

simulation de circuit avec Micro-Cap

premiers pas dans un monde compliqué



Raymond Schouten (Pays-Bas)

Un simulateur de circuits devrait faire partie de la boîte à outils de tout passionné d'électronique, au même titre qu'une alimentation électrique, un multimètre et un oscilloscope. Et comme pour tout autre outil, pour en tirer le meilleur parti, vous devez consacrer un peu de temps à apprendre à l'utiliser. Dans cet article, nous vous montrons comment commencer à utiliser le simulateur gratuit Micro-Cap.

Pourquoi simuler ?

L'utilisation d'un simulateur de circuit peut vous faire gagner du temps pour tester des idées ou spécifier des composants. C'est également un bon outil d'apprentissage et de débogage, qui vous montre ce qui se passe à l'intérieur d'un circuit.

Les logiciels de simulation de circuits comme LTspice (Analog Devices), Tina (Texas Instru-

ments) et Micro-Cap utilisent le code SPICE basé sur la saisie de texte et développé à l'Université de Californie, Berkeley (1973). L'apport des logiciels modernes consiste essentiellement en une interface graphique. Une partie importante de cet article est donc valable pour les trois, surtout lorsqu'il s'agit de conseils pour éviter les erreurs de simulation.

Le simulateur présenté dans cet article est

Micro-Cap [1]. Il s'agit d'un simulateur de circuit de qualité professionnelle (4 500 \$) qui a été publié sous forme de freeware après l'arrêt de son développement. Il bénéficie ainsi de fonctions plus avancées que d'autres simulateurs gratuits mais risque l'obsolescence à terme. Pour l'instant, il est disponible gratuitement sur [1].

Micro-Cap vous permet de dessiner des circuits et de visualiser les signaux qui s'y propagent tout en « tournant des boutons » (en faisant varier les paramètres). Il inclut une grande bibliothèque de modèles de composants, avec même des tubes à vide. Il comprend des outils de conception de filtres actifs et passifs. Il vous permet d'écouter la forme d'onde produite par votre circuit simulé : un plus pour les applications audio.

Comment simuler ?

Simuler un circuit, c'est comme construire quelque chose sur une plaque d'expérimentation. Vous placez les composants, les reliez

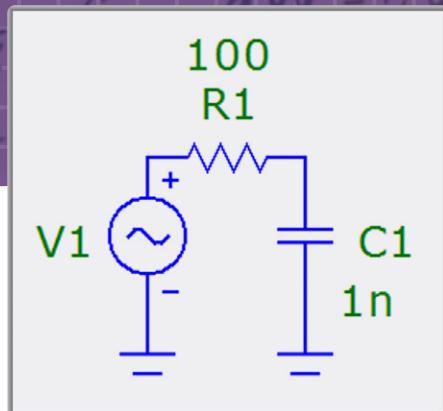


Figure 1. Mon premier circuit, un simple filtre RC passe-bas.

pour former un circuit, ajoutez les tensions d'alimentation et (éventuellement) connectez une source de signaux. Ensuite, vous choisissez de mesurer les signaux avec un oscilloscope (dans le domaine temporel) ou avec un analyseur de spectre (dans le domaine fréquentiel). Vous trouverez plus de détails à ce sujet dans l'encadré « **Types d'analyse** ».

Dessiner notre premier circuit

Après avoir lancé Micro-Cap, nous commençons par créer un simple filtre RC passe-bas et simulons sa réponse en fréquence comme le montre la **figure 1**. Il existe plusieurs façons et raccourcis pour ajouter des composants au circuit (voir encadré). Pour l'instant, nous utilisons la barre de composants située en haut de l'écran (**figure 2**).

Cliquez brièvement avec le bouton gauche de la souris sur le symbole de la résistance et déplacez le pointeur de la souris dans votre feuille de travail vide (vous pouvez aussi cliquer sur la petite flèche ou le triangle à droite du bouton du symbole pour en changer l'orientation). Un symbole de résistance apparaît. Cliquez à nouveau avec le bouton gauche de la souris pour placer la résistance à l'endroit souhaité dans la feuille de travail. Dans la fenêtre qui s'ouvre maintenant, entrez une valeur de 100 dans la case *Value* en haut. Fermez la fenêtre à l'aide du bouton *OK* ou en appuyant sur la touche Entrée.

Répétez cette procédure pour un condensateur; fixez sa valeur à *1n*. Si vous placez le condensateur de manière à ce que l'un de ses fils touche l'un des fils de la résistance, ils seront connectés automatiquement.

Ensuite, nous ajoutons un générateur ou une source d'ondes sinusoïdales en cliquant sur *Component* dans le menu principal, puis en sélectionnant *Analog Primitives Waveform Sources Sine Source*. Sélectionnez *GENERAL* dans la liste sur la droite de la fenêtre des propriétés de la source qui s'est ouverte, puis cliquez sur *OK*.

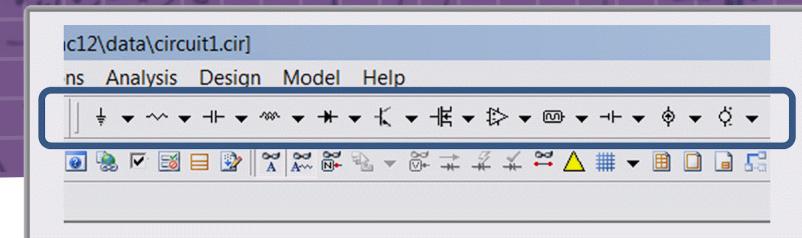


Figure 2. Micro-Cap possède une barre de sélection de composants.

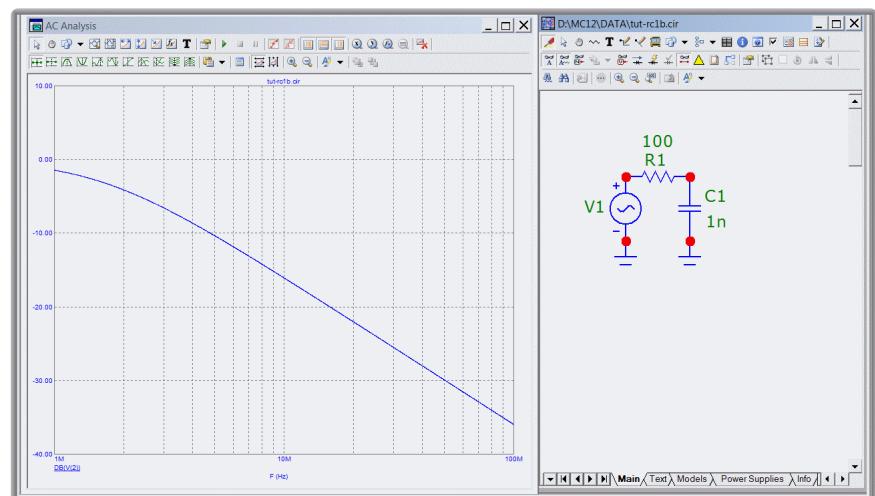


Figure 3. En cliquant sur le nœud RC, la courbe de transfert du filtre s'affiche.

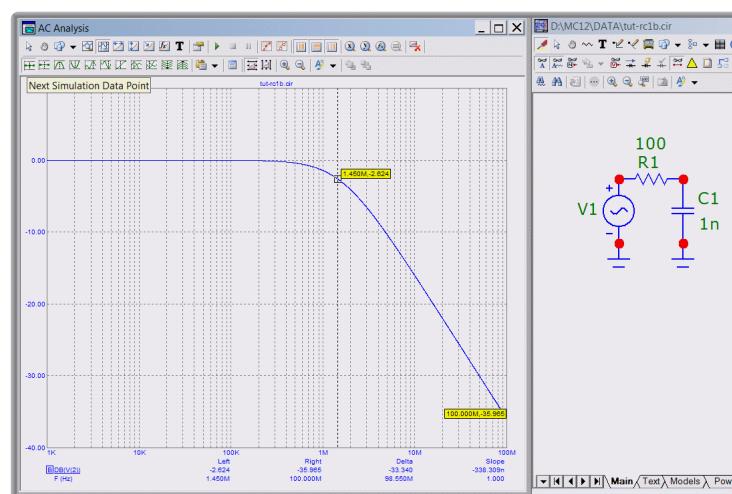


Figure 4. Fixez les limites du graphique en fonction de ce que vous voulez voir.

Terminez le circuit en ajoutant les symboles de masse de la barre de composants au condensateur et à la source du signal.

Si vous avez placé les composants loin les uns des autres, il faut les relier. Un clic sur le bouton *Wire Mode* ou l'appui sur *Ctrl-W* active l'éditeur de câblage. Pour dessiner un fil, cliquez sur le point de départ du fil et, tout en maintenant le bouton gauche de la souris enfoncé, faites glisser le pointeur vers la destination du fil.

La simulation

Nous sommes maintenant prêts à exécuter une simulation. Dans le menu *Analysis*, sélectionnez *Probe AC...* pour passer en mode analyse, prêt à « mesurer ». Dans ce mode,

vous ne pouvez plus modifier le dessin du circuit, seulement les valeurs des composants. Les points rouges dans le circuit sont les nœuds. En cliquant sur un point, vous obtiendrez un graphique dans la fenêtre de *AC Analysis* similaire à celui de la **figure 3**.

Il s'agit d'un graphique avec les paramètres de fréquence par défaut, mais nous voulons un graphique commençant à une fréquence plus basse. Pour ce faire, sélectionnez *Limits...* dans le menu *Probe*. Changez la *Frequency Range* en « *100Meg, 1k* » (le format est « *high, low* ») et cliquez sur *Close* pour quitter. Le graphique devient celui de la **figure 4**. Nous pouvons maintenant voir à la fois la bande passante du filtre (du continu jusqu'à 1 MHz) et sa bande d'arrêt (au-delà de 1 MHz).

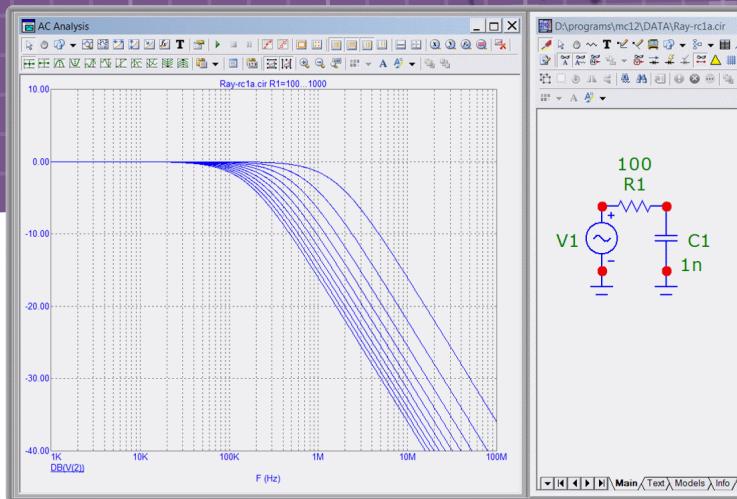


Figure 5. Le balayage d'un paramètre (ici la valeur de R1) permet de visualiser son influence sur la fonction de transfert du circuit.

Vous pouvez lire les points de données dans le graphique en utilisant un curseur. Cliquez sur le bouton supérieur gauche *Next Simulation Data Point* au-dessus du graphique et un curseur apparaît que vous pouvez déplacer.

Simulation et réalité

Selon les graphiques des **figures 3 et 4**, notre filtre bloquerait tout ce qui dépasse 1 MHz ? Donc, toutes les fréquences jusqu'à l'infini ? Nous savons qu'il n'en est rien en réalité. Alors pourquoi est-ce le cas dans la simulation ?

La raison en est qu'un simulateur utilise des composants idéaux. Si vous voulez vous rapprocher du comportement réel d'un circuit, vous devez tenir compte des imperfections de vos composants et du monde réel en ajoutant des éléments parasites. Reportez-vous à l'encadré « **Limites du modèle de composants** », pour plus de détails sur la

façon de rendre votre simulation plus proche d'un circuit réel.

Modification de la valeur d'un composant en mode analyse

En mode analyse, vous pouvez encore modifier les valeurs des composants. Pour ce faire, vous devez passer en *Select Mode* en cliquant sur le bouton portant l'icône de la flèche de la souris en haut à gauche de la fenêtre du circuit (ou en appuyant sur Ctrl-E). Vous pouvez maintenant double cliquer sur la valeur d'un composant et la modifier. Les résultats de la simulation sont automatiquement mis à jour. Si vous voulez sonder un autre endroit du circuit, vous devez revenir au mode *Probe* en cliquant sur le bouton *Probe*.

Paramètre en pas-à-pas

Une caractéristique puissante d'un simulateur est qu'on peut faire varier la valeur d'un

Combien vaut « M » ?

Dans le langage SPICE M signifie milli (10^{-3}) donc si vous définissez la valeur d'une résistance à 1 Mohm, elle sera de $0,001 \Omega$ Vous pouvez utiliser MEG pour méga ou 10^6 .

ou plusieurs paramètres et afficher les résultats sous forme de graphiques multiples. Par exemple, augmentons la valeur de la résistance R1 comme s'il s'agissait d'un potentiomètre pour évaluer la plage de réglage pour une certaine variation du potentiomètre.

Faisons varier la fréquence de coupure du filtre en faisant passer R1 de 100Ω à 1000Ω par pas de 100Ω . Pour cela, sélectionnez *Stepping...* dans le menu *Probe*. Sélectionnez R1 dans la case *Step What*. Saisissez des valeurs pour les cases *From*, *To* et *Step Value* et n'oubliez pas de positionner *Step It* sur *Yes*. Cliquez sur *OK*, puis sur le bouton *Run* (F2) (avec la flèche ou le triangle vert) dans la fenêtre *AC Analysis* pour afficher le graphique en fonction de la valeur de la résistance (**figure 5**).

Dans cet exemple, les pas étaient de taille constante (linéaire) mais ils pourraient être exponentiels. Il est possible de faire varier plusieurs valeurs de composants simultanément ou de manière emboîtée. Vous pouvez également agir sur la valeur d'un paramètre de composant, par exemple, le gain d'un transistor.

Analyse transitoire

Vous devez choisir le bon mode d'analyse pour voir le comportement non linéaire (voir l'encadré « **Types d'analyse** »). Pour obtenir un comportement non linéaire, réalisons un effet de distorsion audio simple, un écrêteur à diode comme illustré à la **figure 6**. Nous pouvons ensuite utiliser l'analyse des transitoires pour observer la distorsion comme si nous utilisions un oscilloscope.

Réglez la fréquence de la source sinusoïdale V1 sur 1 kHz (dans la case « F » dans le

Types d'analyse

Après avoir dessiné le circuit, vous souhaitez effectuer des mesures. Pour cela, vous devez sélectionner un mode d'analyse. Dans le langage SPICE, la mesure à l'aide d'un oscilloscope est appelée « analyse transitoire », tandis que la mesure à l'aide d'un analyseur de spectre est appelée « analyse fréquentielle ». Les points d'interconnexion des composants sont appelés noeuds. En mode analyse, vous pouvez sonder les tensions sur ces noeuds et les courants qui les traversent.

Pour visualiser un comportement non linéaire (par exemple une distorsion ou un écrêteage), vous devez utiliser l'analyse transitoire. L'analyse fréquentielle suppose toujours un comportement linéaire et vous donne la réponse en fréquence des petits signaux de circuits tels que les filtres et les amplificateurs.

Dans les deux types d'analyse, vous pouvez également voir les tensions et les courants continus. D'autres types sont possibles, comme l'analyse du bruit et de l'impédance.

Lorsque le circuit a été dessiné correctement (pas de noeuds flottants, par exemple), un type d'analyse est sélectionné. Un calcul est alors effectué sur une période de temps ou une plage de fréquence définie par l'utilisateur avec une résolution donnée. Le réglage de cette résolution est un compromis entre la régularité de la courbe et le temps de calcul. Lorsque le calcul est prêt, vous pouvez commencer à sonder le circuit.

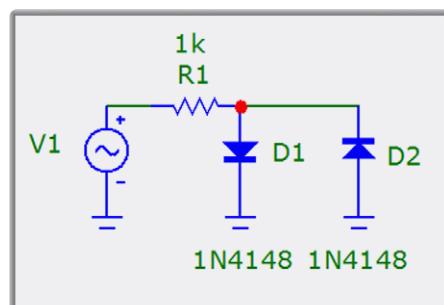


Figure 6. Ce circuit simple présente un comportement non linéaire.

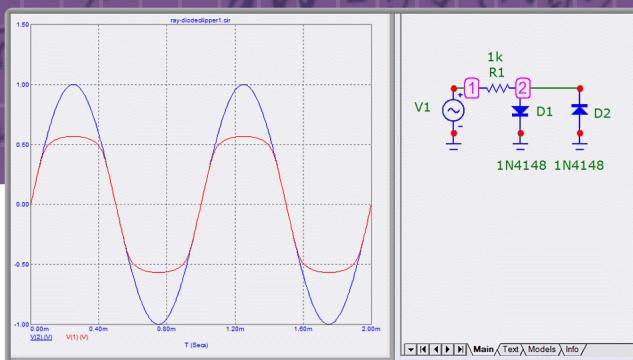


Figure 7. Une analyse transitoire du circuit de la figure 6 produit ces signaux.

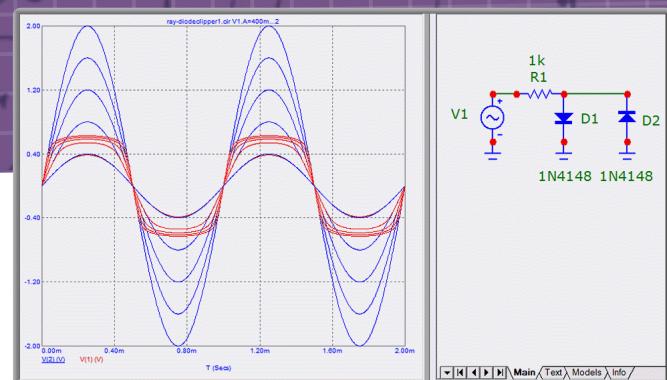


Figure 8. La saturation de la sortie augmente progressivement lorsque l'on augmente l'amplitude du signal d'entrée.

coin inférieur droit de la fenêtre des propriétés) et choisissez *Probe Transient...* dans le menu *Analysis*. Dans le menu *Probe*, choisissez *Limits...* et fixez *Maximum Run Time* à *2m* et *Maximum Time Step* à *2u*. Une bonne pratique consiste à prendre pour le pas de temps le millième de l'intervalle de temps d'exécution. Sondez maintenant le circuit, à la fois à l'entrée (montrant l'onde sinusoïdale) et à la sortie (montrant la forme d'onde écrêtée).

Balayage de l'amplitude

Comme expliqué précédemment, vous pouvez faire varier une valeur ou un paramètre de composant. Faisons-le pour l'amplitude de la source sinusoïdale. Sélectionnez *Stepping...* dans le menu *Probe*. Choisissez l'amplitude « *A* » de *V1* et passez de *400m* à *2V* par pas de *400 mV* (n'oubliez pas de positionner *Step It* sur *Yes*). La **figure 8** montre les résultats.

Comme le circuit de la **figure 6** est censé réaliser un effet audio, il serait utile d'entendre le son qu'il produit. Micro-Cap offre la possibilité de lire la forme d'onde sur votre carte son ou de la stocker dans un fichier *WAV* ou *CSV*.

La durée du son est fixée par les limites de la sonde. Dans *Probe Limits* modifiez *Maximum Run Time* à *500m* (et *Maximum Time Step* à *50u*) pour obtenir une demi-seconde de son. Ensuite, double-cliquez sur la fenêtre de la trace pour ouvrir ses propriétés et sélectionnez l'onglet *Save Curves*. Sélectionnez l'onde

Où trouver les composants ?

Tous les composants sont accessibles via l'onglet *Components* et dans la liste déroulante de la bibliothèque, mais il existe également des raccourcis. Il y a la barre des composants en haut de la fenêtre, mais encore plus rapides sont les touches comme « *R* » pour une résistance et « *C* » pour un condensateur. En outre, le programme enregistre les composants récemment utilisés dans la fenêtre d'ouverture de l'onglet *Components*.



Figure 9: La résolution de la simulation est importante. Ici, *Probe Limits* a été fixé à 100 points.

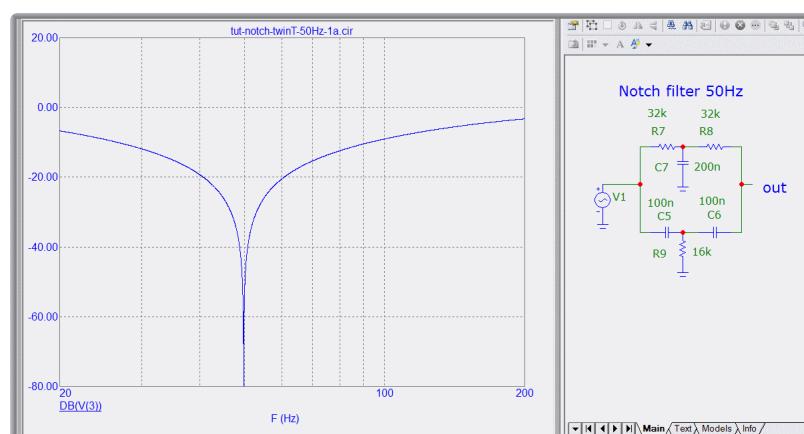


Figure 10. La même simulation que dans la Figure 9, mais maintenant avec *Probe Limits* fixé à 10 000 points.

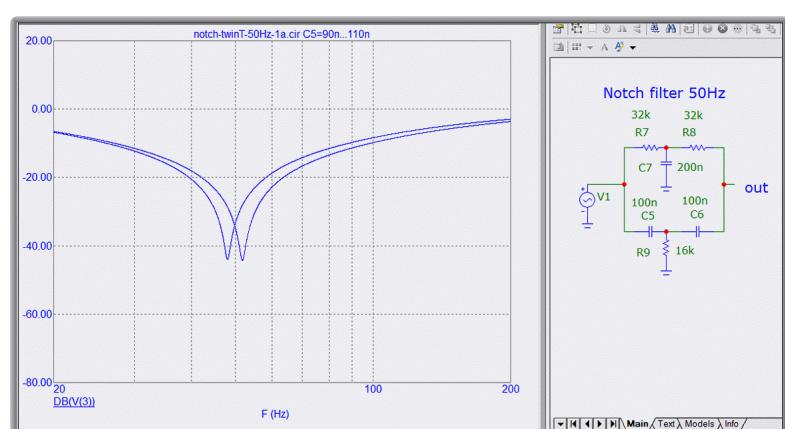
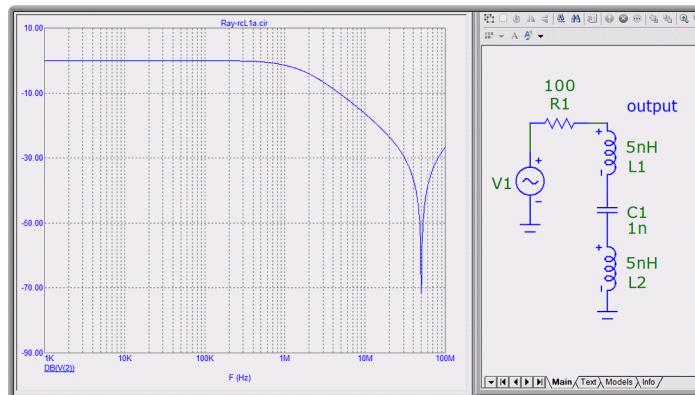


Figure 11. Le même circuit que celui de la figure 9, mais avec *C5* non identique à *C6*.

Limites du modèle de composants

Une simulation n'est aussi bonne que les modèles qu'elle utilise. Tous les composants de notre filtre sont idéaux. En pratique, il n'en est rien. Pour notre filtre passe-bas simple, la principale limitation est l'inductance série des fils du condensateur. Chaque millimètre de fil ajoute environ 1 nH d'inductance qui augmente l'impédance du condensateur au-delà d'une certaine fréquence, réduisant ainsi l'effet de filtrage.

Supposons que votre condensateur ait des fils de 5 mm, et simulons cela en ajoutant deux inductances de 5 nH en série avec les connexions du condensateur (ce qui revient à ajouter une inductance en série de 10 nH).



Nous constatons que le filtre présente une forte atténuation autour de 50 MHz, puis commence à « fuir » à partir de 50 MHz. Ce phénomène est causé par le circuit LC résonnant. Si vous voulez filtrer des interférences RF jusqu'à 1 GHz, c'est un problème, mais dans des cas particuliers, vous pouvez utiliser cet effet, par exemple pour filtrer une fréquence d'horloge d'échantillonnage de 50 MHz, mais il vous faudra retoucher finement la valeur de l'inductance.

L'exemple ci-dessus illustre l'aide apportée par un simulateur dans la conception correcte d'un circuit.

Question : si les fils ajoutent une inductance, l'utilisation de condensateurs CMS permet-elle d'obtenir un filtre sans inductance ? Non, mais cela s'en rapproche. Le condensateur a toujours une longueur finie (2 mm correspondent à 2 nH) et sa connexion à la masse sur le circuit imprimé ajoute également une inductance. Les vias peuvent ajouter 0,3 nH à 1 nH selon la façon dont vous les définissez et les placez.

corrects avec un simulateur, Micro-Cap ou autre, nécessite une certaine connaissance des aspects pratiques de la construction d'un circuit. Savoir comment le configurer et quelles sont ses limites est une condition préalable. Combiner la simulation avec la construction d'un prototype réel est toujours une bonne idée. Ne vous débarrassez donc pas trop vite de votre plaque d'expérimentation avec ses mauvais contacts (comment les modéliser ?). 

220336-04 — VF : Helmut Müller

Des questions, des commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur (rs.elc.projects@gmail.com) ou contactez Elektor à (redaction@elektor.fr).



Produits

► Joy-IT ScopeMega50 oscilloscope USB (SKU 18277)
www.elektor.fr/18277

► Gilles Bocard, livre en anglais « *The LTspice XVII Simulator* » (SKU 19741)
www.elektor.fr/19741

LIENS

[1] Micro-Cap website : <https://www.spectrum-soft.com/download/download.shtml>

que vous voulez entendre dans la liste *Curves*. Si vous avez activé le pas-à-pas (par exemple, celui de l'amplitude du signal d'entrée), vous pouvez écouter chaque pas en le sélectionnant dans la case *What To Save*, puis en appuyant sur *Play*.

Résolution des simulations

Des réglages de résolution incorrects peuvent affecter ou même supprimer des détails des résultats de la simulation. Par exemple, un filtre coupe-bande présente un creux prononcé à la fréquence à laquelle il fonctionne. Si la résolution en fréquence est insuffisante, le creux semble moins profond qu'il ne l'est. La **figure 9** et la **figure 10** montrent les résultats du même filtre coupe-bande Twin-T simulé deux fois, mais avec des réglages de résolution différents.

Composants idéaux

Ce filtre présente un creux infiniment profond à 50 Hz avec les valeurs de composants données. Cependant, avant de construire ce filtre « idéal », réfléchissez un peu aux valeurs des composants. Dans un simulateur, les deux condensateurs de 100 nF seront identiques et exactement 100 nF, et vous obtiendrez un filtre coupe-bande 50 Hz infiniment profond, comme illustré ici.

La modification de la valeur de C5, par exemple, de plus ou moins 10 %, a une grande influence (**figure 11**). Le creux n'est plus que de 40 dB et le filtre est aussi désaccordé, ce qui entraîne une atténuation de seulement 35 dB à 50 Hz. Cela montre comment un simulateur peut vous aider à prédire les effets des tolérances des composants du monde réel sur les performances de votre circuit avant même de le construire.

Pour des simulations encore plus réalistes, vous devez également prendre en compte d'autres paramètres parasites, tels que la longueur des pistes conductrices et des fils (voir encadré).

Ce n'est pas tout, les amis

Cet article n'a fait qu'effleurer la surface d'un sujet complexe. Comme indiqué au début de cet article, un simulateur de circuit doit faire partie de votre boîte à outils, à côté d'un multimètre et d'un oscilloscope. Cependant, gardez toujours à l'esprit qu'un simulateur de circuit simplifie la réalité. Obtenir des résultats