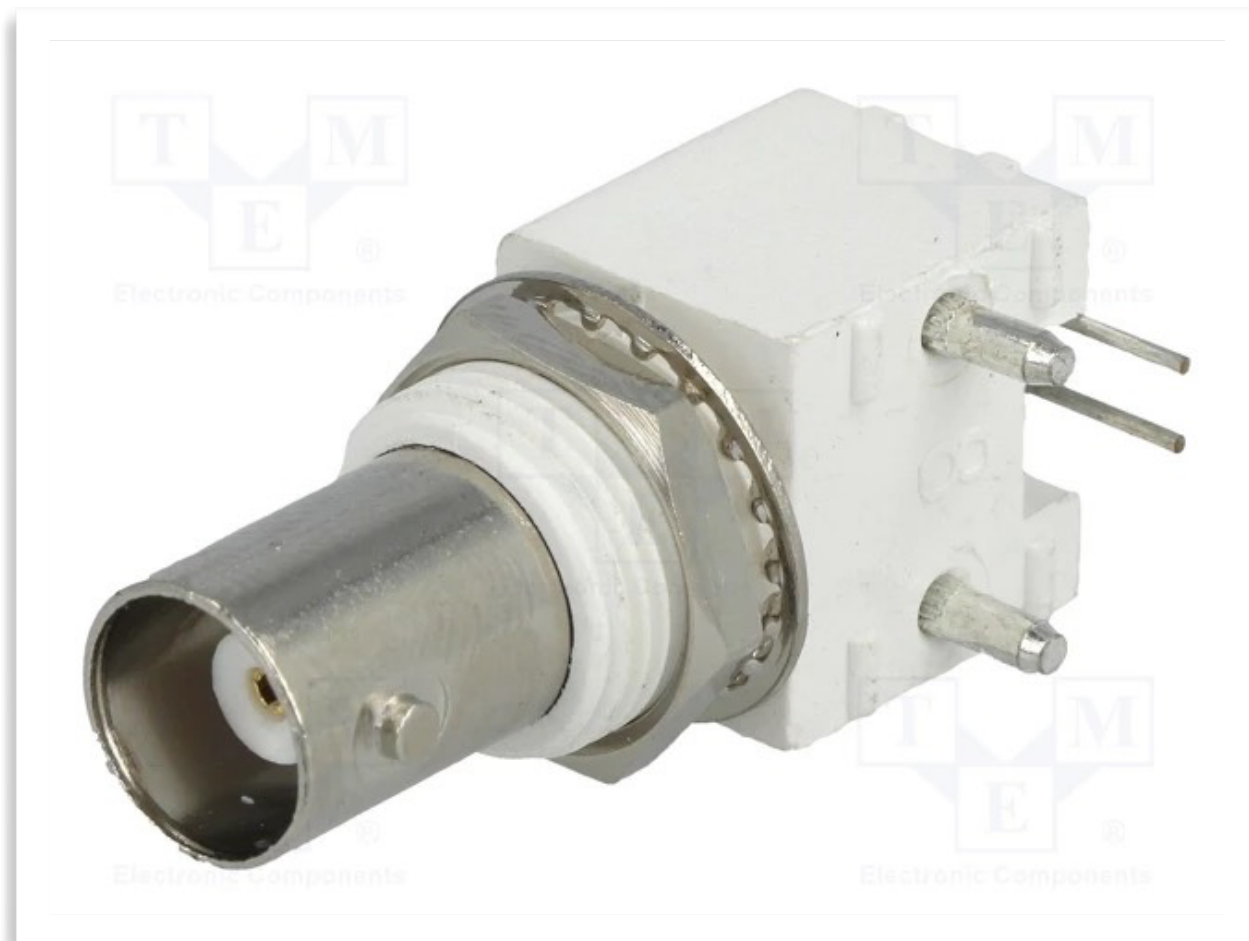


# Connectique BNC

Connecteur angulaire, 50  $\Omega$ .

<https://www.tme.eu/fr/details/bnc-123/connecteurs-bnc/>

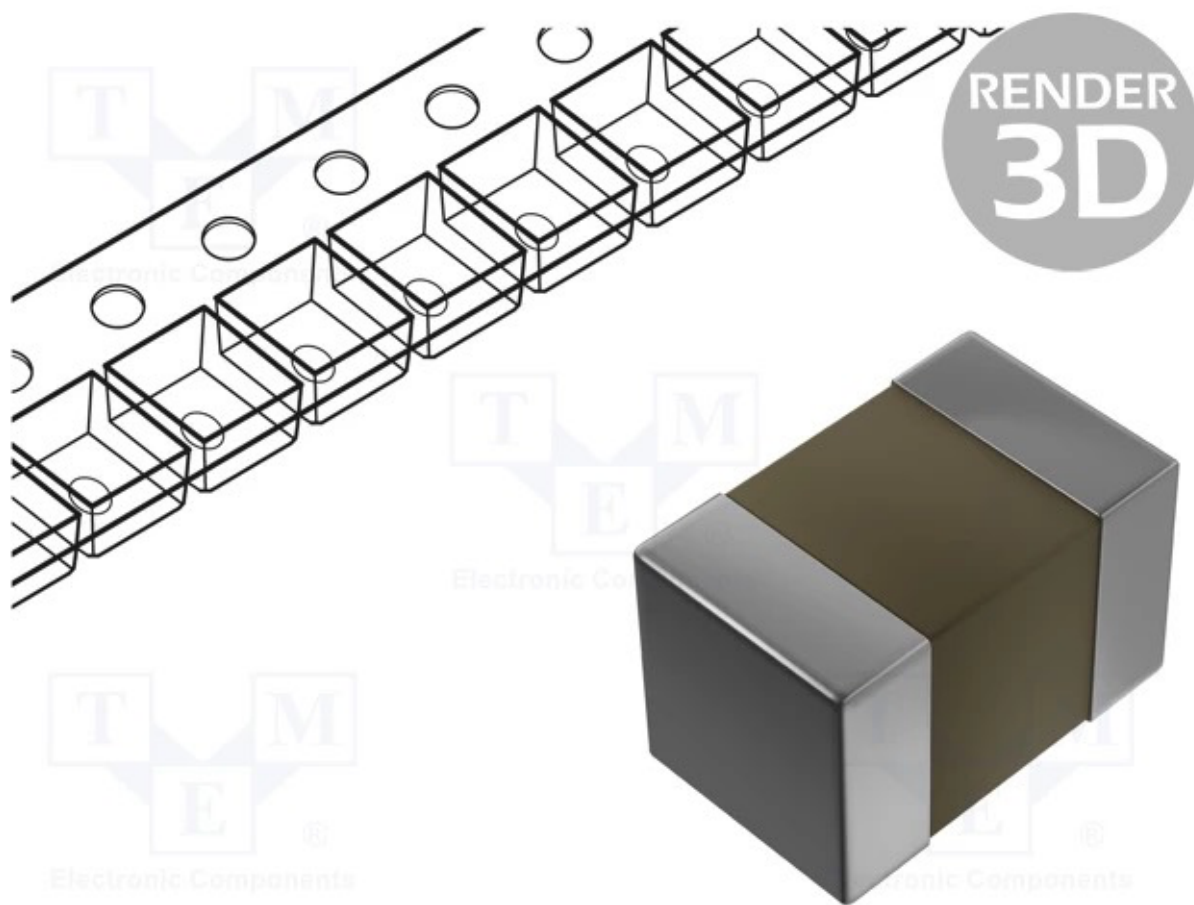
<https://www.tme.eu/fr/details/b6252h5npp3g50/connecteurs-bnc/amphenol-communications-solutions/b6252h5-npp3g-50/>



# Condensateurs 1%

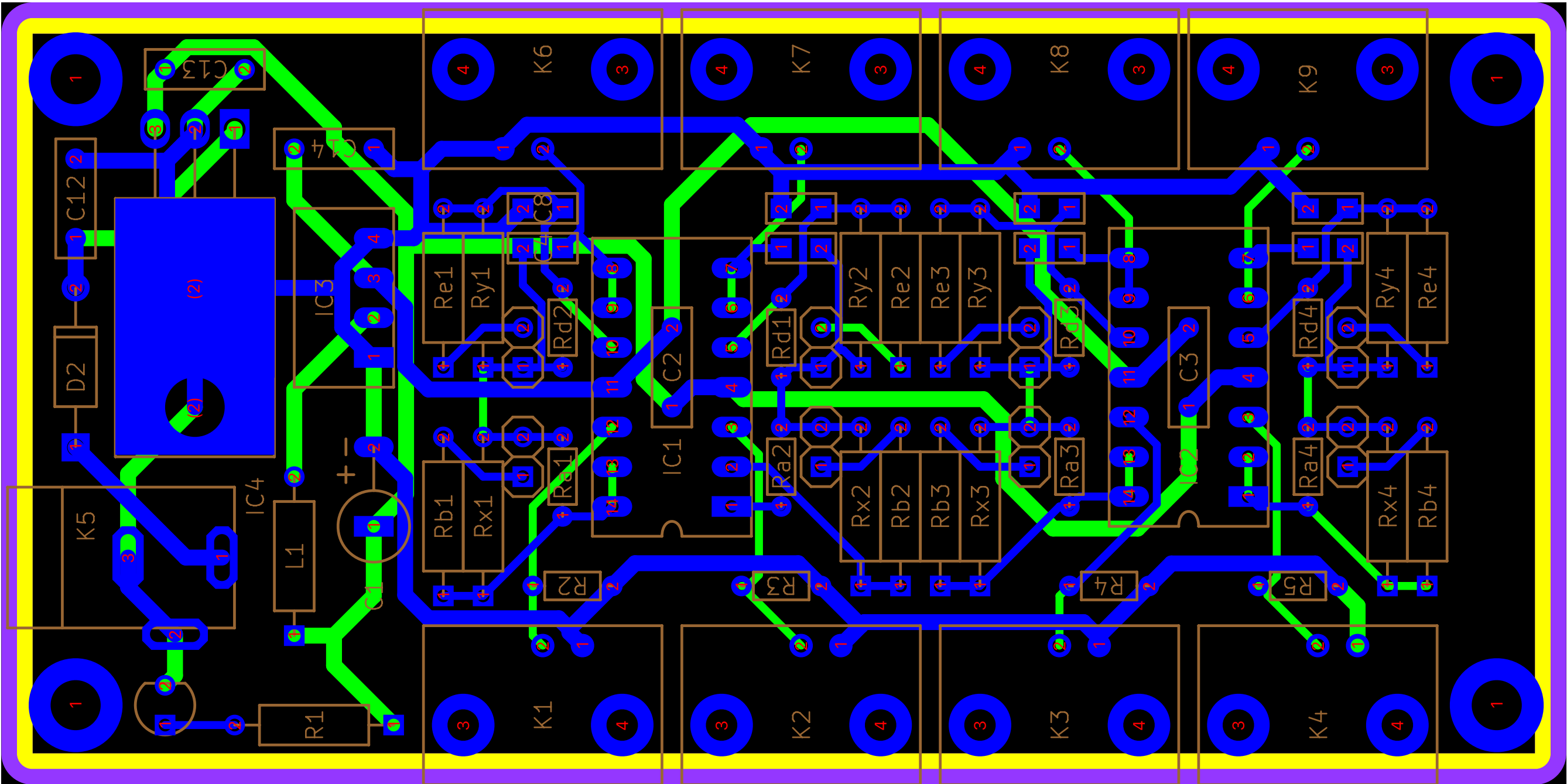
Condensateur céramique 4,7 nF 1%, boîtier 2,0 mm \* 1,2 mm.

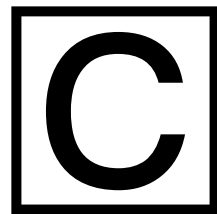
<https://www.tme.eu/fr/details/0805n472f500ct/condensateurs-mlcc-smd-0805/walsin/>





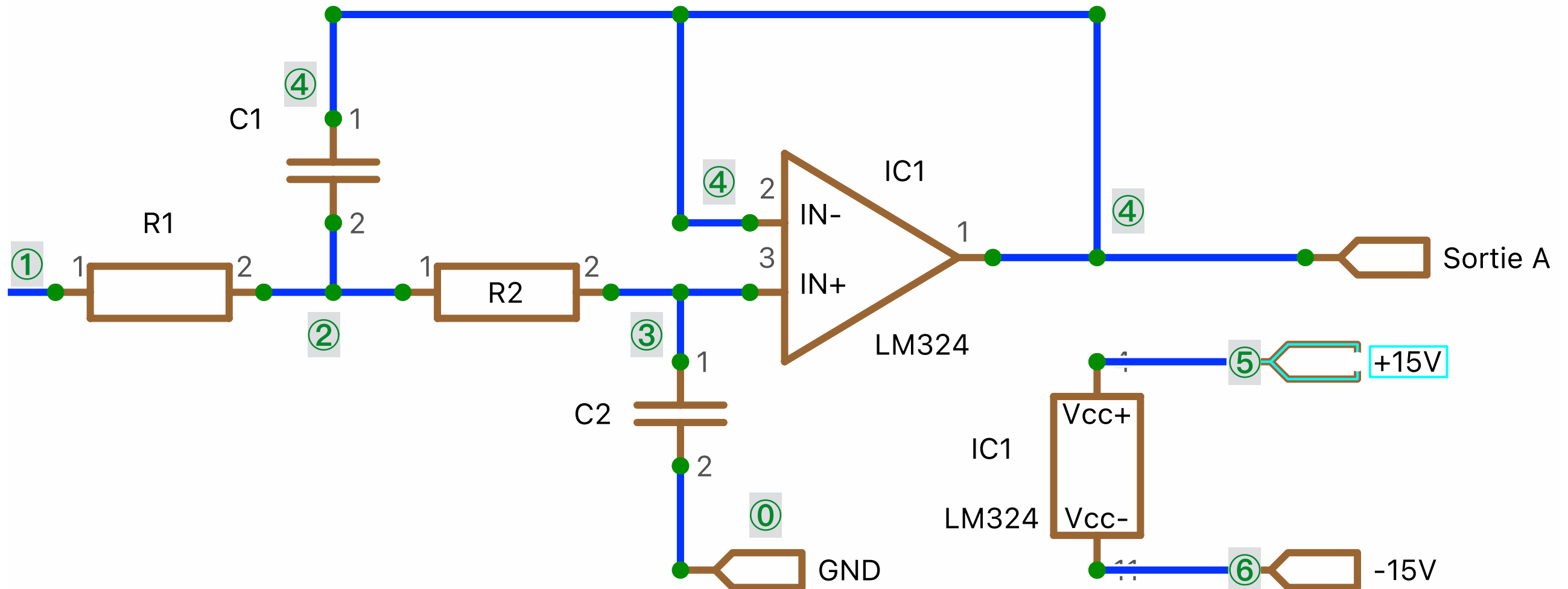
# Circuit imprimé





# **Simulations Spice**

# Le montage simulé



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

Les valeurs choisies sont :  $R1 = 120\text{ k}\Omega$ ,  $R2 = 68\text{ k}\Omega$ ,  $C1 = C2 = 4,7\text{ nF}$ .

La fréquence de coupure théorique est 374 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 VTO=-1)
.ENDS
```

# Code de la simulation

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

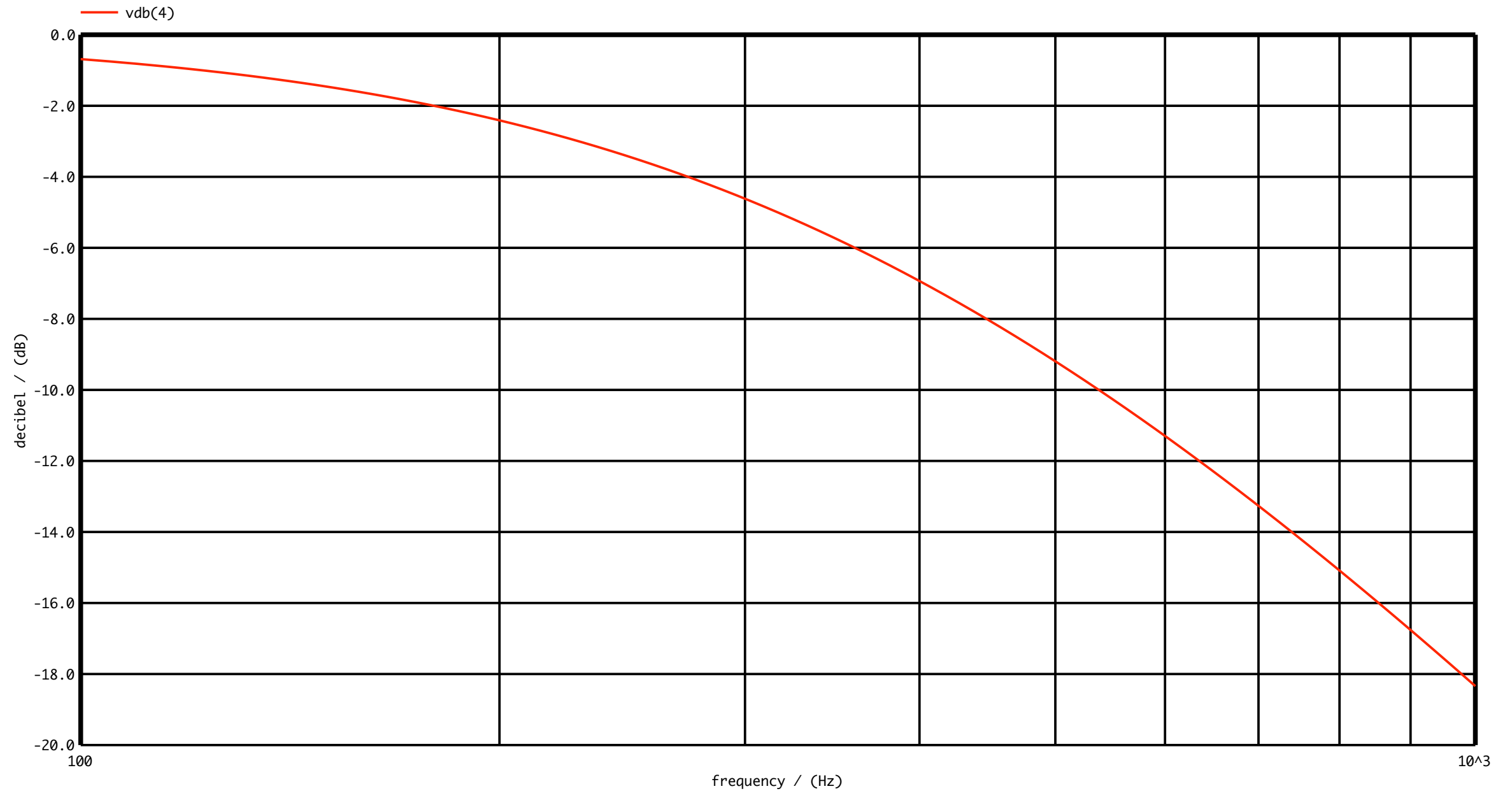
XOP 3 4 5 6 4 TL074

R1 1 2 120k
R2 2 3 68k
C1 2 4 4.7n
C2 3 0 4.7n

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

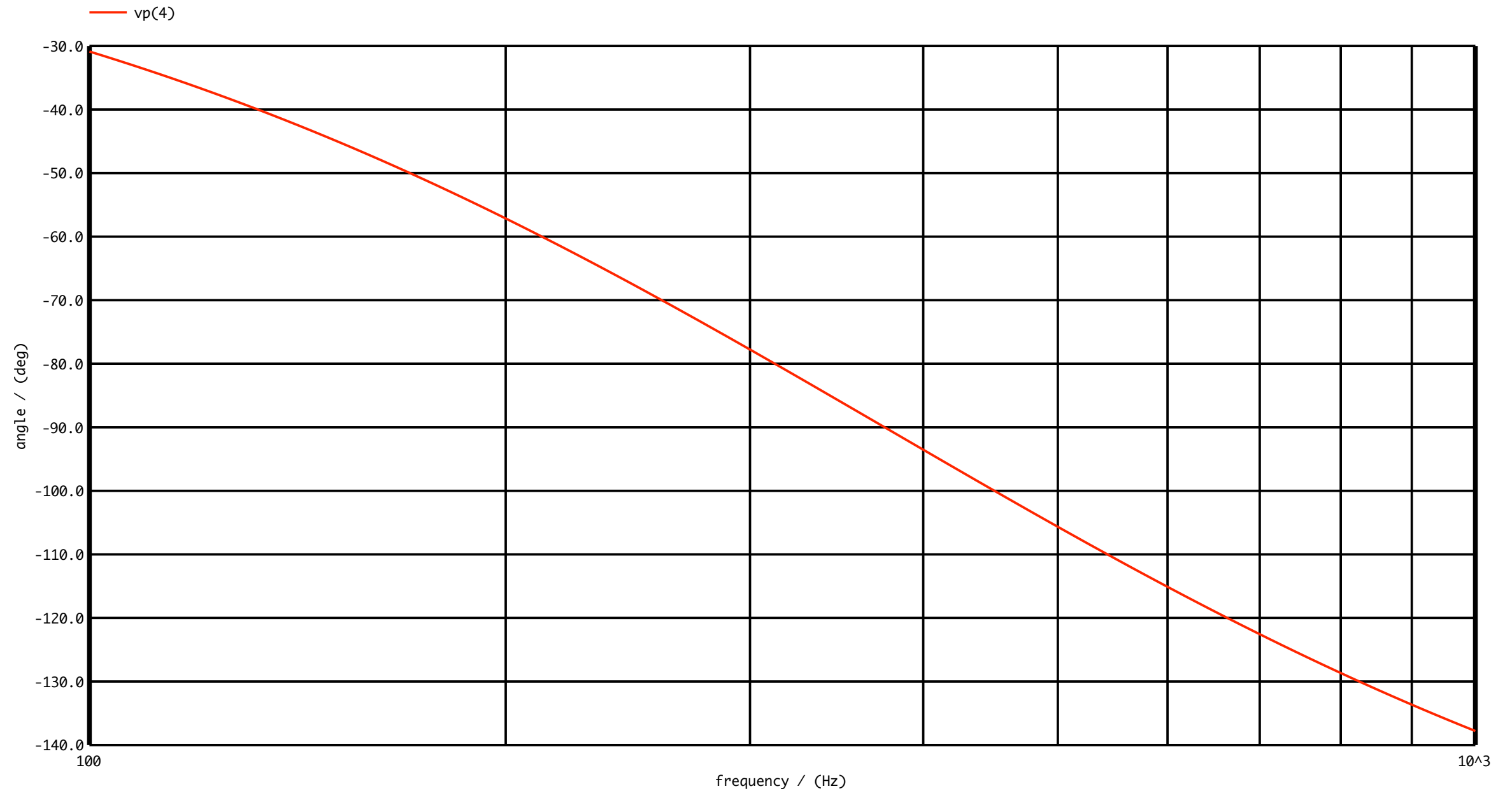
.control
ac dec 100 100 1000
plot vdb(4)
plot vp(4)
.endc
.end
```

# Gain en dB



Cette courbe est le gain en dB entre 100 Hz et 1 kHz. Le gain de -6 dB est atteint pour 360 Hz environ.

# Phase en degré



Cette courbe est la phase en degrés entre 100 Hz et 1 kHz. La phase de  $-90^\circ$  est atteinte pour 375 Hz environ.