

filtres analogiques à capacités commutées

Ceci n'est pas la rubrique Rétronique même si elle s'appuie sur un principe décrit en... 1873 !

Robert Lacoste (Chaville)

J'adore relire des anciens magazines d'électronique dont bien sûr ceux d'Elektor que je garde depuis le n° 1, ce qui ne nous rajeunit pas... Les articles de ces années-là sont une superbe source d'inspiration. À l'époque, il n'y avait pas de microcontrôleurs, les concepteurs devaient être ingénieux ! Les techniques utilisées restent pour la plupart d'actualité. Prenons cet article intéressant sur les filtres à capacités commutées du numéro de janvier 1981 d'Elektor.

Savez-vous de quoi il s'agit ? Les filtres sont des circuits présents dans de nombreux projets, tout électronicien doit savoir se débrouiller pour bricoler et mettre au point un tel circuit.

Eh bien, voici donc un bon sujet pour le dernier épisode de cette série d'articles « hors circuits ». Mais avant de finir, il faut commencer.

Un filtre élémentaire...

Comme toujours, j'évite ici les concepts théoriques compliqués, nous préférerons tous les exemples concrets. Commençons par le filtre le plus simple : le filtre RC d'ordre 1, composé d'une résistance série et d'un condensateur vers la masse. Tout changement rapide du signal d'entrée est ralenti par le temps de charge et de décharge du condensateur à travers la résistance. En freinant les variations rapides du signal, ce filtre en atténue donc les fréquences élevées : c'est un filtre passe-bas. Jetez un œil à la simulation de ce circuit avec un signal carré de 500 Hz appliqué sur son entrée (**fig. 1**). La sortie est un signal vaguement carré, mais avec des montées et descentes amorties, caractéristiques d'un tel filtre RC. J'ai effectué les simulations pour cet article avec le logiciel Proteus VSM (*Labcenter*), mais vous les reproduirez facilement avec n'importe quel logiciel compatible Spice, comme l'excellent et gratuit LT-Spice (*Analog Devices*). Analysons maintenant ce circuit, en supposant p. ex. qu'à un moment donné la tension d'entrée est supérieure à la tension du condensateur. Un courant I traversera la résistance et chargerà



le condensateur. Je ne vous ferai pas l'affront de vous expliquer que l'intensité de ce courant est donné par la loi d'Ohm, hein ?

$$I = U/R = (U_{\text{entrée}} - U_{\text{condensateur}}) / R = (U_{\text{entrée}} - U_{\text{sortie}}) / R \quad (1)$$

Comment se comporte le condensateur maintenant ? Il se charge, oui, mais de combien de volts ? Si l'on considère un petit intervalle de temps dt, la charge Q stockée dans le condensateur sera augmentée de :

$$dQ = I \times dt \quad (2)$$

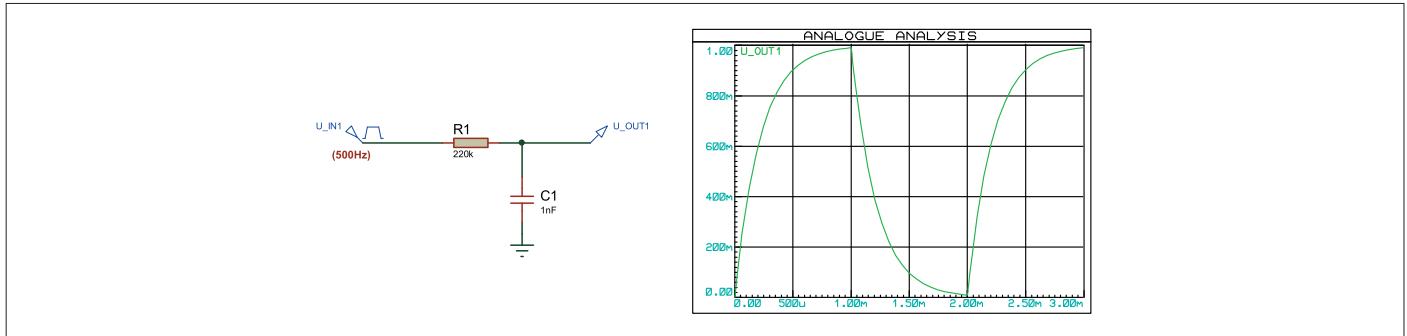


Figure 1. Un filtre passe-bas RC, simulé avec ici une onde carrée en entrée.

En combinant ces deux équations, vous trouverez que :

$$dQ = (U_{\text{entrée}} - U_{\text{sortie}}) \times dt / R \quad (3)$$

Par ailleurs la charge Q d'un condensateur est simplement égale à la tension à ses bornes multipliée par sa valeur en farads, donc ici :

$$Q = C \times U_{\text{sortie}} \quad (4)$$

d'où :

$$dQ = C \times dU_{\text{sortie}} \quad (5)$$

Il suffit de remettre tout ça avec l'équation 3 et de bien agiter pour obtenir :

$$U_{\text{entrée}} - U_{\text{sortie}} = RC \times dU_{\text{sortie}} / dt \quad (6)$$

Pas de panique avec les formules, celle-ci sera la dernière... de ce paragraphe. Vous retiendrez que c'est une équation différentielle. Vous pourriez même vous amuser à la résoudre pour obtenir une formule donnant la tension de sortie en fonction du temps, et ce sera de beaux tronçons d'exponentielles (fig. 1). Notez que la fréquence de coupure sera proportionnelle à $1/RC$.

Passer de R à C ?

Laissons là ce brave filtre RC et intéressons-nous aux filtres à capacités commutées. Tout d'abord, quels sont les inconvénients d'un filtre RC ? Imaginez que vous ayez besoin de faire varier facilement la fréquence de coupure du filtre, par exemple en la pilotant par un microcontrôleur. Comment faire avec un filtre RC ? Vous n'aurez pas d'autre solution que de faire varier électriquement la valeur de R ou de C, ce qui n'est pas si simple à faire avec précision.

À la fin des années 70, les fabricants de circuits intégrés ont cherché à concevoir des filtres performants et flexibles sous forme de circuits intégrés et ont buté sur cette difficulté. De plus, la technique d'implantation des filtres RC sur du silicium est complexe, alors qu'il est facile de réaliser des condensateurs de petite valeur sur une puce. D'où l'idée de remplacer la résistance et le condensateur... par deux petits condensateurs et un peu plus d'électronique. C'est ce qui a donné l'architecture dite à *capacités commutées*. Vous verrez pourquoi cette solution, en prime, permet de régler facilement la question de la fréquence de coupure du filtre. Comme le souligne Philip Golden (*Intersil*) dans son article historique [2], il est intéressant de savoir que cette idée a été décrite par James Clerck Maxwell en... 1873 !

Revenons à l'électronique. La **fig. 2** montre la cellule de base

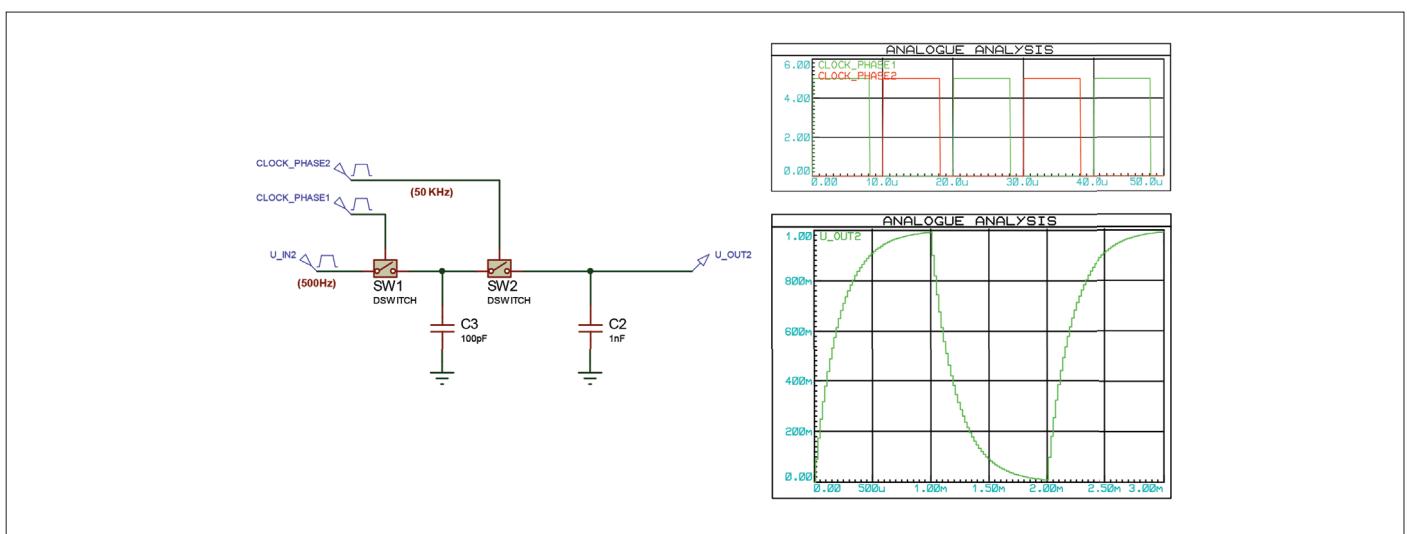


Figure 2. Un étage de filtre à capacité commutée. La résistance est remplacée par un condensateur et deux commutateurs analogiques. Le signal de sortie est très proche de la version analogique, mais avec de petites marches d'escalier causées par l'échantillonnage.

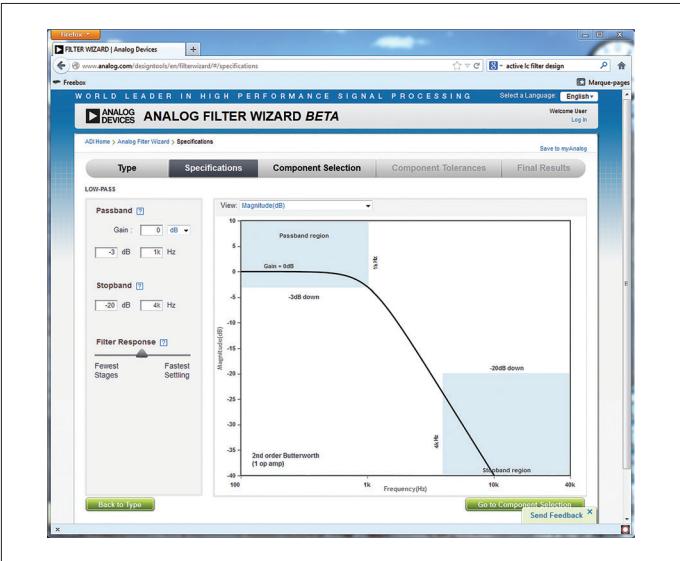


Figure 3. L'outil *Filter Wizard* d'*Analog Devices* permet de calculer facilement les filtres analogiques classiques.

d'un filtre à capacités commutées. Comparez donc ce schéma à celui du filtre RC (fig. 1), vous verrez que la résistance série a été remplacée par un condensateur relié à la masse et deux interrupteurs. Regardez la simulation associée, la forme d'onde filtrée ressemble beaucoup à celle du filtre RC, non ? Pour comprendre comment ça marche, revenons un peu à l'équation (3) :

$$dQ = (U_{\text{entrée}} - U_{\text{sortie}}) \times dt / R$$

Cette équation nous dit qu'avec le filtre RC, à chaque petit inter-

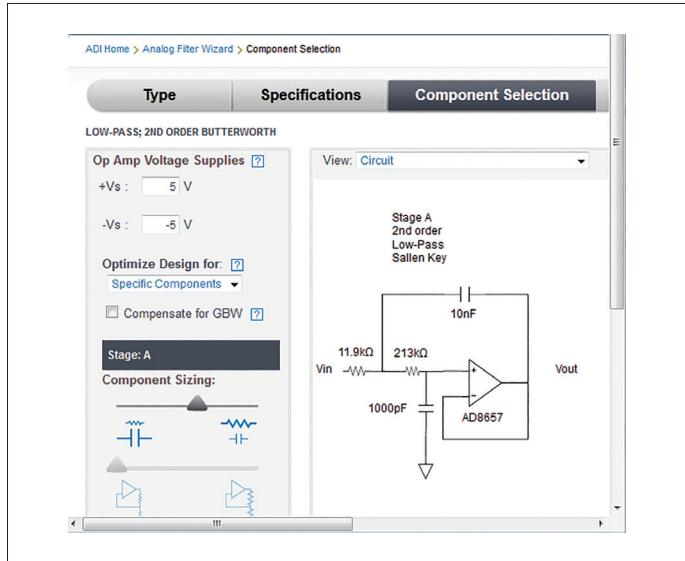


Figure 4. Le schéma produit par *Filter Wizard* est un filtre Sallen-Key.

valle de temps dt , la résistance transfère une petite charge dQ de l'entrée vers la sortie, c'est à dire vers le condensateur C . Pour y voir clair, une autre façon de faire serait de charger un second petit condensateur C' avec la tension d'entrée, puis de le décharger dans le condensateur C ! Si on calcule la valeur de C' pour transférer une charge égale à dQ et qu'on commute ce condensateur toutes les dt secondes, alors on devrait obtenir le comportement d'un filtre RC. Et c'est exactement comme ça que fonctionne un filtre à capacités commutées !

Passons quelques minutes encore sur nos petites formules : à

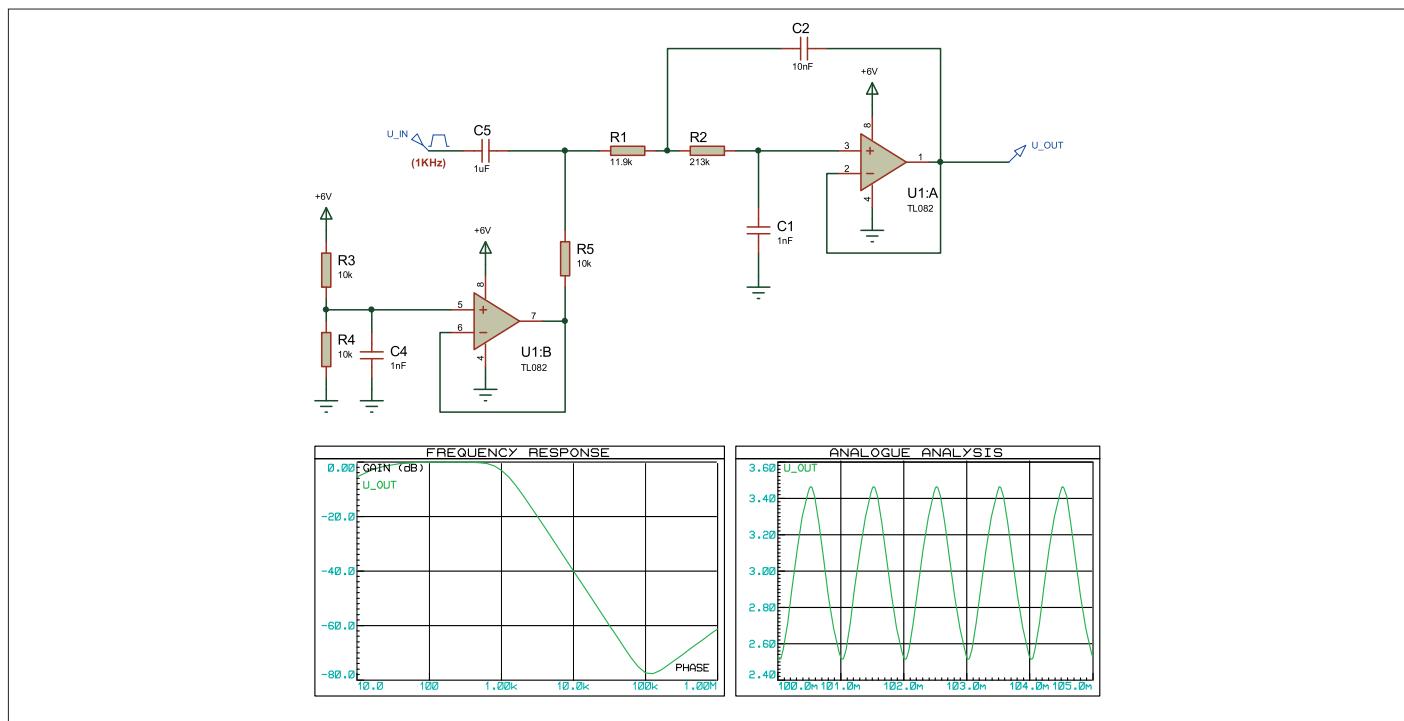


Figure 5. Ce schéma reproduit le filtre passe-bas 1 kHz analogique. La simulation la plus à droite montre le signal de sortie en présence d'une onde carrée de 1 kHz appliquée à l'entrée.

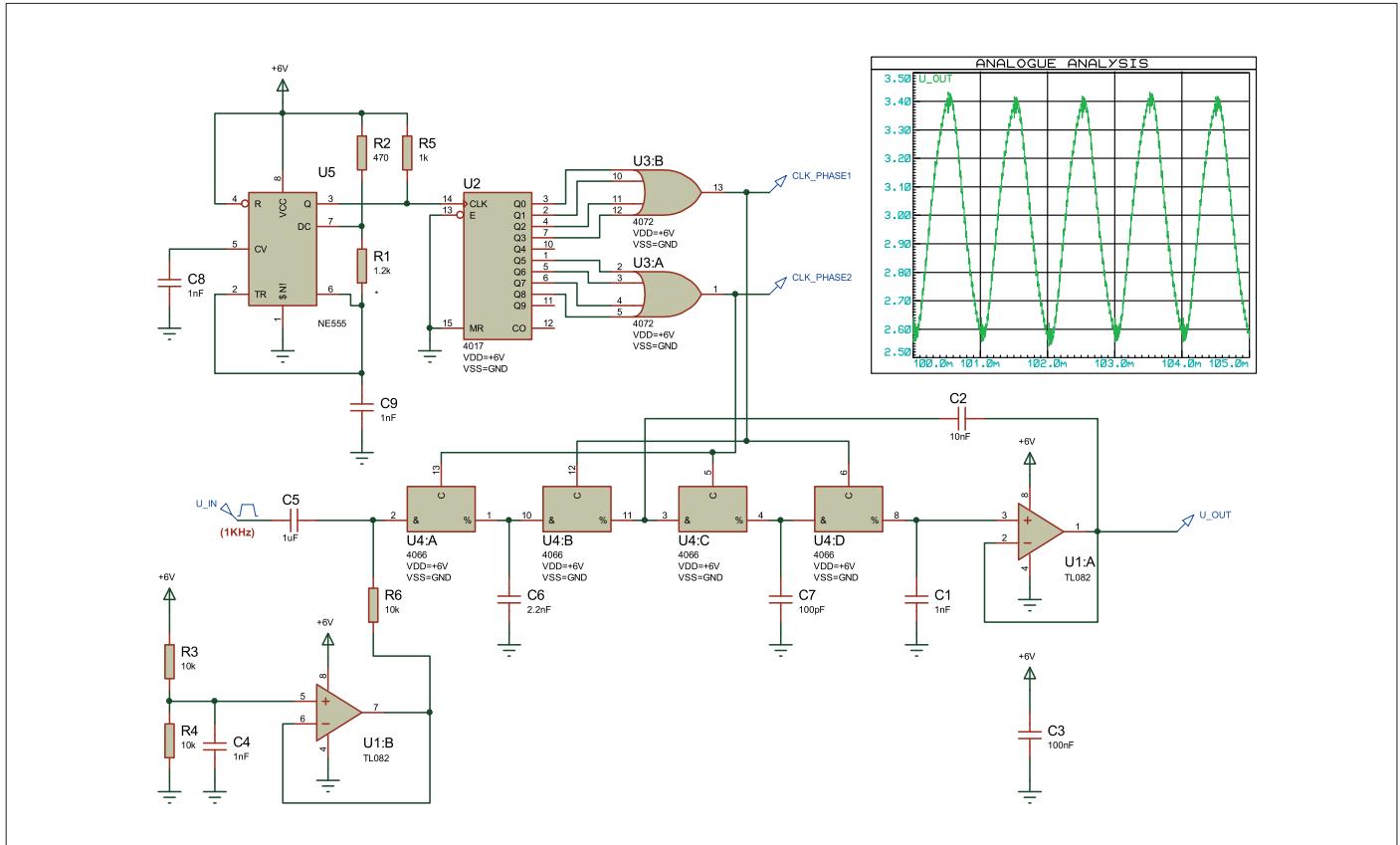


Figure 6. La version à capacités commutées est obtenue à partir de la figure 5 en remplaçant chacune des deux résistances par un condensateur et une paire de commutateurs. La partie supérieure est le générateur d'horloge. La simulation montre un signal très proche de celui de la version analogique.

chaque cycle de commutation, le condensateur C' sera chargé avec une charge $Q = C' \times U_{\text{entrée}}$. En supposant que le condensateur de sortie C est beaucoup plus grand que C' , alors lorsque C' sera commuté sur la sortie sa charge sera quasi instantanément réduite à $Q = C' \times U_{\text{sortie}}$. Par conséquent, à chaque cycle de commutation, la charge transférée est :

$$dQ = C' \times U_{\text{entrée}} - C' \times U_{\text{sortie}} = (U_{\text{entrée}} - U_{\text{sortie}}) \times C' \quad (7)$$

Si vous comparez cette formule à l'équation 3, vous verrez facilement que la cellule de filtre à capacités commutées est équivalente à un filtre RC, avec la correspondance suivante :

$$C' = dt/R, \text{ c'est à dire } C' = 1 / (F_{\text{commutation}} \times R) \quad (8)$$

Et voilà pourquoi un filtre à capacités commutées permet de faire facilement varier la fréquence de coupure : il n'est pas nécessaire de modifier la valeur des composants, mais simplement de changer la *fréquence de commutation des interrupteurs*. Ce qui est bien plus facile à faire dans un circuit intégré numérique !

Un filtre du 2^e ordre

Pour vous prouver que cela marche, je vous propose d'essayer de concevoir un filtre à capacités commutées un peu plus complexe, de le simuler... puis de le construire vraiment.

Prenons l'exemple d'un filtre passe-bas de 1 kHz du 2^e ordre. Commençons par concevoir ce filtre sous la forme d'un filtre RC

classique. Le plus simple pour cela est d'utiliser l'un des outils gratuits disponibles sur la toile, comme celui proposé par *Analog Devices* (**fig. 3**). Il suffit d'entrer les spécifications désirées et sélectionner la topologie de filtre souhaitée, ici un filtre dit *Sallen Key* d'ordre 2. Vous obtiendrez vite le schéma reproduit sur la **fig. 4**. Bien sûr, ce schéma propose d'utiliser un amplificateur opérationnel d'*Analog Devices*, ici un AD8657. Regardez bien le schéma : comme le filtre est du 2^e ordre, sa fréquence de coupure est définie par deux condensateurs (1 nF et 10 nF), et par deux résistances (11,9 kΩ et 213 kΩ).

J'ai simulé pour vous ce schéma, juste pour confirmer qu'il fonctionne comme prévu (**fig. 5**). Comme je n'avais aucun AD8657 sous la main, je l'ai remplacé par un antique TL082, le principe reste le même. Pour pouvoir d'utiliser une alimentation positive, la seconde moitié de ce TL082 est utilisée pour créer une masse virtuelle à la moitié de la tension d'alimentation et pour centrer le signal d'entrée grâce à C_5 et R_5 . Comme le montre la simulation, un signal carré de 1 kHz est transformé en une quasi-sinusoidale, ce qui est normal puisque le filtre atténue fortement les harmoniques. La simulation de la réponse en fréquence est rassurante puisqu'elle confirme qu'on a bien un filtre passe-bas de 1 kHz.

Passons aux condensateurs !

Comment obtenir un filtre à capacités commutées à partir de ce schéma ? On a vu dans l'exemple précédent qu'il suffit de remplacer chacune des deux résistances par un petit condensateur.

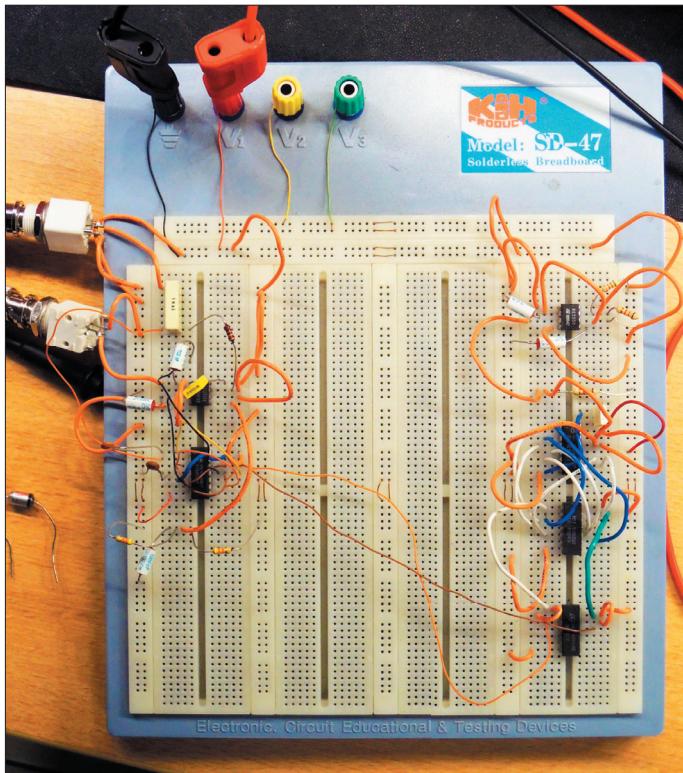


Figure 7. Ma maquette expérimentale. Pas très jolie, mais fonctionnelle. L'horloge est en haut, le filtre en bas.

au rythme de l'horloge. Avec deux opérateurs logiques NOR à quatre entrées (CD4072) on obtient les deux phases d'horloge : la sortie de la première est au niveau logique haut pendant 4/10 du temps, puis les deux lignes d'horloge sont basses pendant 1/10 du temps, puis c'est le tour de la deuxième ligne d'horloge, assurant ainsi l'absence de chevauchement.

On pourrait bien sûr obtenir un résultat similaire avec un peu de code et les sorties à modulation de largeur d'impulsion d'un microcontrôleur. J'ai préféré ressortir de vieilles puces CD40XX du fond de mes tiroirs... La **fig. 6** montre la simulation du circuit complet. Le signal de sortie, avec un carré de 1 kHz à l'entrée, ressemble bien à celui de la version analogique.

Est-ce que ça marche ?

Un simulateur est un superbe outil, mais cela ne nous dispense pas de vérifier que le circuit fonctionne réellement. Comme les fréquences utilisées restent assez basses, je me suis permis d'utiliser une simple carte de prototypage. Le résultat (**fig. 7**) est, euh, très éloigné d'un circuit analogique bien propre, mais je n'avais qu'une demi-heure devant moi... J'ai raccordé ensuite les deux signaux d'horloge à un oscilloscope pour vérifier l'oscillation et les deux phases de l'horloge alternées sans chevauchement (**fig. 8**). Ensuite, j'ai injecté un signal carré de 1 kHz à l'entrée. Regardez le signal de sortie (**fig. 9**) : il est très proche de la simulation, non ?

L'idée des capacités commutées permet de régler facilement la question de la fréquence de coupure du filtre.

Le principe a été décrit par James Clerck Maxwell en... 1873 !

sateur vers la masse et deux commutateurs analogiques. La **fig. 6** montre le résultat. Regardez d'abord la partie basse : c'est le schéma du filtre analogique dont les résistances de 11,9 kΩ et 213 kΩ sont remplacées chacune par un petit condensateur et une paire de commutateurs analogiques, ici des CD4066. Il faut ensuite choisir une fréquence de commutation suffisamment élevée par rapport aux fréquences des signaux, ici j'ai choisi 45 kHz (j'y reviendrai). Enfin il suffit de calculer les valeurs des deux condensateurs en utilisant l'équation 6, qui donne des valeurs de 2,2 nF et 100 pF.

La partie supérieure du schéma est le circuit d'horloge à 45 kHz. Celui-ci paraît bien complexe... C'est parce que tout circuit à capacités commutées requiert deux signaux d'horloge déphasés de 180°, chacun pilotant l'un des commutateurs de chaque paire. Ces deux signaux ne doivent jamais être actifs simultanément, ne serait-ce qu'une nanoseconde. Sinon les lignes d'entrée et de sortie sont court-circuitées, et le filtre ne fonctionne plus du tout. Concevoir deux horloges qui ne se chevauchent pas est moins trivial qu'on le pense. Comme on se contente ici d'une horloge *lente*, 45 kHz, j'ai utilisé une méthode éprouvée : l'antique NE555 délivre une horloge de $10 \times 45 \text{ kHz} = 450 \text{ kHz}$, envoyée à un compteur binaire CD4017. Les dix sorties d'un tel circuit sont activées l'une après l'autre

Enfin, comme j'ai la chance d'avoir dans mon labo un analyseur de spectre HP3585A doté d'un générateur de poursuite, j'en ai profité pour mesurer la réponse en fréquence de ce filtre, en versions capacités commutées et en RC classique (**fig. 10**). Très proche, non ?

Des inconvénients ?

Vous retiendrez qu'un filtre à capacités commutées n'est pas plus difficile à concevoir que ça. Évidemment, tout dépendra des contraintes de votre projet. Revenons une peu sur la sélection de la fréquence d'horloge. Pourquoi ai-je pris 45 kHz ? En fait, le filtre à capacités commutées est un circuit qui découpe (ou échantillonne) le signal analogique, comme le fait un convertisseur analogique/numérique (CAN) ou son inverse le convertisseur numérique/analogique (CNA). À ce sujet, et comme pour tout autre circuit de ce type, Monsieur Nyquist nous dit que l'horloge du découpage du signal analogique doit impérativement être au double de la fréquence la plus élevée du signal traité. Attention, ce n'est pas de la fréquence de coupure du filtre qu'on parle ici, mais de la fréquence la plus élevée susceptible d'être présente dans le signal d'entrée. À défaut de cette précaution, nous aurions de gros soucis avec le *repliement du spectre* qui perturberait gravement la réponse du filtre.

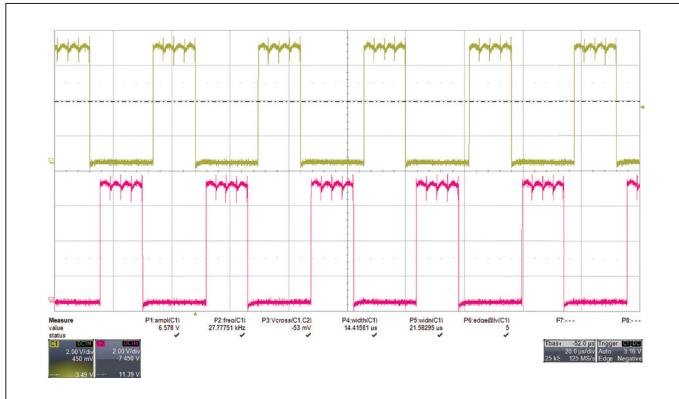


Figure 8. Comme prévu, les deux phases de l'horloge ne se chevauchent pas. Les petits sauts de tension lors des transitions sont des conséquences directes du câblage en l'air...

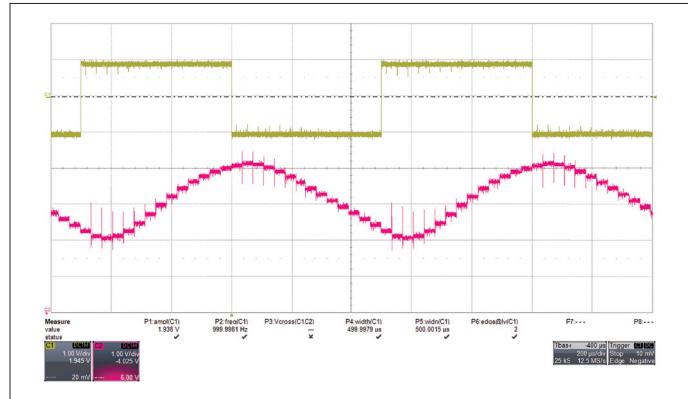


Figure 9. Voici le signal de sortie (rouge) lorsqu'un carré est appliqué à l'entrée (vert). On distingue bien les petites marches d'escalier, qui devront être supprimées par un filtre passe-bas analogique.

Tout comme avec un convertisseur analogique-numérique, la sortie d'un filtre à capacités commutées est un signal échantillonné. Sur l'oscilloscopogramme mesuré sur la maquette (fig. 3), on voit des petites marches d'escalier causées par la commutation des condensateurs. Pour éliminer ces petits sauts après un tel filtre, on ajoute en général un autre filtre analogique, appelé *filtre de reconstruction*. Exactement comme avec un convertisseur A/N ou N/A. Pour que ce filtre soit facile à fabriquer et ne perturbe pas trop le signal utile, vous choisissez en pratique une fréquence d'horloge *largement* supérieure au double de la fréquence maximale du signal : un facteur 10 n'a rien d'exceptionnel...

Pour conclure

Notre petite excursion dans le monde des filtres à capacités commutées touche à sa fin. Il est rare d'avoir à concevoir son propre filtre à partir de composants discrets comme je l'ai fait dans cet article. Les fabricants de circuits intégrés s'en sont donné à cœur joie en matière de filtres intégrés : voyez p. ex. chez *Maxim*, *Analog Devices* ou *Cypress*. Pour comprendre comment ils fonctionnent, pour les utiliser efficacement et à bon escient, rien de tel que mettre soi-même la main à la patte. Je vous encourage chaudement à expérimenter vous-même. Commencez peut-être par reproduire les exemples donnés dans cet article avec un simulateur comme LT Spice, puis sortez le fer à souder si vous en avez envie : c'est de loin la meilleure méthode pour aller au fond des choses et en revenir mieux

armé ! Jetez un œil aux articles cités en référence, ils vous permettront d'aller encore un peu plus loin. ↗

200005-01

*Cet article a été publié en anglais
dans la revue Circuit Cellar (n° 277, août 2013)*

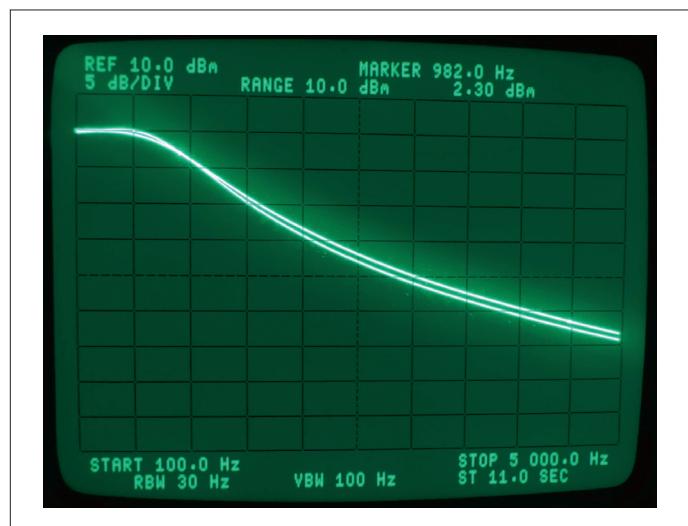


Figure 10. Voici la réponse en fréquence du filtre à capacités commutées comparée à celle de la version analogique.

Liens et littérature

- [1] filtres à capacités commutées Elektor, janvier 1981 (téléchargement gratuit): www.elektormagazine.fr
- [2] The Story of James Clark Maxwell and Switched Capacitor Filters Philip Golden, Intersil capacitor-filters
- [3] Switched capacitors | Take the Mystery Out of the Switched-Capacitor Filter: The System Designer's Filter Compendium Richard Markell, Linear, Application note AN40: <http://cds.linear.com/docs/en/application-note/an40f.pdf>
- [4] Simulateur de signal mixte Proteus VSM : www.labcenter.co.uk
- [5] Oscilloscope numérique Teledyne Lecroy WaveRunner 610zi : <http://teledynelecroy.com/oscilloscope/oscilloscopemodel.aspx?modelid=4781>
- [6] Analyseur de spectre Hewlett Packard HP3585A (antiquité)