

Le condensateur dans tous ses schémas

FRANCISCO CAMACHO [1]

Le non-spécialiste de l'électronique qui enseigne en STI2D peut avoir du mal à appréhender la diversité des condensateurs présents sur les schémas. Ils sont partout, de l'alimentation aux capteurs en passant par les oscillateurs. Que sont ces composants, comment les identifier, comment sont-ils faits, comment déterminer leur rôle et comment analyser leur fonctionnement ? Voici quelques clés pour s'y retrouver.

Ce court exposé n'a pas la prétention d'être exhaustif ; il se veut résolument qualitatif, et est destiné principalement aux non-spécialistes. Il leur permettra d'identifier les condensateurs sur les schémas, et d'avoir une idée de leur rôle dans les structures.

Généralités

Un condensateur est un composant électronique que l'on rencontre dans la quasi-totalité des objets techniques et donc dans les schémas structurels électroniques correspondants. Sur ces derniers, on va pouvoir identifier les condensateurs par leurs symboles ; ils seront ou non polarisés [1]. On trouve encore plusieurs représentations différentes des condensateurs polarisés sur les schémas des constructeurs ou dans les logiciels de simulation qui ne sont plus normalisés.

Premiers calculs

Un condensateur est réalisé selon un principe unique qui est de séparer deux électrodes métalliques en regard, accessibles électriquement, par un matériau non conducteur appelé diélectrique [2].

La grandeur qui caractérise un condensateur est sa capacité ; elle s'exprime en farads (F).

La relation qui permet d'approcher qualitativement les contraintes de réalisation d'un condensateur est celle du condensateur plan :

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{e}$$

ϵ_0 : permittivité du vide (constante)

ϵ_r : permittivité relative du matériau

S : surface d'une électrode

e : épaisseur du diélectrique

La permittivité désigne la propriété physique que possède un milieu donné ; elle rend compte de sa réponse à un champ électrique. Le choix du diélectrique est déterminant pour l'élaboration d'un condensateur et

mots-clés

composant

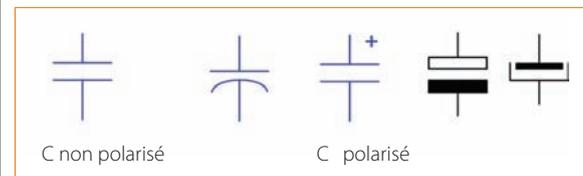
présente des avantages et des inconvénients. Suivant la technologie utilisée, le matériau isolant est solide ou liquide.

La relation met également en évidence que si l'on veut obtenir des valeurs élevées de capacité, il faut augmenter les surfaces des électrodes en regard et diminuer l'épaisseur du diélectrique.

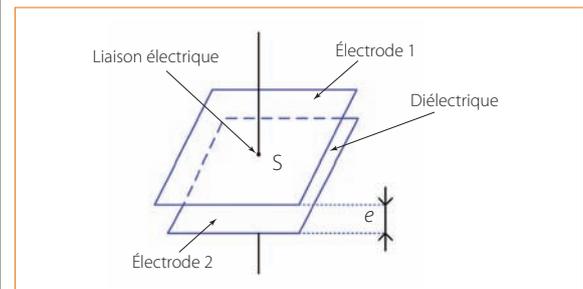
Par ailleurs, lorsque l'on applique une différence de potentiel U entre les électrodes d'un condensateur, le diélectrique est soumis à un champ électrique E tel que

$$E = U/e$$

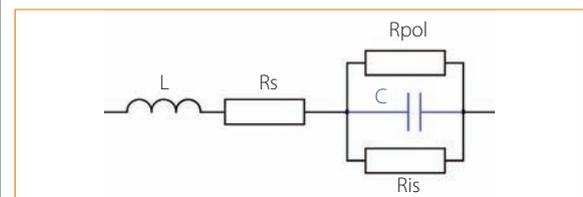
Ce champ électrique ne doit pas dépasser une valeur maximale, spécifique au matériau diélectrique utilisé, appelée *rigidité diélectrique*, sous peine de détruire le condensateur. L'épaisseur étant fixée par la fabrication, la tension applicable sera donc limitée par une



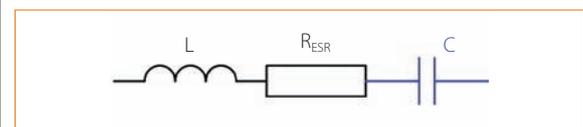
1 Les symboles normalisés des condensateurs



2 Le principe de réalisation d'un condensateur

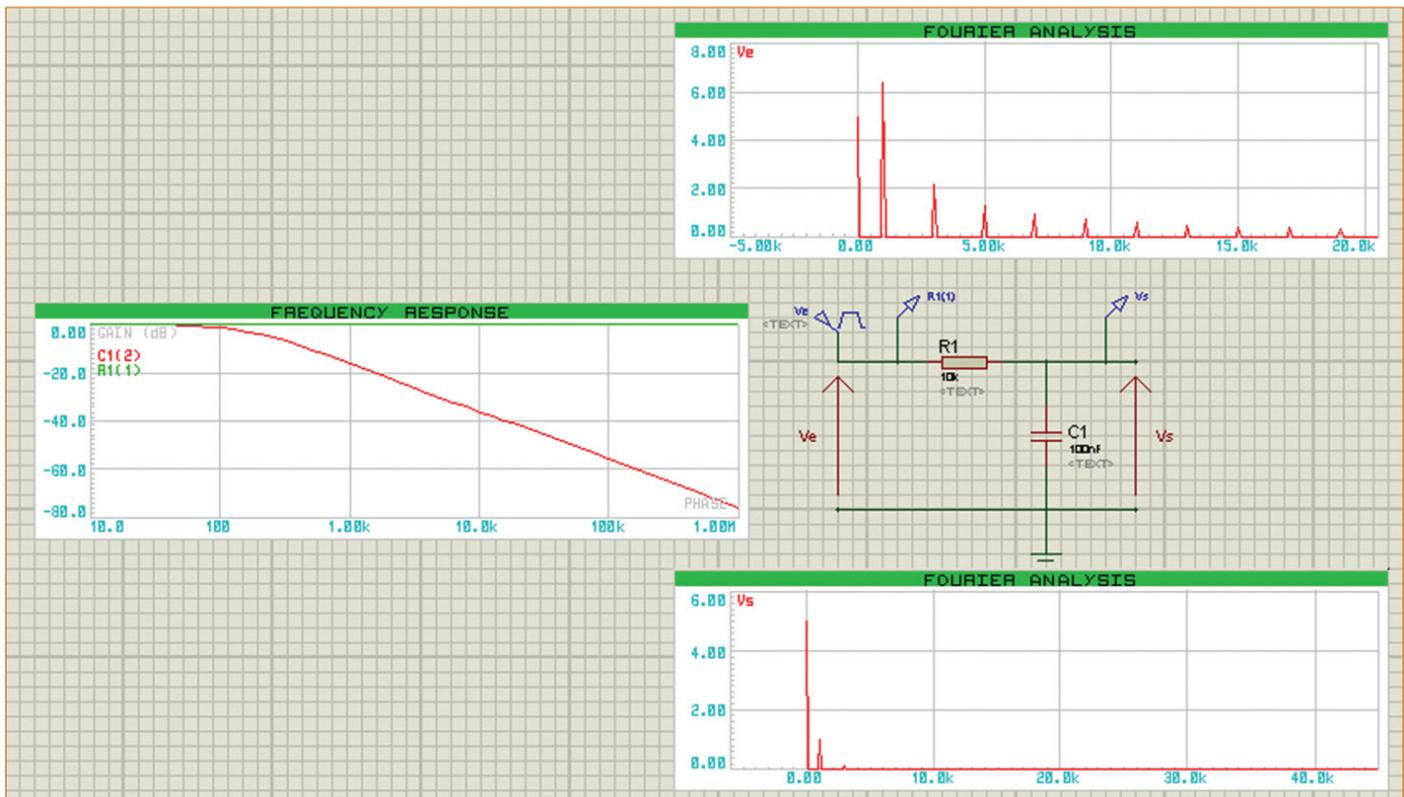


3 Le modèle équivalent complet du condensateur



4 Le modèle équivalent complexe simplifié

[1] Professeur d'électronique au lycée Jacquard de Paris (75019).



5 Le comportement en fréquence : exemple de simulation

tension maximale. On trouvera inscrite sur le corps des composants la tension maximale de service, et la fiche technique renseignera sur la tension maximale d'essai, valeur associée à l'application d'une tension pendant un temps déterminé, ainsi que sur la tension de claquage, valeur qui provoquera la perforation du diélectrique. La relation permet également de dire que plus la capacité sera importante, plus la tension maximale admissible sera faible.

L'intensité qui circule dans la branche où est présent un condensateur ne dépend pas directement de la tension aux bornes de ce dernier, mais de la variation de cette tension. Ainsi, on écrit généralement la relation (convention récepteur, q étant la charge de l'armature sur laquelle arrive i) :

$$i = dq/dt$$

q : charge de l'armature en coulombs

t : temps en secondes

$$q = C \cdot u$$

et donc

$$i = C \cdot du/dt$$

On pourra donc calculer la valeur instantanée de i et de u avec ces relations. Il est à remarquer que u sera obtenu en intégrant i , soit

$$U = 1/C \int i \cdot dt$$

U est donc une somme continue de valeurs, ce qui implique qu'il ne peut y avoir de discontinuité de tension aux bornes d'un condensateur. L'expression montre également que si i est constant, u devient une fonction affine du temps :

$$U = I \cdot t + U_0$$

U_0 : tension aux bornes du condensateur à la date prise comme origine de l'évolution

La modélisation

Bien qu'en première approche on puisse associer au condensateur un modèle purement capacitif représentable par son symbole (C non polarisé) **1**, les conditions de fonctionnement de la structure, en particulier les fréquences des signaux traités, peuvent conduire à adopter un modèle un peu plus complexe qu'un simple élément capacitif. Il est dans ce cas composé de l'élément inductif L dû aux liaisons et à la géométrie de la structure, de l'élément résistif R_s dû aux armatures, aux connexions et aux électrodes, de l'élément résistif R_{pol} dû aux pertes dans le diélectrique et enfin de l'élément résistif R_{is} dû à la résistance d'isolement **2**. On peut simplifier le modèle en remplaçant les trois éléments résistifs par un équivalent de leur association, R_{ESR} **3**. Ce modèle sera utilisé lorsque les fréquences des signaux à analyser seront élevées.

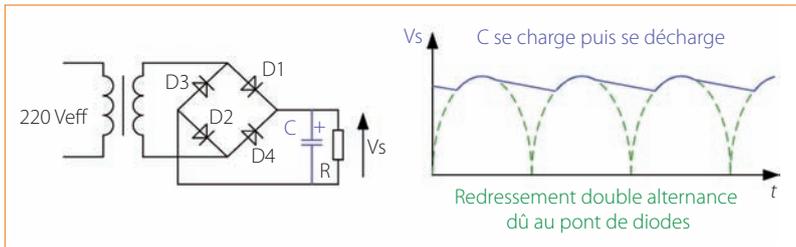
En régime sinusoïdal

Le comportement d'un condensateur lorsqu'il est soumis à un signal sinusoïdal ou plus généralement aux signaux périodiques – décomposables en somme de composantes sinusoïdales ou harmoniques dues à l'application du théorème de Fourier – met en évidence que l'on peut associer au modèle simple du condensateur l'impédance complexe Z_C telle que :

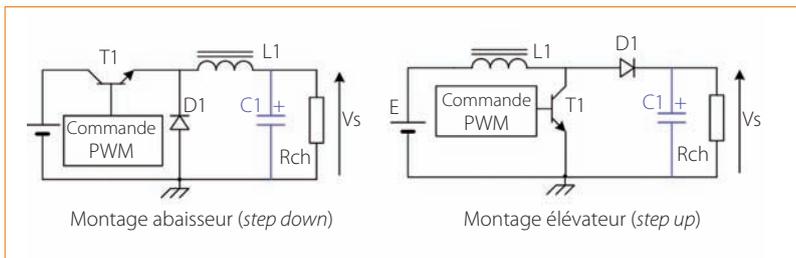
$$Z_C = 1/j\omega C$$

La pulsation ω du signal sinusoïdal, égale à $2\pi f$, est exprimée en radians par seconde (rd/s). On remarque que le nombre complexe Z_C est un imaginaire pur, sans partie réelle, ce qui ne sera plus le cas avec le modèle de la figure **4** où l'impédance s'écrit

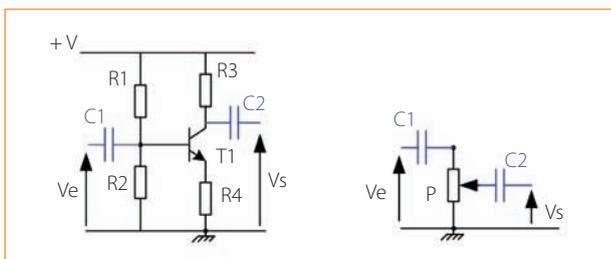
$$Z = j\omega L + R_{ESR} + 1/j\omega C = R_{ESR} + j(\omega L - 1/\omega C)$$



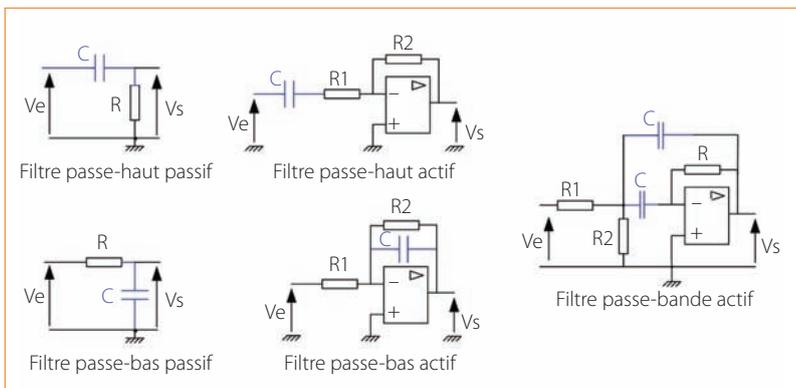
6 La conformation et le stockage dans une alimentation continue



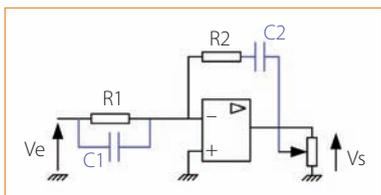
7 Des exemples de convertisseurs à découpage



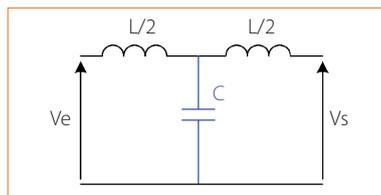
8 Des exemples de structures avec condensateurs de liaison



9 Des exemples de filtres



10 Un correcteur PID



11 Une ligne à retard parfaite

Dans les deux cas, l'impédance complexe est une fonction de w , donc de la fréquence f de la composante qui est appliquée au condensateur. La conséquence en est que le module et l'argument de Z vont varier en fonction de f .

Sachant que pour un nombre complexe s'écrivant $Z = a + jb$ le module s'exprime sous la forme

$$|Z| = (a^2 + b^2)^{1/2}$$

et l'argument θ est tel que

$$\tan \theta = b/a \quad \text{et donc} \quad \theta = \arctan b/a$$

on peut écrire des expressions complexes, les simplifier pour retrouver des formes canoniques qui facilitent les analyses et les interprétations, puis faire des calculs pour trouver les valeurs des paramètres du fonctionnement de la structure pertinents pour l'analyse ou la conception des structures. L'utilisation d'outils de simulation comme Proteus va plus facilement permettre d'évaluer, sans faire de calculs, l'évolution de l'impédance, ou de la fonction de transfert ($T = V_s/V_e$) d'une structure, en fonction de la fréquence des signaux périodiques qui leur sont appliqués 5.

Les utilisations

Associé à d'autres composants, le condensateur participe à la réalisation d'une fonction au sein d'un objet technique. Il va avoir un rôle spécifique, et participer à la réalisation de différentes opérations au sein d'une structure électronique.

Le stockage et la restitution d'énergie

Le condensateur va être utile pour un transfert ponctuel et rapide d'énergie (voir l'encadré sur les supercondensateurs) ou une conformation de la tension dans une alimentation continue 6.

Il va donner au signal une allure quasi continue qui sera fournie après filtrage à l'entrée d'un régulateur. On retrouve également avec le même rôle des condensateurs électrochimiques polarisés de grande capacité dans les structures des convertisseurs à découpage 7.

La liaison entre structures

Les condensateurs sont utilisés pour la transmission des grandeurs variables supports de l'information en éliminant les composantes continues dues aux alimentations 8, ce qui revient à faire un filtrage. Qualitativement, l'impédance du condensateur ayant une valeur quasi infinie pour $w = 0$ rd/s, il se comporte comme un circuit ouvert pour les grandeurs continues.

Le filtrage

On filtre le signal pour sélectionner ou au contraire éliminer les composantes dont les fréquences sont ou ne sont pas représentatives de l'information. Généralement, si la structure présente un ALI (amplificateur linéaire intégré), on parlera de filtre actif; dans le cas contraire, de filtre passif. Dans chaque structure, le condensateur participe à la détermination des propriétés du filtre 9 :

- passe-bas, les composantes du signal d'entrée dont la fréquence est élevée par rapport à une fréquence repère f_0 , appelée fréquence de coupure à - 3 dB (décibels), vont être fortement atténuées donc pratiquement inexistantes en sortie;

Les supercondensateurs

Nature et performances

Si le supercondensateur est bien un condensateur, il se distingue par sa structure interne et son usage. Sa spécificité est de permettre l'obtention d'une densité d'énergie (quantité d'énergie que l'on peut stocker dans le composant par rapport à son poids et à sa taille) beaucoup plus élevée qu'avec des condensateurs électrolytiques ordinaires – mais moins qu'avec des batteries **a**.

	Batterie (au lithium-ion)	Supercondensateur (à base de carbone)	Condensateur (électrolytique)
Densité d'énergie (Wh/kg)	150	15	0,1

a Tableau comparatif des densités d'énergie

Dans l'usage, les supercondensateurs sont des dispositifs de stockage d'énergie différents des batteries. Ces dernières, dont les charges électriques sont stockées dans le volume de l'électrolyte et sur la petite surface des électrodes, sont lentes à se charger comme à se décharger, ce qui rend la sollicitation d'une forte énergie en un temps très réduit impossible. Par contre, dans les supercondensateurs, les charges se situent sur la très grande surface des électrodes, ce qui rend beaucoup plus rapide, de l'ordre quelques secondes, les cycles de charge et décharge. De plus, ces composants ont une longue durée de vie.

Les matériaux utilisés classiquement dans la fabrication des supercondensateurs sont des carbones poreux que l'on a plongés dans un liquide contenant des ions positifs et négatifs, puis soumis à un courant électrique **b**. Ils possèdent de très grandes surfaces de façon à pouvoir stocker le plus de charges possible. L'étendue de ces surfaces est due à la présence d'une très grande quantité de pores d'un diamètre compris entre 2 et 20 nanomètres (soit 10 000 fois plus fins qu'un cheveu). À titre d'exemple, un gramme de ces matériaux permet d'obtenir une surface équivalente à la moitié d'un terrain de football!

La dimension des pores est un compromis entre une taille trop importante qui conduirait à une trop faible augmentation de la surface et une taille trop petite qui empêcherait les ions d'y pénétrer.

Utilisations

Les supercondensateurs sont utilisés pour la récupération de l'énergie de freinage de nombreux véhicules (voitures, bus, trains), ou encore pour assurer l'ouverture d'urgence de l'avion A380. Ils sont commercialisés à l'unité ou sous forme de blocs les associant en dérivation **c**.

Actuellement, de nouveaux supercondensateurs atteignant les 15 Wh/kg commencent à être commercialisés auprès de l'industrie d'exploration gazière et pétrolière, très intéressée par ce moyen de stockage qui ne risque pas d'exploser, contrairement aux batteries lithium-ion.

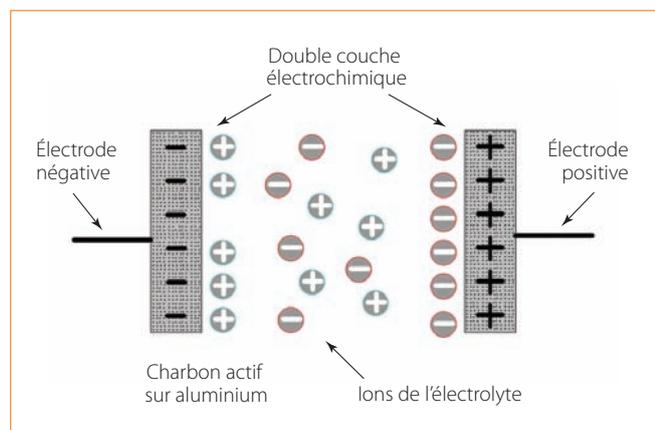
En Chine, depuis 2010, des supercondensateurs confèrent aux bus de la société Sunwin une autonomie de 3 à 6 km. Ils sont rechargés à chaque station à l'aide d'un pantographe. Trente secondes suffisent pour les recharger à 50 %, et il ne faut que 80 secondes pour les recharger à 100 %.

En France, en septembre 2013 a été baptisé le premier bateau électrique entièrement alimenté par des supercondensateurs. Ce catamaran électrique sans batterie de 22,1 m sur 7,2 m qui peut accueillir 113 personnes, dont 3 à mobilité réduite, ainsi que 10 vélos, fera la navette entre Lorient et Pen-Mané. Construit par le chantier STX de Lanester, ce bateau à propulsion exclusivement électrique se rechargera à chaque escale en seulement 4 minutes. Doté de deux propulseurs azimuthaux, il est capable d'atteindre une vitesse maximale (chargé) de 10 nœuds.

La Toyota Yaris Hybrid-R a la taille d'une petite citadine, mais aussi la puissance d'une sportive grâce à ses 4 moteurs et à son supercondensateur qui lui permettent d'atteindre une puissance de 420 chevaux. Le supercondensateur récupère efficacement l'énergie du freinage pour la restituer ensuite en 10 secondes en mode route et en seulement 5 secondes pour apporter un véritable « boost » en mode course.

Certains constructeurs automobiles étudient la piste du supercondensateur haute densité pour remplacer la batterie dans les véhicules électriques, mais ce n'est encore qu'au stade expérimental.

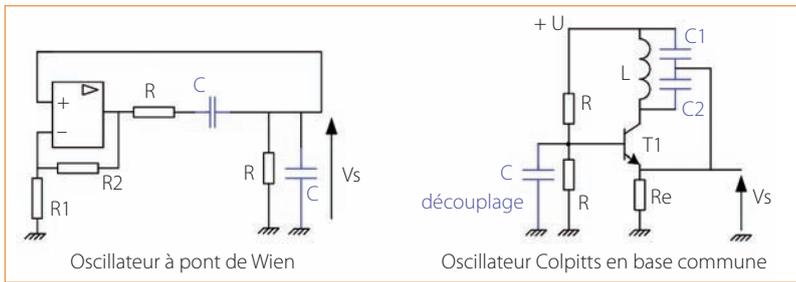
Le prix des supercondensateurs à base de graphène a été divisé par 100 en quinze ans, les applications sont de plus en plus nombreuses dans de multiples domaines, et la recherche avance vite dans les laboratoires : des scientifiques sont déjà parvenus à créer des supercondensateurs avec une densité énergétique de 600 Wh/kg, quand les batteries lithium-ion en atteignent 150. Réalisés à partir de carbone, les supercondensateurs offrent de plus l'avantage d'être biodégradables. Plus besoin de circuits de récupération et moins de pollution!



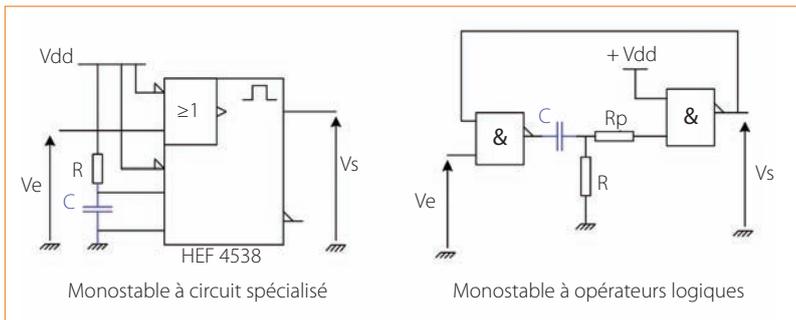
b La constitution des supercondensateurs



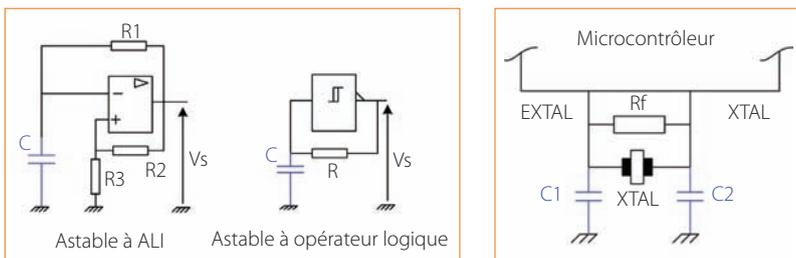
c Exemples de supercondensateurs commercialisés



12 Des exemples d'oscillateurs sinusoïdaux

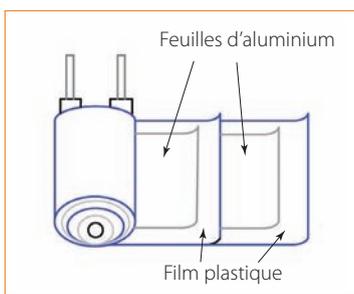


13 Des exemples de monostables

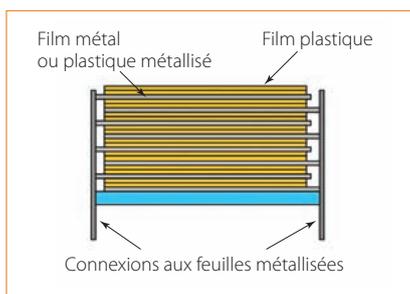


14 Des exemples d'astables

15 Une « horloge » pour microcontrôleur



16 Un condensateur à diélectrique plastique à bobinage



17 Un condensateur à diélectrique plastique métallisé

– passe-haut, seules les composantes de fréquence supérieure à f_0 vont être transmises à la sortie ;
 – passe-bande, c'est uniquement un ensemble de composantes, dont les fréquences sont comprises entre deux valeurs repères f_1 et f_2 , qui vont se retrouver en sortie de la structure. Les condensateurs participent à la définition des fréquences de coupure des filtres.
 La figure 5 montre le diagramme de Bode ($G = 20 \log |V_s/V_e|$ en dB) ainsi que les diagrammes spectraux de V_e et V_s associés à la structure d'un filtre passe-bas passif.

La correction au sens de l'automatique

La correction est utile si l'on recherche la rapidité, la précision et la stabilité d'un système asservi soumis à une commande ou à la présence de perturbations. C'est encore le choix des valeurs des capacités associées aux valeurs des résistances qui va déterminer les performances de la correction apportée au système 12.

Le retard

Il s'agit du retard entre la grandeur d'entrée et la grandeur de sortie d'une structure. Dans une ligne à retard parfaite 11, le signal de sortie $s(t)$ est lié au signal d'entrée par la relation $s(t) = e(t - \tau)$
 τ : retard apporté par la ligne

Les oscillations sinusoïdales

Il est parfois nécessaire, pour conditionner des capteurs par exemple, de disposer d'oscillateurs sinusoïdaux 12. Le principe est de réaliser un système bouclé fonctionnant en régime d'instabilité. Les condensateurs participent à la définition de la fréquence d'oscillation. À noter, les condensateurs de découplage se comportent comme des circuits ouverts pour les composantes continues, en particulier pour la tension d'alimentation, et comme des courts-circuits pour les composantes variables. On les trouve câblés au plus près des circuits logiques connectés aux lignes d'alimentation.

La temporisation et l'élaboration d'un signal d'horloge

● Monostables et astables 13 14
 C'est la charge et/ou la décharge du condensateur qui permettent l'obtention d'une tension fonction exponentielle du temps qui sera comparée à des seuils provoquant des basculements des tensions de sortie. Les notices techniques des composants utilisés donnent les relations permettant de calculer les durées. On peut déterminer la valeur de la tension aux bornes du condensateur en régime transitoire en fonction du temps, pour un circuit RC, à l'aide de la relation suivante :

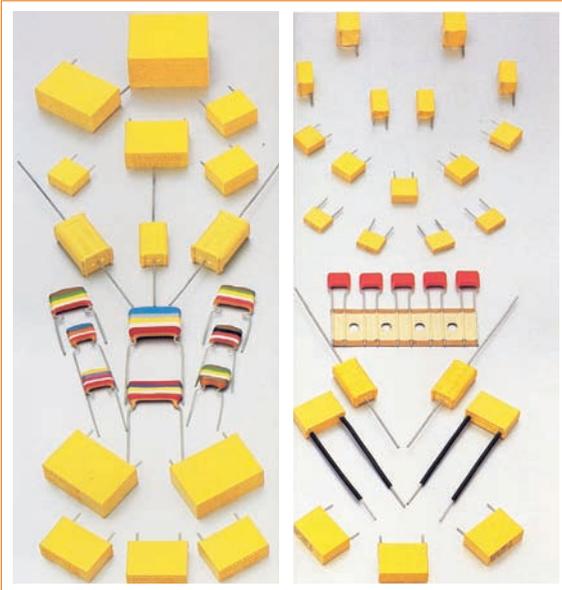
$$v(t) = V_{\infty} + (V_0 - V_{\infty})e^{-t/\tau}$$

- V_0 : tension initiale
- V_{∞} : tension en régime permanent
- τ : constante de temps, $\tau = R \cdot C$

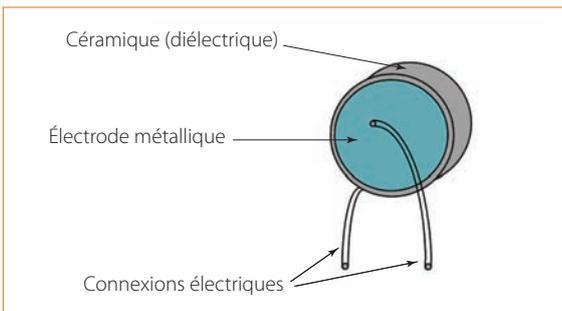
En connaissant les valeurs de tension initiale et finale, on peut en déduire en fonction du besoin $v(t)$ ou t . La durée de l'état instable pour les monostables ainsi que la fréquence du signal de l'astable sont une fonction du produit ($R \cdot C$).

● « Horloge » pour microcontrôleur 15

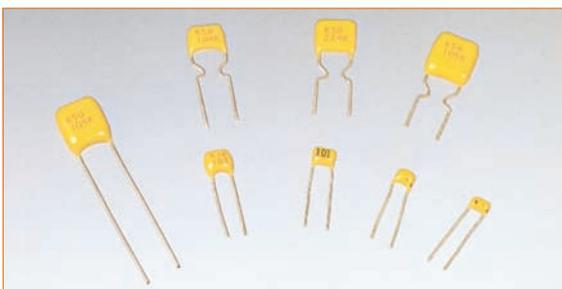
On associe souvent des quartz aux microcontrôleurs pour réaliser le signal d'horloge nécessaire au séquençage des instructions. Ces composants permettent d'obtenir des fréquences précises et stables. Ils sont encadrés par des condensateurs de faibles capacités



18 Des condensateurs à diélectrique plastique



19 Un condensateur disque à diélectrique céramique



20 Des condensateurs céramiques multicouches

0	0	pF	± 20 %	Tension de service	Exemples :
1	1	× 10 pF	± 10 %		
2	2	× 100 pF		250 V	47 nF ± 10 % 250 V
3	3	nF		400 V	
4	4	× 10 nF			100 nF ± 10 % 400 V
5	5	× 100 nF			
6	6	pF			
7	7	× 10 pF			
8	8				
9	9				

Valeur de la capacité Tolérance Tension de service

21 Le marquage par code couleur

dont les valeurs dépendent du quartz et du microcontrôleur utilisés. Ils contribuent à la réalisation de l'astable constitué par l'ensemble.

Les principaux types

Les condensateurs non polarisés

À diélectrique plastique

Ils sont constitués d'un bobinage de feuilles d'aluminium séparées par un ou plusieurs films plastiques (polystyrène, polyester, polypropylène), ce qui permet d'avoir une surface en regard importante 16. La feuille d'aluminium peut être remplacée par une feuille de plastique vaporisée d'une fine couche de ce métal; on classera alors ces condensateurs dans la catégorie à diélectrique plastique métallisé. Ces derniers sont souvent réalisés par empilage en alternant feuilles métallisées et feuilles non métallisées 17. Les condensateurs à diélectrique polyester sont les plus courants. On réserve ces condensateurs à des usages ne demandant pas une grande précision. Les condensateurs à diélectrique polycarbonate permettent une bonne précision, et les valeurs de leurs capacités évoluent peu avec la température.

La figure 18 montre différents modèles commercialisés, que l'on pourra identifier sur les cartes à câblage imprimé.

À diélectrique céramique

Les céramiques utilisées sont obtenues par synthèse; les grains les constituant sont solidarisés par traitement thermique. Les céramiques ainsi réalisées possèdent une permittivité relative ϵ_r très élevée, ce qui permet la fabrication de condensateurs à capacité élevée avec un faible encombrement. On peut réaliser un condensateur facilement en faisant un « sandwich » constitué d'un disque de céramique disposé entre deux disques métallisés 19, ou comme pour les films plastiques métallisés en empilant des couches alternativement céramiques et métalliques. Il existe trois groupes de céramiques, I, II et III, qui se distinguent par leurs constituants et donc leurs caractéristiques. On trouve différentes formes et modèles en fonction des fabricants 20.

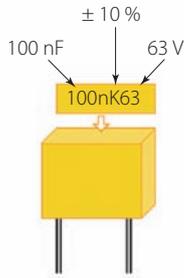
Étant donné la grande variété de modèles disponibles parmi les condensateurs non polarisés, il n'est pas toujours aisé de décoder leur marquage; les principaux codes rencontrés sont donnés en 21 22 et 23.

Les condensateurs polarisés

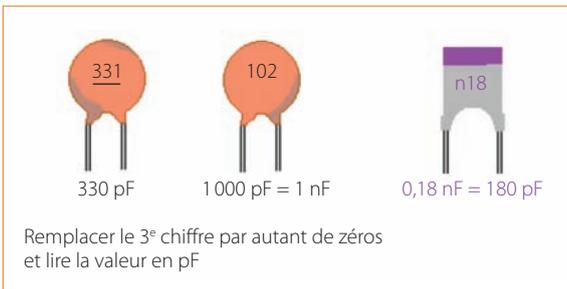
Électrolytiques à électrodes d'aluminium

Ce sont des condensateurs de forte capacité 24. L'alumine qui se forme à la surface de la feuille d'aluminium de l'anode lorsque cette dernière est oxydée constitue le diélectrique, le papier spécial imprégné avec un électrolyte (substance conductrice permettant la

Marquage	Valeur	Tolérance	Tension de service
3p3	3,3 pF	F 1 %	en clair
33p	33 pF	G 2 %	
330p	330 pF	H 2,5 %	
n33	330 pF	J 5 %	
33n	33 nF	K 10 %	
330n	330 nF	M 20 %	
μ330	330 nF		
3μ3	3,3 μF		
33μ	33 μF		



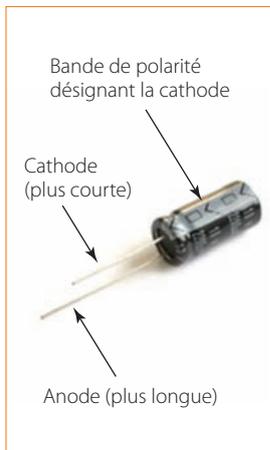
22 Le marquage des condensateurs MKT (polyester)



23 Le marquage des condensateurs céramiques de faible capacité



24 Des condensateurs électrolytiques à électrodes d'aluminium



25 Le marquage et les repères d'un condensateur électrolytique à électrodes d'aluminium

mobilité des ions) associé à une autre feuille d'aluminium constituant la cathode.

La valeur de la capacité est marquée en clair ainsi que la tension de service.

L'anode est repérée par une bague concave, et la cathode par un signe « - » sur le corps du composant **25**.

Électrolytiques au tantale

Ils sont de nature électrochimique. La cathode est constituée d'une succession de couches d'argent et de couches de carbone, l'anode d'une perle de tantale. Ce métal est fritté, et les grains compactés obtenus, enrobés d'électrolyte, vont permettre d'obtenir des

Condensateurs goutte au tantale

KEMET

Série T 350

- Faible courant de fuite, facteur de perte réduit
- CEI 55/085/56

Données techniques

Temp. de service -55...+85 °C
 Tolérance capacité +20%
 Courant résiduel 0,02 x 8 x C
 Temp. de soudage max. 270 °C (3 s)

26 La fiche technique d'un condensateur au tantale

	Filtres secteur	Alimentations continues	Alimentations à découpage	Liaisons basses fréquences	Découplages	Filtres basses fréquences	Lignes à retard	Transistors en commutation	Impulsions	Découplage HF
Polystyrène						X			X	
Polyester									X	
Polycarbonate										
Polypropylène	X							X		
Mica							X			
Céramique I					X					X
Céramique II										
Électrolytique à l'aluminium		X	X	X	X					
Électrolytique au tantale					X	X				

27 Les différents types de condensateurs et leurs applications

surfaces importantes, et par conséquent des capacités élevées, avec un encombrement bien inférieur à celui des condensateurs électrochimiques à électrodes aluminium **26**.

Comment choisir ?

Le choix du condensateur va dépendre de l'application, et en particulier de la nature des grandeurs électriques sur lesquelles il va agir, principalement la fréquence, la tension maximale, la puissance. L'encombrement peut également constituer un critère, ainsi que le coût. Le tableau **27** donne quelques exemples de correspondance entre types de condensateurs et applications. ■