

LES CONDENSATEURS

OBJECTIF

- Connaître la constitution interne d'un condensateur.
- Connaître les propriétés d'un condensateur (capacité, relation courant-tension, énergie,).
- Savoir comment associer des condensateurs.
- Connaître les différentes utilisations du condensateur en électronique.
- Avoir les connaissances de base sur le champ électrique et la force électrostatique.

I- CONSTITUTION D'UN CONDENSATEUR

1- Présentation

Un condensateur se présente en général comme un dipôle polarisé, ou non polarisé, dont voici quelques exemples :

Condensateurs chimiques polarisés



Condensateurs "polyester MKT"



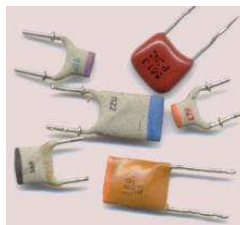
Condensateurs "polypropylène MKP"



Condensateurs "céramique"

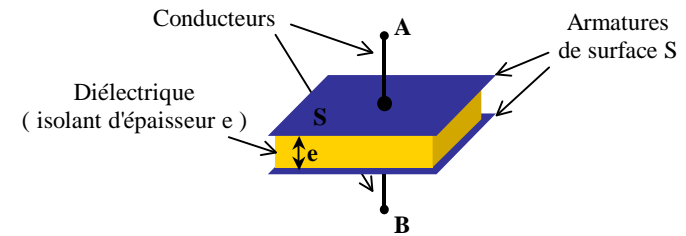


Condensateurs "céramique multicouche"

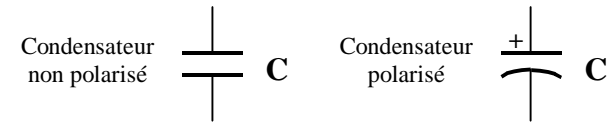


2- Constitution

Un condensateur est constitué de deux surfaces conductrices (*armatures*) séparées par un isolant (*diélectrique*). Le contact électrique se fait sur chacune des armatures.



3- Symbole

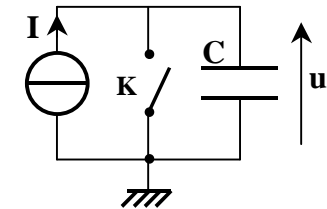


II- PROPRIÉTÉS D'UN CONDENSATEUR

1- Charge d'un condensateur à courant constant

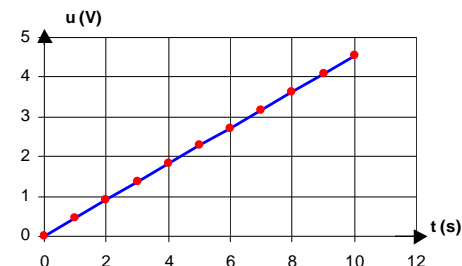
■ Montage expérimental

Il s'agit de faire circuler un courant constant $I = 1\text{mA}$ dans un condensateur et de relever l'évolution de la tension :



Initialement, l'interrupteur K est fermé et à partir de l'instant $t = 0$, K est ouvert.

■ Chronogramme $u(t)$ et tableau de valeurs



t (s)	u (V)
0	0,00
1	0,45
2	0,91
3	1,36
4	1,82
5	2,27
6	2,73
7	3,18
8	3,64
9	4,09
10	4,55

Observation : La tension augmente linéairement au cours du temps.

2- Capacité d'un condensateur

Reprenons l'expérience de charge à courant constant :

- Le condensateur reçoit une quantité d'électricité $q = I.t$, donc q augmente linéairement au cours du temps.
- La tension u aux bornes du condensateur augmente linéairement elle aussi, il y a donc proportionnalité entre q et u . On peut dire que $q = \text{"constante"} \times u$.

Définition : La capacité C d'un condensateur est définie par la relation :

$$q = C \cdot u$$

coulomb (C)
farad (F)
volt (V)

Ordre de grandeur et sous-multiples :

- électronique : pF (10^{-12} F) ; nF (10^{-9} F) et μ F (10^{-6} F)
- électrotechnique : μ F (10^{-6} F) ; mF (10^{-3} F) et F.

Remarque (uniquement pour la charge à courant constant) :

On a $u = \frac{q}{C}$ avec $q = I.t$ donc $u = \frac{I}{C}.t$ (droite de coefficient directeur $\frac{I}{C}$).

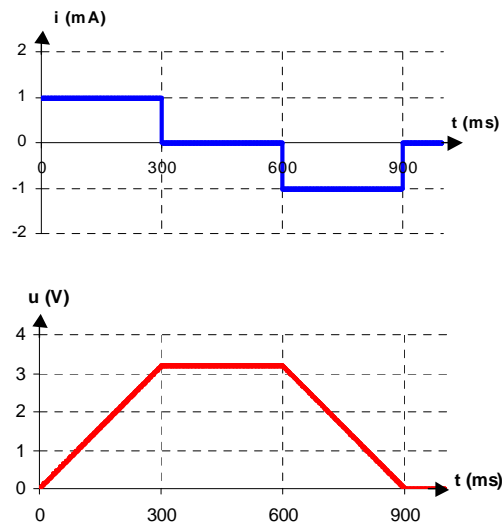
Dans l'expérience, le coeff. directeur de la droite est $\frac{4,55-0}{10-0} \approx 0,455 \text{ V.s}^{-1}$ et ce résultat

est aussi égal à $\frac{I}{C}$. Donc $C = \frac{I}{0,455} = \frac{1.10^{-3}}{0,455} \approx 2,2 \text{ mF}$ ou $C = 2200 \mu\text{F}$.

3- Relation entre courant et tension

Chargeons un condensateur avec successivement les valeurs $+I$; 0 et I (1 mA ; 0 et -1 mA).

Les figures ci-contre représentent les chronogrammes de $u(t)$ et $i(t)$:



- $0 < t < 300 \text{ ms}$: La tension u croît linéairement, le coefficient directeur de la droite est positif : $\frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{+I}{C}$.
- $300 < t < 600 \text{ ms}$: La tension u reste constante, le coefficient directeur de la droite est donc égal à zéro : $\frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{0}{C} = 0$.
- $600 < t < 900 \text{ ms}$: La tension u décroît linéairement, le coefficient directeur de la droite est négatif : $\frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{-I}{C}$.

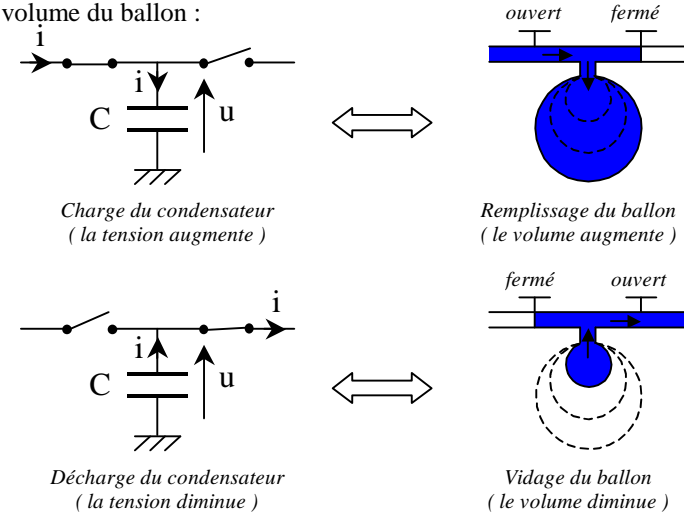
Loi : La relation entre l'intensité du courant et la tension aux bornes d'un condensateur

parfait est : $i = C \frac{\Delta u}{\Delta t}$ ou $i = C \frac{du}{dt}$.

Le courant est responsable de la variation de tension.

Remarque : Par analogie hydraulique, on peut comparer le condensateur à un ballon extensible dont le volume augmente lors du remplissage.

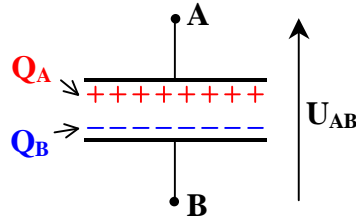
Le courant et la tension seront respectivement assimilés au débit de liquide et au volume du ballon :



- On peut donc estimer qu'un condensateur est un "réservoir" de tension.
- Seul un courant très élevé peut faire varier brusquement la tension aux bornes d'un condensateur. On peut donc considérer que la tension aux bornes d'un condensateur ne peut varier brusquement.

4- Charges portées par les armatures

Dans un condensateur (schéma ci-contre), les charges électriques ne peuvent traverser l'isolant. Les porteurs de charges Q_A s'accumulent sur la surface de l'armature A et les porteurs de charges Q_B s'accumulent sur la surface de l'armature B.



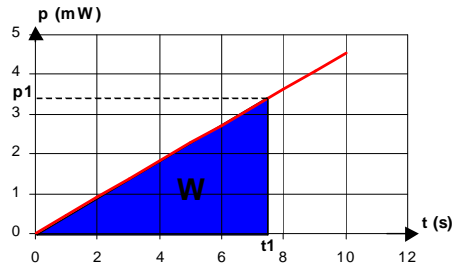
On a donc : $Q_A = -Q_B = C (V_A - V_B) = C U_{AB}$.

Remarque : Lorsqu'on parle de "charge" d'un condensateur, il s'agit de la valeur absolue de la charge : $Q = |Q_A| = |Q_B|$.

5- Energie stockée dans un condensateur

Reprenons l'expérience de charge du condensateur à courant constant ($I = 1\text{mA}$).

La puissance $p = u \cdot i$ reçue par le condensateur croît linéairement au cours du temps (figure ci-contre) :



L'énergie W stockée, par le condensateur jusqu'à la durée t_1 , est représentée par la surface colorée.

On a donc : $W = p_1 \frac{t_1}{2} = u_1 I \frac{t_1}{2} = u_1 \frac{Q_1}{2}$.

Loi : L'énergie stockée dans un condensateur dépend de la charge Q accumulée et donc de la tension U à ses bornes :

$$W = \frac{1}{2} Q U = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} C U^2$$

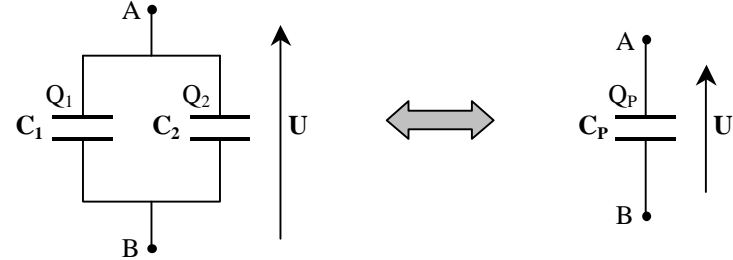
Q en coulombs (C)
 U en volts (V)
 W en joules (J)
 C en Farads (F).

III- ASSOCIATIONS DE CONDENSATEURS

1- Association parallèle (somme des charges)

L'association en parallèle induit une augmentation de la surface des armatures donc :

$$Q_P = Q_1 + Q_2 \Rightarrow C_P U = C_1 U + C_2 U$$



Loi : La capacité équivalente pour N condensateurs en parallèle est égale à la somme des capacités.

$$C_P = C_1 + C_2 + \dots + C_N$$

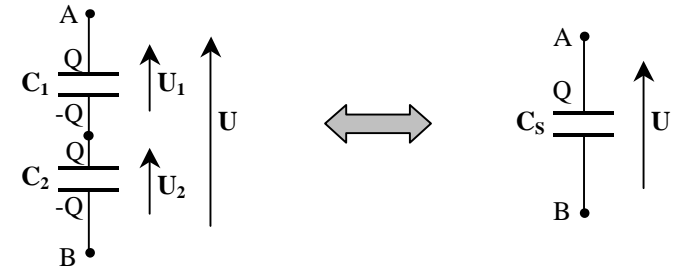
Remarque : L'association en parallèle permet d'augmenter la capacité.

2- Association série (somme des tensions)

Dans une association série, la charge stockée Q est identique pour tous les condensateurs.

On a : $U = U_1 + U_2$

$$\Rightarrow \frac{Q}{C_S} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$



Loi : L'inverse de la capacité équivalente pour N condensateurs en parallèle est égale à la somme des inverses des capacités.

$$\frac{1}{C_S} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}$$

Remarque : L'association en série permet d'augmenter la tension d'utilisation.

IV- CHAMP ÉLECTRIQUE ET FORCES ÉLECTROSTATIQUES

1- Capacité d'un condensateur plan

La capacité C d'un condensateur plan dépend de sa géométrie :

- C est proportionnelle à la surface S d'une armature.
- C est inversement proportionnelle à l'épaisseur e du diélectrique.

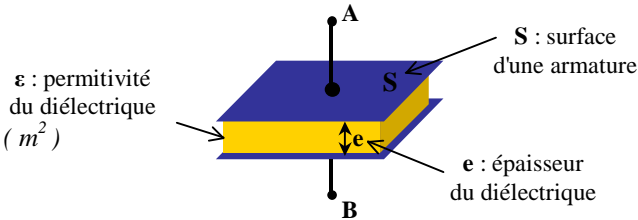
La capacité C d'un condensateur plan dépend aussi de la nature du diélectrique :

- C est proportionnelle à ϵ (permittivité du diélectrique).

Remarque : on pose $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ avec $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \text{F.m}^{-1}$ permittivité du vide (air)
et ϵ_r permittivité relative du diélectrique

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

unités : S en mètres carrés (m²)
 ϵ_0 en F.m⁻¹
 ϵ_r sans unités
e en mètres.



Exemple : Calculons la capacité C d'un condensateur dont les caractéristiques sont :

- surface S = 10 dm²
- épaisseur de l'isolant e = 100 μm
- permittivité relative $\epsilon_r = 7$ (condensateur au micas).

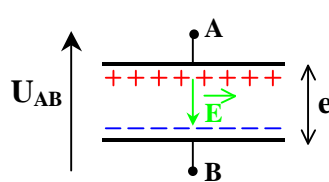
$$C = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \times 7 \times \frac{10 \cdot 10^{-2}}{100 \cdot 10^{-6}} \approx 62 \text{ nF.}$$

2- Champ électrique dans un condensateur

La concentration de charges +Q à la surface d'une plaque et de charges -Q à la surface de l'autre plaque, induit un champ électrique \vec{E} dirigé des charges +Q vers les charges -Q.

L'intensité E de ce champ électrique est : $E = \frac{U_{AB}}{e}$

unités : U_{AB} en volts (V)
e en mètres (m)
E en volts par mètres (V.m⁻¹).



3- Champ disruptif

Il existe une limite à l'intensité du champ électrique dans le diélectrique.

Au-delà d'une certaine intensité, le diélectrique peut être détruit. Le champ maximal est appelé champ disruptif.

Au champ disruptif correspond une valeur maximale de tension qu'il ne faut jamais atteindre.

Exemple : Calculons la capacité C et la tension maximale U_{MAX} admissible pour un condensateur mylar (polyester MKT) dont les caractéristiques sont :

- surface S = 2 dm²
- permittivité relative $\epsilon_r = 3,25$
- épaisseur diélectrique e = 2 μm
- champ disruptif $E_{MAX} = 200 \text{ MV/m.}$

$$C = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \times 3,25 \times \frac{2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-6}} \approx 290 \text{ nF}$$

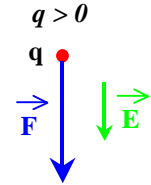
$$U_{MAX} = E_{MAX} \cdot e = 200 \cdot 10^6 \times 2 \cdot 10^{-6} = 400 \text{ V.}$$

4- Force électrostatique

Un porteur de charge électrique q, placé dans un champ électrique

\vec{E} subit une force électrostatique \vec{F} telle que :

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad q \text{ en coulomb (C), } E \text{ en (volt.m}^{-1}\text{) et } F \text{ en newtons (N).}$$



5- Application de la force électrostatique : l'oscilloscope cathodique

Un oscilloscope sert à visualiser l'évolution d'une tension au cours du temps.

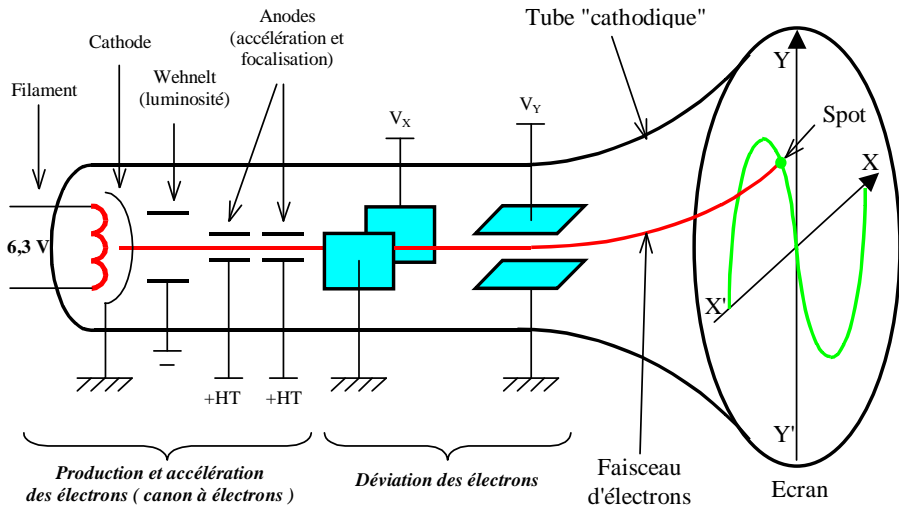
La tension à mesurer est amplifiée pour donner la tension V_Y qui sera appliquée sur les plaques de déviation verticale.

Une tension V_X en dent de scie est produite par l'oscilloscope et appliquée sur les plaques de déviation horizontale pour faire déplacer le spot de gauche à droite.

Différents réglages permettent d'adapter la vitesse horizontale du spot, ainsi que l'amplification de la tension à mesurer, pour visualiser correctement le signal.

Le principe physique est la déviation d'un faisceau d'électron par le champ électrique présent entre des plaques de déviation.

Schéma interne du tube cathodique :



V- UTILISATION DES CONDENSATEURS

Objectifs

L'objet de ce chapitre est d'indiquer, sans développement théorique, différentes utilisations des condensateurs en électronique.

1- Production de "rampe" de tension

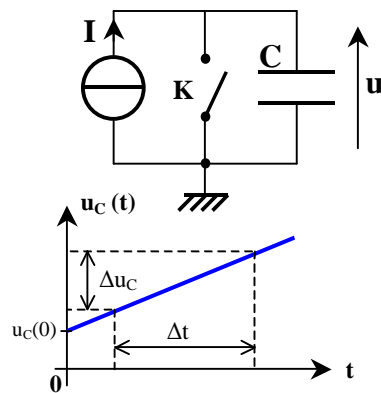
a- Avec générateur de courant

Il s'agit de faire circuler un courant constant I dans un condensateur C .

La tension évolue linéairement et le coefficient directeur est

$$\frac{\Delta u_C}{\Delta t} = \frac{I}{C}$$

On a donc : $u_C(t) = u_C(0) + \frac{I}{C} t$

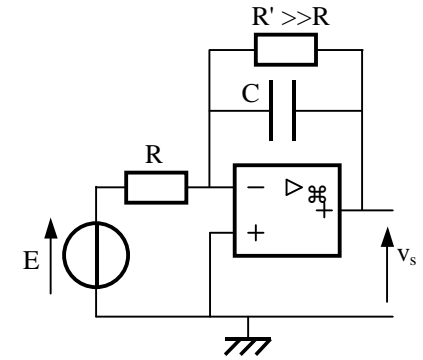


b- Avec circuit intégrateur et tension constante

La tension E est constante donc :

$$v_S(t) = -\frac{E}{RC} t + v_S(0)$$

Remarque : La réglage de la rampe de tension se fait en ajustant la tension E .



2- Lissage en sortie d'un pont redresseur

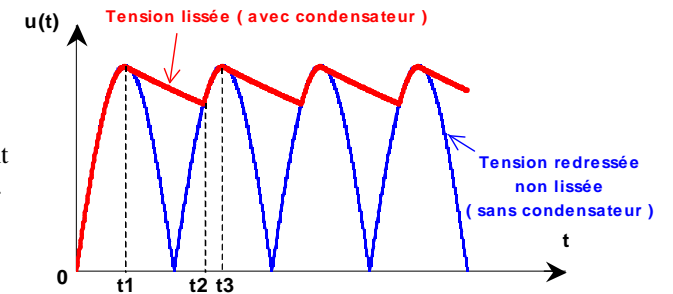
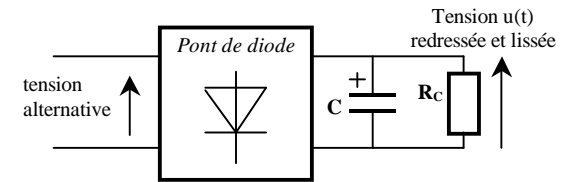
La tension en sortie d'un pont redresseur double alternance a l'allure d'une sinusoïde "redressée" c'est à dire ayant subit la fonction "valeur absolue". Cette tension positive présente des variations importantes; on branche donc, en sortie du pont, un condensateur chimique de forte capacité pour "absorber" le maximum de variations de tension (schéma et graphe ci-dessous).

Analyse du chronogramme :

■ de 0 à t_1 , le condensateur se charge "rapidement" en suivant les variations de la tension en sortie du pont.

■ de t_1 à t_2 , le condensateur se décharge "lentement" dans le récepteur R_C et bloque les diodes du pont car la tension à l'entrée du pont chute plus rapidement que celle du condensateur. Ici, c'est le condensateur qui fournit l'énergie à la charge R_C .

■ de t_2 à t_3 , la tension redressée devient supérieure à celle du condensateur, celui-ci se recharge rapidement en suivant la tension redressée.



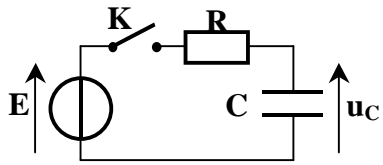
3- Fonction temporisation

Il s'agit ici de charger ou de décharger un condensateur avec une source de tension et à travers une résistance.

C'est la durée de charge ou de décharge qui permet de réaliser une "temporisation".

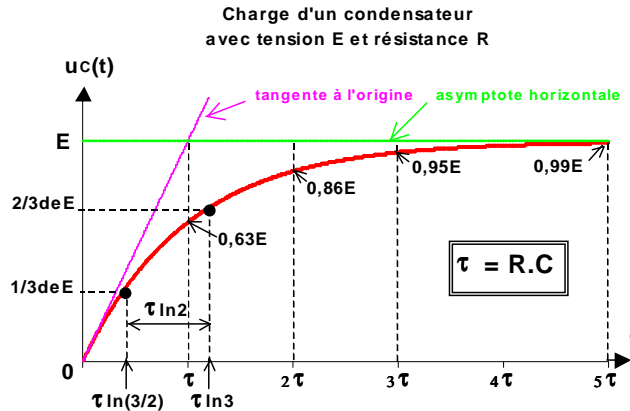
A l'instant $t = 0$, le condensateur est déchargé et on ferme l'interrupteur K.

■ Courbe de charge



$$u_C(t) = E \left(1 - e^{-t/\tau} \right)$$

avec $\tau = R.C$ (τ en s; R en Ω et C en F)

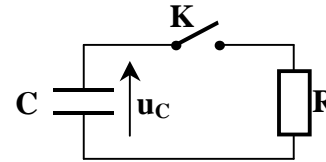


La courbe $u_C(t)$ possède les propriétés ci-dessous :

- ① L'asymptote horizontale coupe la tangente à l'origine à l'instant $t = \tau = R.C$.
- ② A l'instant $t = \tau$, le condensateur est chargé à 63% ($u_C(\tau) = 0,63E$).
- ③ Aux instants $t = 2\tau$, 3τ et 5τ le condensateur est chargé à 86%, 95% et 99%.
- ④ Le temps pour passer de 0 à 1/3 de E est : $t = \tau \ln(3/2) \approx 0,405\tau$.
- ⑤ Le temps pour passer de 0 à 2/3 de E est : $t = \tau \ln 3 \approx 1,10\tau$.
- ⑥ Le temps pour passer de 1/3 à 2/3 de E est : $t = \tau \ln 2 \approx 0,693\tau$.
- ⑦ Le temps pour passer de 0 à 1/2 de E est : $t = \tau \ln 2 \approx 0,693\tau$ (non représenté sur le graphe).

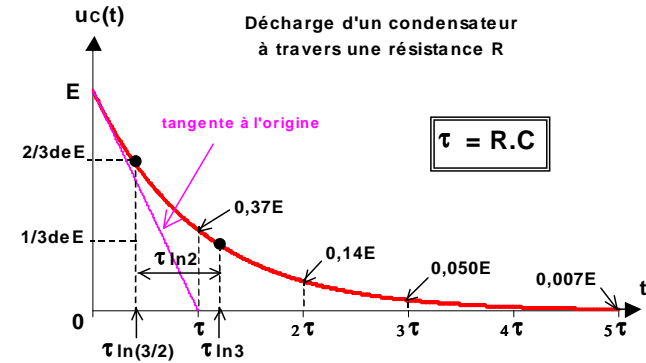
■ Courbe de décharge

Supposons que le condensateur soit initialement chargé avec la tension $u_C(0) = E$. A l'instant $t = 0$, l'interrupteur K est fermé.



$$u_C(t) = E.e^{-t/\tau}$$

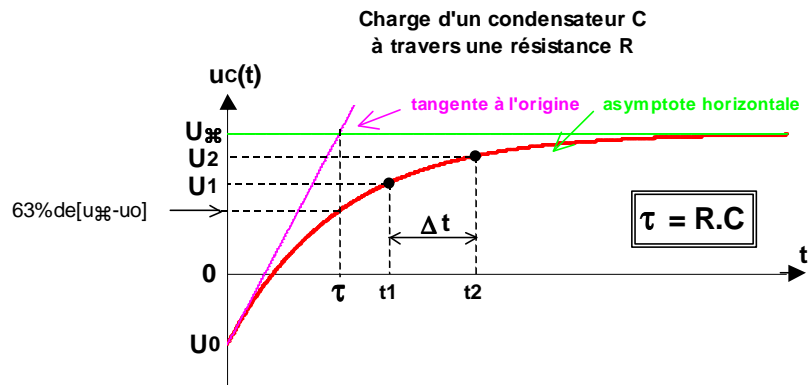
avec $\tau = R.C$ (τ en s; R en Ω et C en F)



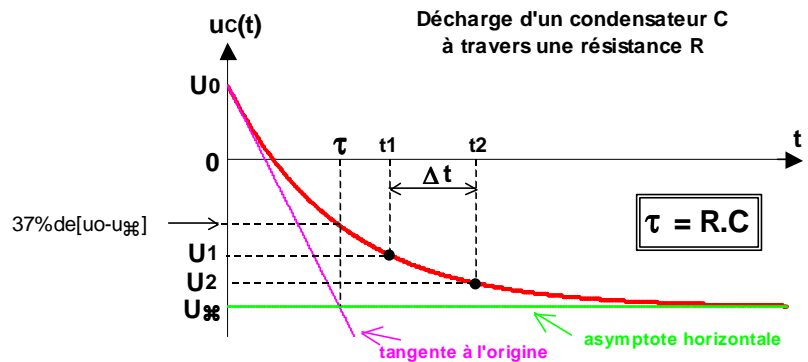
La courbe $u_C(t)$ possède les propriétés ci-dessous, analogues à la courbe de charge :

- ① L'asymptote horizontale coupe la tangente à l'origine à l'instant $t = \tau = R.C$.
- ② A l'instant $t = \tau$, le condensateur n'est plus chargé qu'à 37% ($u_C(\tau) = 0,37E$).
- ③ Aux instants $t = 2\tau$, 3τ et 5τ le condensateur n'est plus chargé qu'à 14%, 5% et 0,7%.
- ④ Le temps pour passer de E à 2/3 de E est : $t = \tau \ln(3/2) \approx 0,405\tau$.
- ⑤ Le temps pour passer de E à 1/3 de E est : $t = \tau \ln 3 \approx 1,10\tau$.
- ⑥ Le temps pour passer de 2/3 à 1/3 de E est : $t = \tau \ln 2 \approx 0,693\tau$.
- ⑦ Le temps pour passer de E à 1/2 de E est : $t = \tau \ln 2 \approx 0,693\tau$ (non représenté sur le graphe).

■ Courbe générale de charge : $u_C(t) = (U_\infty - U_0)(1 - e^{-t/\tau}) + U_0$



■ Courbe générale de décharge : $u_C(t) = (U_0 - U_\infty)e^{-t/\tau} + U_\infty$



La relation donnant Δt en fonction de U_2 et U_1 est : $\Delta t = t_2 - t_1 = \tau \ln \frac{U_\infty - U_1}{U_\infty - U_2}$

Remarque : cette relation est valable pour les deux courbes (charge et décharge).

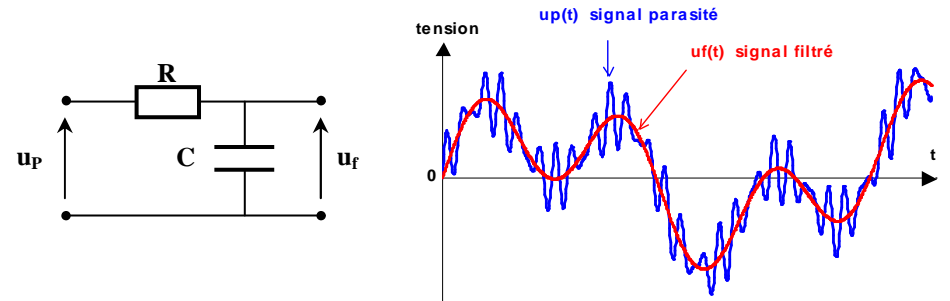
4- Fonction filtrage

■ Filtre passe-bas passif

La tension aux bornes du condensateur (montage ci-dessous) représente la tension de sortie du filtre. Le condensateur absorbe les variations rapides de tension, les "hautes fréquences" seront donc atténuées tandis que les "basses fréquences" seront transmises.

La fonction de transfert du filtre est : $T(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega/\omega_0}$ avec $\omega_0 = \frac{1}{RC}$.

Le graphe ci-dessous illustre l'utilisation du filtre pour éliminer un signal parasite " haute fréquence ":

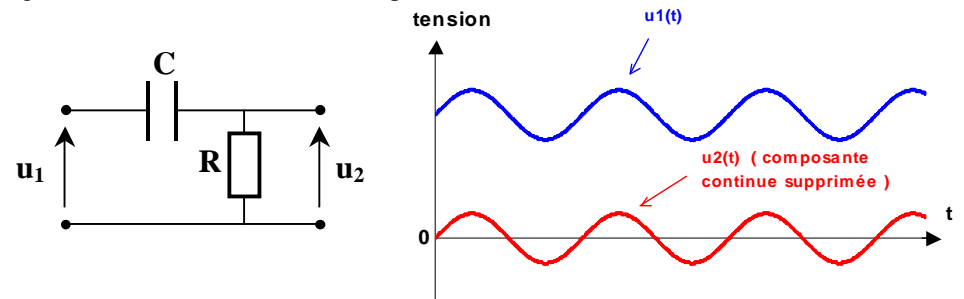


■ Filtre passe-haut passif

A l'inverse du filtre passe-bas, le filtre passe-haut va atténuer les basses fréquences pour laisser "passer" les plus hautes fréquences.

La fonction de transfert du filtre est : $T(j\omega) = \frac{j\omega/\omega_0}{1 + j\omega/\omega_0}$ avec $\omega_0 = \frac{1}{RC}$.

Le graphe ci-dessous illustre l'utilisation du filtre pour éliminer la composante continue d'un signal (très utilisé à l'entrée d'un amplificateur).



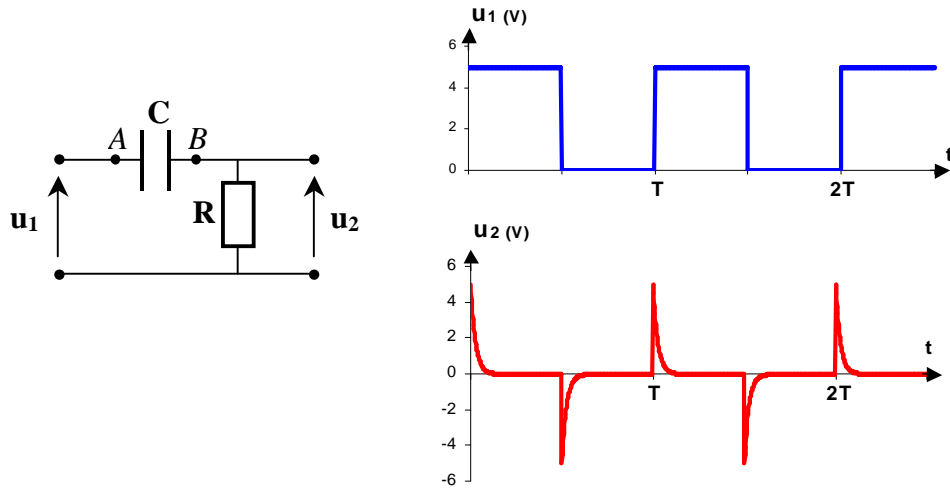
5- Transformation Front → Impulsion

■ Montage de base

La transformation d'un signal "carré" en signal impulsionnel est souvent mise en œuvre en électronique.

Un condensateur et une résistance suffisent pour réaliser cette transformation.

Le schéma et le chronogramme ci-dessous illustrent la transformation Front → Impulsion.



Analyse des chronogrammes

Lors d'un changement "brutal" de tension u_1 (front), le condensateur ne se charge pas immédiatement à cause de la résistance R . Le potentiel au point B suit donc la même variation que le potentiel au point A.

Le condensateur va ensuite se charger à travers la résistance R et le potentiel au point B va tendre vers zéro. Pour que cette charge soit rapide (impulsions), il faut que la constante de temps $\tau = RC$ soit petite devant la période T du signal.

Pour l'exemple des chronogrammes ci-dessus, on a $\tau = T / 50$.

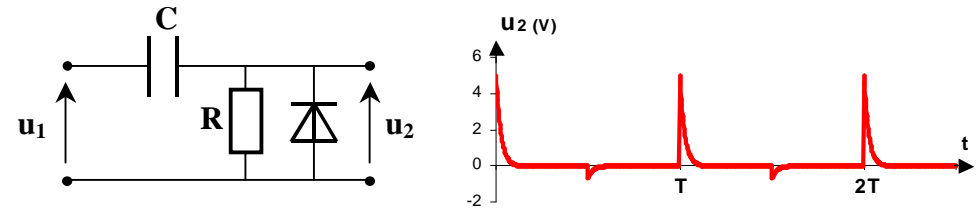
Remarque : Ici, les fronts montants et les fronts descendants sont transformés respectivement en impulsions positives et négatives.

■ Montage " amélioré "

Les impulsions négatives peuvent être néfastes dans certains cas.

On peut améliorer le dispositif en " éliminant " ces impulsions négatives.

Il suffit d'ajouter au montage, une diode de redressement qui " absorbera " les tensions négatives (schéma et chronogramme ci-dessous) :



Analyse du chronogramme

Pour les impulsions positives, la diode est bloquée et n'a donc aucun effet sur la tension u_2 .

Lors d'une impulsion négative, la diode devient passante et la tension u_2 doit idéalement être égale à zéro volts.

En pratique, on sait que la diode passante présente une tension de seuil (0,7 V pour une diode au silicium). La tension u_2 est donc constituée d'impulsions positives (5V) et d'impulsions négatives (- 0,7 V).

Ces impulsions négatives, de part leur faible tension, seront considérées comme négligeables.

Remarque : Pour éliminer les impulsions positives, il suffit d'inverser le sens de branchement de la diode.