

Kees de Groot

**De nos jours, les concepteurs d'électronique passent plus de temps devant leur pc que derrière leur fer à souder. Des logiciels futés sont en mesure de simuler des circuits complets sur ordinateur sans avoir à réaliser la moindre soudure. SPICE a jeté les bases de tels programmes de simulation dès 1972. Nous vous expliquons brièvement ici comment SPICE arrive à les imiter fidèlement.**

SPICE est un logiciel de simulation de circuits électroniques : il vous en révèle les mesures de tous les courants et de toutes les tensions avant même de l'avoir construit. Tout est assemblé et expérimenté sur le pc. On peut utiliser tous les composants électroniques connus pour constituer le circuit, résistances, condensateurs, transistors bipolaires et FET. De très nombreux circuits intégrés sont également disponibles en bibliothèque. Mais on peut définir soi-même de nouveaux composants, butinés sur Internet ou achetés. Les résultats des simulations s'accordent généralement très bien avec la pratique, même jusqu'à des fréquences très élevées. À côté des circuits analogiques, les logiciels modernes de simulation permettent aussi de traiter des circuits numériques tels que microcontrôleurs, RAM et logique à portes, mais aussi les antennes et les lignes de transmission.

### Pourquoi utiliser SPICE ?

Pour l'amateur, SPICE est une excellente occasion de réaliser des expériences avec de nouveaux composants, éventuellement encore à découvrir. Se faire plaisir, par une après-midi pluvieuse, à assembler un circuit à tubes,

par exemple, puis à réduire sans retenue la tension d'alimentation pour observer les problèmes qui vont se poser dans le montage. On a vite fait de construire de la sorte un étage push-pull de puissance ou un étage final HF en classe E à tubes, à transistors ou à FET. Et tout ça, sans risque de griller un seul composant onéreux ! Mais le concepteur professionnel électronicien, lui aussi, peut tirer grand bénéfice d'un tel logiciel. Il a tout loisir de tester des circuits ou des modifications sans avoir à fabriquer un nouveau prototype. Et il pourra encore mettre en évidence l'influence des tolérances et la sensibilité à la température des composants utilisés de quoi évaluer rapidement les qualités de reproductibilité du circuit avant sa mise en production.

### Depuis le commencement

La naissance de SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis*) remonte à 1972, lorsque Larry Nagel et Donald Pederson de l'université de Berkeley en Californie en rédigèrent en FORTRAN la toute première version. Les premières versions ne disposaient pas d'interface graphique pour la bonne raison qu'elles s'exécutaient sur ordinateur central. À cause de cela, la descrip-

tion des circuits prenait une forme assez spartiate. Jusqu'il y a peu, les modèles SPICE et les circuits élémentaires étaient encore décrits de cette manière (**figure 1**). Les dernières versions de SPICE, nous sommes alors en 1985, furent écrites en C. La première pour pc, PSPICE, fut commercialisée par MicroSim.

À présent, il y a des dizaines d'outils de simulation qui s'inspirent plus ou moins de SPICE. Outre les versions commerciales, il existe des versions en logiciel gratuit. Pour des fins didactiques, on en trouve aussi dont la taille ou la durée est limitée. De nombreux programmes de simulation offrent la possibilité d'introduire un schéma graphique et de consulter les résultats dessinés sur un oscilloscope virtuel. Souvent, il est aussi possible de passer sans hiatus du circuit au dessin de la platine.

En plus de la simulation de circuits électroniques, il existe des logiciels développés pour des domaines bien précis. Il y en a pour les circuits intégrés, les circuits numériques, les circuits à micro-ondes et les filtres, mais aussi pour les antennes de radio et les champs électromagnétiques. On peut y introduire les données de l'ancienne manière numérique de SPICE, en décrivant toutes les entrées, les sorties, les noeuds, les tensions, courants et composants. Mais beaucoup de logiciels modernes vous permettent heureusement de saisir les composants sous forme graphique et de les réunir à l'aide de la souris. Pour les circuits numériques, on peut recourir à un langage de programmation du matériel tel que VHDL ou éventuellement Verilog s'il faut y ajouter de l'analogique.

Les systèmes mécaniques appartiennent à un tout autre domaine de simulation. Et que diriez-vous d'un programme de simulation pour construire des projets LEGO ? Mais ceci est déjà une autre histoire, vous l'aurez deviné.

## Comment travaille SPICE ?

SPICE fait un usage habile des lois d'Ohm et de Kirchhoff. La loi d'Ohm donne le rapport entre la tension aux bornes d'une résistance et le courant qui y circule. Si la tension vaut  $U = 12 \text{ V}$  et qu'un courant  $I = 0,5 \text{ A}$  traverse une résistance, celle-ci a une valeur de  $24 \Omega$  ( $R = U/I$ ). La loi des courants de Kirchhoff dit qu'en chaque noeud, il y a toujours autant de courant qui y entre que de courant qui en sort. C'est comme si l'on relie des tuyaux d'arrosage à un connecteur en T. Toute l'eau qui entre par un tuyau devra forcément sortir par les autres. Ni plus, ni moins.

La loi des tensions de Kirchhoff dit que dans une maille (un parcours fermé dans un circuit, qui vous ramène à votre point de départ), la somme des tensions est nulle. Vous faites un tour à vélo en terrain accidenté. Quelle que soit la route suivie, vous ne trouverez jamais un trajet qui descend du camping vers le bistrot, puis qui descend encore pour vous ramener au camping. Tout ce que vous avez descendu, il vous faudra le remonter.

Un petit exemple. Supposons que vous chargiez un petit accumulateur de  $1,2 \text{ V}$  à travers une résistance de  $10 \Omega$  à partir d'une source de tension de  $12 \text{ V}$ . Vous placez un galvanomètre à cadre mobile d'une résistance interne de  $100 \Omega$  aux bornes de l'accumulateur, comme à la **figure 2**.

La loi de Kirchhoff nous donne :

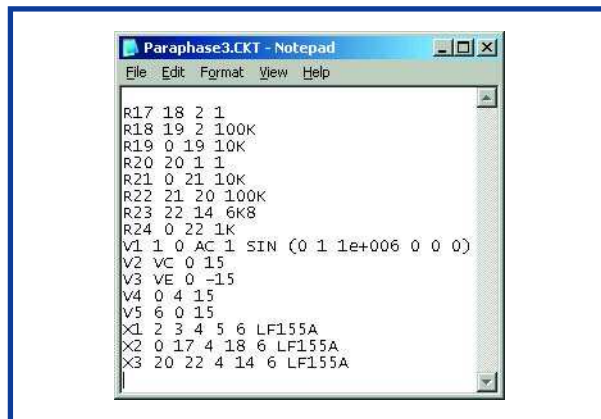
$$U_1 - I_1 \cdot R_1 + U_2 = 0 \quad (1)$$

$$U_2 + (I_1 - I_2) \cdot R_2 = 0 \quad (2)$$

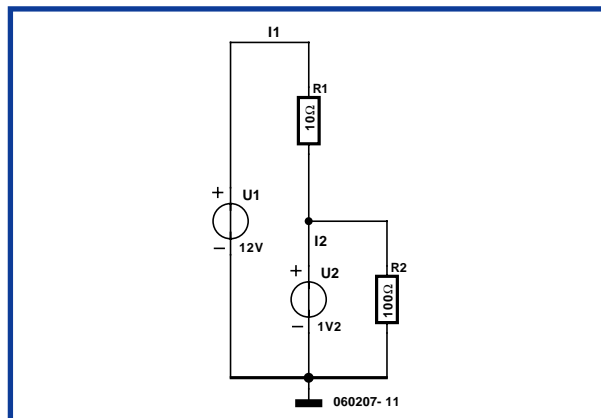
Avec un minimum d'algèbre, on peut résoudre ces deux équations pour trouver  $I_1$  et  $I_2$ . On obtient alors  $I_1 = 1,08 \text{ A}$  et  $I_2 = 1,068 \text{ A}$ . L'accumulateur se charge donc sous  $1,068 \text{ A}$ .

SPICE le fait de la même façon. En chaque noeud (chaque carrefour), il applique la loi de Kirchhoff pour les courants et dans chaque maille, celle des tensions. Cela fournit une quantité d'équations qu'il met en mémoire sous forme de matrice de nombres. Puis il inverse la matrice et résout le système d'équations. Vous pouvez y mettre autant de résistances, de sources de tension ou de courant que vous voulez, à condition d'expliquer à l'ordinateur ce que vous avez branché entre les différents noeuds.

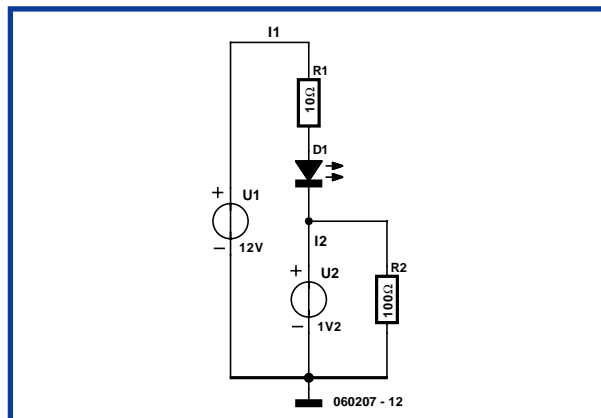
Si nous intercalons une résistance en série avec une LED, comme à la **figure 3**, la réponse ne sera pas aussi comode à trouver. La LED va causer une chute de tension d'environ  $2 \text{ V}$ , donc  $U_1$  tombe à peu près à  $10 \text{ V}$ . Rien ne nous empêche de calculer les résultats pour  $I_1$  et  $I_2$ ,



**Figure 1.** Extrait d'une liste de noeuds en SPICE. Tous les composants y sont repris avec les numéros des croisements entre lesquels ils se situent. Ils y sont accompagnés de leurs propriétés spécifiques.

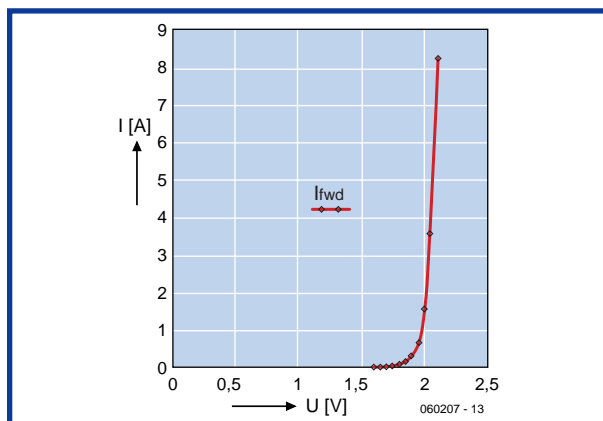


**Figure 2.** Schéma équivalent d'une alimentation de  $12 \text{ V}$  qui charge une cellule d'accumulateur au CdNi à travers une résistance de  $10 \Omega$ . Un appareil à cadre mobile est branché en parallèle sur l'accumulateur.



**Figure 3.** On intercale en série avec la résistance de charge un témoin à LED.

Figure 4.  
La caractéristique  
calculée du  
fonctionnement de la  
LED.



mais avec cette valeur de 2 V nous n'obtiendrons là qu'une approximation superficielle. Si nous voulons une réponse exacte, il faudra faire appel à un peu plus de mathématique, parce que la LED est un élément non-linéaire.

Le courant dans la LED se calcule par :

$$I_{LED} = I_s \cdot (e^{U_d/N \cdot U_T} - 1)$$

dans laquelle  $I_s$  vaut  $5,5 \cdot 10^{-15}$  A,  $U_d$  représente la tension aux bornes de la diode,  $U_T = 25 \cdot 10^{-3}$  V et  $N = 2,3$ .

Le **figure 4** nous montre tout cela sous forme graphique. Il s'agit de la caractéristique de conduction d'une diode ou d'une LED, telle que le fabricant nous la fournit. Si la tension sur la diode est moindre que 2 V, il n'y passe que très peu de courant. Si la tension s'élève au-dessus de ce seuil, alors le courant augmente très rapidement.

Sachant cela, nous pouvons remplacer la LED par une source de tension  $U_{LED}$  qui varie en fonction du courant  $I$  dans le circuit de la **figure 5**. Mais nous ne sommes pas encore au bout de nos peines. Les lois de Kirchhoff, dans un circuit non-linéaire, nous pouvons faire une croix dessus. Et une source de tension dont la valeur dépend d'un autre élément du circuit, nous n'en trouverons pas dans les formules.

Ce que nous pouvons faire, c'est linéariser la LED dans un domaine précis. L'idée est que si l'on ne rencontre que de petites variations de tension et de courant dans la LED, on peut la considérer comme linéaire. Alors, nous pouvons reprendre les lois de Kirchhoff et calculer tous les courants et toutes les tensions du circuit. Cela ne va pas nous donner la réponse exacte, mais une bien meilleure approximation. Sur base du résultat de cette approximation, nous allons adapter les paramètres et refaire le calcul en ce point précis de la caractéristique. Il est clair que si nous effectuons plusieurs itérations, nous atteindrons un résultat tout à fait acceptable.

Nous avons vu comment SPICE se tire d'affaire, confronté à des éléments non-linéaires. Il les remplace par des circuits qui, en un point de fonctionnement déterminé, sont assimilables à des composants linéaires. En opérant une succession de calculs sur les circuits non-linéaires, SPICE sait que finalement il aboutira à un point de réglage qui « colle » au circuit.

### Bobines et condensateurs

Si le circuit est alimenté en tension alternative, nous pouvons considérer selfs et condensateurs comme des impédances complexes et leur appliquer très normalement les lois d'Ohm et de Kirchhoff pour déterminer les tensions et

les courants dans le circuit. Mais pour percer à jour son comportement lors de l'enclenchement, ce n'est pas aussi banal.

Prenons encore un circuit simple, celui de la **figure 6**, comme exemple : une source de tension de 12 V, une résistance de 1 kW et un condensateur de 1 nF. Au moment où la tension est appliquée, un courant va circuler à travers R1, lequel va charger C1, ce qui fera augmenter la tension à ses bornes. Le courant de charge diminuera donc progressivement. À la fin, le condensateur sera chargé à 12 V. Si nous observons le circuit à l'instant où le condensateur est chargé à 4 V, il y a encore 8 V sur R1. Il y passe donc 8 mA. On peut remplacer alors le condensateur par une source de tension. La variation de tension  $dU = dt \cdot i/C$ . Donc si un courant de 8 mA circule pendant 0,1  $\mu$ s, la tension du condensateur augmente de

$$1 \cdot 10^{-7} \cdot 8 \cdot 10^{-3} / 1 \cdot 10^{-9} = 0,8 \text{ V.}$$

Après cette période de 0,1  $\mu$ s, il y aura une tension de 4,8 V sur le condensateur et de 7,2 V sur R1, valeurs de départ pour un nouveau calcul pour la 0,1  $\mu$ s suivante. C'est de cette manière que nous pouvons calculer la courbe de la

### figure 7.

Quand on utilise cette méthode simple d'intégration, les périodes doivent rester très courtes. En conséquence, le pc doit exécuter de nombreuses étapes et le temps de calcul est long. Mais si nous prenons des périodes trop courtes, il risque de se produire des erreurs supplémentaires dans les arrondis.

Souvent la période est variable. Lors de grands changements, les pas sont automatiquement raccourcis, ils s'allongent si les variations sont faibles. En réalité, SPICE utilise des formules légèrement différentes, basées sur une intégration trapézoïdale, mais l'idée générale reste la même.

Dans notre exemple, le condensateur a été remplacé par une source de tension. On peut aussi bien prendre une source de courant et une résistance, comme dans l'exemple avec la diode. Le principe reste le même : échanger le composant à simuler contre une combinaison de composants linéaires et pratiquer des itérations pour approcher de la solution.

### Les composants réels

Jusqu'à présent, nous n'avons travaillé qu'avec des composants théoriques, aux caractéristiques idéales. Les composants réels présentent une structure nettement plus complexe. C'est ainsi qu'une vraie résistance est en fait une mise en série d'une résistance et d'une inductance parasite, le tout shunté par un condensateur. Avec les transistors et les amplificateurs opérationnels, il faut envisager encore une ribambelle d'autres caractéristiques. Dans les modèles SPICE, on fait la distinction entre composants théoriques (virtuels) et réels. Chez ceux-ci, il s'agit d'habitude de petits circuits qui imitent autant que possible le comportement global d'un composant déterminé. L'utilisateur ne s'en aperçoit pas parce que, sur écran, un transistor apparaît toujours sous son symbole conventionnel. Ce n'est qu'à l'examen des propriétés internes ou dans la liste des noeuds que l'on découvre qu'il y a, derrière lui, bien davantage qu'un transistor théorique idéal.

La plupart des fabricants de semi-conducteurs livrent des modèles SPICE de leurs composants, dans lesquels les caractéristiques propres à chaque type sont détaillées. Il n'y a qu'avec des modèles précis de ce genre que l'on

peut réaliser une simulation qui correspond au comportement effectif d'un circuit.

## Trucs et ficelles

Avec SPICE, il faut toujours avoir un point de masse. C'est le repère de référence. Lors de la simulation d'un circuit, on commence systématiquement par une analyse des conditions de départ. Elle peut échouer dès ce stade si, par exemple, elle découvre trois condensateurs en série. Celui du milieu peut se situer en principe à n'importe quel niveau de potentiel. Tout dépend de la charge initiale des condensateurs. Même si, au total, elle est nulle, le condensateur central peut en définitive présenter une charge indéterminée.

Quand se produit une erreur bizarre, on peut souvent se tirer d'embarras en modifiant la position de certains composants ou en ajoutant par-ci, par-là quelques résistances de plusieurs  $M\Omega$  vers la masse, si du moins cela ne contrarie pas le fonctionnement du dispositif.

Si vous travaillez avec des composants virtuels, il se peut que la simulation du circuit fournisse d'excellents résultats et qu'après substitution de composants normaux, il arrive des choses étranges. La raison en est peut-être que les composants ne sont plus idéaux, parce qu'il aurait mieux valu les choisir dans la série E12, par exemple. C'est principalement dans les filtres que l'on peut trouver une courbe de réponse qui diverge sensiblement de ce qui était théoriquement prévu. Ici aussi, le programme de simulation peut vous aider, parce que la simulation dite de Monte-Carlo vous permet d'attribuer une tolérance à tous les composants. Ensuite, nous pouvons soumettre le circuit à une véritable vague de chaleur. Il est alors recalculé pour toute une kyrielle de combinaisons de tolérances et de températures et le résultat se présente en graphique constitué d'une famille de courbes que nous espérons voir s'échelonner à proximité les unes des autres.

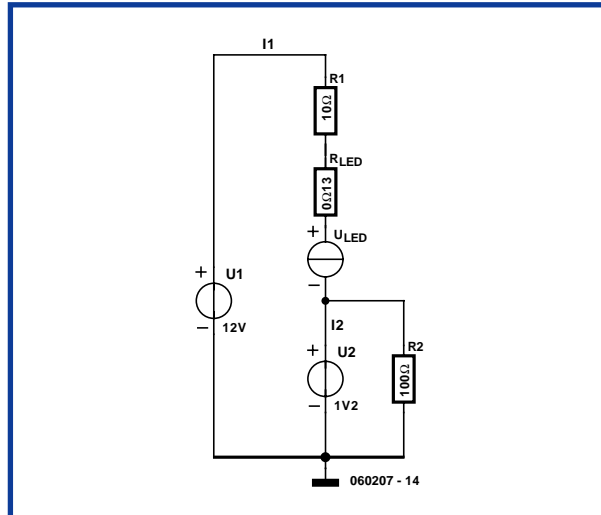
Dans une simulation d'un circuit à composants réels, il y a des choses intéressantes à observer en haute fréquence. Dans ce domaine, la self-induction d'une résistance (rien déjà que ses fils de raccordement) peut prendre une importance supérieure à celle de la résistance elle-même. Différentes capacités parasites (souvent d'à peine quelques picofarads) peuvent occasionner pas mal de soucis. Vous pouvez aisément en ajouter au schéma à certains endroits pour examiner quelles conséquences elles ont sur le signal de sortie.

Travailler avec des amplificateurs opérationnels peut se révéler frustrant, parfois. Vous utilisez des circuits virtuels et pour une petite faute dans le montage, vous voyez la tension de sortie grimper à plus d'un kilovolt, alors qu'un véritable amplificateur opérationnel se bloquerait simplement à l'une des tensions d'alimentation.

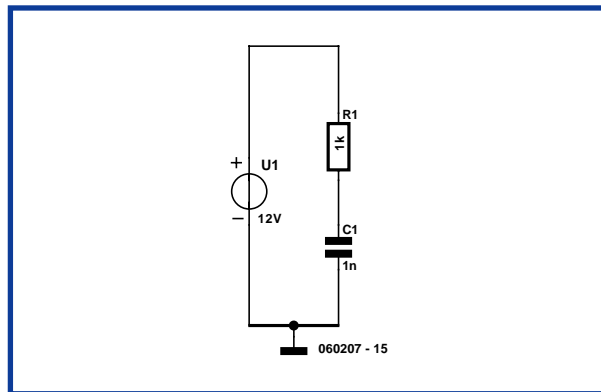
SPICE manifeste souvent une profonde aversion pour les transformateurs de sortie flottants. Reliez toujours un côté de la sortie du transfo à la masse et si vous ne pouvez pas le faire, y ajouter une résistance de  $1\ M\Omega$  peut, ici aussi, faire merveille.

Remarquez que certains programmes SPICE ne connaissent pas la différence entre m et M, mais comprennent fort bien MEG. Une résistance de  $1\ m\Omega$ , c'est bien peu de chose. Pour éviter la méprise, dans le doute, spécifiez  $1\ 000\ k\Omega$  ou bien  $1\ MEG$ .

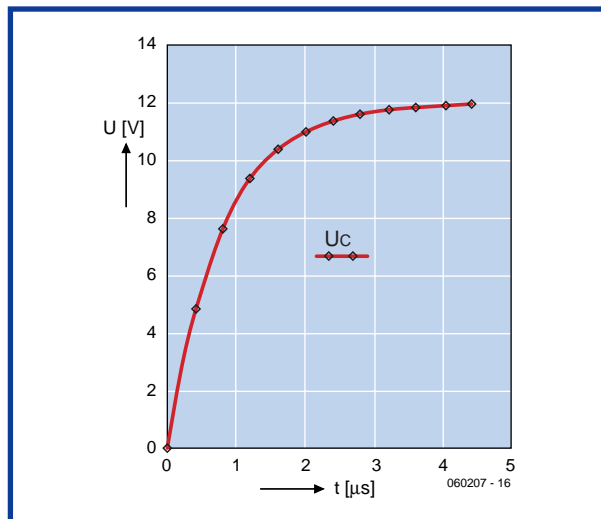
Avec SPICE, vous pouvez constituer des circuits qui utilisent des composants impossibles à fabriquer. Essayez donc de bobiner une self de  $100\ H$  ou de confectionner une résistance de  $0,01\ \Omega$  ! Et un transformateur défini



**Figure 5.** La LED est remplacée par une source de tension avec résistance interne pour déterminer les tensions et courants dans le circuit et trouver son point précis de fonctionnement.



**Figure 6.** On calcule le comportement à l'enclenchement à l'aide de ce schéma simple : une source de tension charge un condensateur via une résistance.



**Figure 7.** La courbe calculée de l'évolution de la tension sur le condensateur.

par vos soins avec une densité de flux de  $1\ 000\ T$  ne fera même pas sourciller SPICE.

Avant de conclure : il arrive qu'un circuit manifestement simple ne fonctionne pas. Si vous avez bien vérifié toutes les liaisons et qu'il ne marche décidément pas, il reste le recours de vous rendre sur Internet et à demander conseil dans un forum. Certains fabricants se montrent très coopératifs. Ils accordent de l'intérêt à se tenir au courant de ce qui va bien autant que de ce qui se passe mal en pratique. Mais pour être honnêtes, la pêche est plus fructueuse si, plutôt que de se présenter comme un utilisateur lambda, on précise que c'est dans le cadre d'un vaste test bêta !

(060207-1)