© Alexandre Parodi – Octobre 2009

RAPPELS ÉLÉMENTAIRES D'ÉLECTRICITÉ

Alexandre Parodi,
Professeur (en informatique) à l'UHP / ESIAL
alexandre.parodi@esial.uhp-nancy.fr

voir l'animation: *Diaporama / Visualiser ...*
avancer: *Barre d'espace ou clic souris*
reculer: *p*

© Alexandre Parodi – Octobre 2009

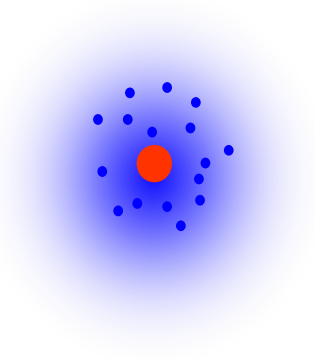
Électron = particule élémentaire
ponctuelle
de masse infime
et de **charge élémentaire** - e invariante

La charge se conserve

unité de charge = Coulomb, symbole **C**

m_e = 9,109 x 10^{-31} kg = 1 / 1835 masse atome H

e = 1,602 x 10^{-19} C



Atome = noyau massif de charge +Ze
entouré d'un nuage de Z électrons
en mouvement erratique.

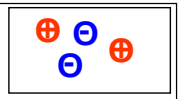
Dimension ≈ 1Å (Angtrom) = 0,1 nm = 10^{-10} m

Exemple: l'atome de silicium Si a Z=14 électrons

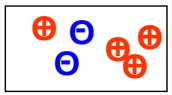
PHYSIQUE ATOMIQUE

© Alexandre Parodi – Octobre 2009

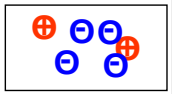
Zone **neutre**: sa **charge** totale est **nulle**
autant de charges positives +e que de charges négatives -e



Zone **chargée positivement**: sa **charge** totale est **positive**
plus de charges positives +e que de charges négatives -e

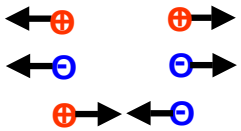


Zone **chargée négativement**: sa charge totale est négative
moins de charges positives +e que de charges négatives -e

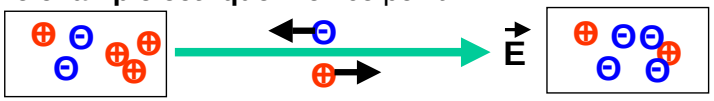


Deux charges de **même** signe se **repoussent**

Deux charges de signe **contraire s'attirent**



On peut résumer l'effet en un point M de toutes les charges par
le **champ électrique** $\vec{E}$ en ce point:

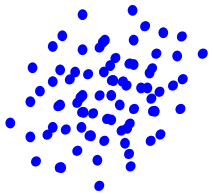


La force électrostatique $\vec{f}$ subie par une particule au point M de charge q =

$\vec{f} = q\,\vec{E}$

ÉLECTROSTATIQUE

© Alexandre Parodi – Octobre 2009



Électricité = gaz de particules chargées
(souvent des électrons)

≈ fluide électrique

Quantité d'électricité = charge électrique du fluide

Vis à vis de l 'électricité, un matériau peut être:

• **Conducteur**: *(Métaux, eau salée, flamme ...)* il contient de ***nombreuses particules chargées mobiles*** qui peuvent circuler librement **dans** le matériau (mais pas en sortir); par exemple, dans un métal, les particules chargées mobiles sont les électrons libérés par **chacun** des atomes.
Le conducteur est généralement neutre.

• **Isolant**: *(verre, SiO_2, bois sec, plastique, huile, air, vide ...)*
aucune charge mobile: l'électricité ne peut pas y circuler

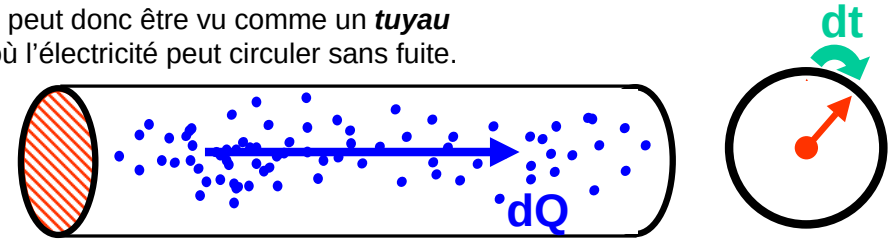
• **Semi-conducteur**: *(Carbone, Silicium, Germanium)* seuls **quelques** atomes libèrent des **électrons mobiles**: ***peu d'électricité peut donc s'y déplacer***.

ÉLECTRICITÉ MATÉRIAUX

© Alexandre Parodi – Octobre 2009

Un **fil électrique** est un cylindre **conducteur**

Il peut donc être vu comme un ***tuyau***
où l'électricité peut circuler sans fuite.

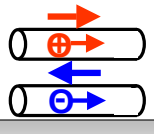


Courant électrique ou **intensité** électrique =
débit d'électricité dans le tuyau,
= **charge électrique qui y passe par unité de temps** : $i = dQ / dt$

L'unité de courant est donc l'unité de charge / unité de temps = 1 C / s
appelé **Ampère, de symbole A:** $1A = 1C/s$

Sens du courant réel:

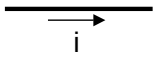
- sens de circulation des charges si elles sont positives
- sens **contraire** si elles sont **négatives.**
(dettes partent = argent vient).



COURANT ÉLECTRIQUE

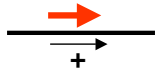
© Alexandre Parodi – Octobre 2009

On peut indiquer arbitrairement un **sens de référence** par une flèche.



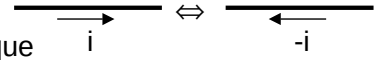
L'**intensité algébrique** i est :

- **positive** ⇔ sens du **courant réel** est dans le **même sens** que la référence



- **négative** ⇔ sens du **courant réel** est dans le **sens contraire**.

Si on **change le sens** de référence,
on **change le signe** de l 'intensité algébrique



INTENSITÉ ALGÈBRIQUE

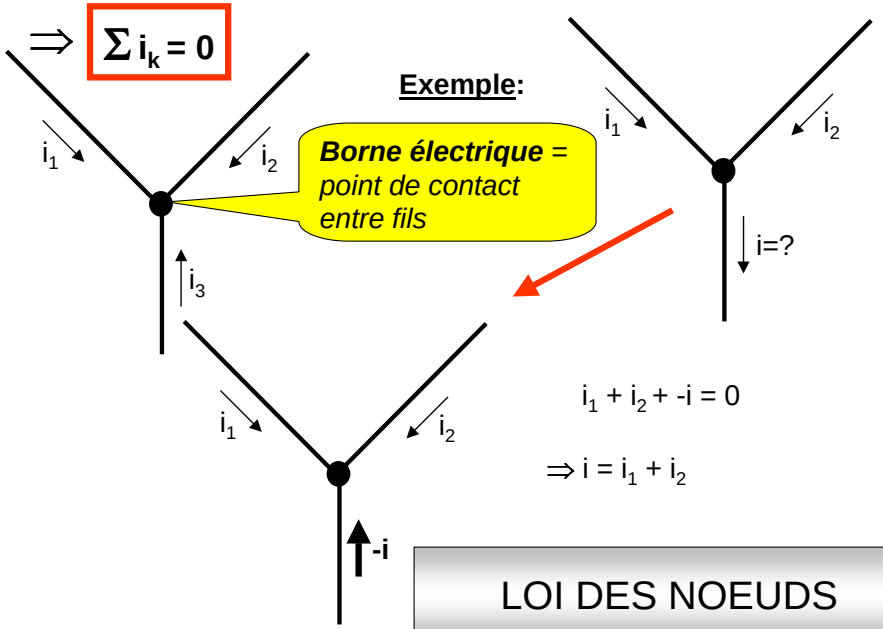
© Alexandre Parodi – Octobre 2009

- La charge se conserve
- pas d'accumulation ici

La somme des intensités algébriques *convergeant* vers un même point est nulle.

$\Rightarrow \Sigma i_k = 0$

Exemple:

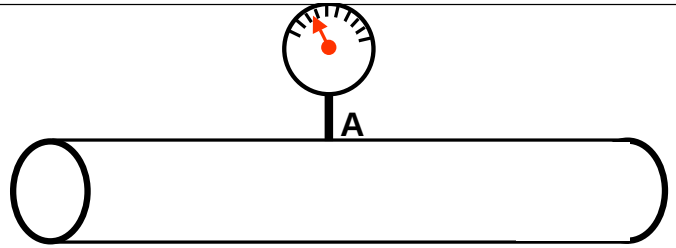


$i_1 + i_2 + -i = 0$

$\Rightarrow i = i_1 + i_2$

LOI DES NOEUDS

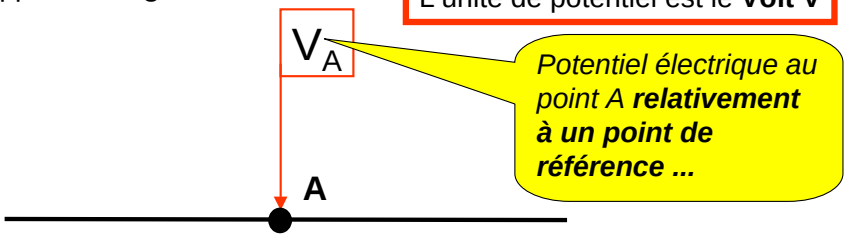
© Alexandre Parodi – Octobre 2009



En hydraulique, on peut mesurer la pression en chaque point d'un circuit.

L'analogue de la pression en électricité est le **potentiel électrique**
aussi appelé **voltage** ou **tension**.

L'unité de potentiel est le **Volt V**



il se représente avec un drapeau piqué en A et étiqueté par sa valeur

POTENTIEL ÉLECTRIQUE

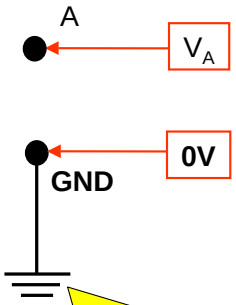
© Alexandre Parodi – Octobre 2009

... on ne peut pas définir un potentiel électrique sans référence !

Le potentiel électrique d'un point A est donc défini *relativement* au **point de référence des potentiels GND:**

Par définition, **ce point de référence a le potentiel zéro**.

En général, le point de référence des potentiels est appelé **masse**, «GrouND» (abrégé : **GND**)



Il est généralement relié au **chassis** du système.

Quand c'est possible, il est relié à la **terre**, par le point central de la prise d'alimentation

Il est *souvent* relié au pôle - de la pile.

Ce symbole graphique symbolise un pieux planté en terre et signifie «masse», GND même s'il n'est pas relié à la terre

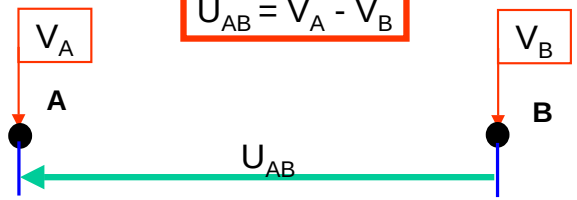
Analogie: un manomètre ne mesure pas la pression absolue d'un pneu mais sa pression relativement à la pression atmosphérique

POINT DE RÉFÈRENCE DES POTENTIELS

© Alexandre Parodi – Octobre 2009

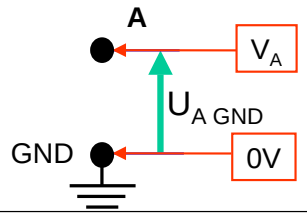
La **différence de potentiel** (**d.d.p.**) entre deux points A et B se note U_{AB}

$$U_{AB} = V_A - V_B$$



*La d.d.p. U_{AB} «de A (relativement) à B» se représente avec une flèche **de B vers A** étiquetée par sa valeur*

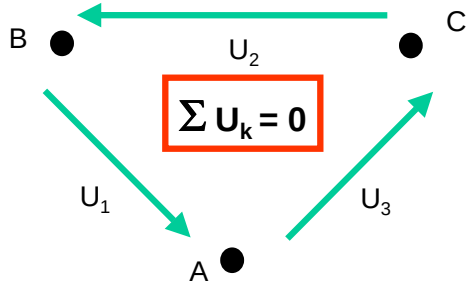
Si on change le sens de la flèche on change aussi le signe de la d.d.p.



$$V_A = U_{A\,GND}$$

DIFFÉRENCE DE POTENTIEL ÉLECTRIQUE

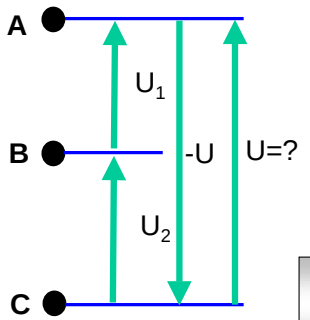
© Alexandre Parodi – Octobre 2009



$$U_1 + U_2 + U_3 = V_A - V_B + V_B - V_C + V_C - V_A = 0$$

La somme des d.d.p. orientées dans le même sens autour d'une maille est nulle.

Exemple:



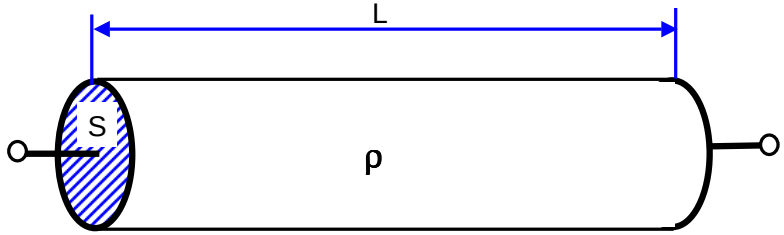
$$U_1 + U_2 + (-U) = 0$$

$$\Rightarrow U = U_1 + U_2$$

LOI DES MAILLES

© Alexandre Parodi – Octobre 2009

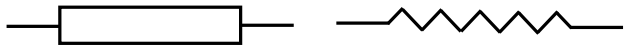
Une résistance est un dipôle résistant au passage du courant



C 'est un **dipôle** car il a deux pôles, ou bornes extérieures.

Sa **résistance R** se mesure en **Ohms de symbole Ω**

Elle se représente par un fin rectangle ou un zig-zag:

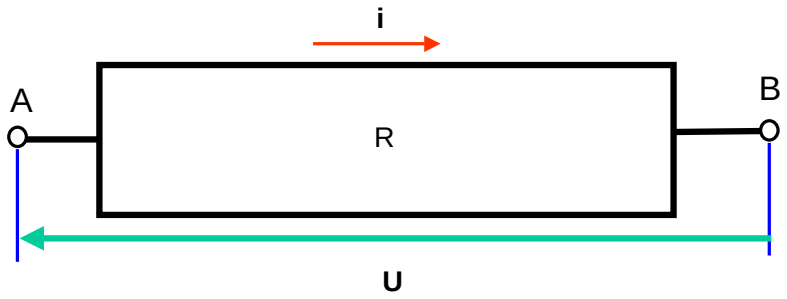


Pour un barreau de longueur L, de section S dont le matériau a une **résistivité ρ** :

$$R = \rho \times L / S$$

RÉSISTANCE

© Alexandre Parodi – Octobre 2009



$$U = R \times i$$

Exemple:

$R=0 \Rightarrow U_{AB} = 0 \times i = 0 \Rightarrow V_A - V_B = 0 \Rightarrow V_A = V_B$

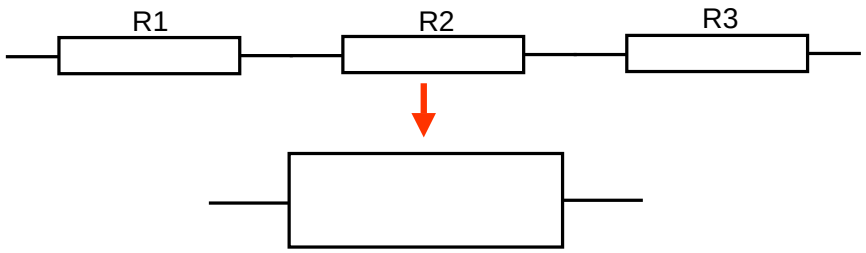
Deux points reliés par un fil parfaitement conducteur (de résistance nulle) sont au même potentiel

Un fil transporte le potentiel électrique entre deux bornes ...
Mais il faut aussi transporter le potentiel de référence pour la mesure à l'arrivée !

LOI D'OHM

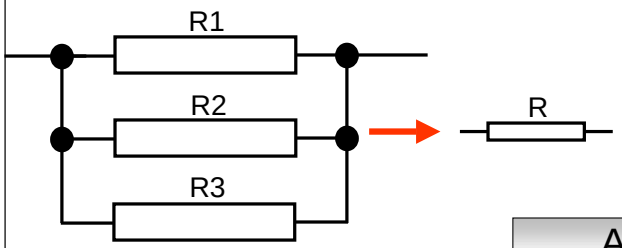
© Alexandre Parodi – Octobre 2009

Résistances en série:



$$R = R1 + R2 + R3$$

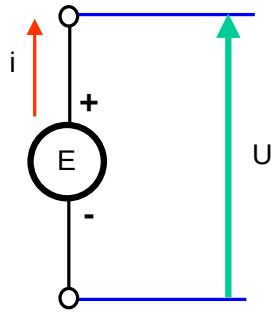
Résistances en parallèle:



$$R = R1 // R2 // R3 = 1/(1/R1 + 1/R2 + 1/R3)$$

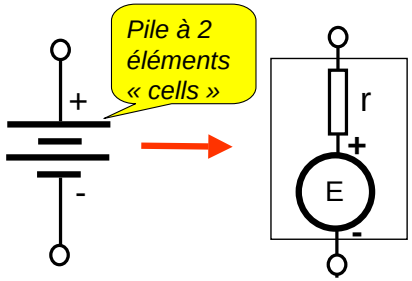
ASSOCIATION DE RÉSISTANCES

© Alexandre Parodi – Octobre 2009



≠ champ électrique

Un **générateur de tension** parfait de **force électromotrice** (f.e.m.) **E** est «une pompe à charge» qui maintient une d.d.p. **U = E** entre ses bornes ***quel que soit*** le courant i débité.



Un **vrai générateur** (e.g.une pile) équivaut à un générateur de tension parfait de f.e.m. E avec une petite **résistance interne** r **en série** .

La d.d.p. U à ses bornes dépend alors du courant i débité selon:

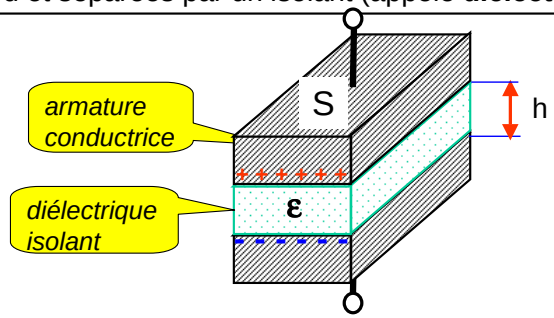
$$U = E - r\,i$$

Les lumières baissent quand le démarreur tourne

GÉNÉRATEUR

© Alexandre Parodi – Octobre 2009

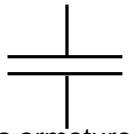
Un **condensateur** est un dipôle constitué de deux armatures conductrices en regard et séparées par un isolant (appelé **diélectrique**).



Elles peuvent se charger d'électricité en surface interne.

Sa **capacité C** se mesure en **Farads**, symbole **F**

Il se représente par:



Pour un condensateur plan dont les armatures de surface en regard S sont à la distance h et dont le diélectrique a une **permittivité ε** :

$$C = \varepsilon S / h$$

$$\varepsilon = \kappa\,\varepsilon_0$$

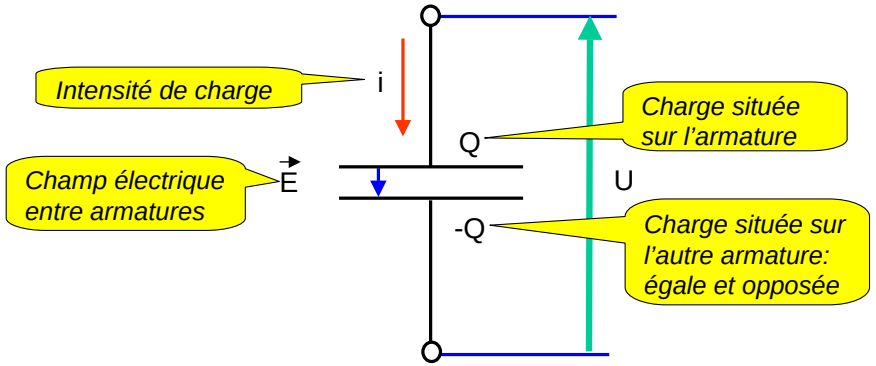
Permittivité relative

$\varepsilon_0 = 8{,}854$ pF/m

Permittivité du vide

CONDENSATEUR

© Alexandre Parodi – Octobre 2009



$Q = C \times U$

Vitesse de variation de charge

$dQ / dt = i$

Dans un condensateur plan, le champ électrique E entre les armatures séparées d'une distance h vaut :

$E = U / h$

LOIS DES CONDENSATEURS

© Alexandre Parodi – Octobre 2009

Une particule de charge q du diélectrique subit un champ électrique E et est donc soumise à une force:

$f = E\,q$

Les cristaux qui le constituent étant constituées de particules de charge - et d'autres de charge +, ils sont soumis à des forces antagonistes qui peuvent les rompre si le champ est trop élevé.

Par conséquent, le champ doit rester inférieur au champ de claquage $E_{breakdown}$

$E < E_{breakdown}$

Il en résulte que la d.d.p. à ses bornes doit être limitée à $U_{breakdown}$:

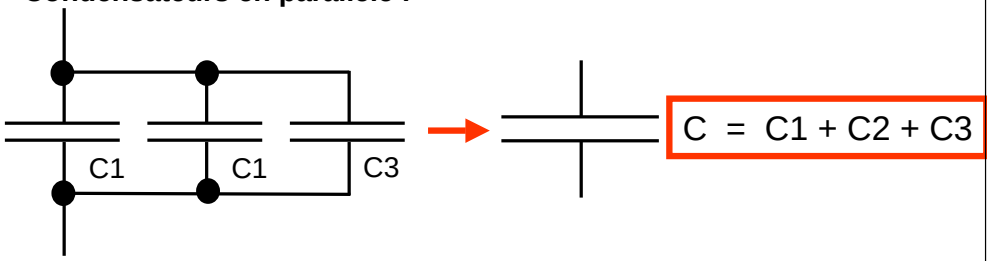
$E = U / h < E_{breakdown} \Rightarrow U < h\,E_{breakdown}$

$U < U_{breakdown}$ $\quad$ $U_{breakdown} = h\,E_{breakdown}$

CLAQUAGE D'UN CONDENSATEUR

© Alexandre Parodi – Octobre 2009

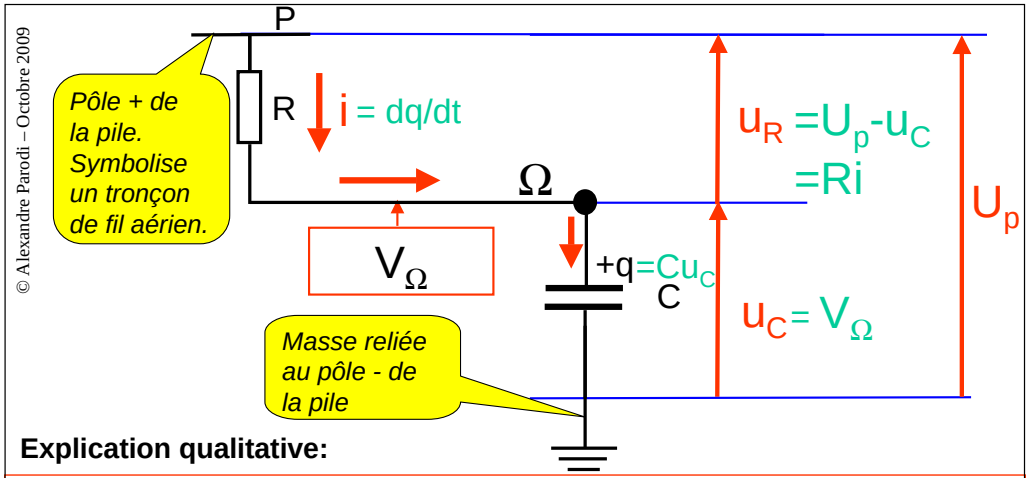
Condensateurs en parallèle :



$C = C1 + C2 + C3$

ASSOCIATION DE CONDENSATEURS

© Alexandre Parodi – Octobre 2009



Explication qualitative:

• Au début le condensateur est déchargé, donc q=0 et u_c=q/C=0.
De ce fait, la d.d.p. aux bornes de la résistance $u_R = U_p - u_c = U_p - 0 = U_p$ est forte: le courant $i = u_R/R$ chargeant le condensateur est fort aussi: q et donc u_c montent vite.
• Puis, au fur et à mesure que le condensateur se charge, q augmente, u_c =q/C croit, et donc $u_R = U_p - u_c$ décroit : le courant i faiblit et la montée de u_c ralentit.
• Enfin u_c atteind U_p: alors u_r=0 et donc i=0: la charge q et donc u_c n'augmentent plus.

CHARGE DU CONDENSATEUR: MODÉLISATION

© Alexandre Parodi – Octobre 2009

$V_\Omega = u_C$ $\quad u_R = R\,i$

$q = C\,u_C$ $\quad u_R = U_p - u_c$

$i = dq/dt$

5 équations et 6 variables.
On voudrait connaître $V_\Omega(t)$:
on établit une relation entre V_Ω et t en éliminant les autres variables

Etablissement de l'équation différentielle:

Équation différentielle du 1er ordre (dérivée 1ère seulement).

$i = dq/dt = dCu_c/dt = C\,du_c/dt = C\,dV_\Omega/dt$

$u_R = U_p - u_c = U_p - V_\Omega$

$u_R = R\,i = R\,C\,dV_\Omega/dt$

$\Rightarrow RC\,dV_\Omega/dt = U_p - V_\Omega$

Intégration de l'équation différentielle:

U_p constant

$dV_\Omega/dt \,/\, (V_\Omega - U_p) = -1/(RC) \Rightarrow d(V_\Omega - U_p)/dt \,/\, (V_\Omega - U_p) = -1/(RC)$

$d\,\mathrm{Ln}(V_\Omega - U_p)/dt = -1/(RC) \Rightarrow \mathrm{Ln}(V_\Omega - U_p) = -t/(RC) + C_0$

Constante d 'intégration

$\Rightarrow V_\Omega - U_p = \exp(-t/(RC) + C_0) = \exp(-t/(RC)) \times \exp(C_0) = \exp(-t/(RC)) \times C_1$

$\Rightarrow V_\Omega = \exp(-t/(RC)) \times C_1 + U_p$

Solution avec une constante inconnue C_1

***Détermination de la constante** par utilisation d'une condition aux limites:*

$t=0 \Rightarrow V_\Omega = 0 \quad \Rightarrow \exp(-0/(RC)) \times C_1 + U_p = 0 \quad \Rightarrow C_1 + U_p = 0 \quad \Rightarrow C_1 = -U_p$

$\Rightarrow V_\Omega = \exp(-t/(RC)) \times (-U_p) + U_p = U_p - U_p \exp(-t/(RC))$

$$\Rightarrow V_\Omega = U_p\left(1 - e^{-t/(RC)}\right)$$

CHARGE DU CONDENSATEUR: RÉSOLUTION

© Alexandre Parodi – Octobre 2009

La puissance p est le débit d'énergie W :
c'est l'énergie par unité de temps

$p = dW/dt$

L'unité d 'énergie est le Joule **J**

L'unité de puissance est le Watt **W**

La puissance électrique instantanée fournie à un appareil est: $p = u \times i$

L'énergie fournie à une résistance R est entièrement transformée en chaleur

Pour éviter que sa température ne s'élève trop,
la puissance qu'elle peut dissiper est donc limitée : $p < p_{max}$

$u = R \times i \quad \Rightarrow p = R \times i^2$

$i = u/R \quad \Rightarrow p = (1/R) \times u^2$

L'énergie totale W envoyée dans une résistance
par une d.d.p. u(t) au cours du temps t est donc :

$$W = \int_{t=-\infty}^{t=+\infty} dW \qquad \int_{-\infty}^{+\infty} p\,dt \Rightarrow W = (1/R) \times \int_{-\infty}^{+\infty} u^2\,dt$$

Cette formule est utilisée en Traitement du Signal

PUISSANCE ÉLECTRIQUE