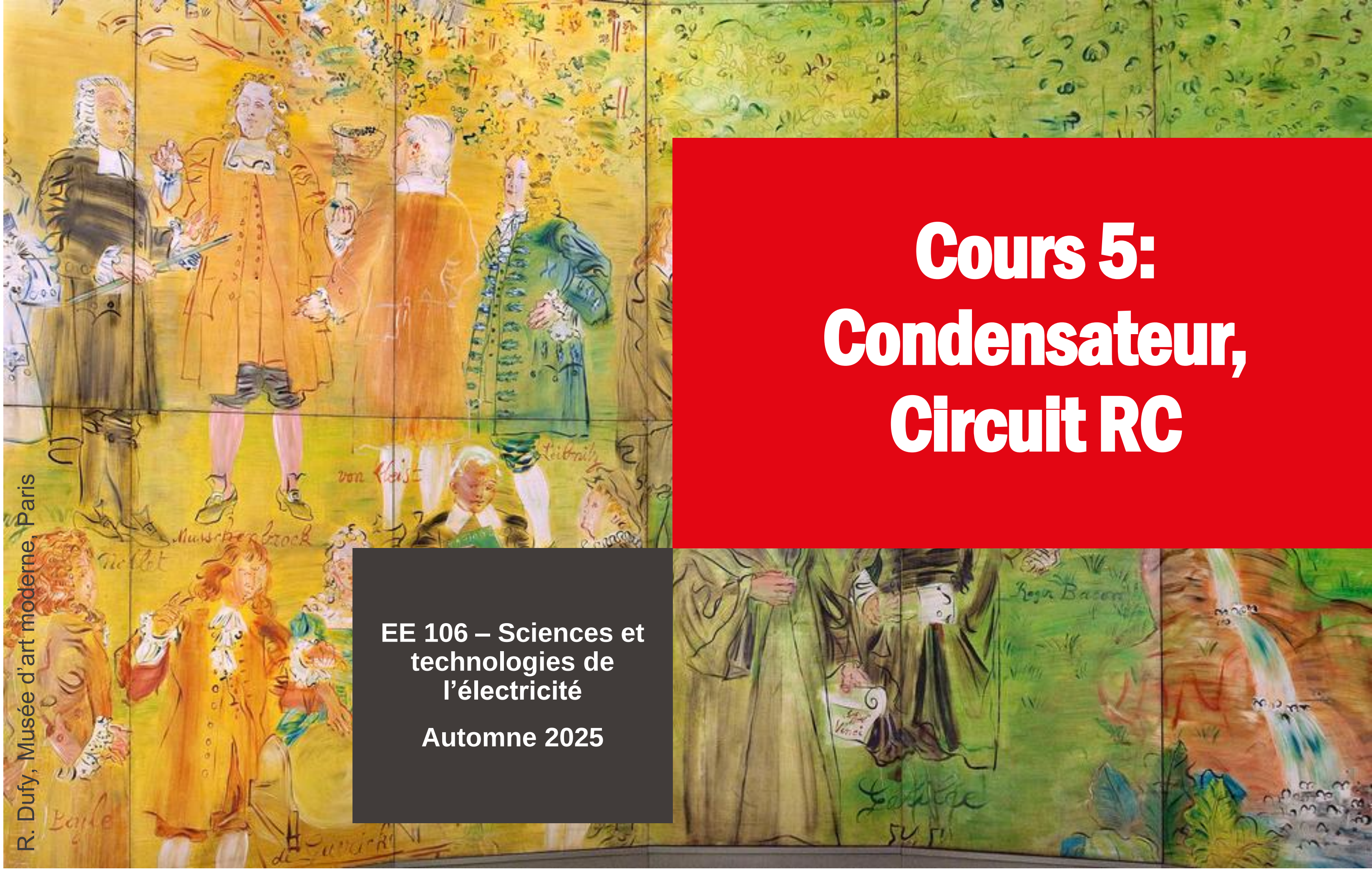
EPFL

Cours 5: Condensateur, Circuit RC

EE 106 – Sciences et technologies de l'électricité

Automne 2025



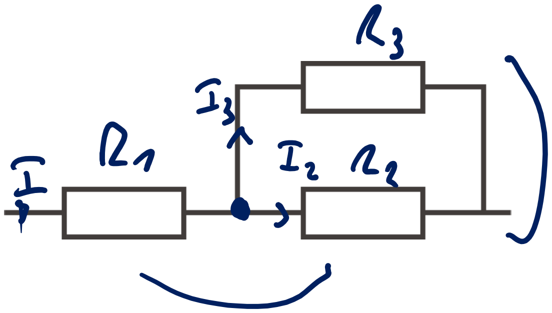
R. Dufy, Musée d'art moderne, Paris

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Dr. Christian Lafforgue – christian.lafforgue@epfl.ch

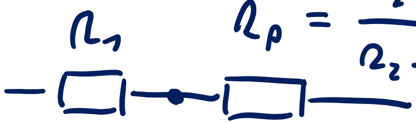
Rappels

- Rappels – Série/parallèle



parallèle !

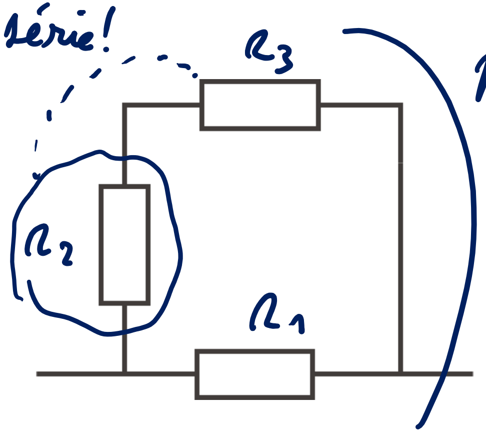
série ? NON



$$R_p = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

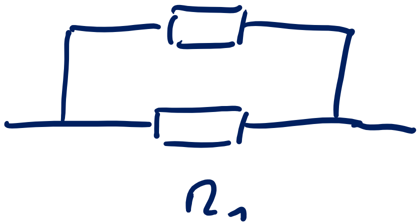
série !

série !



parallèle ? NON

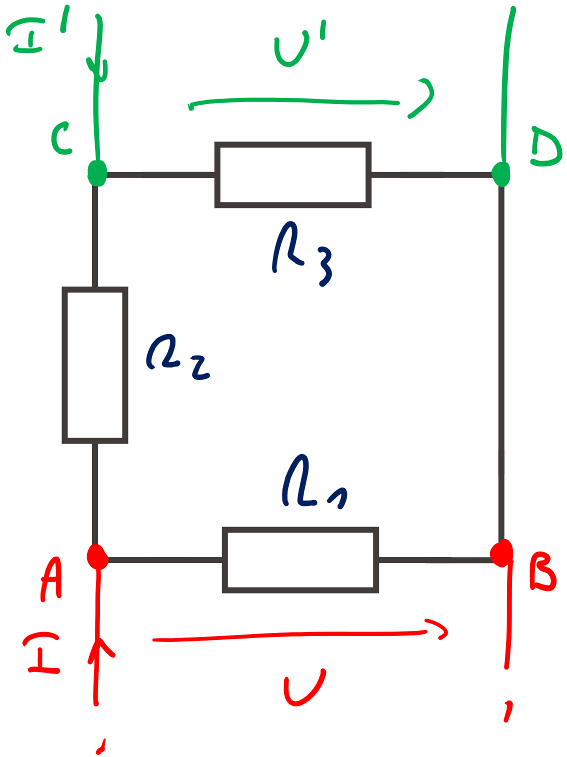
$$R_s = R_2 + R_3$$



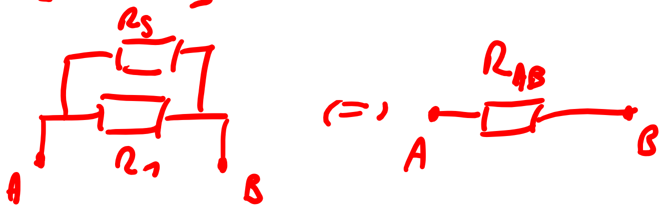
parallèle !

- Rappels – Résistance équivalente

C. Lafforgue

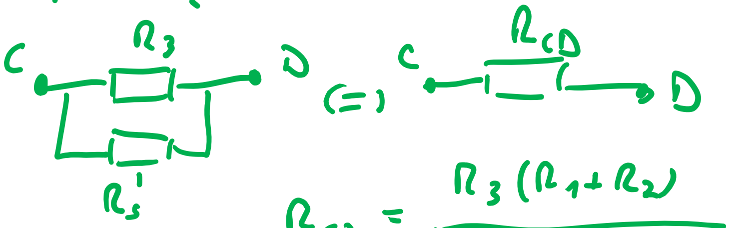


R_2 et R_3 en série



$$R_{AB} = \frac{(R_2+R_3)R_1}{R_1+R_2+R_3}$$

R_1 et R_2 en série

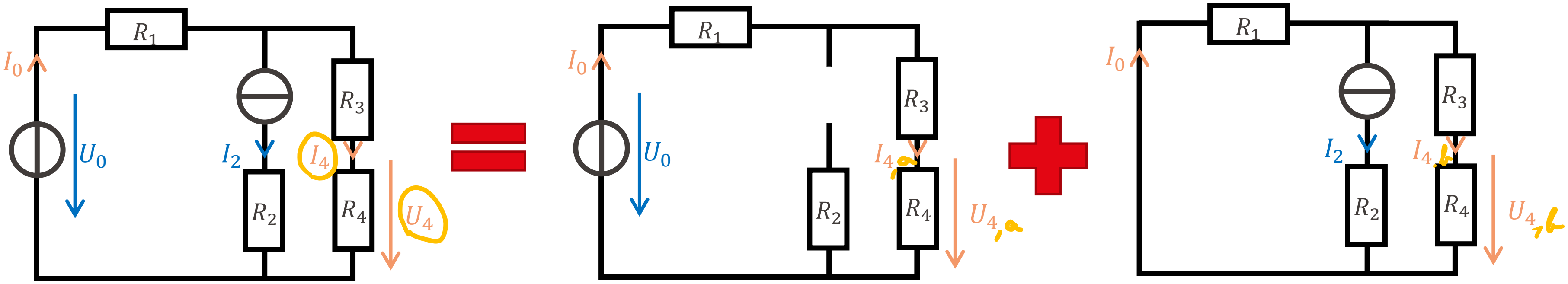


$$R_{CD} = \frac{R_3(R_1+R_2)}{R_1+R_2+R_3}$$

$$R_{AB} = \frac{U}{I}$$

- Rappels – Principe de superposition

C. Lafforgue

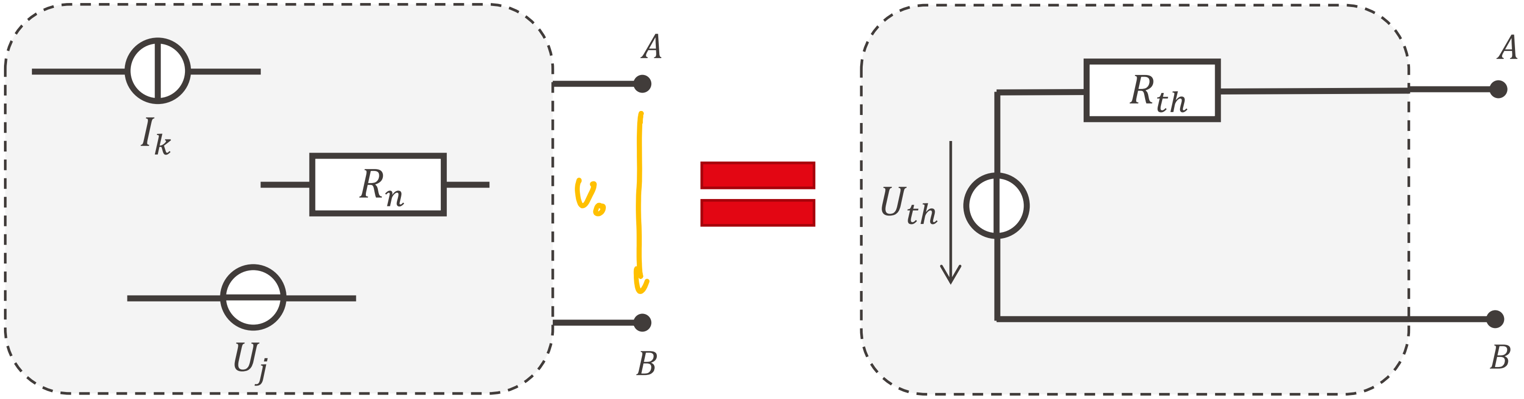


$$U_4 = U_{4,a} + U_{4,b}$$

$$I_4 = I_{4,a} + I_{4,b}$$

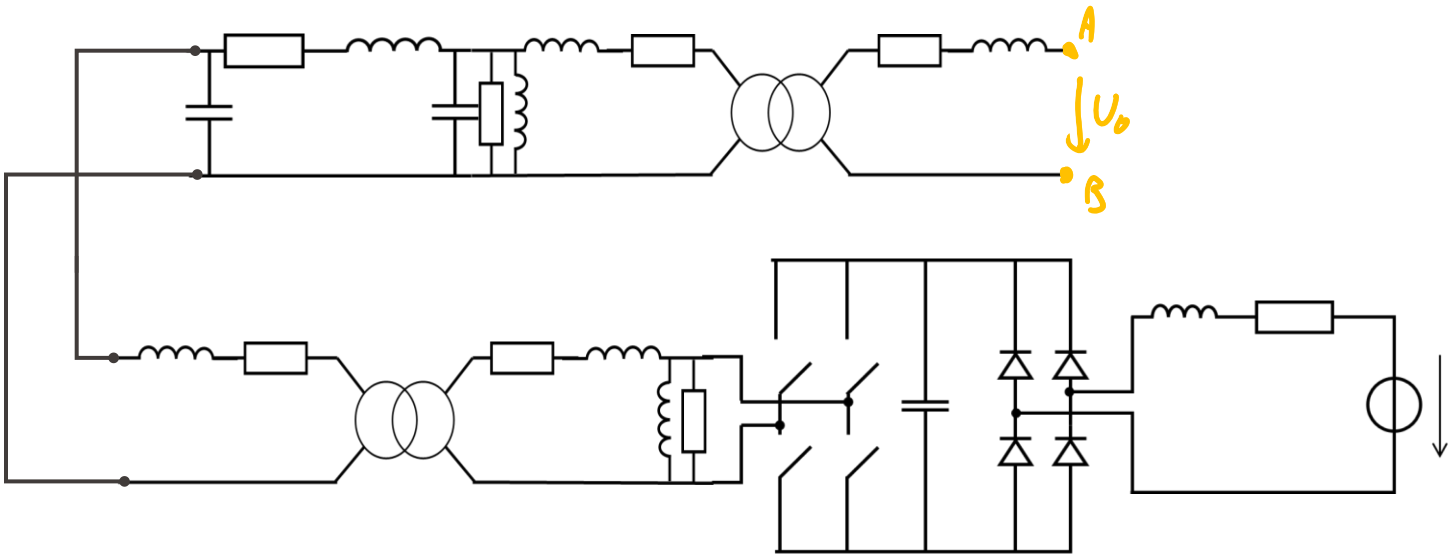
- Rappels – Théorèmes de Thévenin et de Norton

C. Lafforgue



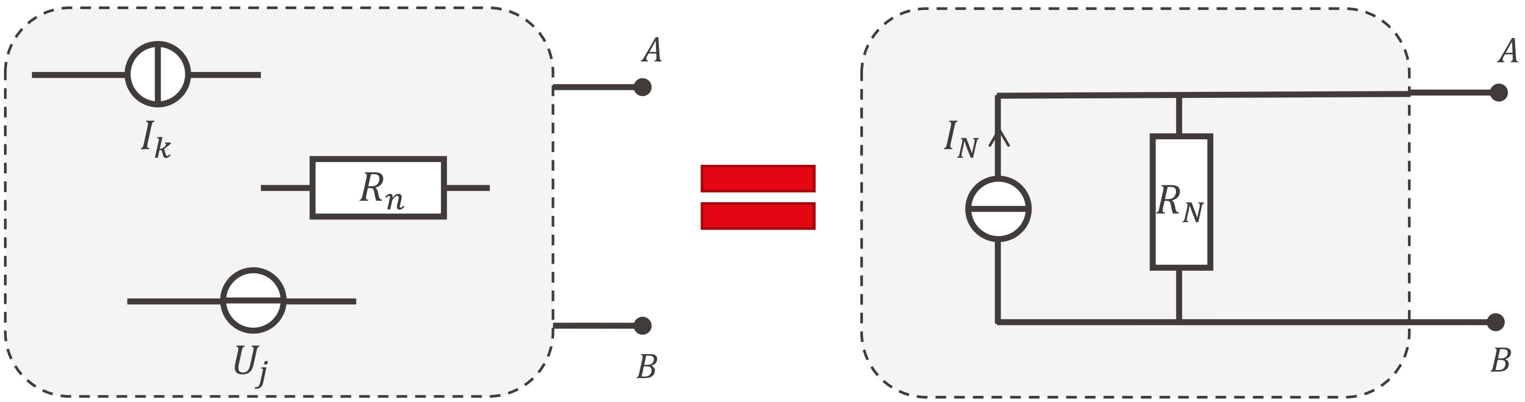
$$\boxed{\begin{aligned} U_{th} &= U_0 \\ R_{th} &= R_{AB} \end{aligned}}$$

- Rappels – Théorèmes de Thévenin et de Norton



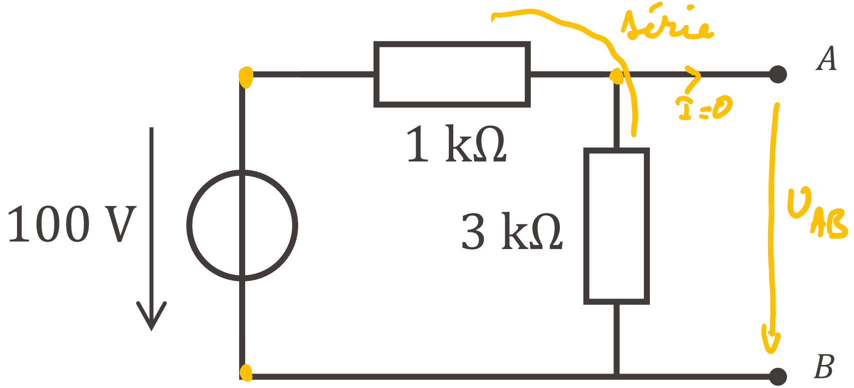
$$\boxed{\begin{aligned} U_{th} &= U_0 \\ R_{th} &= R_{AB} \end{aligned}}$$

- Rappels – Théorèmes de Thévenin et de Norton



$$\boxed{\begin{aligned} I_N &= I_{cc} \\ R_N &= R_{AB} \end{aligned}}$$

- Rappels – Que vaut la tension équivalente de Thévenin entre A et B?

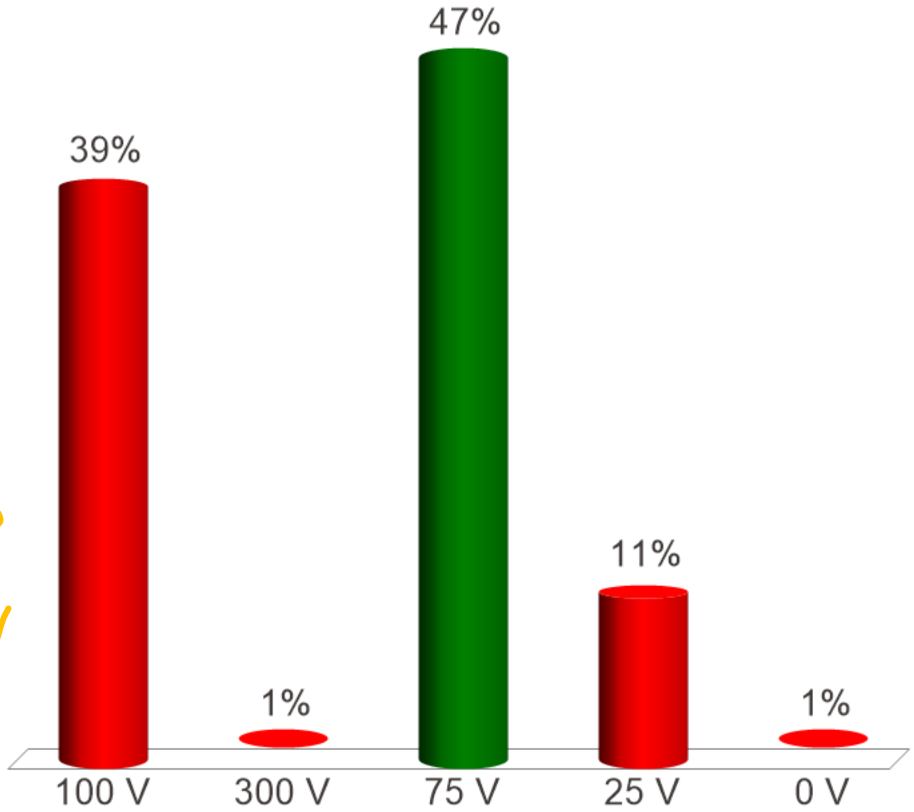


A. 100 V
B. 300 V
✓ C. 75 V
D. 25 V
E. 0 V

div. de tension:

$$U_{AB} = \frac{3\cdot10^3}{1\cdot10^3+3\cdot10^3}\times100 = \frac{3}{4}\times100 = 75\,V$$

Session ID: **ee106poll**
URL: **ttpoll.eu**



Objectifs

- Décrire le comportement d’un condensateur plan
- Déterminer la relation courant-tension d’un condensateur
- Etudier un circuit en régime transitoire

Les condensateurs

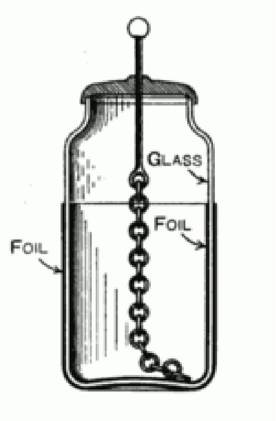
Le condensateur

Symbole	Signification	Grandeur	Unité
	Condensateur	C (capacité)	farad (F)

- Le condensateur est un composant de base utilisé pour:
  - Le stockage d’énergie
  - Le filtrage de signaux parasites
  - La protection de systèmes électriques sensibles
  - …
- C’est un dipôle passif

Le condensateur

- 1745: Ewald Georg von Kleist et Pieter van Musschenbroek inventent la **bouteille de Leyde,** ancêtre du condensateur
- Deux conducteurs sont séparés par une paroi de verre (isolant)
- La bouteille de Leyde est utilisée pour faire des décharges électriques après lui avoir appliqué une tension électrique

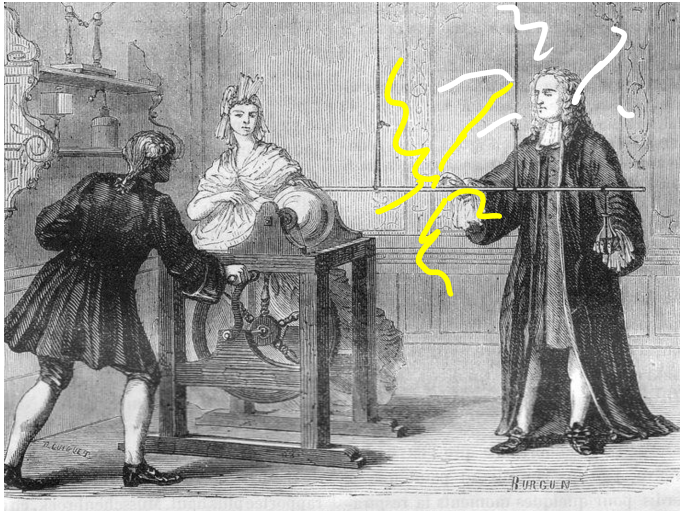


Pieter van Musschenbroek
1692-1761
Physicien néerlandais

Ewald Georg von Kleist
1700-1748
Physicien allemand

Le condensateur

- 1745: Ewald Georg von Kleist et Pieter van Musschenbroek inventent la **bouteille de Leyde,** ancêtre du condensateur
- Deux conducteurs sont séparés par une paroi de verre (isolant)
- La bouteille de Leyde est utilisée pour faire des décharges électriques après lui avoir appliqué une tension électrique



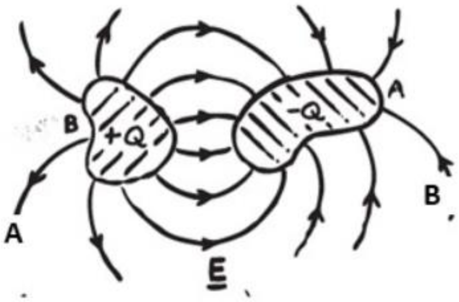
Pieter van Musschenbroek
1692-1761
Physicien néerlandais

Ewald Georg von Kleist
1700-1748
Physicien allemand

Le condensateur généralisé

- On considère deux surfaces conductrices
  - De forme quelconque
  - Isolées l'une de l'autre, fixes dans l'espace

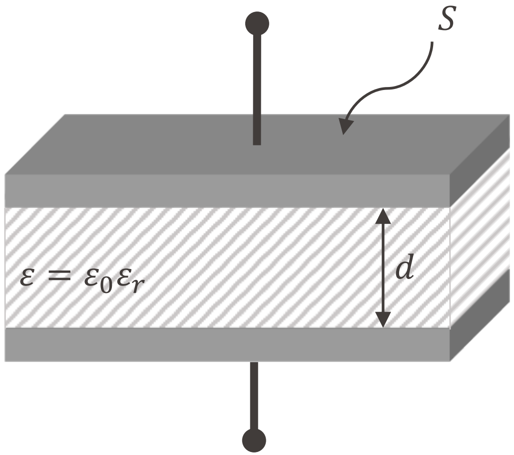
- Les deux surfaces sont chargées, chacune avec une charge opposée
  - Une surface a une charge $+Q$, l'autre a une charge $-Q$
  - La séparation de charge a lieu lorsqu'une source de tension est connectée au condensateur



Le condensateur plan

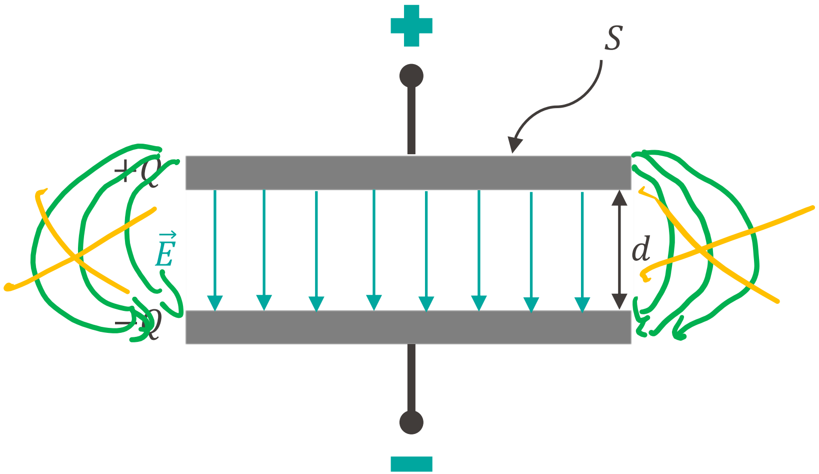
- Lorsque les deux surfaces chargées sont des plaques parallèles, on parle de **condensateur plan**

- Le condensateur est caractérisé par:
  - Une surface S
  - Une séparation d
  - Une permittivité diélectrique $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$

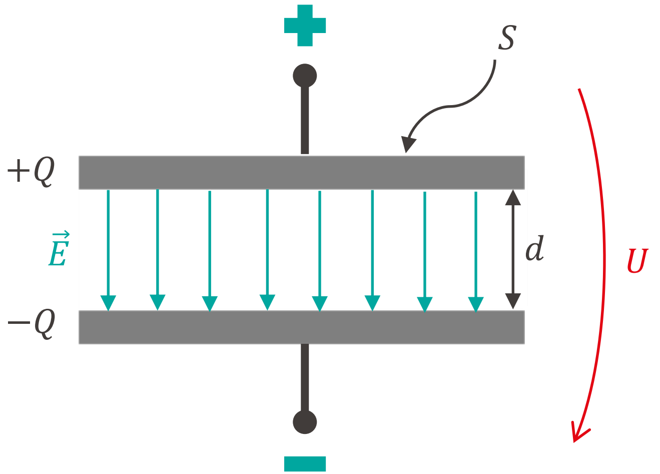


Le condensateur plan idéal

- On considère les plaques du condensateur « infiniment » grandes (les côtés des plaques sont très grands comparés à d)
  - Les effets de bords peuvent être négligés
  - Le champ électrique entre les plaques est homogène



Le condensateur plan idéal



cf cours 1.

- $\|\vec{E}\| = \frac{U}{d}$
- On peut aussi montrer que:

eq. de Maxwell-Gauss

th. de Green-Ostrogradski

$$\|\vec{E}\| = \frac{Q}{\varepsilon S}$$

- On en déduit:

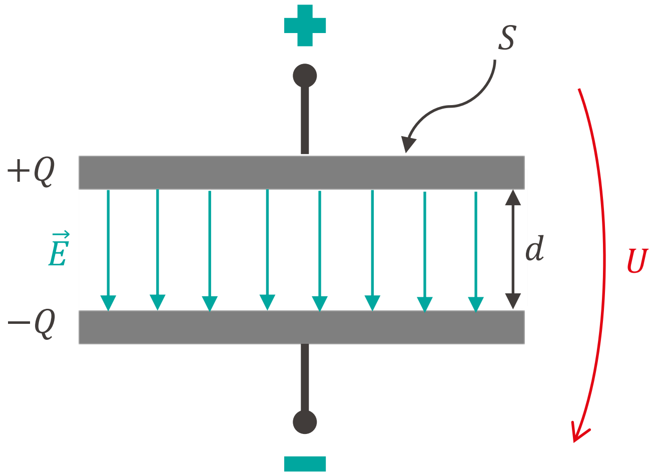
$$Q = \frac{\varepsilon S}{d} U$$

- On définit ainsi **la capacité** du condensateur plan:

$$\boxed{\begin{aligned} Q &= CU \\ C &= \frac{\varepsilon S}{d} \end{aligned}}$$

Unité: farad (F)

Le condensateur plan idéal



Ordre de grandeur de la capacité?

$$C = \frac{\varepsilon S}{d}$$

Calculer la capacité du condensateur

C. Lafforgue

Ordre de grandeur de la capacité?

$$C = \frac{\varepsilon S}{d}$$

- $d = 1\ \mathrm{mm}$
- $S = 1.13\ \mathrm{cm}^2$
- $\varepsilon = \varepsilon_0 \simeq 8.85 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{F \cdot m^{-1}}$ (air entre les plaques)

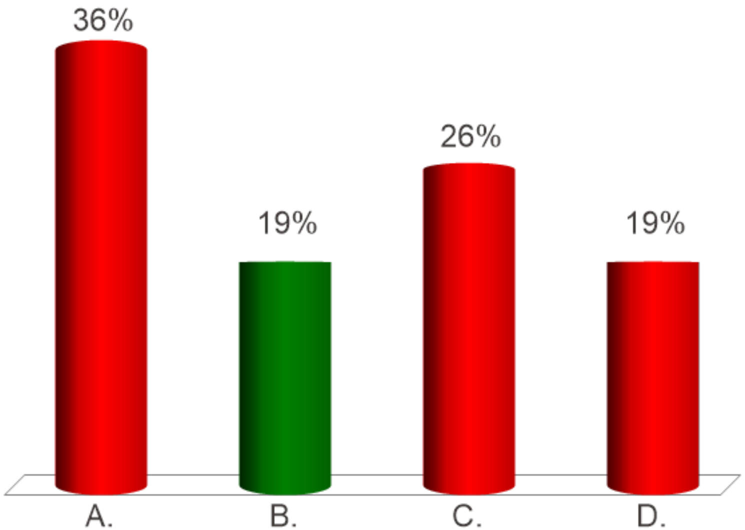
$$C = \frac{10 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-4}}{10^{-3}} = 10^{-12}\ F$$

A. $C = 10\ \mathrm{nF}$

B. $C = 1\ \mathrm{pF}$

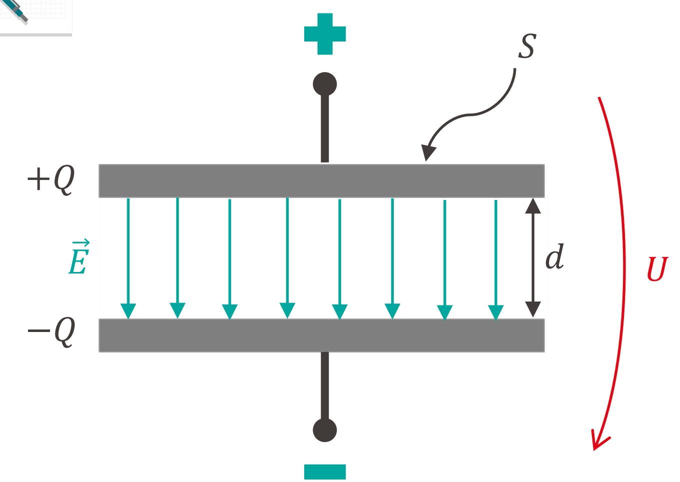
C. $C = 10\ \mathrm{pF}$

D. $C = 0.1\ \mathrm{nF}$



Session ID: **ee106poll**
URL: **ttpoll.eu**

Le condensateur plan idéal



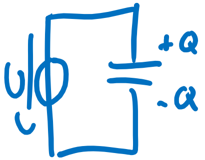
Ordre de grandeur de la capacité?

$$C = \frac{\varepsilon S}{d}$$

$C \sim fF \to mF$

Energie accumulée dans un condensateur

- Lorsqu'il est connecté à une source de tension, le condensateur accumule des charges ⇒ il accumule de l'énergie électrostatique
  - Une fois chargé, la charge est fixe: $Q = \text{cste}$.
  - $i(t) = \frac{dQ}{dt}$ donc dans un condensateur chargé, le courant est nul



Un condensateur chargé est équivalent à un circuit ouvert

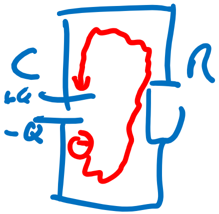
Autrement dit, en régime statique, un condensateur se comporte comme un circuit ouvert.

En régime statique:

C. Lafforgue

Energie accumulée dans un condensateur

- Un condensateur chargé peut écouler ses charges en le branchant à un autre dipôle passif, par exemple une résistance
  - Le condensateur libère de l'énergie stockée en se déchargeant
  - L'énergie emmagasinée est égale au travail fourni pour se charger



$$dW_c = dq \cdot u$$

$$q = Cu \rightarrow u = \frac{q}{C}$$

$$\hookrightarrow dW_c = \frac{1}{C} q \cdot dq$$

$$W_c = \int_0^Q \frac{1}{C} q \cdot dq = \frac{1}{C} \int_0^Q q \cdot dq = \frac{1}{C} \left[\frac{q^2}{2} \right]_0^Q$$

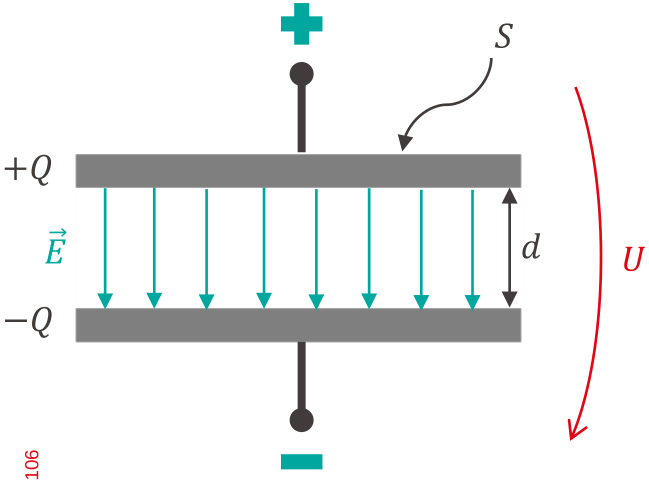
$$W_c = \frac{Q^2}{2C} \quad \text{or} \quad Q = CU$$

← tension initiale

$$W_c = \frac{1}{2} C U^2$$

Energie accumulée dans un condensateur

- Un condensateur chargé peut écouler ses charges en le branchant à un autre dipôle passif, par exemple une résistance
  - Le condensateur libère de l'énergie stockée en se déchargeant
  - L'énergie emmagasinée est égale au travail fourni pour se charger



$$W_c = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$$

$$\boxed{W_c = \frac{1}{2} C U^2}$$

Points clés

- Un condensateur est un dipôle qui accumule de l'énergie électrostatique en condensant des charges proportionnellement à la tension:

$$\boxed{Q = CU}$$

- Le condensateur est caractérisé par sa **capacité**:

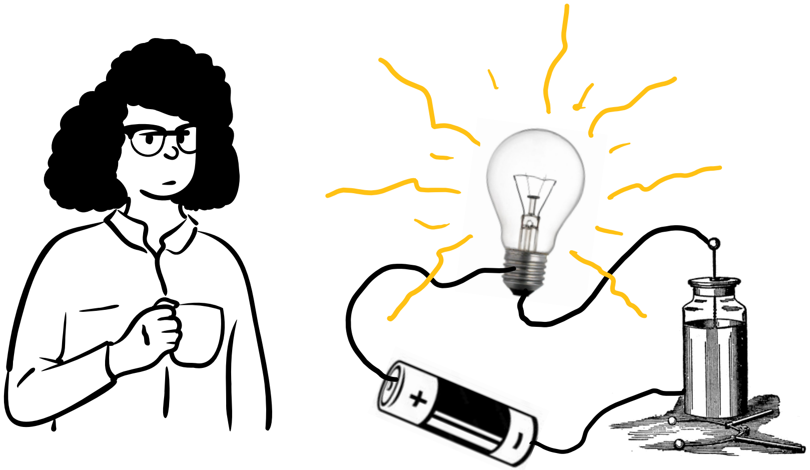
$$\boxed{C = \frac{\varepsilon S}{d}}$$

- L'énergie accumulée pour une tension U est:

$$\boxed{W_c = \frac{1}{2} C U^2}$$

- En régime statique, le condensateur se comporte comme un circuit ouvert

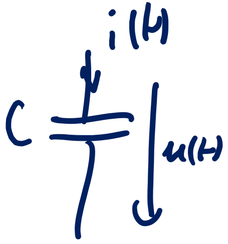
Comportement dynamique



Courant traversant un condensateur

- On a vu qu'en régime continu $I = 0$ et que le condensateur chargé se comporte comme un circuit ouvert

- Que se passe-t-il **pendant** la charge du condensateur?



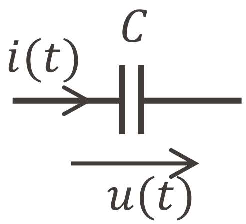
$$\begin{cases} i(t) = \dfrac{dq}{dt}(t) \\ q(t) = C\,u(t) \end{cases} \Rightarrow \quad i(t) = C\,\dfrac{du}{dt}(t)$$

Courant traversant un condensateur

- On a vu qu'en régime continu $I = 0$ et que le condensateur chargé se comporte comme un circuit ouvert

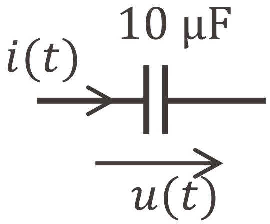
- Que se passe-t-il **<u>pendant</u>** la charge du condensateur?

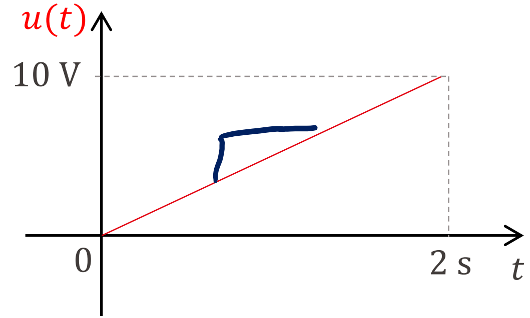
$$\boxed{i(t) = C\frac{du}{dt}(t)}$$



- Un courant transitoire peut exister!

Que vaut le courant i pour le profil de tension donné?



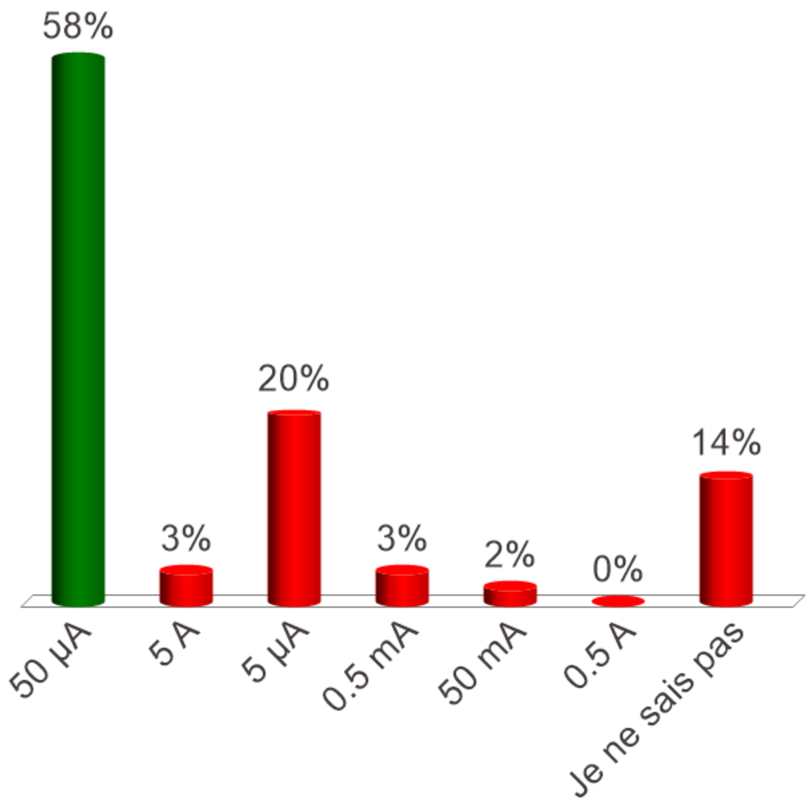


A. 50 µA
B. 5 A
C. 5 µA
D. 0.5 mA
E. 50 mA
F. 0.5 A
G. Je ne sais pas

$$i(t) = C \frac{du}{dt}(t)$$

$$= 10\cdot 10^{-6} \cdot 5$$

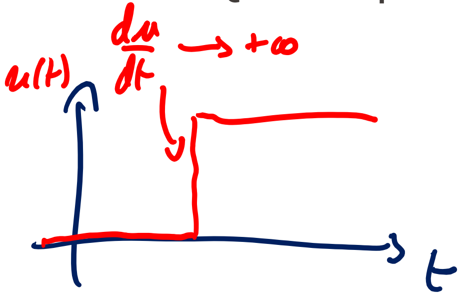
$$= 50 \cdot 10^{-6}\ A$$



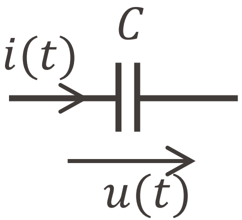
Session ID: **ee106poll**
URL: **ttpoll.eu**

Courant traversant un condensateur

- Que se passe-t-il **<u>pendant</u>** la charge du condensateur?



$$\boxed{i(t) = C\frac{du}{dt}(t)}$$

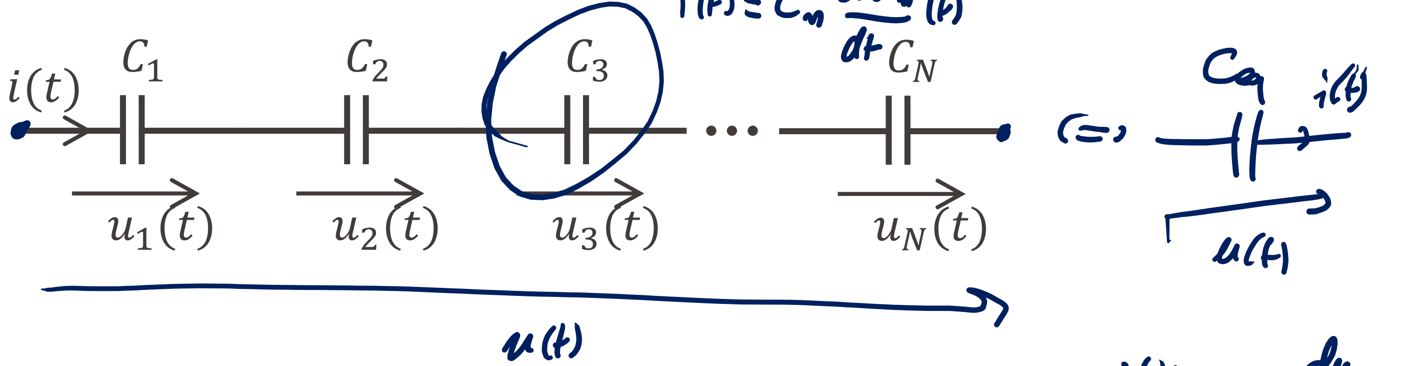


- **Remarque:** le courant ne peut pas être infini, donc **<u>la tension aux bornes du condensateur est continue.</u>**

Agencement de condensateurs

Condensateurs en série

$$i(t) = C_n \frac{du_n}{dt}(t)$$



$$u(t) = \sum_{n=1}^{N} u_n(t)$$

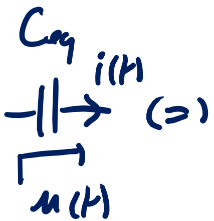
$$\frac{du}{dt}(t) = \sum_{n=1}^{N} \frac{du_n}{dt}(t) = \sum_{n=1}^{N} \frac{i(t)}{C_n} = \underbrace{\left[\sum_{n=1}^{N} \frac{1}{C_n}\right]}_{\frac{1}{C_{eq}}} \cdot i(t)$$

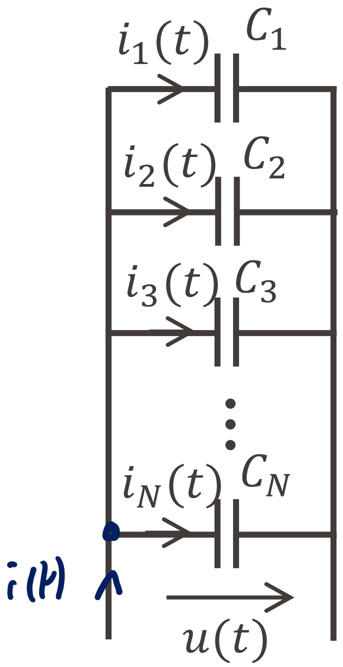
$$i(t) = C_{eq} \frac{du}{dt}(t)$$

$$\frac{du}{dt}(t) = \frac{1}{C_{eq}} i(t)$$

Agencement de condensateurs

Condensateurs en parallèle





$$i(t) = \sum_{n=1}^{N} i_n(t) = \sum_{n=1}^{N} C_n \frac{du}{dt}(t)$$

$$i(t) = \left[\sum_{n=1}^{N} C_n\right] \cdot \frac{du}{dt}(t)$$

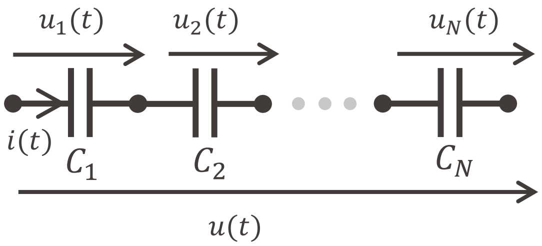
$$i(t) = C_{eq} \cdot \frac{du}{dt}(t)$$

Points clés

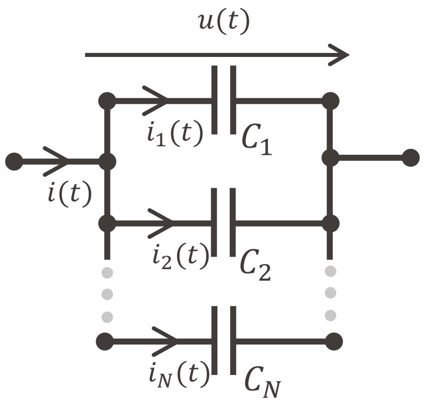
- Les circuits avec condensateurs ont un comportement dynamique (dépend du temps)

$$\boxed{i(t) = C\frac{du}{dt}}$$

- Des condensateurs en parallèle s'ajoutent
  - Des résistances en parallèle ont une capacité équivalente plus grande
- Pour des condensateurs en série, les inverses des capacités s'ajoutent
  - Des condensateurs en série ont une capacité équivalente plus petite



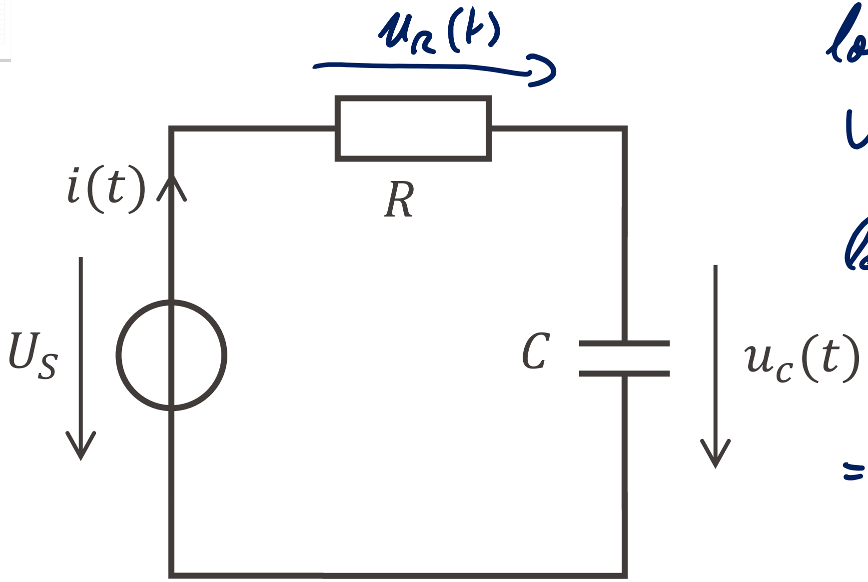
$$\boxed{\frac{1}{C_{\mathrm{eq}}} = \sum_{n=1}^{N}\frac{1}{C_n}}$$



$$\boxed{C_{\mathrm{eq}} = \sum_{n=1}^{N} C_n}$$

Circuit RC

- On modélise un circuit dépendant du temps t:



Loi des mailles:

$$U_S = u_R(t) + u_c(t)$$

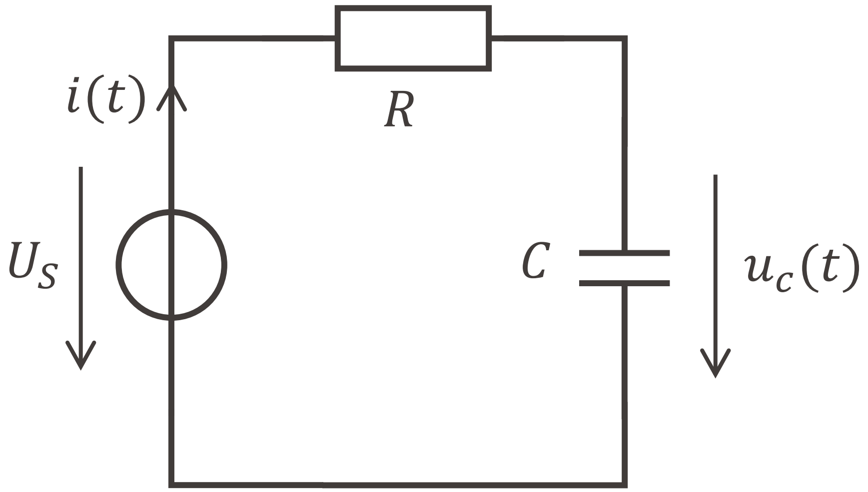
Loi d'Ohm : $u_R(t) = R\,i(t)$

or $i(t) = C \dfrac{du_c}{dt}(t)$

$$\Rightarrow U_S = RC\frac{du_c}{dt}(t) + u_c(t)$$

Circuit RC

- On modélise un circuit dépendant du temps t:



Loi des mailles:

$$U_S = Ri(t) + u_c(t)$$

Relation caractéristique du condensateur::

$$i(t) = \frac{Cdu_c}{dt}(t)$$

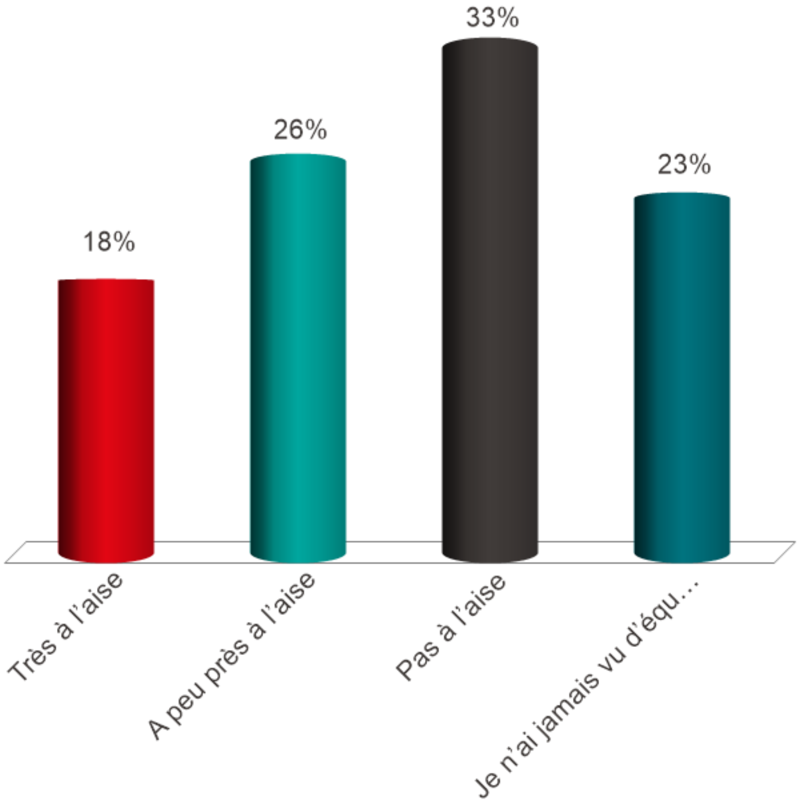
Donc on obtient:

$$U_S = RC\frac{du_c}{dt} + u_c(t)$$

$$\boxed{\frac{du_c}{dt}(t) + \frac{1}{RC}u_c(t) = \frac{1}{RC}U_S}$$

Comment vous sentez-vous avec les équations différentielles?

A. Très à l’aise
B. A peu près à l’aise
C. Pas à l’aise
D. Je n’ai jamais vu d’équations différentielles



Session ID: **ee106poll**
URL: **ttpoll.eu**

Point sur les équations différentielles d'ordre 1

C. Lafforgue

- Définition de la fonction exponentielle: solution de l'équation différentielle

$$\frac{dg}{dz}(z) = g(z)$$

- La fonction exponentielle s'écrit $g(z) = e^z$

e = constante de Néper

$\simeq 2,7$

- Propriété:
  - Si $h(z) = Ae^{kz}$ alors $\frac{dh}{dz}(z) = kAe^{kz} = k \cdot h(z)$

$$\frac{dh}{dz}(z) = k \cdot h(z)$$

Point sur les équations différentielles d'ordre 1

- On souhaite déterminer une fonction $x(t)$ régie par une équation différentielle linéaire d'ordre 1:

$$\frac{dx}{dt}(t) + \frac{1}{\tau}x(t) = \frac{1}{\tau}X_0$$

- Ici, τ est une constante de temps (nécessaire pour que l'équation soit physiquement correcte)
- X_0 est une constante, correspondant à la source dans notre cas

Point sur les équations différentielles d'ordre 1

C. Lafforgue

$$\frac{dx}{dt}(t) + \frac{1}{\tau}x(t) = \frac{1}{\tau}X_0$$

$$\frac{dh}{dz}(z) = k\,h(z)$$

$$h(z) = A\,e^{kz}$$

- 1. On résout l'équation homogène:

$$\frac{dx_h}{dt}(t) + \frac{1}{\tau}x_h(t) = 0 \iff \frac{dx_h}{dt}(t) = \underbrace{-\frac{1}{\tau}}_{k}\,x_h(t)$$

- Les solutions d'une telle équation sont des fonctions exponentielles:

$$x_h(t) = Ae^{-t/\tau}$$

Point sur les équations différentielles d'ordre 1

$$\frac{dx}{dt}(t) + \frac{1}{\tau}x(t) = \frac{1}{\tau}X_0$$

- 1. On résout l'équation homogène:

$$\frac{dx_h}{dt}(t) + \frac{1}{\tau}x_h(t) = 0$$

Point sur les équations différentielles d'ordre 1

C. Lafforgue

$$\frac{dx}{dt}(t) + \frac{1}{\tau}x(t) = \frac{1}{\tau}X_0$$

- 1. On résout l'équation homogène:

$$\frac{dx_h}{dt}(t) + \frac{1}{\tau}x_h(t) = 0$$

Point sur les équations différentielles d'ordre 1

C. Lafforgue

$$\frac{dx}{dt}(t) + \frac{1}{\tau}x(t) = \frac{1}{\tau}X_0$$

- 2. On cherche une solution particulière. L'équation accepte une solution sous la forme d'une constante ($\frac{dx_p}{dt} = 0$):

$x(t) = x_p$

$$x_p = X_0$$

$\frac{dx}{dt}(t) = 0$

$0 + \frac{1}{\tau}x_p = \frac{1}{\tau}X_0$

Point sur les équations différentielles d'ordre 1

$$\frac{dx}{dt}(t) + \frac{1}{\tau}x(t) = \frac{1}{\tau}X_0$$

- 3. On additionne la solution de l'équation homogène associée et la solution particulière:

$$\boxed{x(t) = Ae^{-t/\tau} + X_0}$$

Point sur les équations différentielles d'ordre 1

C. Lafforgue

$$\frac{dx}{dt}(t) + \frac{1}{\tau}x(t) = \frac{1}{\tau}X_0$$

- 3. On additionne la solution de l'équation homogène associée et la solution particulière:

$$\boxed{x(t) = Ae^{-t/\tau} + X_0}$$

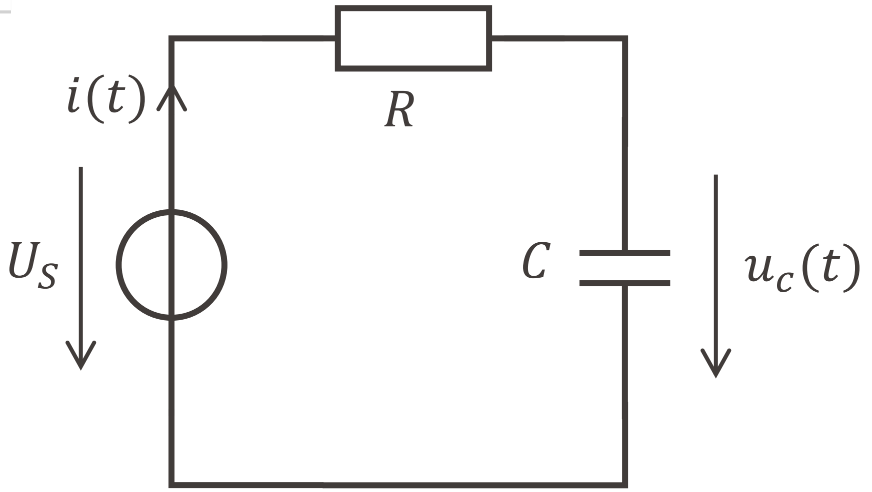
$x(0) = Ae^0 + X_0 = A + X_0$

- On obtient une famille de solutions. Le comportement total est déterminé par **la condition initiale**.

Circuit RC – charge du condensateur

- On modélise un circuit dépendant du temps t:

$$\frac{du_c}{dt}(t) + \frac{1}{\tau}u_c(t) = \frac{1}{\tau}U_s$$



Condition initiale:
$u_c(0) = 0\ \mathrm{V}$

τ

$$\boxed{\frac{du_c}{dt}(t) + \frac{1}{\underbrace{RC}_{\tau}}u_c(t) = \frac{1}{RC}U_S}$$

$$u_c(t) = A\,e^{-t/\tau} + U_s$$

$$u_c(0) = 0\ \mathrm{V} \iff A + U_s = 0$$

$$\iff A = -U_s$$

$$\Rightarrow u_c(t) = -U_s\,e^{-t/\tau} + U_s$$

$$\boxed{u_c(t) = U_S\left(1 - e^{-t/\tau}\right)}$$

Circuit RC – charge du condensateur

$$\frac{du_c}{dt}(t) = \frac{1}{\tau} U_s \, e^{-t/\tau}$$

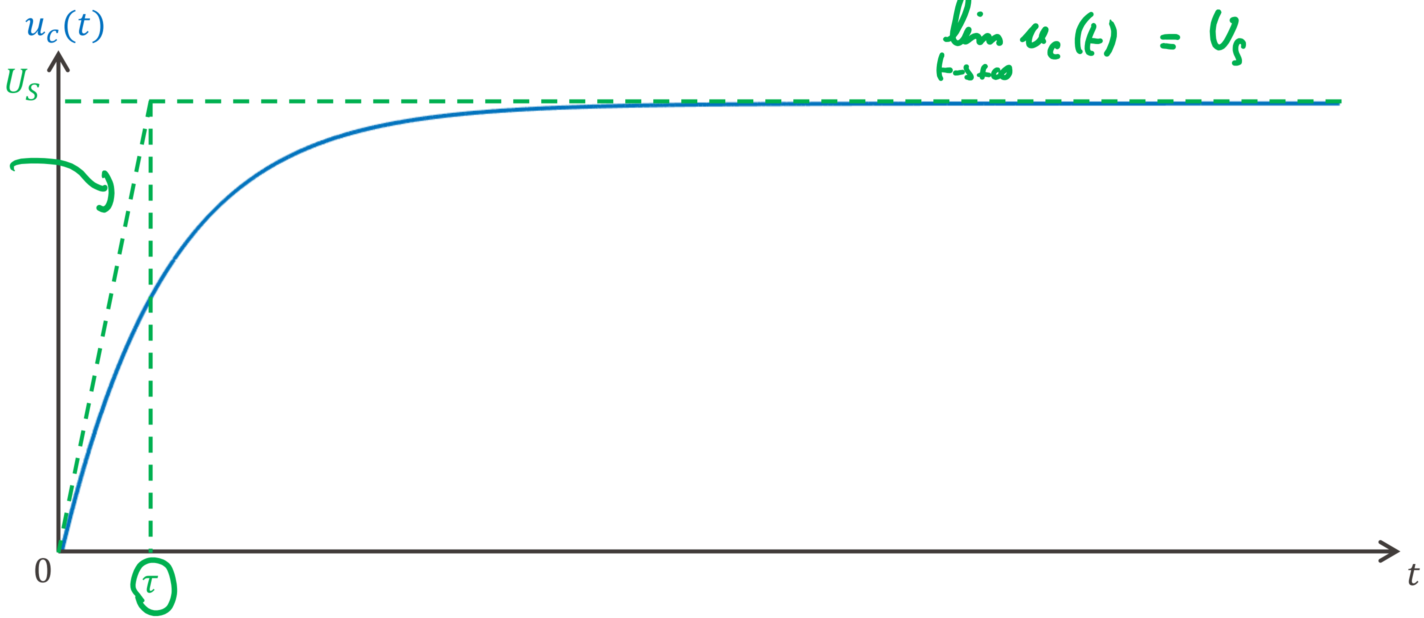
$$\boxed{u_c(t) = U_S\left(1 - e^{-t/\tau}\right)}$$

$$\tau = RC$$

$$\frac{du_c}{dt}(0) = \frac{U_s}{\tau}$$

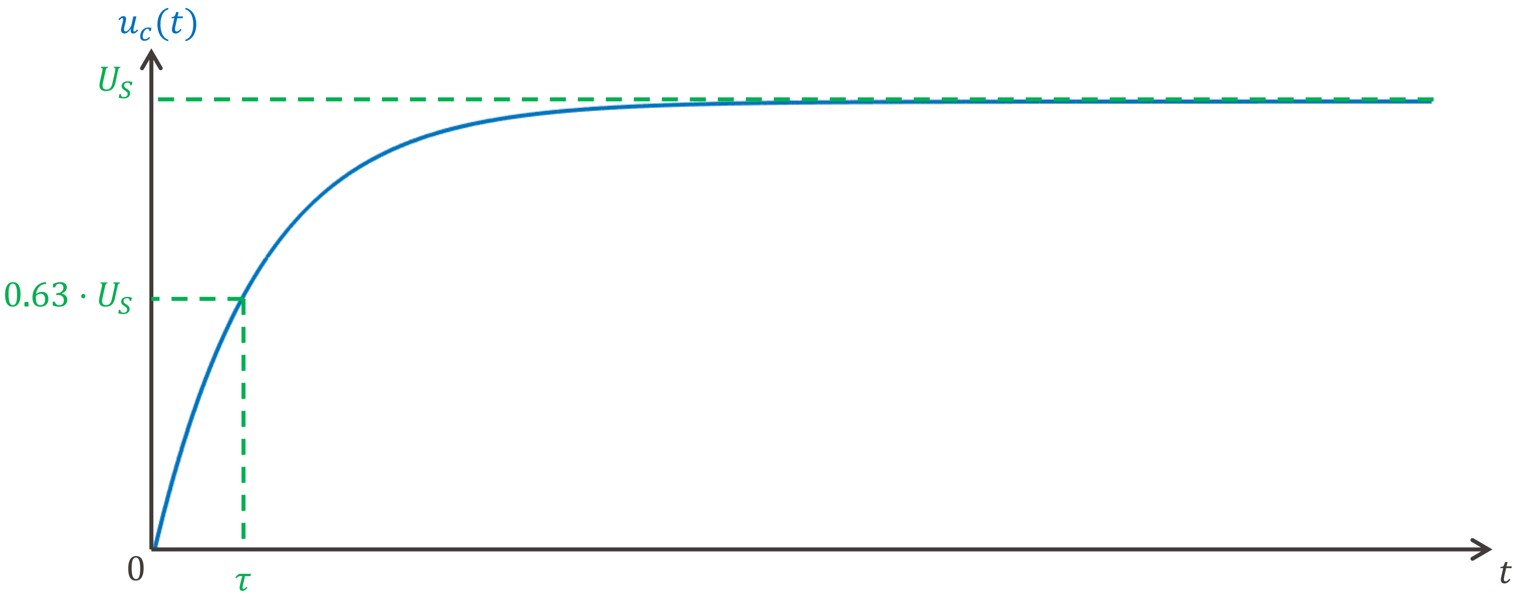
$$y = \frac{U_s}{\tau} t$$

$$\lim_{t \to +\infty} u_c(t) = U_s$$



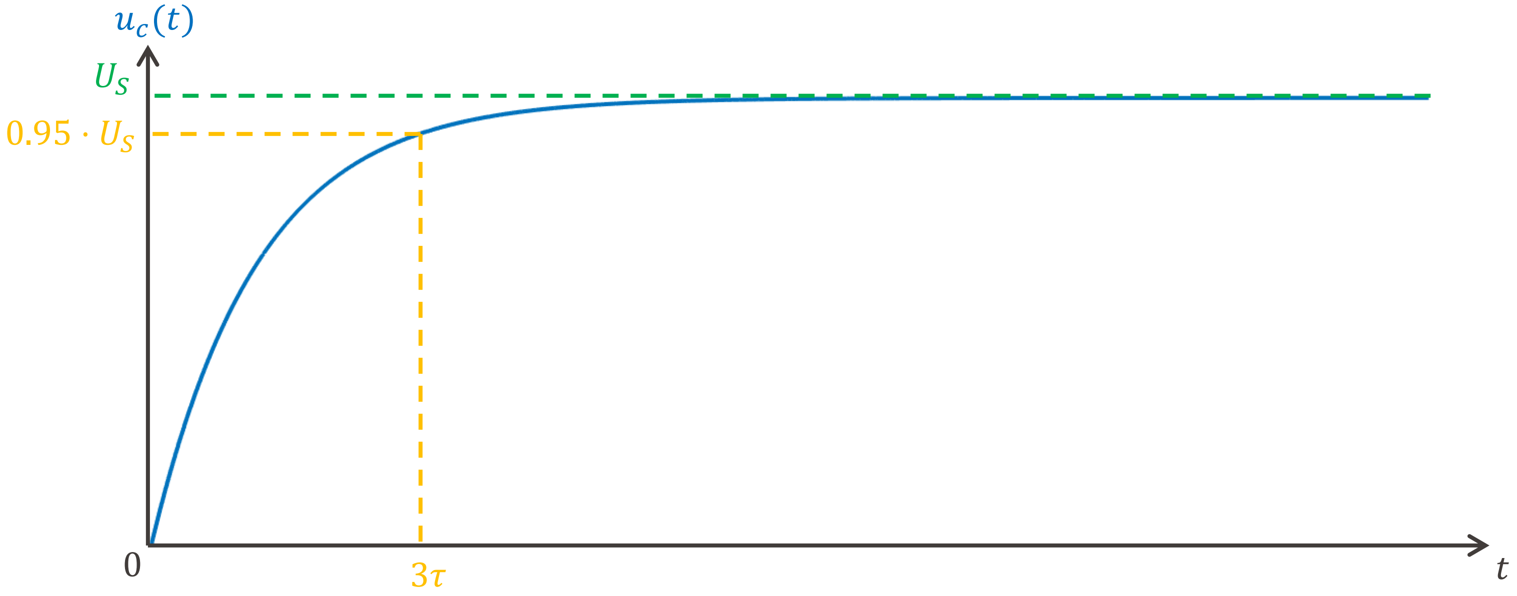
Circuit RC – charge du condensateur

$$\boxed{u_c(t) = U_S\left(1 - e^{-t/\tau}\right)}$$



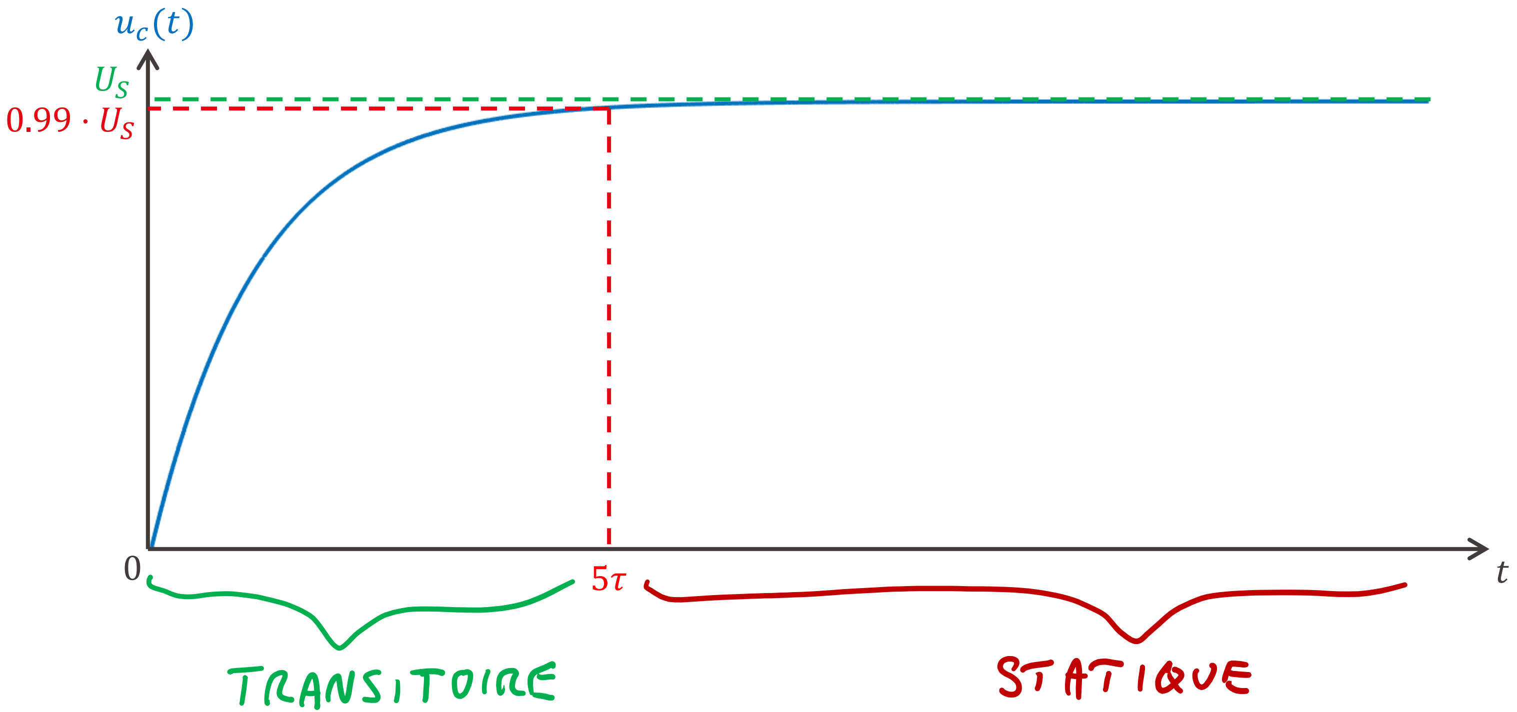
Circuit RC – charge du condensateur

$$\boxed{u_c(t) = U_S\left(1 - e^{-t/\tau}\right)}$$



Circuit RC

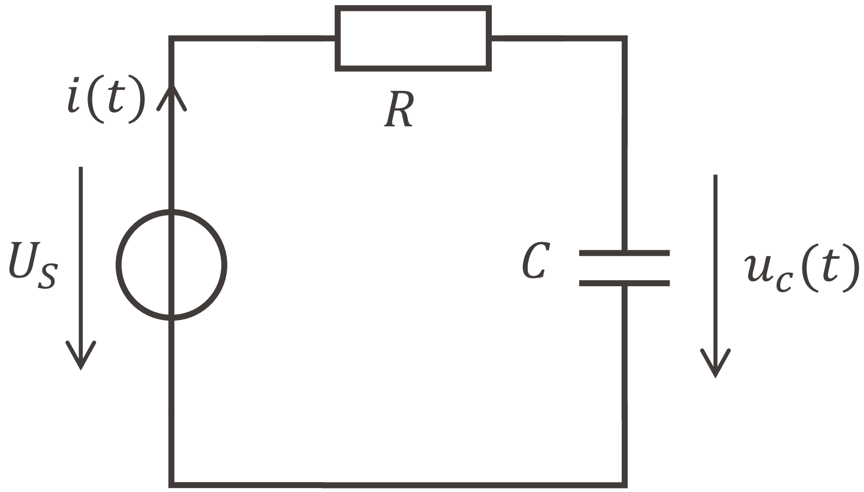
$$u_c(t) = U_S\left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$



Circuit RC – charge du condensateur

$i(t) = C \frac{du_c}{dt}(t)$

- On modélise un circuit dépendant du temps t:



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

$$\Rightarrow i(t) = \frac{CU_S}{\tau} e^{-t/\tau}$$

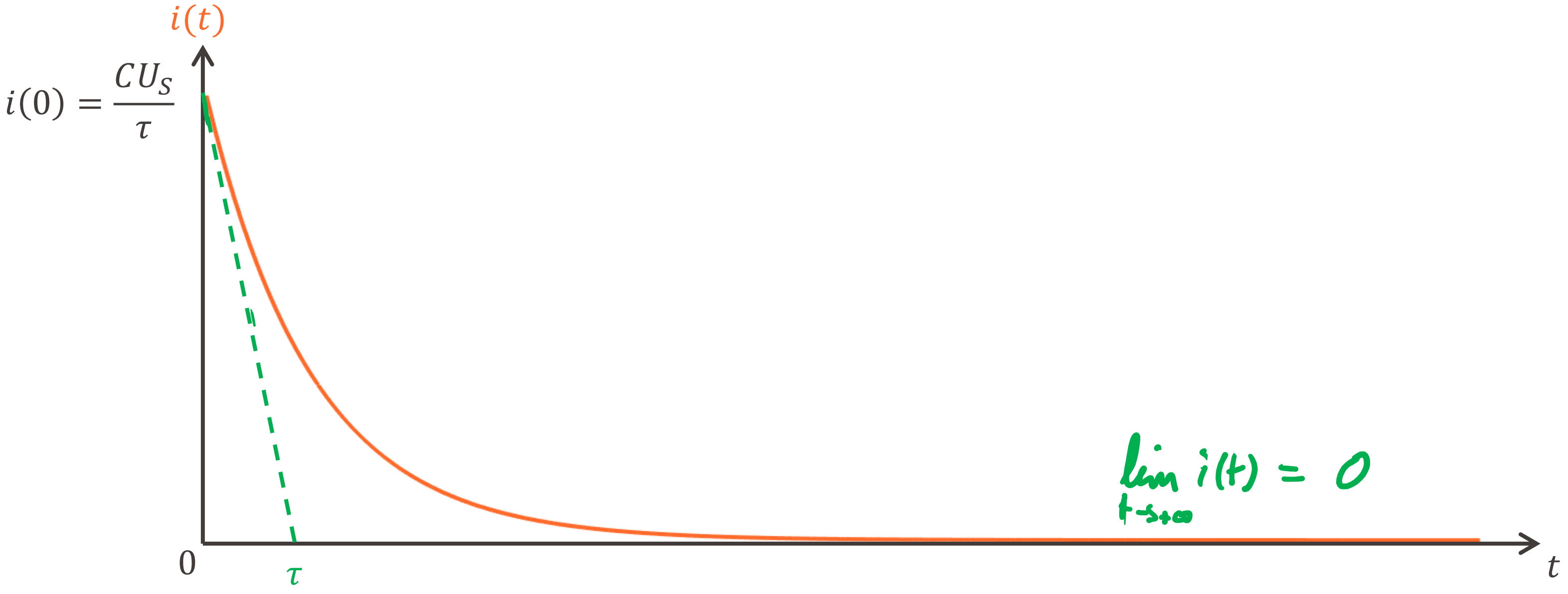
Condition initiale:

$u_c(0) = 0 \text{ V}$

C. Lafforgue

Circuit RC – charge du condensateur

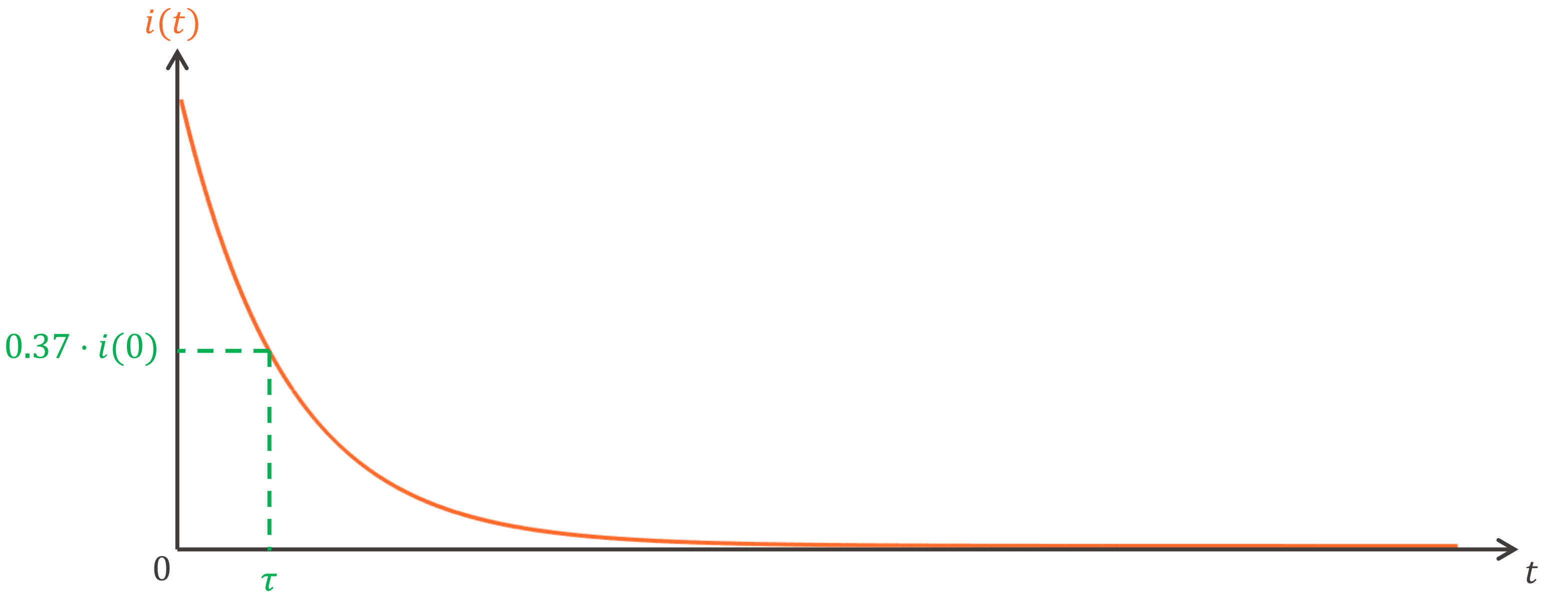
$$\boxed{i(t) = \frac{CU_S}{\tau} e^{-t/\tau}}$$



Circuit RC – charge du condensateur

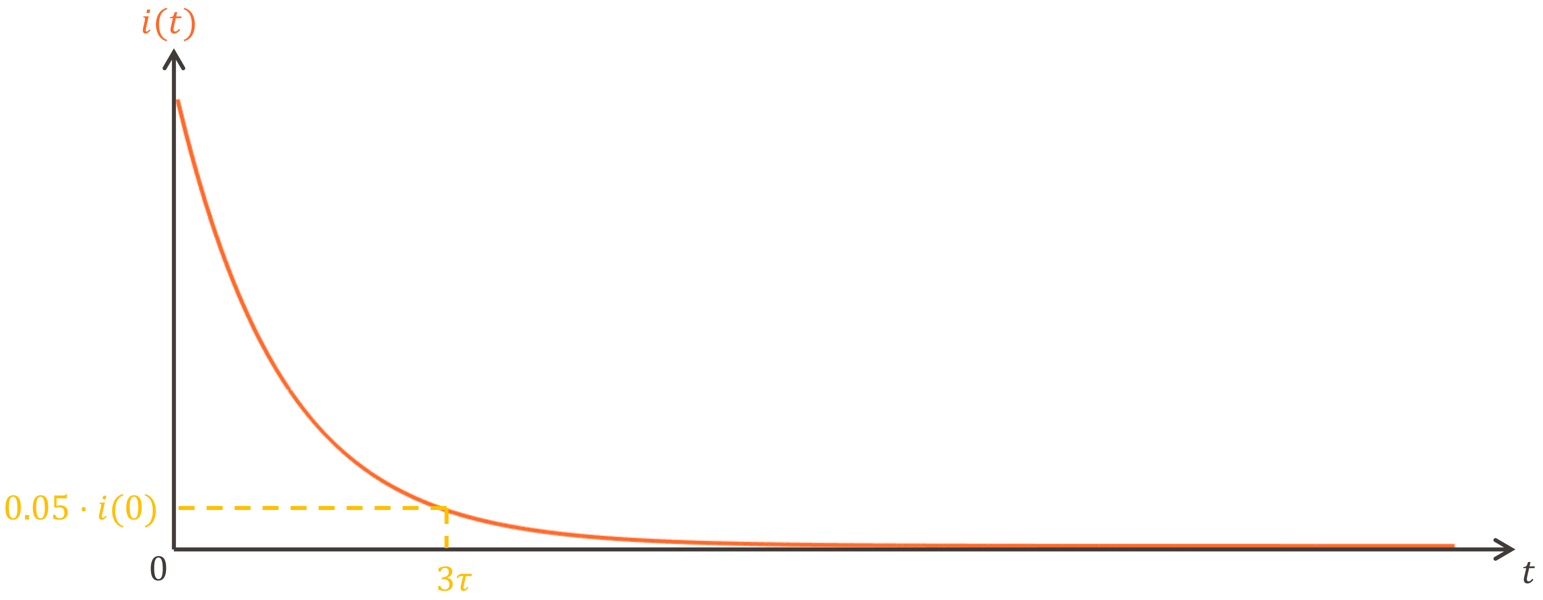
C. Lafforgue

$$\boxed{i(t) = \frac{CU_S}{\tau} e^{-t/\tau}}$$



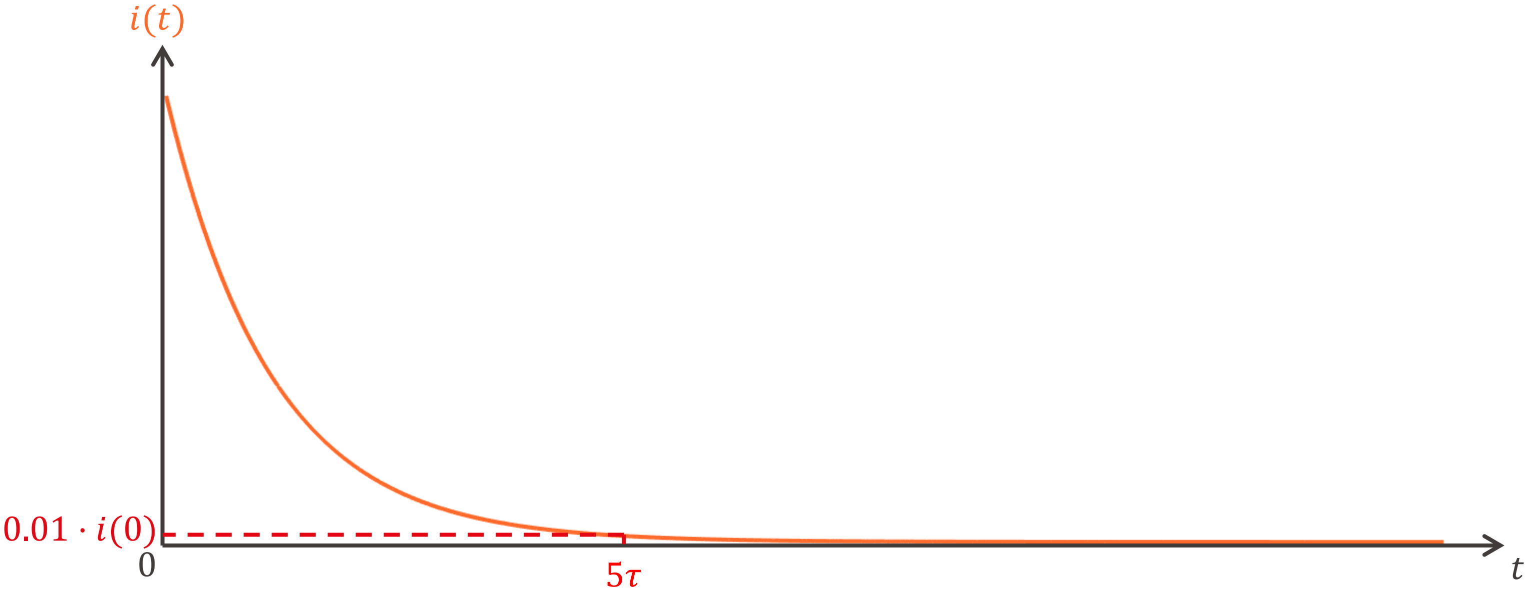
Circuit RC – charge du condensateur

$$i(t) = \frac{CU_S}{\tau} e^{-t/\tau}$$



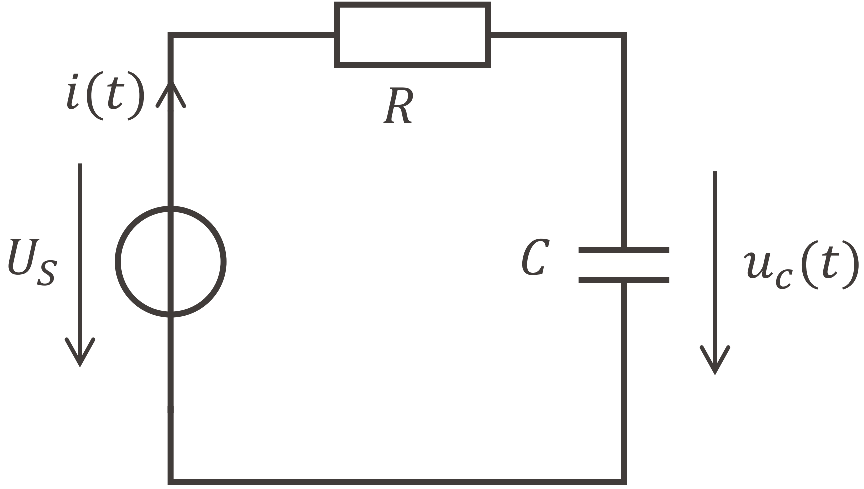
Circuit RC – charge du condensateur

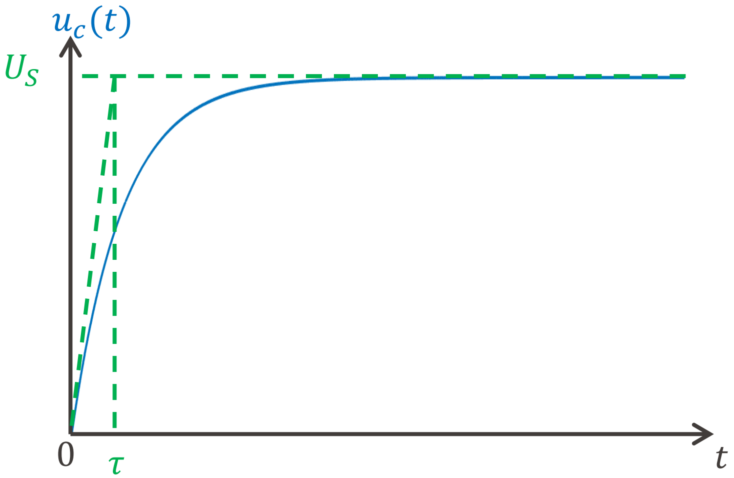
$$i(t) = \frac{C U_S}{\tau} e^{-t/\tau}$$



Circuit RC – charge du condensateur

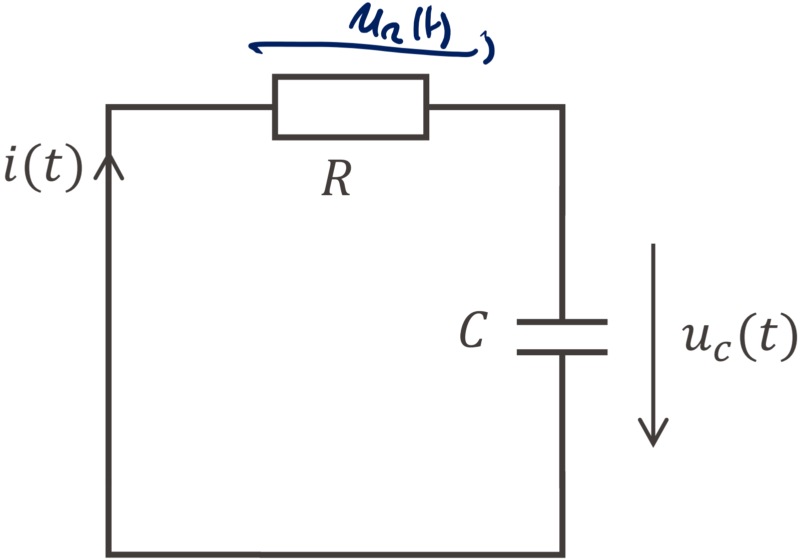
- Lorsque l'on alimente le circuit avec une source de tension, le condensateur se charge
  - La tension du condensateur tend vers une constante
  - Le condensateur est considéré chargé après 5τ (99% de la valeur finale)
  - Le courant tend vers 0 A, correspondant au régime statique





Circuit RC – décharge du condensateur

- On modélise un circuit dépendant du temps t:



Condition initiale:
$u_c(0) = U_0$

Loi des mailles :

$$u_R(t) + u_c(t) = 0$$

$$RC \frac{du_c}{dt}(t) + u_c(t) = 0$$

$$\frac{du_c}{dt}(t) + \frac{1}{\tau} u_c(t) = 0 \quad ; \quad \tau = RC$$

$$\Rightarrow u_c(t) = A e^{-t/\tau}$$

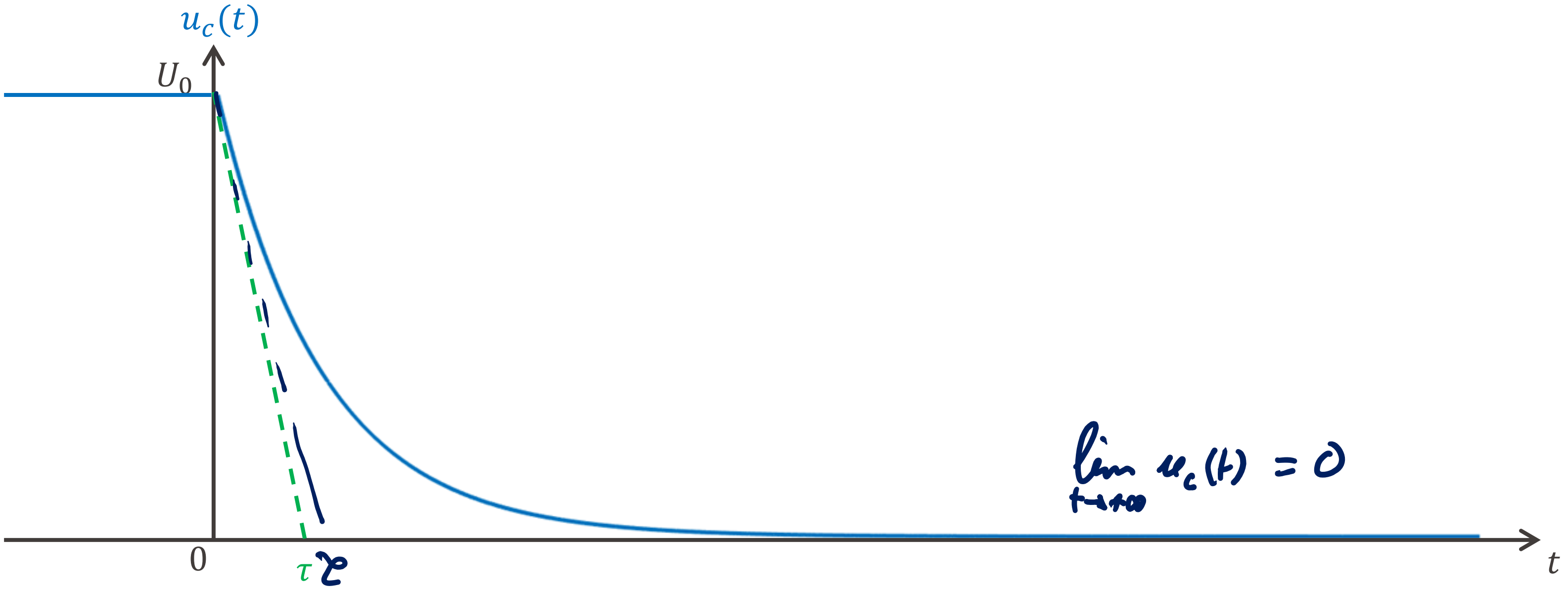
$$u_c(0) = U_0 \Rightarrow U_0 = A$$

$$\Rightarrow u_c(t) = U_0 e^{-t/\tau}$$

C. Lafforgue

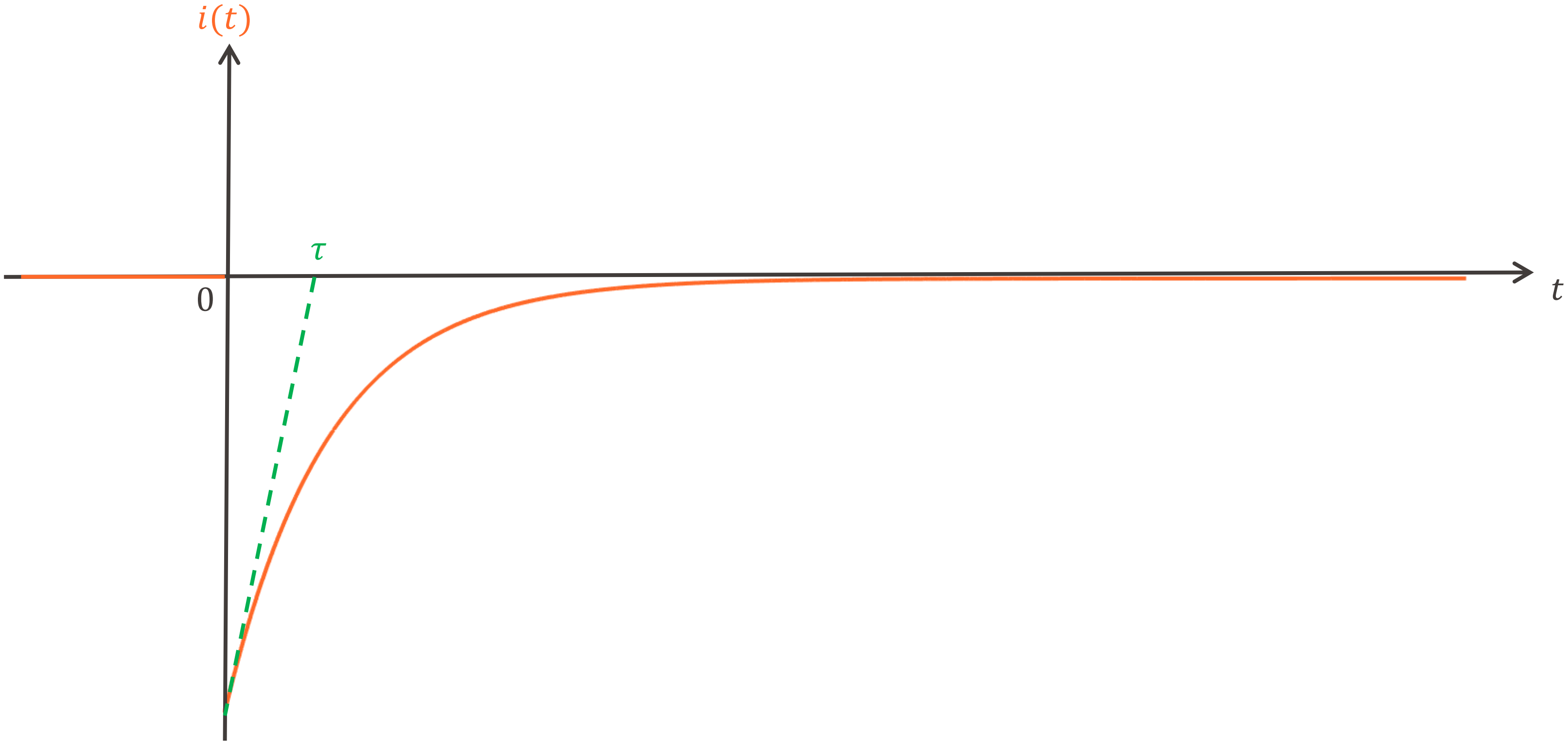
Circuit RC – décharge du condensateur

$$\boxed{u_c(t) = U_0 e^{-t/\tau}}$$



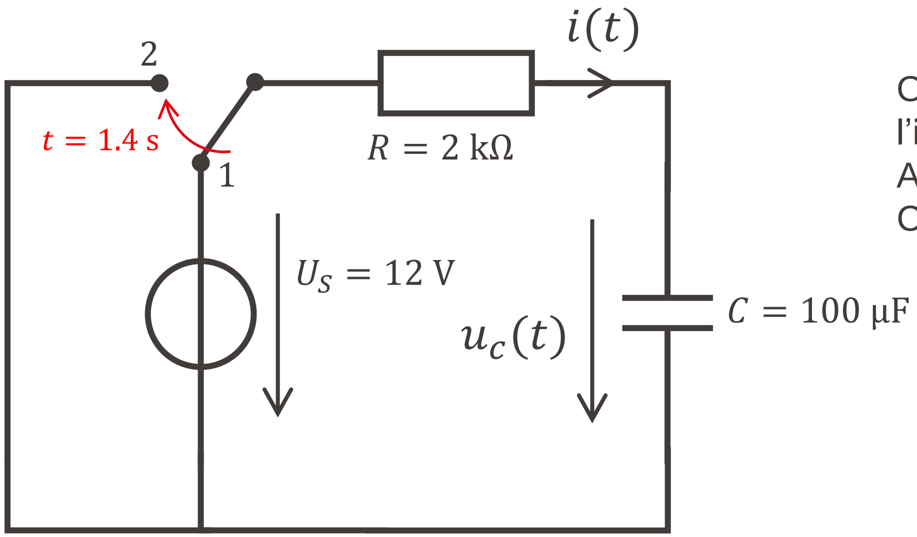
Circuit RC – décharge du condensateur

$$i(t) = -\frac{CU_0}{\tau} e^{-t/\tau}$$



Circuit RC – exemple

C. Lafforgue



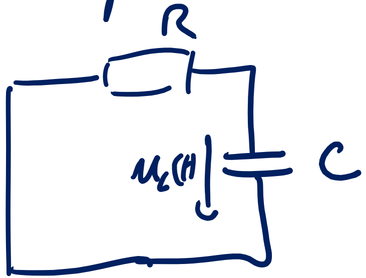
On considère le condensateur initialement déchargé et l'interrupteur est en position 1.
A $t = 1.4$ s, on bascule l'interrupteur en position 2.
Calculons $u_c(t)$ et $i(t)$

$$u_c(t) = U_s(1 - e^{-t/\tau})$$

$$\tau = RC = 200\text{ ms}$$

Circuit RC – exemple

on ferme l'interrupteur (à partir de $t = 1{,}4\,s$)



$t' = t - 1{,}4\,s$

$u_c(t') = A\, e^{-t'/\tau}$

$t' = 0 \rightarrow u_c = u_c(1{,}4\,s)$

$\tau = 200\,ms \rightarrow 5\tau = 1\,s < 1{,}4\,s$

$u_c(t'=0) = u_c(t = 1{,}4\,s) \simeq U_s$

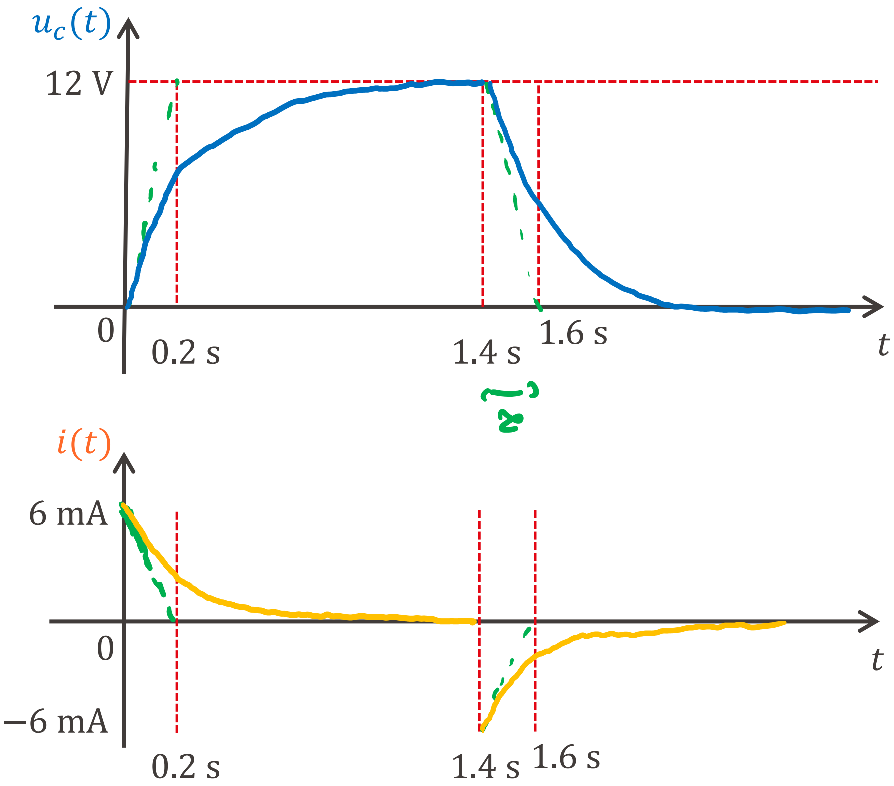
$u_c(t') = U_s\, e^{-t'/\tau}$

C. Lafforgue

Circuit RC – exemple

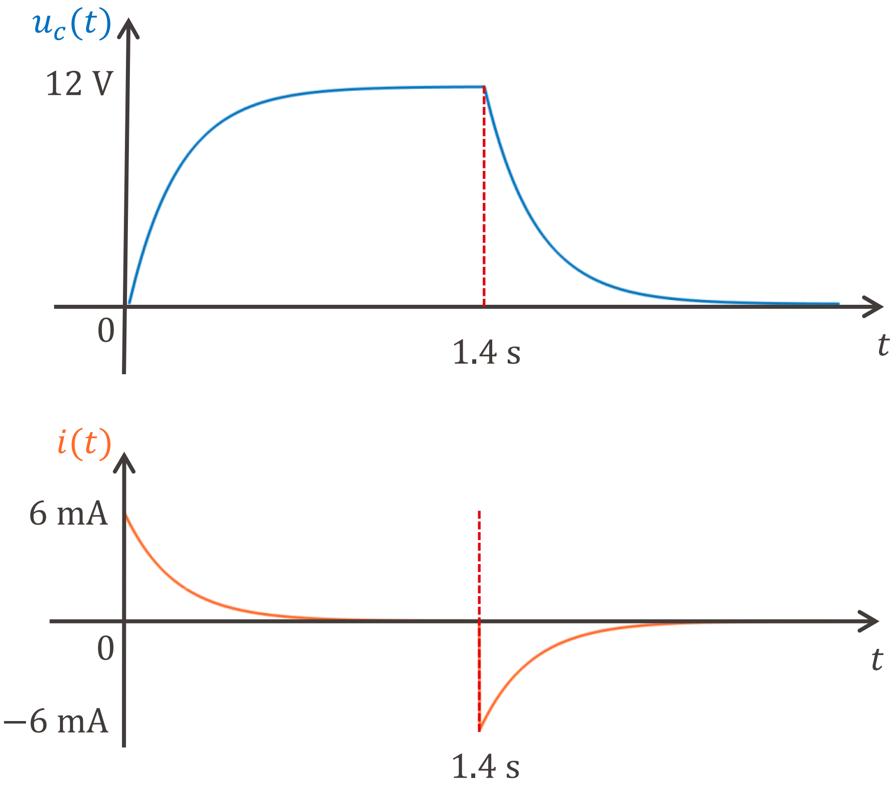
Circuit RC – exemple

Circuit RC – exemple



C. Lafforgue

Circuit RC – exemple



Points clés

- Un condensateur est un dipôle qui accumule de l'énergie électrostatique en condensant des charges proportionnellement à la tension:

$$\boxed{Q = CU}$$

- Le condensateur est caractérisé par sa **capacité**:

$$\boxed{C = \frac{\varepsilon S}{d}}$$

- L'énergie accumulée pour une tension U est:

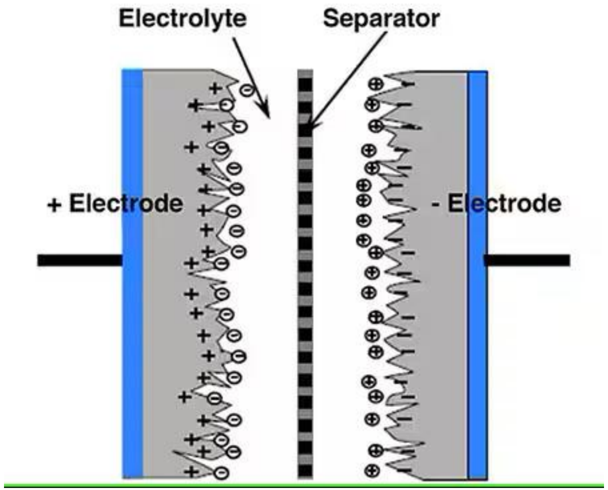
$$\boxed{W_c = \frac{1}{2} C U^2}$$

- En régime statique, le condensateur se comporte comme un circuit ouvert

Pour aller plus loin

- Aujourd’hui, il existe des condensateurs particuliers utilisés pour des applications nécessitant de fortes densités de puissance et d’énergie
  - Recharge rapide de véhicules électriques
  - Démarrage de moteurs
  - …
- Il s’agit des supercondensateurs
  - Délivrent plus de courant que les condensateurs conventionnels
  - Plus grande durée de vie que les batteries
  - Charges/décharges rapides comparativement aux batteries
- Ils ont des capacités entre le F et le kF!

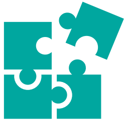
Pour aller plus loin



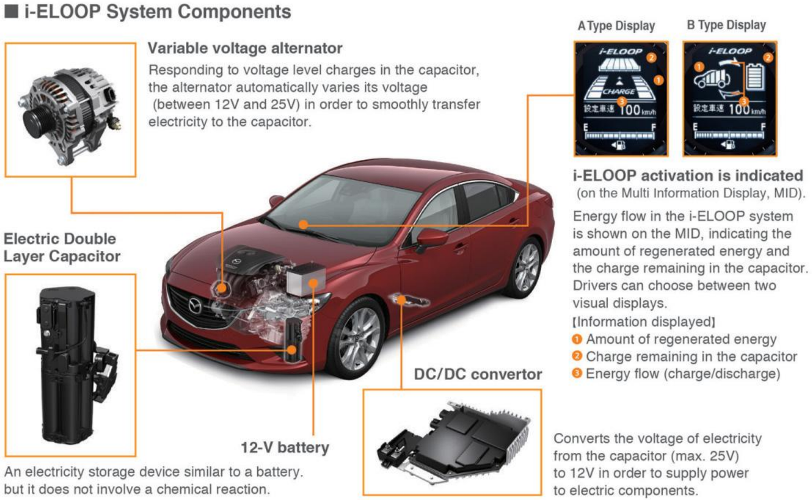
Pour aller plus loin

- Utilisés pour des recharges rapides
    - Exemple: système de recharge rapide pour bus électriques TOSA à Genève

Pour aller plus loin



- Utilisés pour récupérer de l'énergie lors de freinages
  - Exemple: système de récupération pour fonctions « start & stop » (i-ELOOP Mazda)
  - Exemple: alimentation ponctuelle d'excavatrice (6120B H FS Cat)



Merci pour votre attention

R. Dufy, « La fée électricité »
Musée d'art moderne, Paris