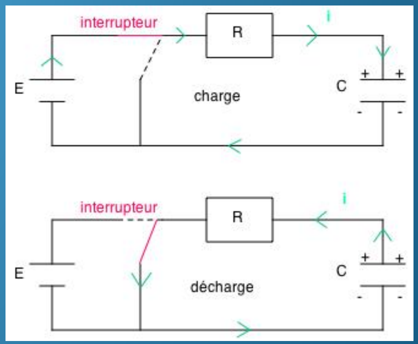
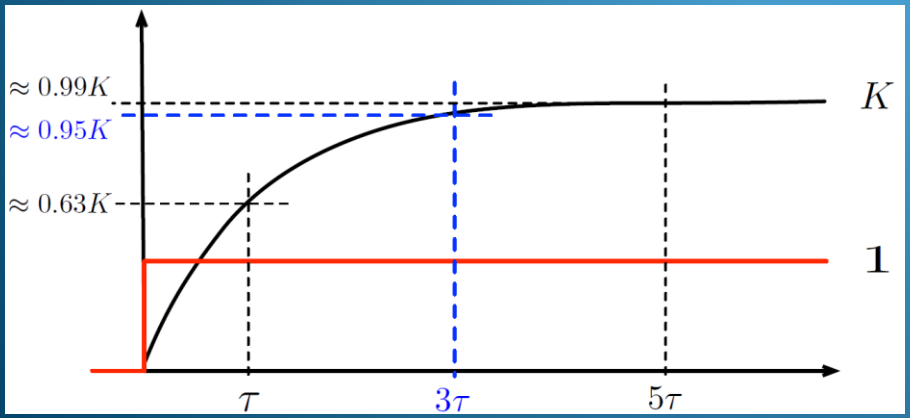
Composants de l'électronique
BUT 1 – Eln1 – Module R1-09

2. Charge et décharge d'un condensateur à travers une résistance



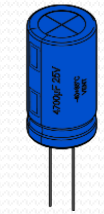


Jean-François LIEBAUT
Juan BRAVO
IUT GEII, université de Toulon
: *bravo@univ-tln.fr*

Plan du cours

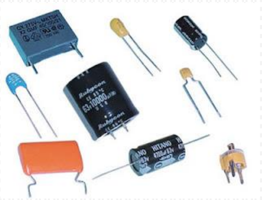
- Le condensateur
- Utilités du condensateur
- Equations du circuit RC
  - Charge
  - Décharge
  - Equation universelle
- Exemples

Le composant condensateur

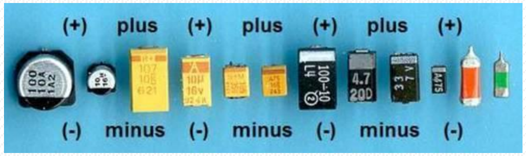


- Introduction

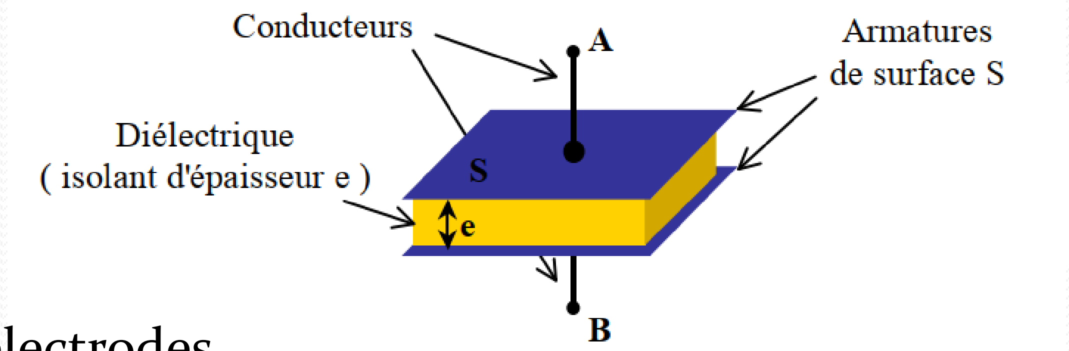
Le condensateur (parfois nommé Capa) est un composant très utilisé dans les circuits électroniques.

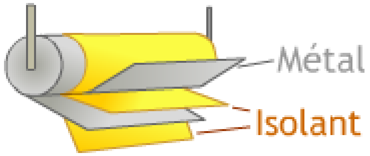


Le condensateur à la particularité de pouvoir stocker de l'énergie électrique lorsqu'il est soumis à une tension.



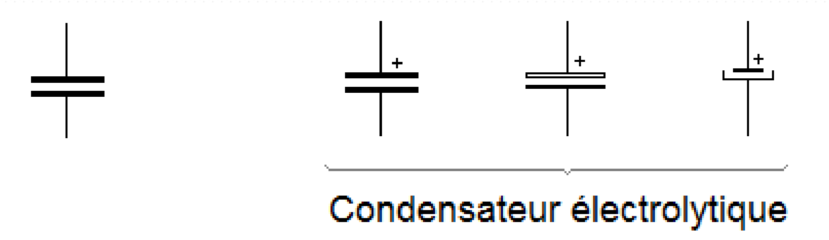
- Constitution



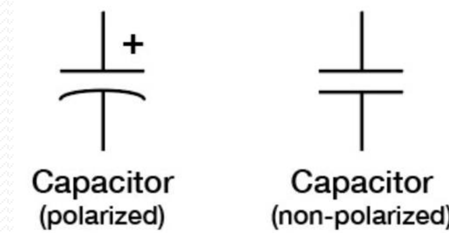


- Deux électrodes
- Séparées par une couche de diélectrique (isolant)
- Différentes technologies suivant le diélectrique utilisé

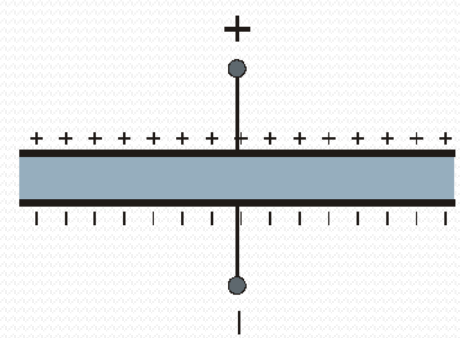
- Symbole du condensateur



Symboles US

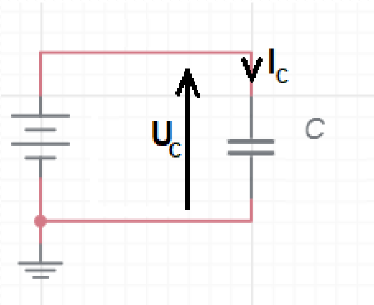


- Effet capacitif, capacité
  - Quand on applique une tension (ddp) aux bornes du condensateur
    - ✓ Création d'un champs électrique entre les deux armatures
    - ✓ Stockage de charges électriques sur chaque armature
  - La capacité d'un condensateur, représente sa capacité à stocker des charges
    - ✓ Capacité exprimée en Farads (F, mF, µF, pF, …)
    - ✓ La quantité de charges stockées s'exprime en coulombs (C).



Relations électriques

- Charge électrique - Tension
  - On impose une tension U (différence de potentiel) aux bornes d'un condensateur de capacité C
  - Quantité de charges stockées dans le condensateur $\mathbf{Q=C.U_C}$
  - Si la tension est variable dans le temps : $\mathbf{q(t)=C.u_C(t)}$



- Charge électrique - Courant
  - Par définition le courant électrique correspond à la variation de charges électriques.
  - $i_C(t) = \frac{dq(t)}{dt}$
- Relation courant-tension
  - En combinant les deux relations.
  - $i_C(t) = C.\frac{du_C(t)}{dt}$
  - Le courant qui traverse le condensateur est proportionnel à la variation de tension à ses bornes.
  - Si $u_C(t)$ est constant (invariant dans le temps) alors le courant qui traverse le condensateur est nul $i_C(t)=0$

Association de condensateurs

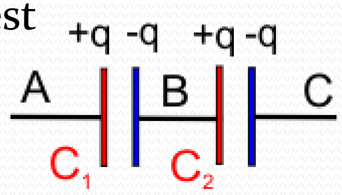
Association parallèle

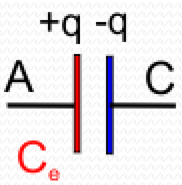
- La tension est la même pour tous les condensateurs (//)
- La quantité de charges stockées dans l'ensemble est la somme des charges stockées $\mathbf{Q = C1.U_C + C2.U_C + C3.U_C + \ldots}$
- En factorisant $u_C(t)$: $\mathbf{Q = (C1 + C2 + C3 + \ldots).U_C}$
- Soit la capacité équivalente à l'ensemble C_e :

$$\mathbf{C_e = C1 + C2 + C3 + \ldots}$$

Association série

- Le courant est commun à tout le circuit, donc la charge stockée est la même dans chaque condensateur (q sur l'image).
- Des armatures reliées portent des charges opposée.
- La tension se répartie sur chaque condensateur.
- $V_A\text{-}V_C\text{=}V_A\text{-}V_B\text{+}V_B\text{-}V_C$ soit $V_A\text{-}V_C = q/C1 + q/C2 = q/C_e$
- Soit la capacité équivalente à l'ensemble Ce :





$$\mathbf{1/C_e = 1/C1 + 1/C2 + 1/C3 + \ldots}$$

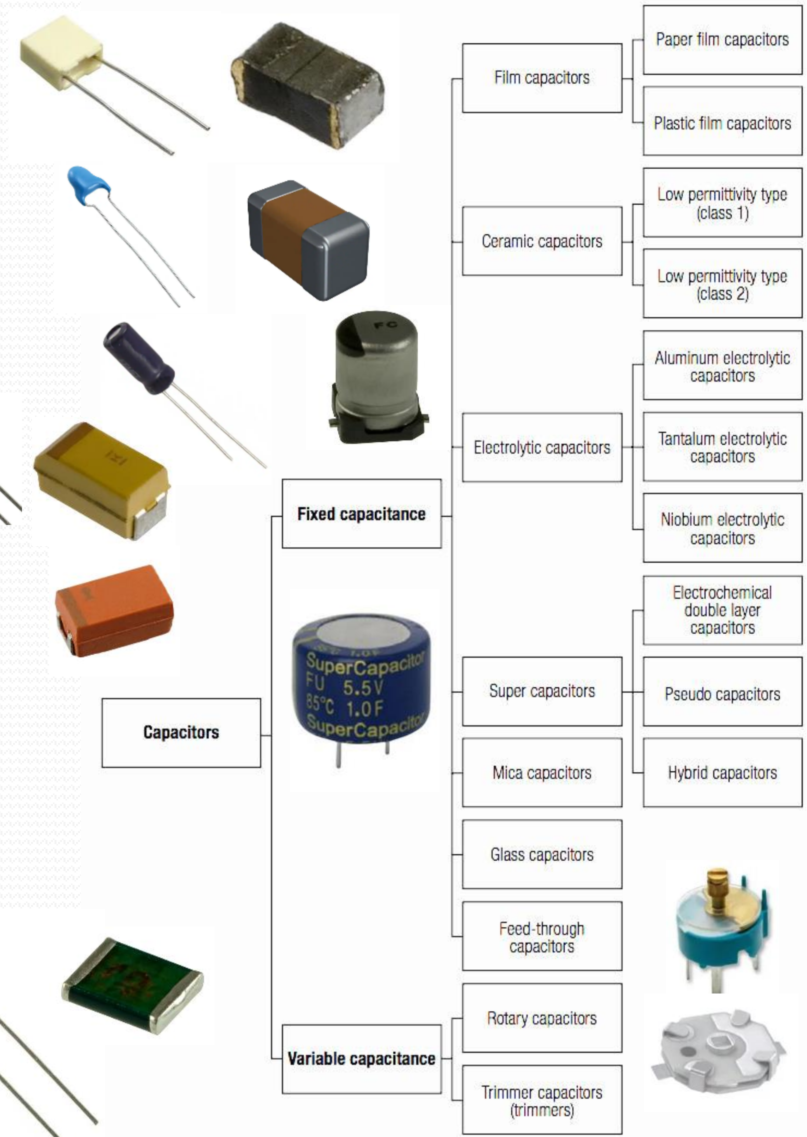
$$C_e = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots}$$

Utilisations du condensateur

- Réservoir temporaire d'énergie
  - Dans les alimentations pour stabiliser la tension délivrée.
  - En stockage à la place de batteries => Super condensateurs
- Pour filtrer les signaux
  - Pour atténuer des signaux de fréquences non désirée (par exemple du crépitement dans une enceinte)
  - Pour séparer les signaux continus des signaux variables
  - Pour qu'un appareil ne perturbe pas les autres
- Pour le démarrage de moteurs
  - Permet le démarrage du moteur électrique monophasé
- Pour retarder des signaux
  - Pour attendre que l'alimentation soit stabilisée avant de démarrer un circuit
  - Pour créer un signal périodique (Astable)

Différentes technologies

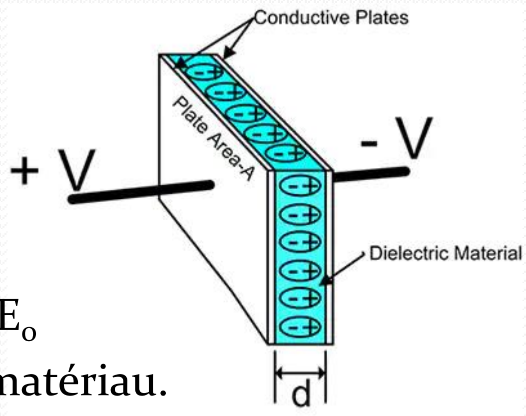
- Condensateur à film
  - Film plastique mince comme diélectrique (Polypropylène, Polyéthylène (PEET, PPS), …)
  - Haute tension, stable
- Condensateur céramique
  - Diélectrique en céramique (ex dioxyde de titane)
  - Stable, faibles pertes,
- Condensateur électrolytique
  - Electrolyte liquide imprégné dans un papier. Polarisé.
  - Aluminium, Tantale, Niobium
  - Capacité élevée, haut rendement volumétrique
- Condensateur mica
  - Diélectrique en mica (mica d'argent)
  - Précis, haute stabilité



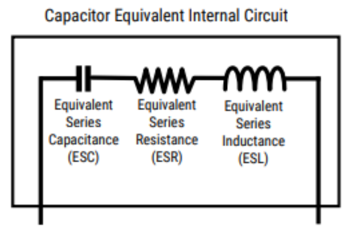
- Technologie / domaine d'utilisation

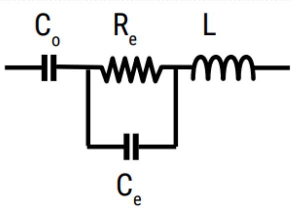
	Filtres secteur	Alimentations continues	Alimentations à découpage	Liaisons basses fréquences	Découplages	Filtres basses fréquences	Lignes à retard	Transistors en commutation	Impulsions	Découplage HF
Polystyrène						X			X	
Polyester									X	
Polycarbonate										
Polypropylène	X							X		
Mica		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

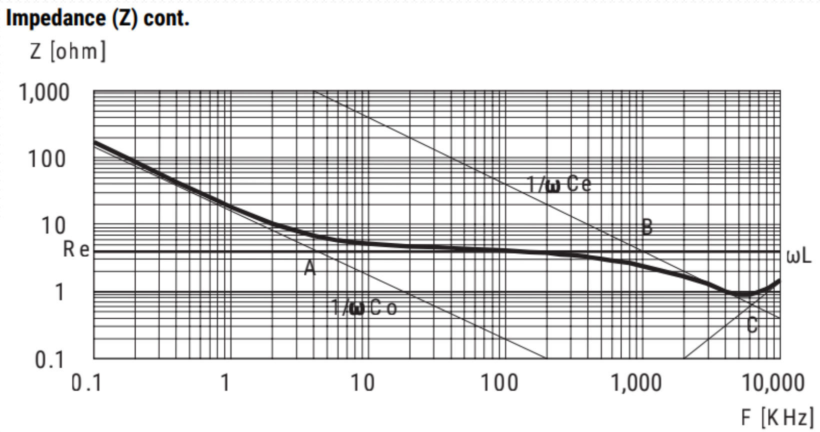
- Caractéristiques des condensateurs
  - Capacité : $C = \varepsilon.\frac{A}{d}$
    - ✓ C est la capacité en Farads (F, mF, µF, nF, pF)
    - ✓ A est la surface de la plaque en mètres carrés
    - ✓ d est la distance entre les plaques en mètres
    - ✓ ε est la permittivité du matériau diélectrique, $\varepsilon = \varepsilon_r . E_o$
    - ✓ ε_o permittivité du vide et ε_r permittivité relative du matériau.



  - Tension de service, c'est la tension maximale d'utilisation.
  - Plage de température de fonctionnement (ex -25°C to +85°C)
  - Comportement en fréquence
    - ✓ Limite de fonctionnement en fonction de la fréquence
    - ✓ ESR : Résistance série équivalente
    - ✓ ESC : Capacité série équivalente

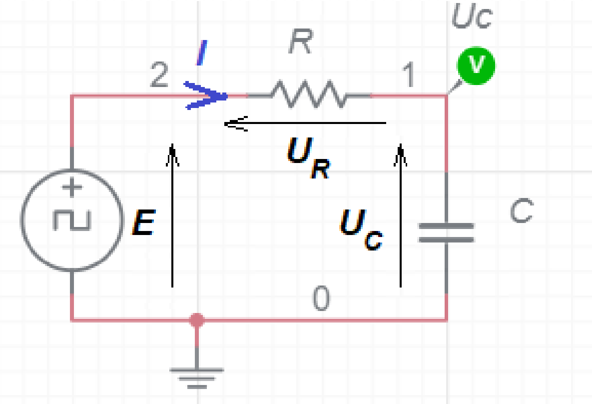






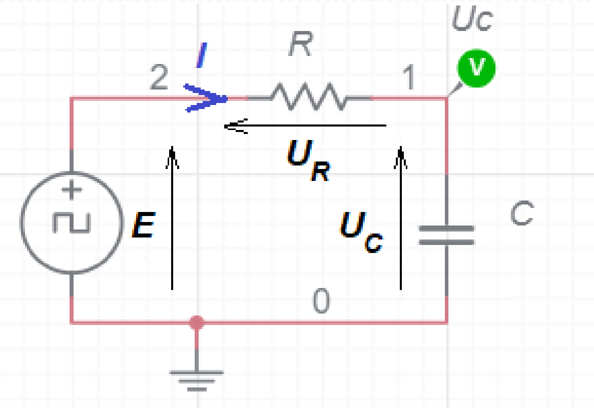
Charge et décharge du condensateur

- Montage
  - Résistance en série avec le condensateur
  - Limitation du courant de charge
  - Détermine le temps de charge



- Utilisation
  - Filtrage (pour atténuer des signaux non désirés, étude S2)
  - Créer un temps de retard
    - ✓ Retard après un évènement (monostable)
    - ✓ Générer des signaux périodiques (astables)
- Equations électriques du circuit
  - Fléchage (générateur / récepteurs) et $I_E=I_C=I_R=I$
  - Loi des mailles : $e(t) = u_R(t) + u_C(t)$
  - Relation I/U
    - ✓ R : $u_R(t) = R.i_R(t)$
    - ✓ C : $i_C(t) = C.\frac{du_C}{dt}(t)$

- Equation différentielle de la tension aux bornes du condensateur

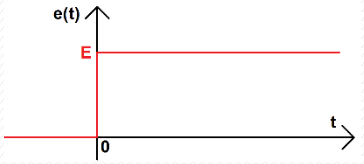


$$\begin{cases} e(t) = u_R(t) + u_C(t) = R.i_R(t) + u_C(t) \\ i_C(t) = C.\dfrac{du_C}{dt}(t) \\ i_R(t) = i_C(t) = i(t) \end{cases}$$

En remplaçant par i(t) ⇨ $\begin{cases} e(t) = R.i(t) + u_C(t) \\ i(t) = C.\frac{du_C}{dt}(t) \end{cases}$

Equation différentielle en $u_C(t)$ ⇨ $\boldsymbol{e(t) = R.C.\frac{du_C}{dt}(t) + u_C(t)}$

- Equation de la charge du condensateur



  - $e(t)$ passe de o à E à t=o (échelon de tension)
  - Le condensateur est complétement déchargé ($u_C(t=0) = 0$)
  - Pour t ≥ o alors : $E = R.C.\frac{du_C}{dt}(t) + u_C(t)$

- Equation de la charge du condensateur (suite)
  - $R.C$ homogène à un temps
  - On pose $\boldsymbol{\tau = R.C}$ la constante de temps du circuit RC
  - Pour t ≥ 0 alors : $\tau.\frac{du_C}{dt}(t) + u_C(t) = E$
  - Résolution de l'équation différentielle :
    - ✓ Equation sans second membre : $\tau.\frac{du_C}{dt}(t) + u_C(t) = 0$
    - ✓ Solution sans 2nd membre : $u_C(t) = K.e^{-\frac{t}{\tau}}$
    - ✓ Solution particulière avec 2nd membre : $u_C(t) = E$ $\left(\frac{du_C}{dt}(t) = 0\right)$
    - ✓ Solution complète : $u_C(t) = K.e^{-\frac{t}{\tau}} + E$
    - ✓ Conditions initiales $u_C(0) = 0$ donc $u_C(0) = K.e^{-\frac{0}{\tau}} + E = K + E = 0$

      Soit : $K = -E$ ***donc*** $u_C(t) = -E.e^{-\frac{t}{\tau}} + E$

    ⇨ Equation charge : $\boldsymbol{u_C(t) = E.\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)}$

Exemples
Equations RC
Utilités
Condensateur

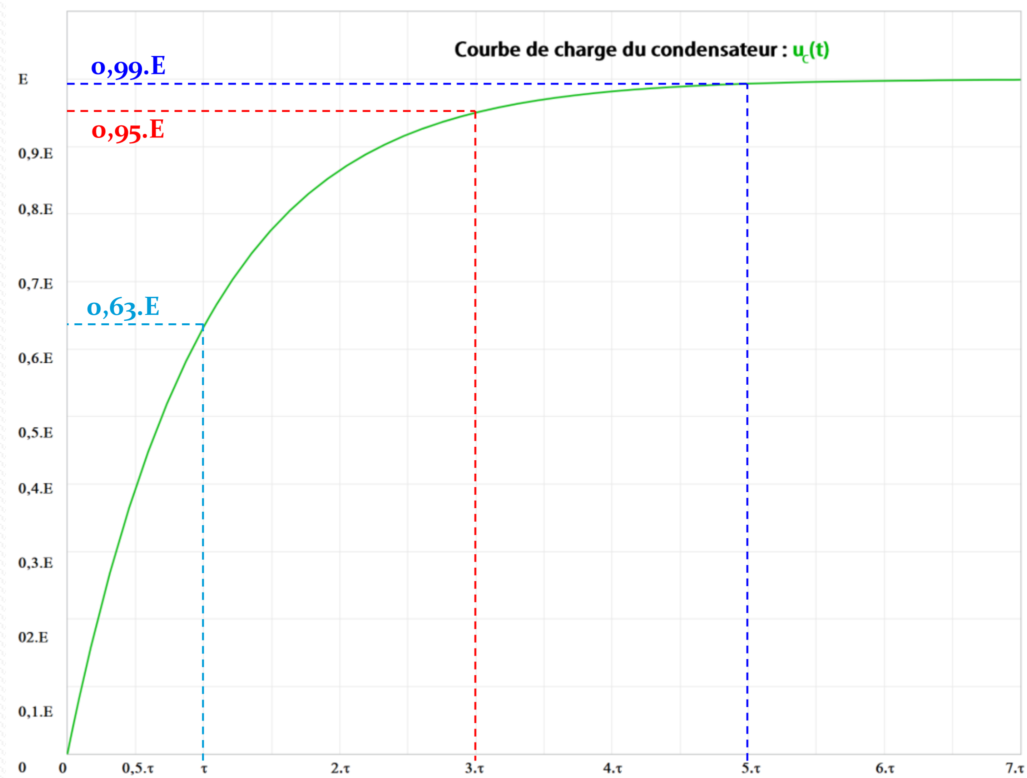
- Evolution de la tension aux bornes du condensateur
  - $u_C(t) = E.\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$
  - Pour t = τ,

$$u_C(\tau) = E.\left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau}}\right)$$
$$= E.(1 - e^{-1}) = 0{,}63.E$$

⇨ **A la charge :**
$\boldsymbol{u_C(\tau) = 63\%\ de\ E}$

  - Instant t_x ou $u_C(t_x) = x.E$,

$$u_C(t_x) = E.\left(1 - e^{-\frac{t_x}{\tau}}\right) = x.E$$
$$\left(1 - e^{-\frac{t_x}{\tau}}\right) = x$$
$$e^{-\frac{t_x}{\tau}} = 1 - x$$
$$e^{\frac{t_x}{\tau}} = \frac{1}{1-x}$$
$$t_x = \tau.\ln\frac{1}{1-x}$$



⇨ **95% de la charge :**
$\boldsymbol{t_{95\%} = 2{,}9957.\tau \approx 3.\tau}$

⇨ **99% de la charge :**
$\boldsymbol{t_{99\%} = 4{,}605.\tau \approx 5.\tau}$

Equation de la décharge du condensateur

- $e(t)$ passe de E à 0 à t=0
- Le condensateur est complétement chargé $(u_C(t=0)=E)$
- Pour t ≥ 0 alors : $\tau.\frac{du_C}{dt}(t)+u_C(t)=0$
- Résolution de l'équation différentielle :
  - ✓ Solution : $u_C(t)=K.e^{-\frac{t}{\tau}}$
  - ✓ Conditions initiales $u_C(0)=E$

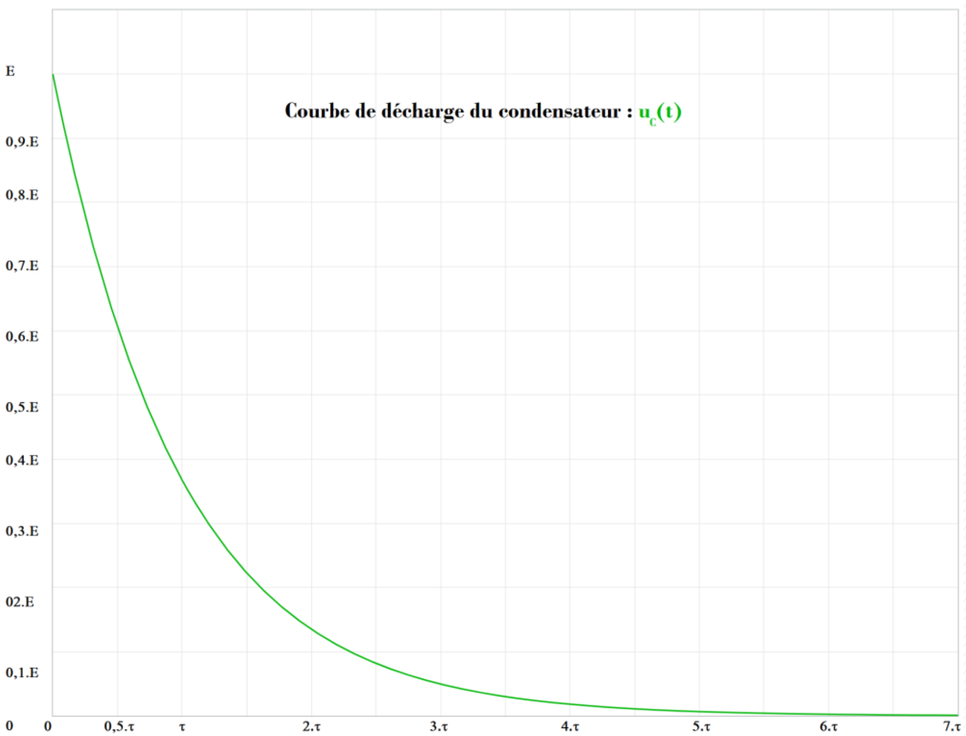
    donc $u_C(0)=K.e^{-\frac{0}{\tau}}=E$

    Soit : $K=E$

    Donc : $u_C(t)=E.e^{-\frac{t}{\tau}}$

⇨ Equation décharge :

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



Evolution de la tension aux bornes du condensateur

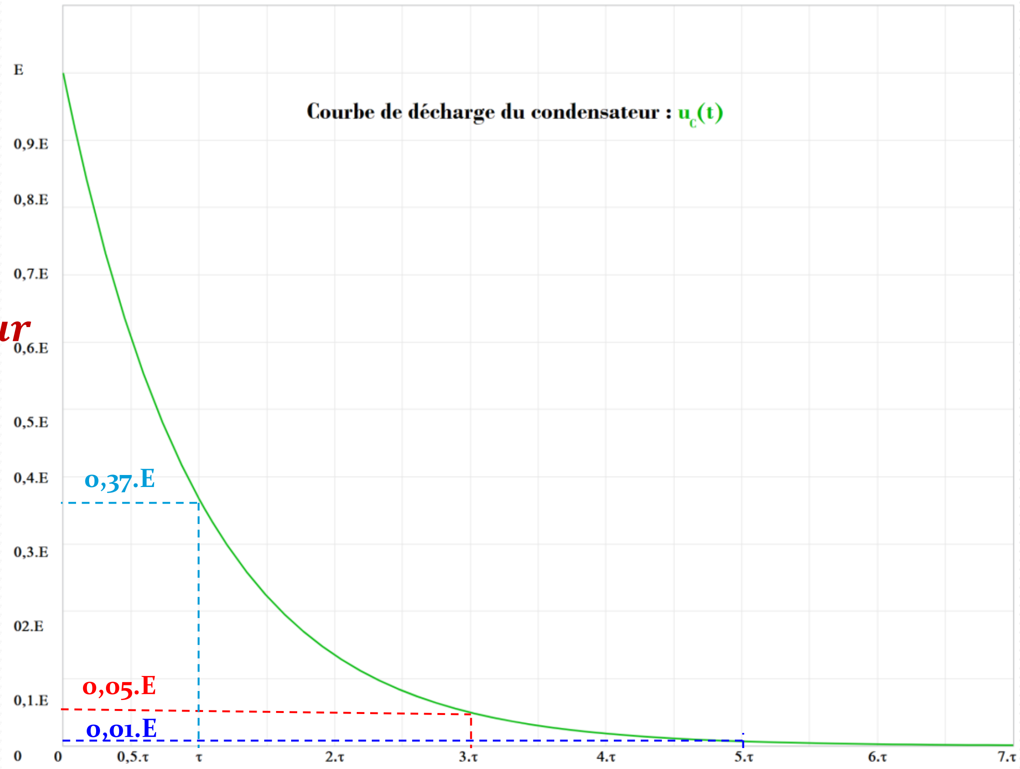
- $u_C(t) = E.e^{-\frac{t}{\tau}}$
- Pour t = τ,

$$u_C(\tau) = E.e^{-\frac{\tau}{\tau}}$$
$$= E.e^{-1} = 0{,}37.E$$

⇨ **A la décharge :**
$\boldsymbol{u_C(\tau) = 37\%\ de\ E}$
$\boldsymbol{63\%\ de\ décharge\ du\ condensateur}$

- Instant t_x ou $u_C(t_x) = x.E$,

$$u_C(t_x) = E.e^{-\frac{t_x}{\tau}} = x.E$$
$$\Rightarrow e^{-\frac{t_x}{\tau}} = x$$
$$\Rightarrow e^{\frac{t_x}{\tau}} = \frac{1}{x}$$
$$\Rightarrow t_x = \tau.\ln\frac{1}{x}$$



⇨ **95% de la décharge du condensateur : $\boldsymbol{t_{5\%} = 2,9957.\tau \approx 3.\tau}$**

⇨ **99% de la décharge du condensateur : $\boldsymbol{t_{1\%} = 4,605.\tau \approx 5.\tau}$**

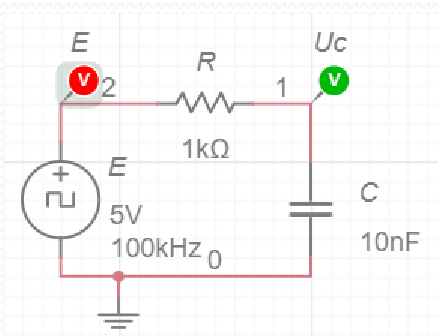
- Equation universelle de la tension aux bornes du condensateur
  - Le condensateur n'est pas complétement chargé ou déchargé $u_C(t=0) = u_{Cinitiale}$
  - Pour t ≥ 0 alors : $\tau.\frac{du_C}{dt}(t) + u_C(t) = E \; ou \; 0 = u_{Cfinale}$
  - Résolution de l'équation différentielle :
    - ✓ Equation sans second membre : $\tau.\frac{du_C}{dt}(t) + u_C(t) = 0$
    - ✓ Solution sans 2nd membre : $u_C(t) = K.e^{-\frac{t}{\tau}}$
    - ✓ Solution particulière avec 2nd membre : $u_C(t) = u_{Cfinale}$
    - ✓ Solution complète : $u_C(t) = K.e^{-\frac{t}{\tau}} + u_{Cfinale}$
    - ✓ Conditions initiales $u_C(0) = u_{Cinitiale}$ donc $u_{Cinitiale} = K.e^{-\frac{0}{\tau}} + u_{Cfinale}$

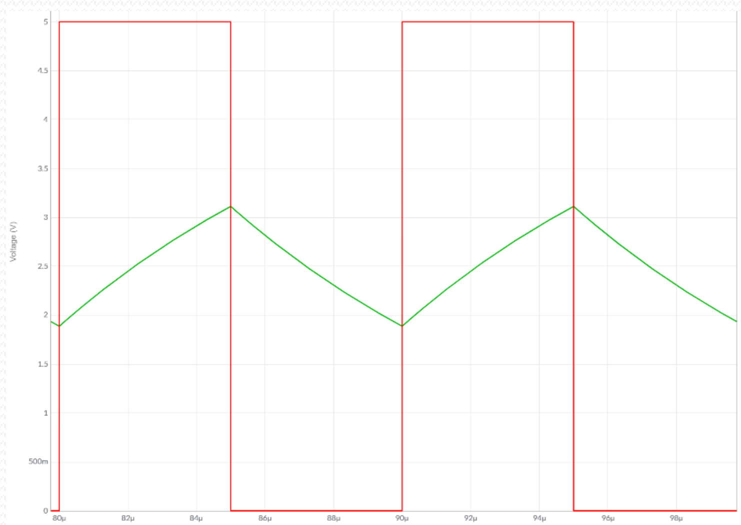
      Soit : $K = u_{Cinitiale} - u_{Cfinale}$

      ⇨ Equation universelle (charge/décharge) :

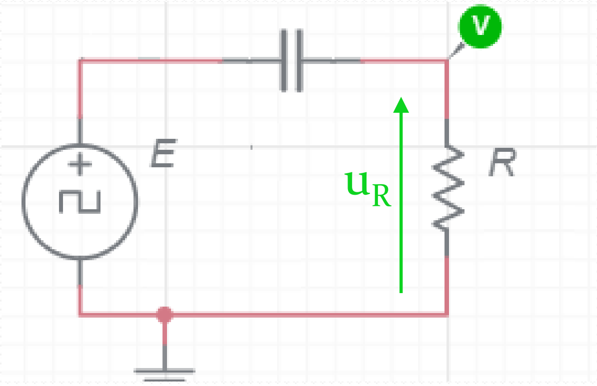
$$\boldsymbol{u_C(t) = u_{Cfinale} + \left(u_{Cinitiale} - u_{Cfinale}\right).e^{-\frac{t}{\tau}}}$$

- Cas particulier charge complète :
  - ✓ $u_C(t=0) = u_{Cinitiale} = 0$
  - ✓ $u_C(t \to \infty) = u_{Cfinale} = E$
  - ✓ $u_C(t) = u_{Cfinale} + (u_{Cinitiale} - u_{Cfinale}).e^{-\frac{t}{\tau}}$
  - ✓ $u_C(t) = E + (0 - E).e^{-\frac{t}{\tau}} = E.\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$
- Cas particulier décharge complète :
  - ✓ $u_C(t=0) = u_{Cinitiale} = E$
  - ✓ $u_C(t \to \infty) = u_{Cfinale} = 0$
  - ✓ $u_C(t) = u_{Cfinale} + (u_{Cinitiale} - u_{Cfinale}).e^{-\frac{t}{\tau}}$
  - ✓ $u_C(t) = 0 + (E - 0).e^{-\frac{t}{\tau}} = E.e^{-\frac{t}{\tau}}$
- Charge et décharge incomplète :





- Equation différentielle de la tension aux bornes de la résistance



$$\begin{cases} e(t) = u_R(t) + u_C(t) \\ i(t) = C.\dfrac{du_C}{dt}(t) \end{cases}$$

Equation différentielle en $u_R(t)$

- ➢ 2 solutions pour résoudre cette équation
- ➢ Solution 1 avec la loi des mailles : $e(t) = u_R(t) + u_C(t)$

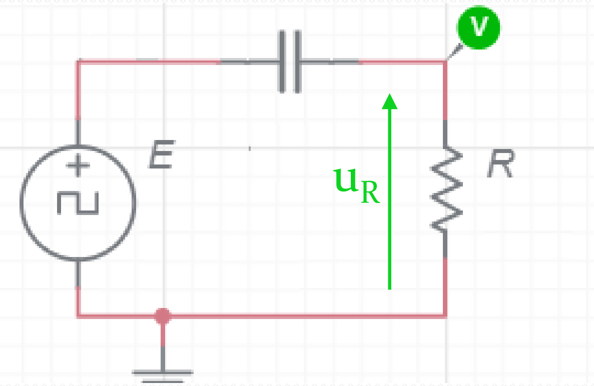
$$\Rightarrow \begin{cases} u_R(t) = E - u_C(t) \; pour \; la \; charge \; du \; condensateur \\ u_R(t) = 0 - u_C(t) \; pour \; la \; décharge \; du \; condensateur \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} u_R(t) = E - E.\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = E.e^{-\frac{t}{\tau}} \; pour \; la \; charge \\ u_R(t) = -E.e^{-\frac{t}{\tau}} \; pour \; la \; décharge \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \boldsymbol{u_R(t) = E.e^{-\frac{t}{\tau}} \; pour \; la \; charge} \\ \boldsymbol{u_R(t) = -E.e^{-\frac{t}{\tau}} \; pour \; la \; décharge} \end{cases}$$

- Solution 2 : résolution de l'équation différentielle en $u_R(t)$

$$\begin{cases} e(t) = u_R(t) + u_C(t) & (1) \\ i(t) = C.\dfrac{du_C}{dt}(t) = \dfrac{u_R(t)}{R} & (2) \end{cases}$$



⇨ Il faut exprimer $u_C(t)$ en fonction de $u_R(t)$ ou de sa dérivée.

⇨ Ici : $\dfrac{du_C}{dt}(t) = \dfrac{u_R(t)}{R.C}$ il faudrait intégré ! Pas équation différentielle

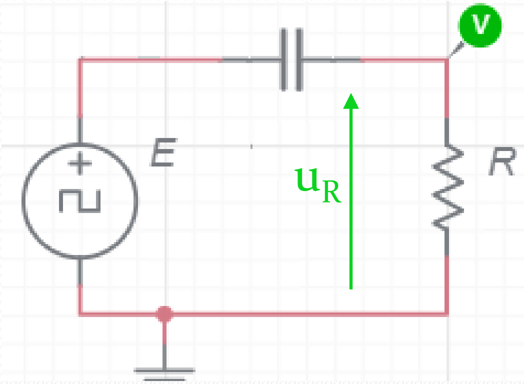
⇨ En dérivant l'équation (1) $\begin{cases} \dfrac{de}{dt}(t) = \dfrac{du_R}{dt}(t) + \dfrac{du_C}{dt}(t) \\ \dfrac{du_C}{dt}(t) = \dfrac{u_R(t)}{R.C} \end{cases}$

e(t) est une constante (E pour la charge et 0 pour la décharge)

⇨ $\dfrac{de}{dt}(t) = 0$ alors l'équation différentielle en $u_R(t)$ est :

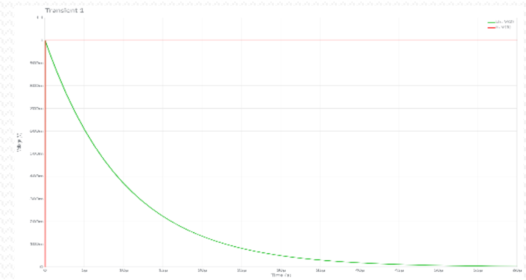
$\dfrac{du_R}{dt}(t) + \dfrac{u_R(t)}{R.C} = 0$ où $u_R(t) + \tau.\dfrac{du_R}{dt}(t) = 0$

⇨ Solution de l'équation différentielle en $u_R(t)$:



$$u_R(t) + \tau.\frac{du_R}{dt}(t) = 0$$

- ✓ Solution : $u_R(t) = K.e^{-\frac{t}{\tau}}$
- ✓ Conditions initiales :
  - Pour la charge $u_C(0) = 0$ donc $u_R(0) = E - 0$

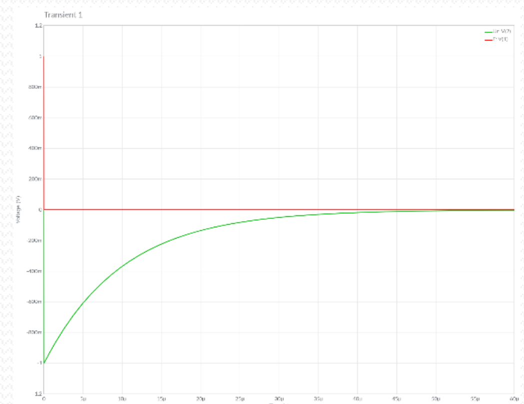


↳ $u_R(0) = K.e^{-\frac{0}{\tau}} = E$

↳ $K = E$

↳ $u_R(t) = E.e^{-\frac{t}{\tau}}$

  - Pour la décharge $u_C(0) = E$ donc $u_R(0) = 0 - E$



↳ $u_R(0) = K.e^{-\frac{0}{\tau}} = -E$

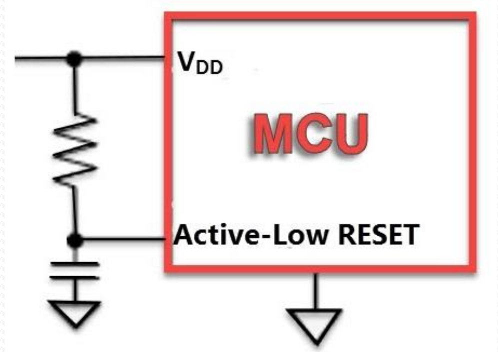
↳ $K = -E$

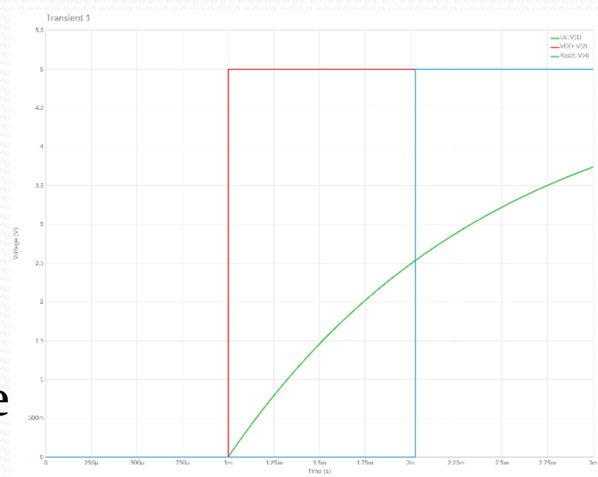
↳ $u_R(t) = -E.e^{-\frac{t}{\tau}}$

$$\Rightarrow \begin{cases} \boldsymbol{u_R(t) = E.e^{-\frac{t}{\tau}}\ pour\ la\ charge} \\ \boldsymbol{u_R(t) = -E.e^{-\frac{t}{\tau}}\ pour\ la\ décharge} \end{cases}$$

Exemples

- Exemple 1 : Reset microcontrôleur
  - Montage :
    - ✓ Le reset du MCU est actif au niveau bas
    - ✓ La résistance R sert à imposer un niveau haut sur le reset lorsque la tension d'alimentation est présente.
    - ✓ On place un condensateur en série pour maintenir le reset un petit temps après l'arrivée de la tension d'alimentation.
    - ✓ Le constructeur recommande une résistance de 33 kΩ.
    - ✓ On suppose qu'une tension supérieure à $V_{DD}/2$ sur la broche reset est vu comme un niveau haut.
  - On cherche à détermine la valeur à donner au condensateur pour ajouter un temps de reset de 1 ms.





- Equation de la charge du condensateur :

$$u_C(t) = u_{Cfinale} + \left(u_{Cinitiale} - u_{Cfinale}\right).e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\Rightarrow u_C(t) = V_{DD} + (0 - V_{DD}).e^{-\frac{t}{\tau}} = V_{DD}.\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

- Calcul du retard :
  - ✓ Soit t_o le retard.
  - ✓ $u_C(t_0) = \frac{V_{DD}}{2}$

$$\Rightarrow \frac{V_{DD}}{2} = V_{DD}.\left(1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}}\right)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2} = 1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}} \text{ soit } e^{-\frac{t_0}{\tau}} = \frac{1}{2} \text{ ou encore } e^{\frac{t_0}{\tau}} = 2$$

$$\Rightarrow t_0 = \tau.\ln 2 \text{ soit } \tau = \frac{t_0}{\ln 2} = R.C$$

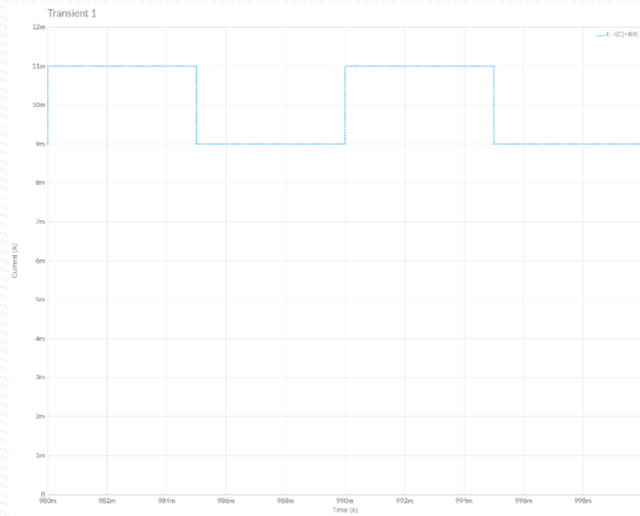
$$\Rightarrow C = \frac{t_0}{R.\ln 2}$$

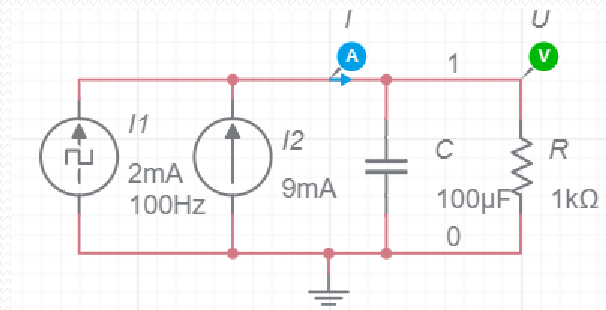
  - ✓ Application numérique

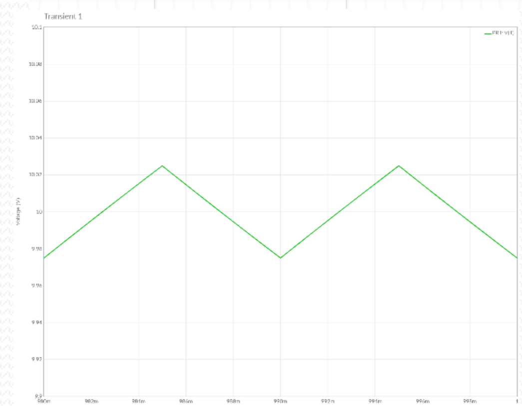
$$C = \frac{1.10^{-3}}{33.10^{3}.\ln 2} = 43{,}7.\,10^{-9}$$

⇨ C=43,7 nF ⇨ 47 nF en série E12

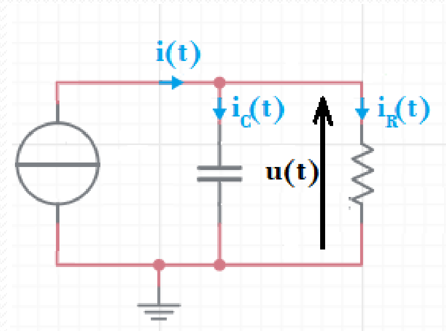
- Exemple 2 : Atténuation de la composante variable du courant
  - Source de courant (I) avec :
    - ✓ Une composante continue de 10 mA
    - ✓ Des variations carrées à 100 Hz de +/- 1 mA
  - Montage :
    - ✓ La résistance R de 1 kΩ sert à obtenir une tension image du courant fourni.
    - ✓ On place un condensateur de 100 µF en // sur la résistance pour limiter les ondulations dues à la composante de 100 Hz.
  - On cherche à détermine l'amplitude des ondulations sur la tension de sortie du montage (U).







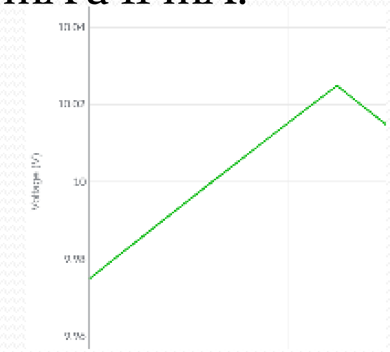
- Equation différentielle en u(t):



$$\begin{cases} i(t) = i_R(t) + i_C(t) \\ i_C(t) = C.\dfrac{du}{dt}(t) \\ u(t) = R.i_R(t) \end{cases} \Rightarrow \quad i(t) = \frac{u(t)}{R} + C.\frac{du}{dt}(t)$$

↳ $u(t) + RC.\dfrac{du}{dt}(t) = R.i(t)$

- Résolution de l'équation pour la charge du condensateur :
  - ✓ Début de charge de C : On suppose qu'a t=0 i(t)passe de 9 mA à 11 mA. Donc R.i(t) passe de 9 V à 11 V (R=1 kΩ). u(t) va passer de u_{min} à u_{max} pendant la charge



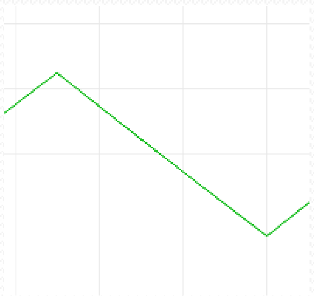
  - ✓ $u(t) = u_{finale} + \left(u_{initiale} - u_{finale}\right).e^{-\frac{t}{\tau}}$

↳ $u(t) = 11 + (u_{min} - 11).e^{-\frac{t}{\tau}}$

  - ✓ Fin de la charge de C : fréquence=100 Hz donc T=10 ms donc fin de la charge au bout de T/2=5 ms. Valeur atteinte : u_{max}.

↳ $u_{max} = 11 + (u_{min} - 11).e^{-\frac{T}{2.\tau}}$

- Résolution de l'équation pour la décharge du condensateur :
  - ✓ Début décharge : On suppose qu'a t=0 i(t)passe de 11 mA à 9 mA. Donc R.i(t) passe de 11 V à 9 V (R=1 kΩ). u(t) va passer de u_{max} à u_{min} pendant la décharge



  - ✓ $u(t) = u_{finale} + \left(u_{initiale} - u_{finale}\right).e^{-\frac{t}{\tau}}$
  - ➩ $u(t) = 9 + (u_{max} - 9).e^{-\frac{t}{\tau}}$
  - ✓ Fin de la décharge de C au bout de T/2=5 ms. Valeur atteinte : u_{min}.
  - ➩ $u_{min} = 9 + (u_{max} - 9).e^{-\frac{T}{2.\tau}}$
- Valeur de l'ondulation en fonction de la valeur de C :
  - ✓ Ondulation Δu : $\Delta u = u_{max} - u_{min}$
  - ➩ $\Delta u = 11 + (u_{min} - 11).e^{-\frac{T}{2.\tau}} - \left(9 + (u_{max} - 9).e^{-\frac{T}{2.\tau}}\right)$
  - ➩ $\Delta u = 2 + \left(u_{min} - 11 - (u_{max} - 9)\right).e^{-\frac{T}{2.\tau}}$
  - ➩ $\Delta u = 2 + (u_{min} - u_{max} - 2).e^{-\frac{T}{2.\tau}} = 2 + (-\Delta u - 2).e^{-\frac{T}{2.\tau}}$
  - ➩ $\Delta u\left(1 + e^{-\frac{T}{2.\tau}}\right) = 2 - 2.e^{-\frac{T}{2.\tau}}$ ⇨ $\Delta u = 2.\frac{1- e^{-\frac{T}{2.\tau}}}{1+e^{-\frac{T}{2.\tau}}}$

AN : $\Delta u = 2.\frac{1- e^{-\frac{5}{200}}}{1+e^{-\frac{5}{200}}} = 25\text{ mV}$