L’électronique EZE*

*électronique et zyztèmes embarqués
* prononcé “easy”

1. **Composants passifs en RF**
   - Bobin’athlon & TP schéma équivalent
2. **Ondes dans une ligne de transmission**
   - TP propagation dans un câble coaxial
3. **Recepteur radio & antenne**
   - TP modulation & SAE Radiogoniométrie
4. **Smith, Paramètres [S] et adaptation d’impédance**
   - Escape Smith
5. **Analyseur de réseaux (VNA)**
   - Mini projet caractérisation boite noire
6. **Modulations numériques**
   - Hack d’un coffre fort pédagogique

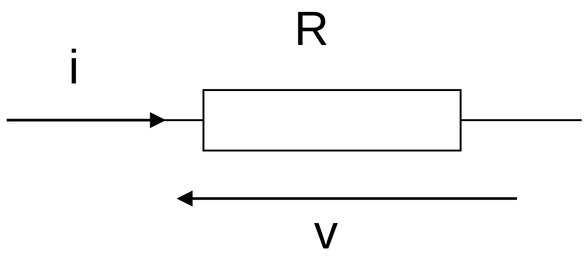
Composants passifs

Quand les codensateurs deviennent inductifs et les inductances capacitives...

Claude Pellet / Olivier Briat

2018-2019

Les composants idéaux en régime sinusoïdal



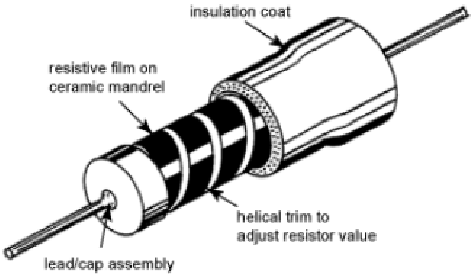
$$V = R\,i$$

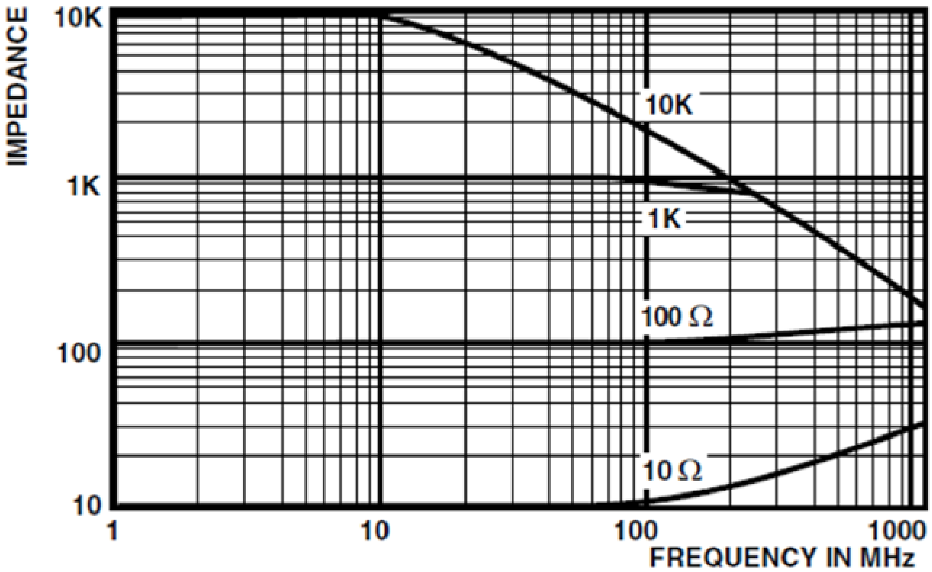
$$\underline{V} = \underline{Z}\,\underline{I} = R\,\underline{I}$$

$$\boxed{\underline{Z}_R = R}$$

La résistance idéale est constante quand la fréquence varie

La résistance réelle
technologie traversante à couche de carbone

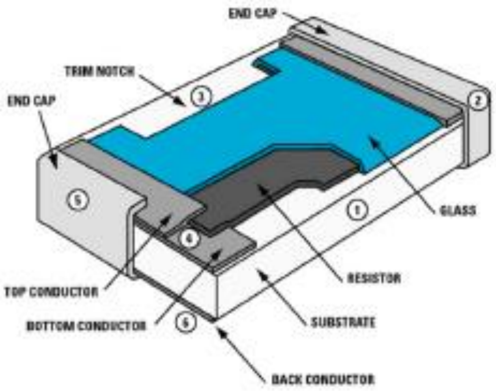


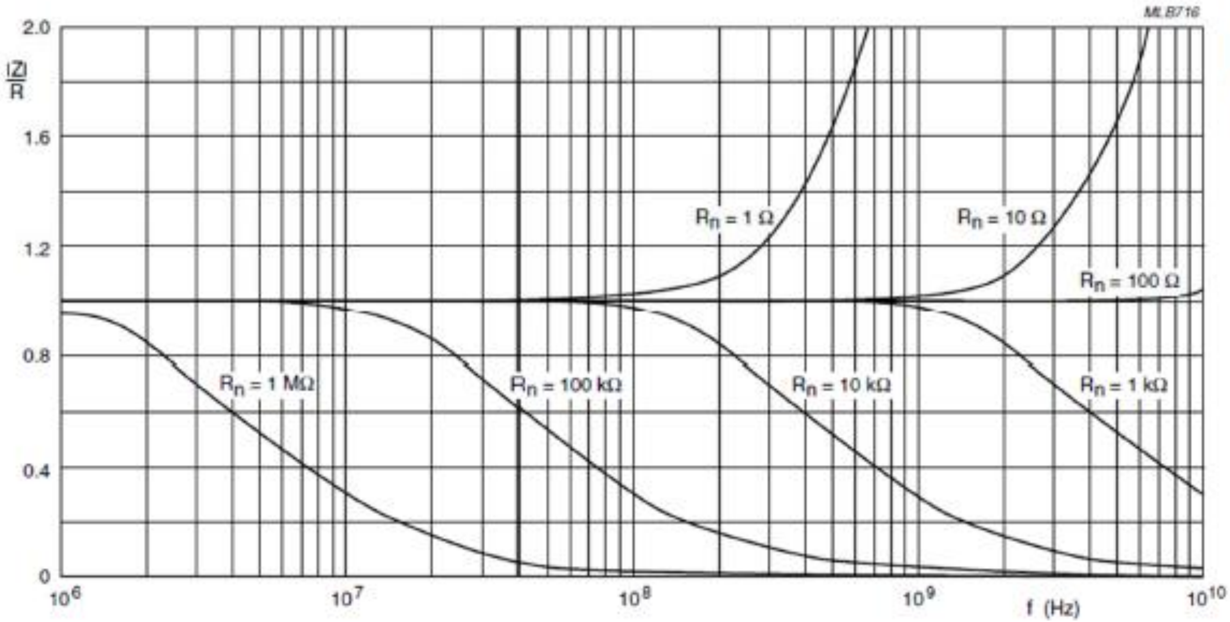


Extrait datasheet Vishay
série E24, 1/4W
www.vishay.com

La résistance réelle

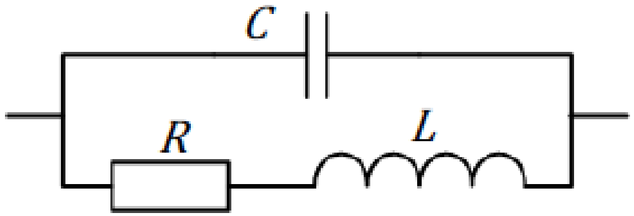
technologie CMS





Extrait datasheet Vishay
boîtier 0603 (1.6mmx0.8mm)
www.vishay.com

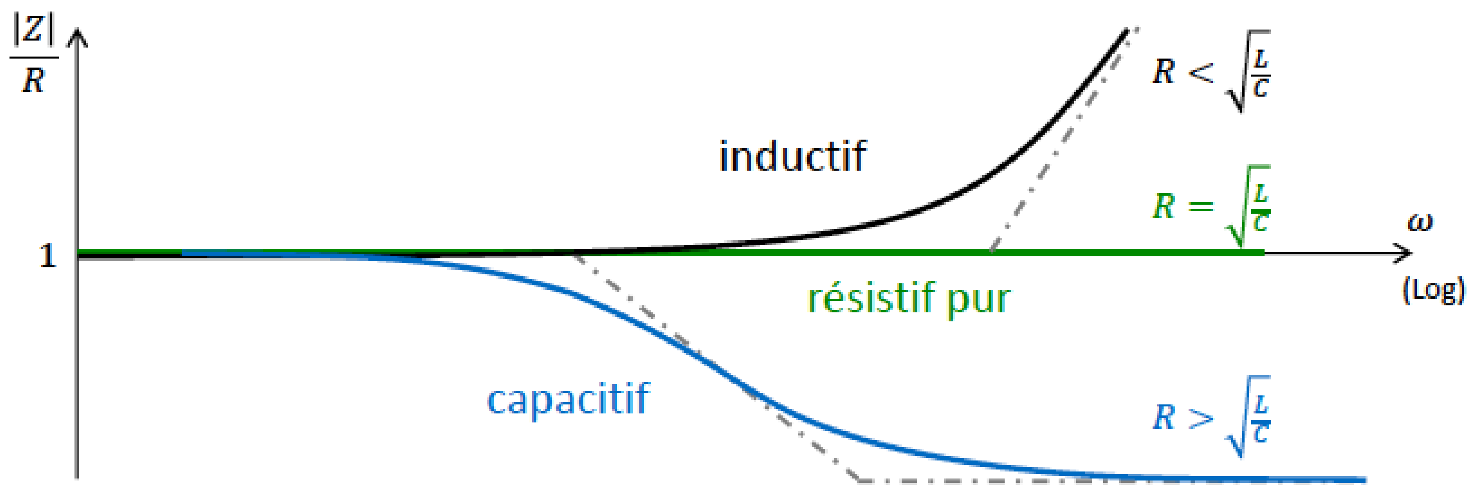
La résistance réelle
modèle équivalent



$$\underline{Z} = R.\frac{1 + j\frac{L}{R}\omega}{1 + jRC\omega + LC(j\omega)^2}$$

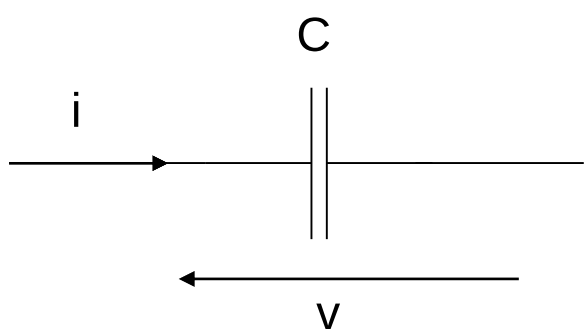
En pratique $LC\omega^2 \ll 1$

donc : $\underline{Z} \simeq R.\dfrac{1 + j\frac{L}{R}\omega}{1 + jRC\omega}$ pour $R = \sqrt{\dfrac{L}{C}}$ alors $Z = R$



Le condensateur idéal

Le condensateur idéal se modélise par une simple capacité
q est la charge stockée, par définition q = C v

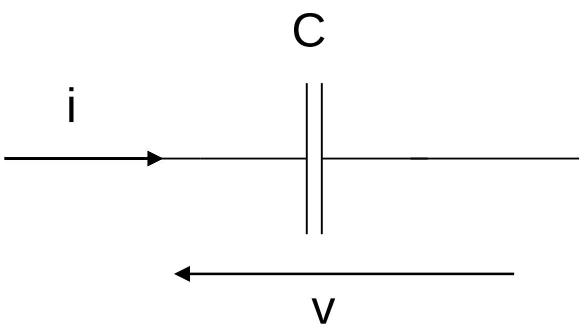


$$q = C\,v \quad \text{et} \quad i = \frac{dq}{dt}$$

$$\boxed{i = C\frac{dv}{dt}}$$

Le courant dans un circuit réel ne pouvant être infini, il ne peut y avoir de variation instantanée de tension aux bornes d’un condensateur idéal.

Les composants idéaux en régime sinusoïdal



$$i = C\frac{dv}{dt}$$

$$\underline{V} = \underline{Z}\,\underline{I} = \frac{1}{jCw}\underline{I}$$

$$\boxed{\underline{Z}_C = \frac{1}{jCw}}$$

La condensateur idéal présente une impédance dont le module varie en 1/f et dont la phase est égale à $-\pi/2$

Le condensateur réel
technologie électrolytique

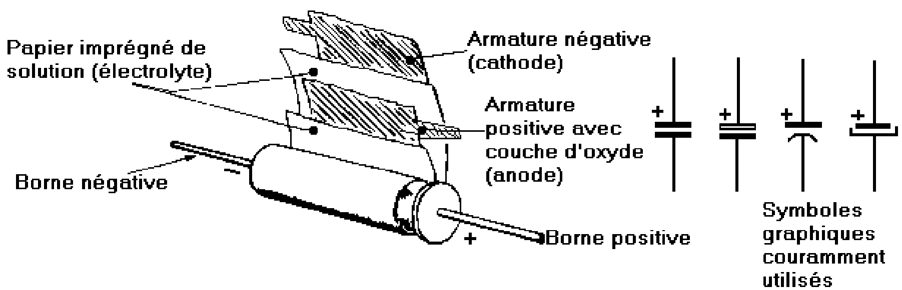
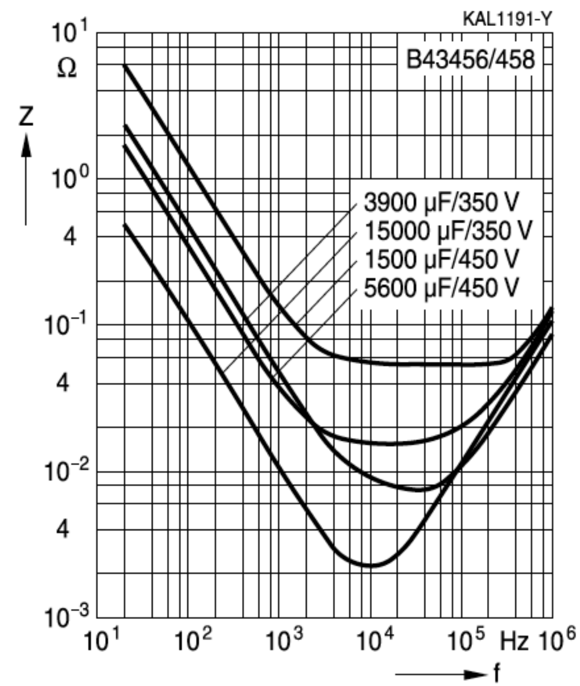


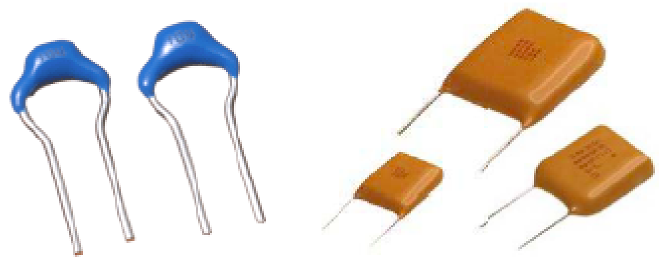
Fig. 8. - Structure d'un condensateur électrolytique au papier-aluminium.

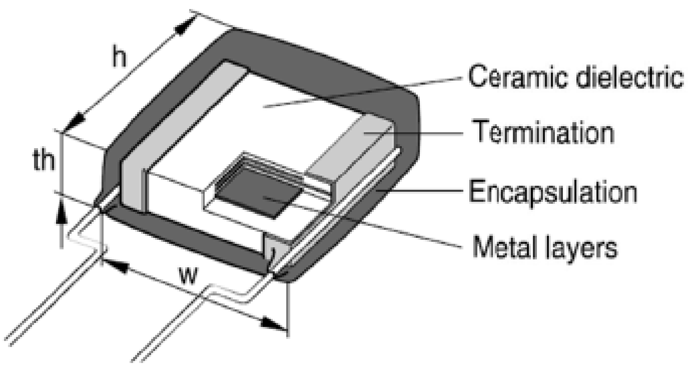
Impedance Z versus frequency f

Typical behavior at 20 °C

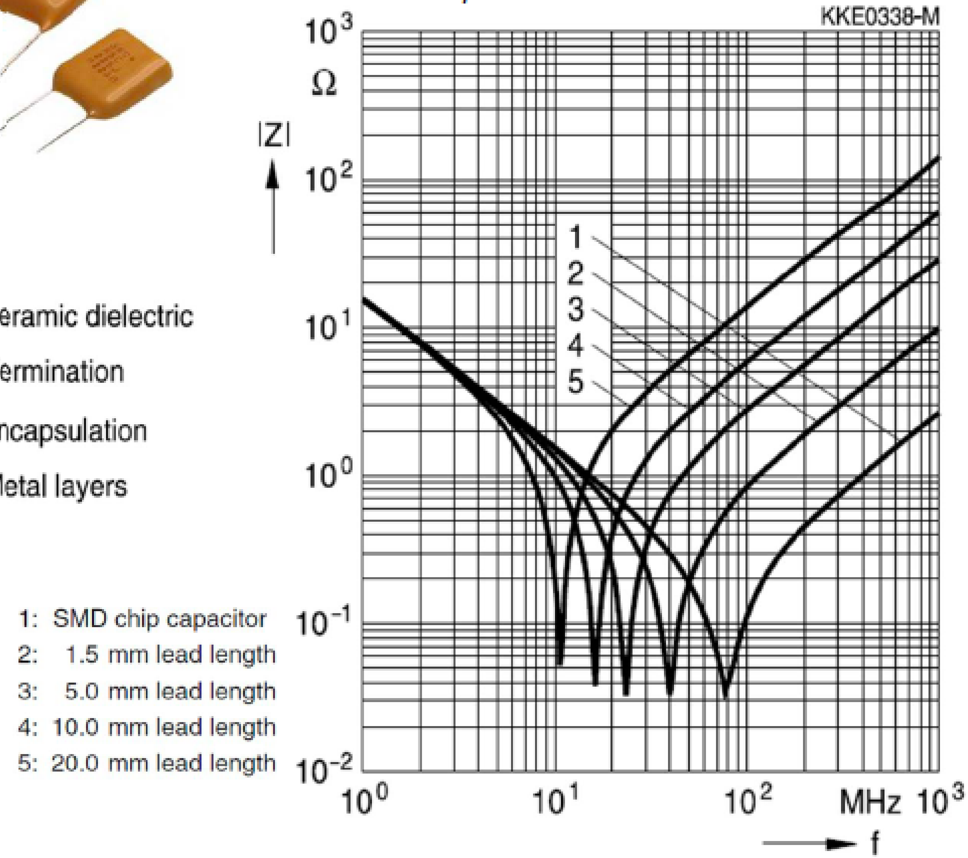


Le condensateur réel
technologie céramique à fils



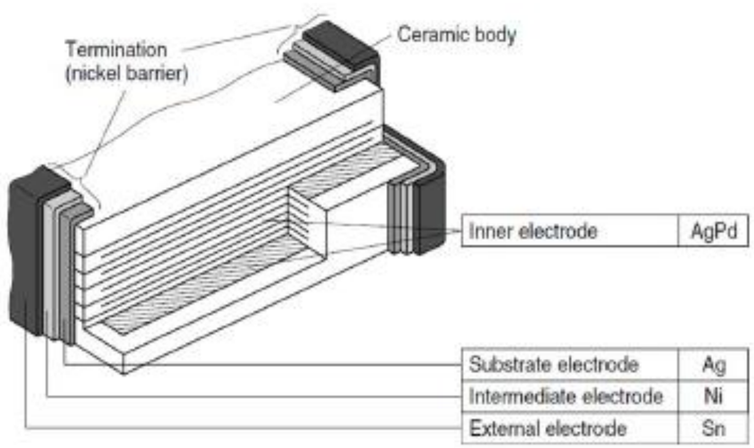


Extrait datasheet Epcos
MLCC leaded (C0G)
www.epcos.com

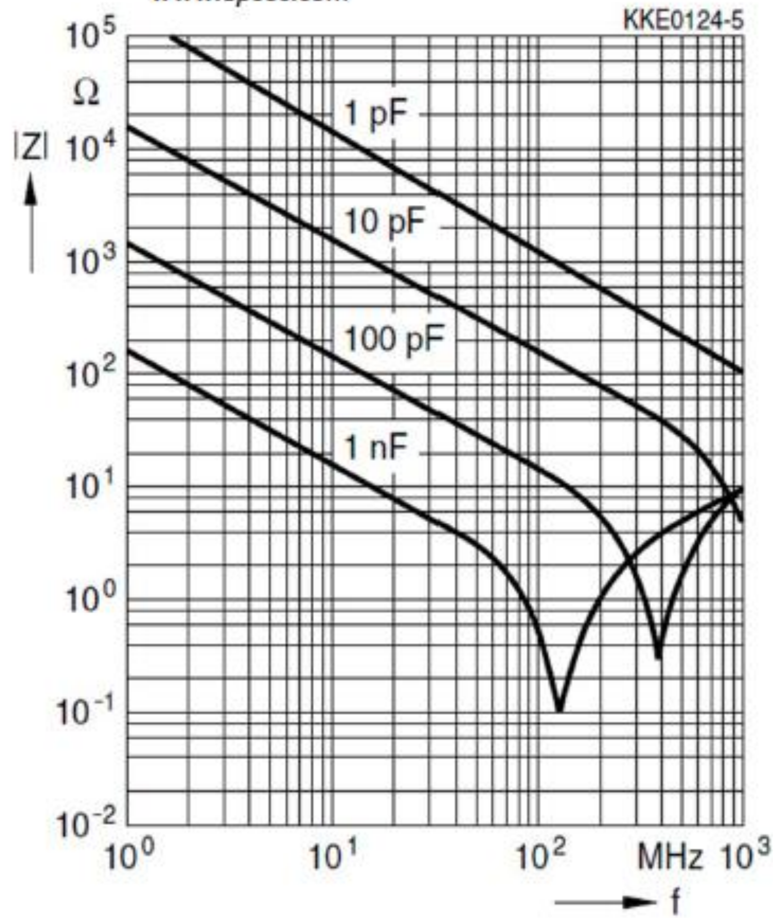


Le condensateur réel

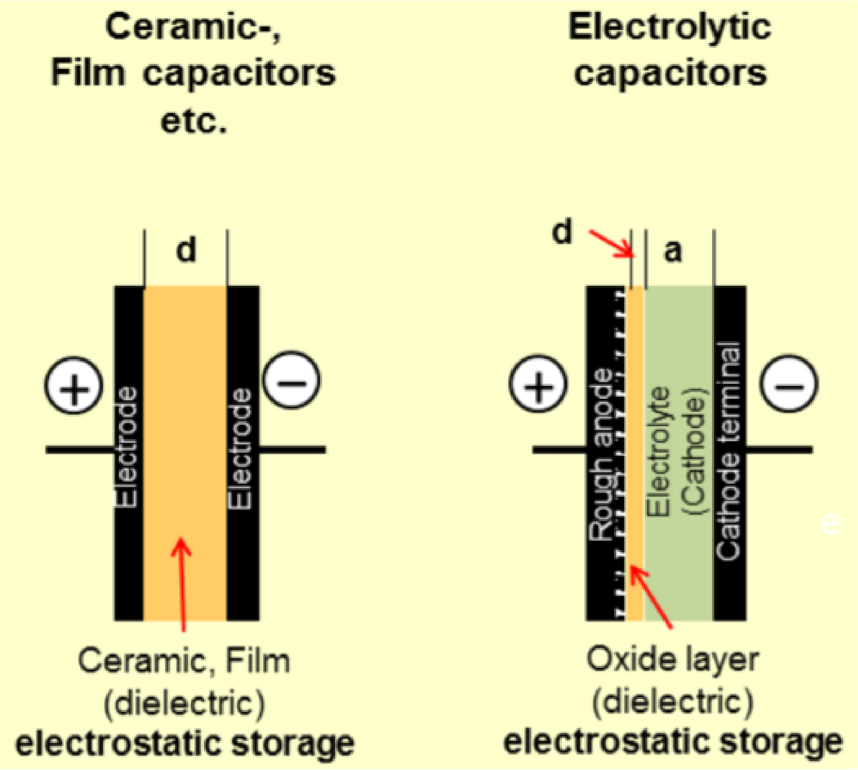
technologie CMS céramique



Extrait datasheet Epcos
MLCC SMT (C0G)
www.epcos.com



Comparaison MLCC/électrolytique



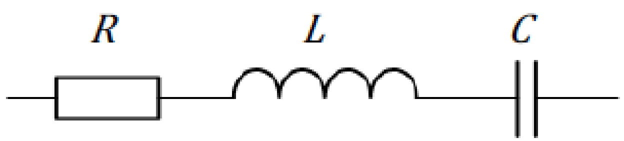
- Condensateur électrolytique :

Forte valeur de capacité : qq µF à qq F

- Condensateur céramique :

Faible valeur de capacité : qq pF à qq 100nF

Le condensateur réel
modèle équivalent

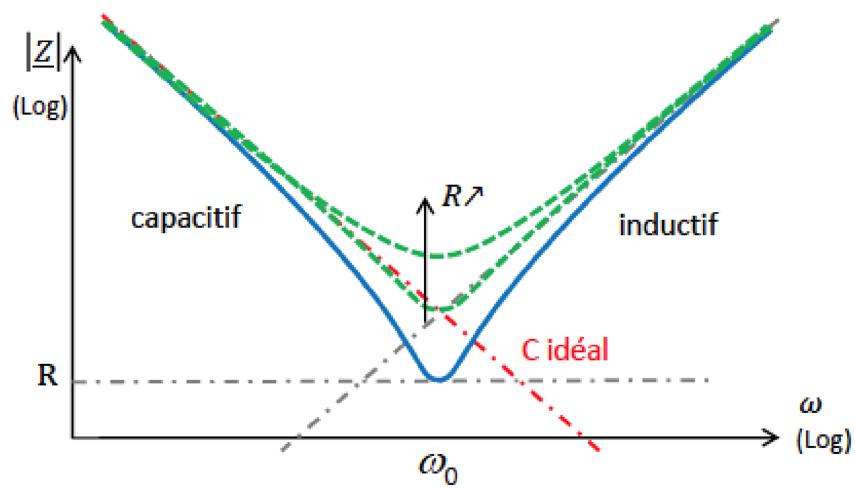


$$\underline{Z} = R + jL\omega + \frac{1}{jC\omega}$$

$$|\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

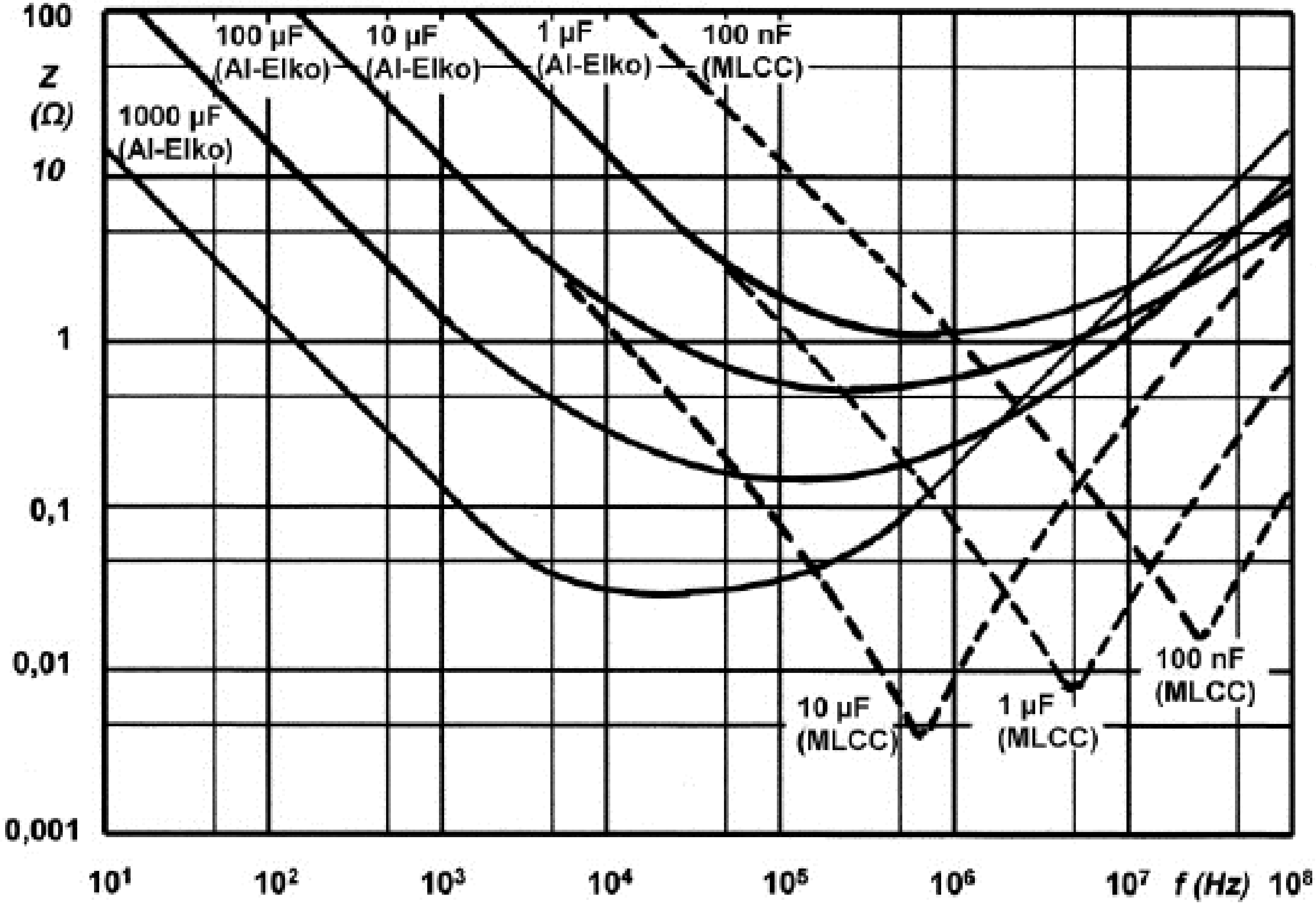
Fréquence de résonance $f_0 = \frac{1}{2\pi\omega_0}$ avec $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

- $\omega = \omega_0,\ Z = R$
- $\omega << \omega_0,\ Z \simeq \frac{1}{C\omega}$
- $\omega >> \omega_0,\ Z \simeq L\omega$



- Z(ω) possède un minimum, caractéristique d'une résonance de type « série »
- Pour $R = \sqrt{L/C}$ la courbe de Z passe par le point d'intersection des asymptotes

Comparaison MLCC/électrolytique

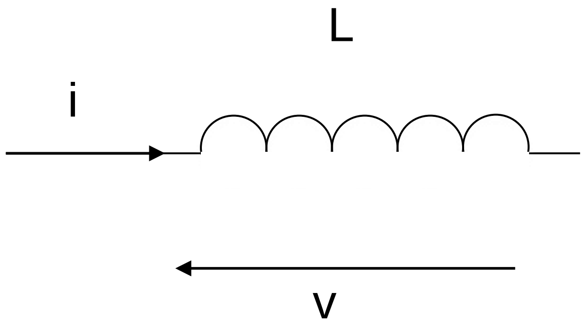


La bobine idéale

La bobine idéale se modélise par une simple inductance

Φ est le flux magnétique qui traverse la bobine,

l'inductance L est définie par Φ = Li

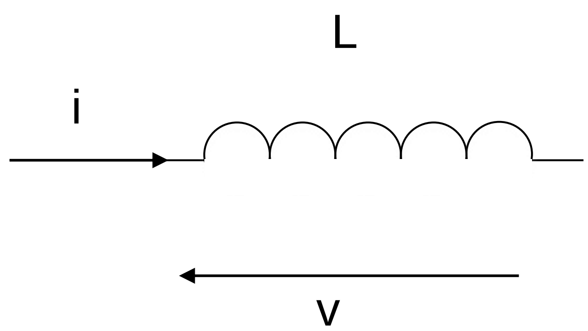


$F = L\,i$ et $v = \dfrac{dF}{dt}$

$$\boxed{v = L\frac{di}{dt}}$$

La tension dans un circuit réel ne pouvant être infinie, il ne peut y avoir de variation instantanée du courant qui traverse une inductance idéale.

Les composants idéaux en régime sinusoïdal



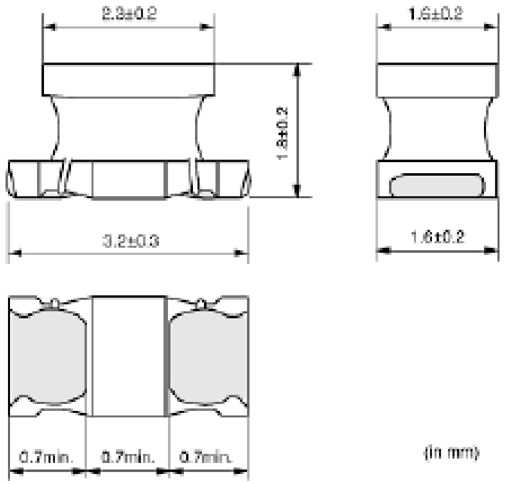
$$\Longleftrightarrow \quad v = L\frac{di}{dt} \quad \Longleftrightarrow \quad \underline{V} = \underline{Z}\,\underline{I} = jLw\underline{I}$$

$$\boxed{\underline{Z}_L = jLw}$$

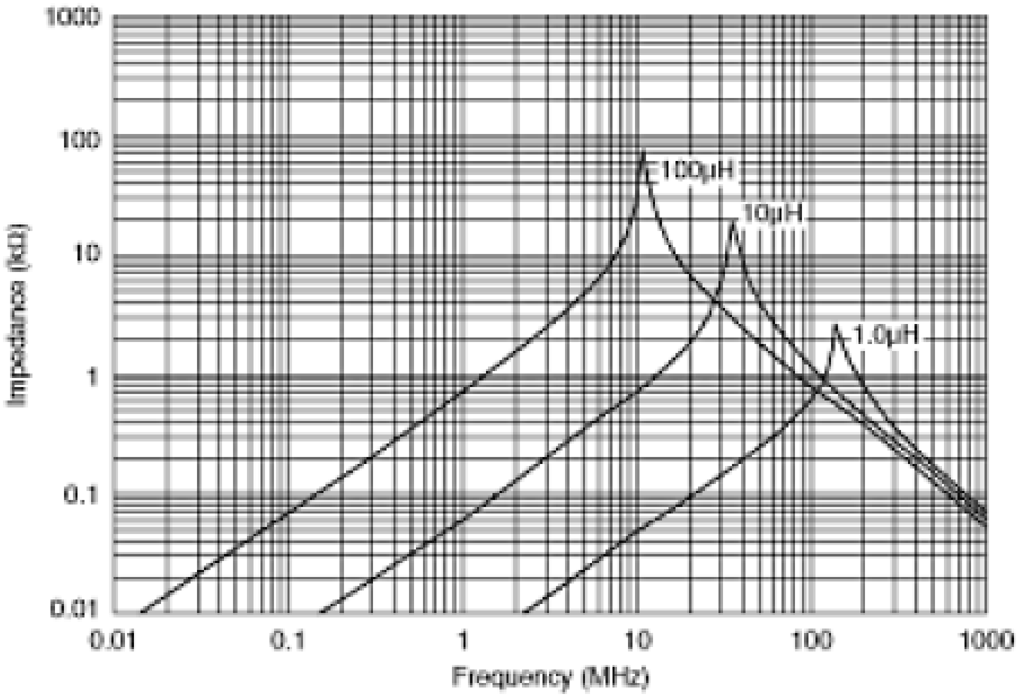
La bobine idéale présente une impédance dont le module varie en f et dont la phase est égale à $\pi/2$

La bobine réelle

Exemple d'inductances CMS (boîtier 1206)



Extrait datasheet Murata
Inductance LQH31CN
www.murata.com



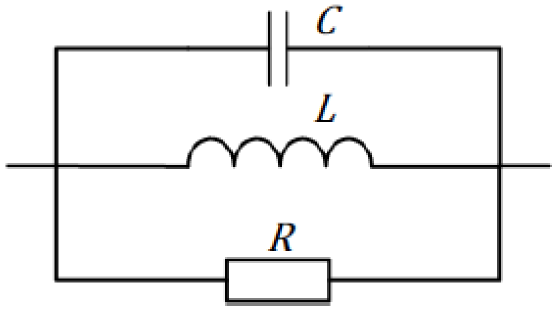
La bobine réelle

Inductances

Technologie traversante

Technologie CMS

La bobine réelle

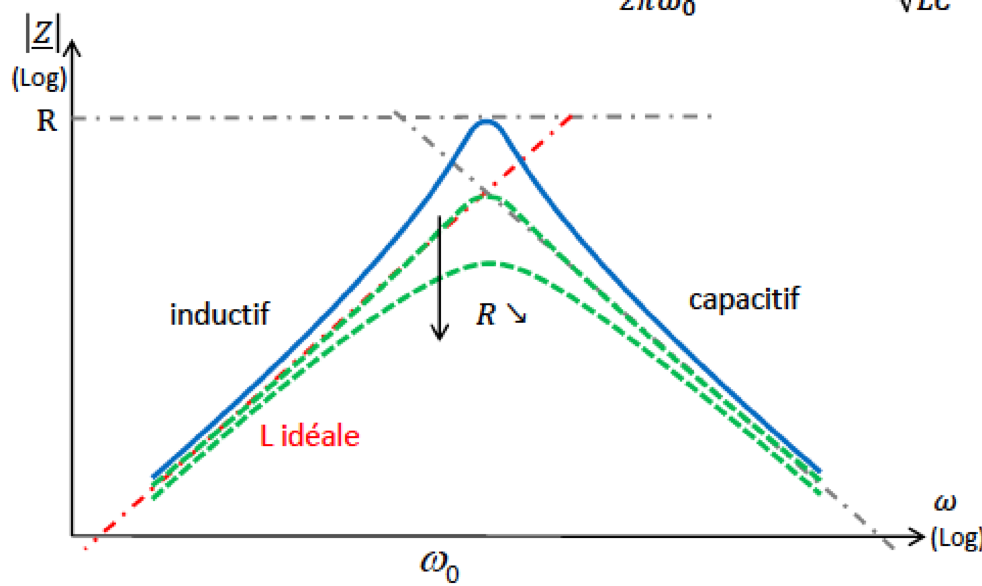


$$\underline{Y} = \frac{1}{R} + \frac{1}{jL\omega} + jC\omega$$

$$|\underline{Z}| = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(C\omega - \frac{1}{L\omega}\right)^2}}$$

Fréquence de résonance $f_0 = \frac{1}{2\pi\omega_0}$ avec $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

- $\omega = \omega_0,\ Z = R$
- $\omega << \omega_0,\ Z \simeq L\omega$
- $\omega >> \omega_0,\ Z \simeq \frac{1}{C\omega}$



- Z(ω) possède un maximum, caractéristique d'une résonance de type « parallèle »
- Pour $R = \sqrt{L/C}$ la courbe de Z passe par le point d'intersection des asymptotes

Propagation

Quand la longueur d'onde est grande devant les dimensions des circuits...

Claude Pellet

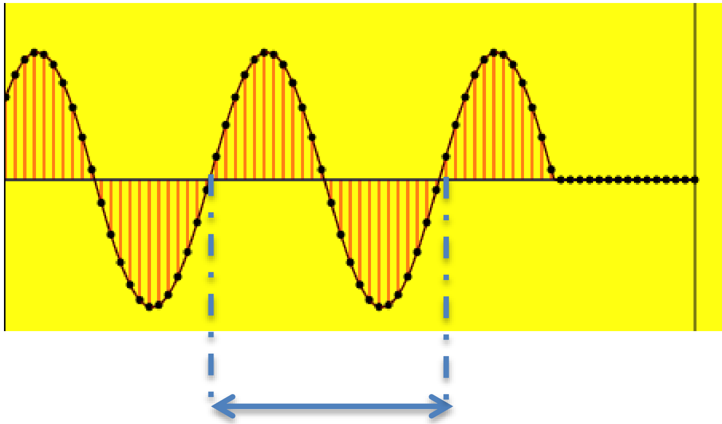
2018-2019

Notion de propagation d'onde

Les ronds dans l'eau

Expérience commune

Agitation d'une corde



Longueur d'onde λ

https://www.youtube-nocookie.com/embed/xjfd-gu1vA4

https://www.youtube-nocookie.com/embed/iWKFPTgkpXo

http://www.walter-fendt.de/html5/phen/standingwavereflection_en.htm

propagation

Le phénomène de propagation existe toujours, cependant on peut ne pas en tenir compte si les dimensions du circuit sont beaucoup plus faibles que la la longueur d'onde.

$$\lambda = \frac{V_p}{f}$$

V_p : Vitesse de propagation

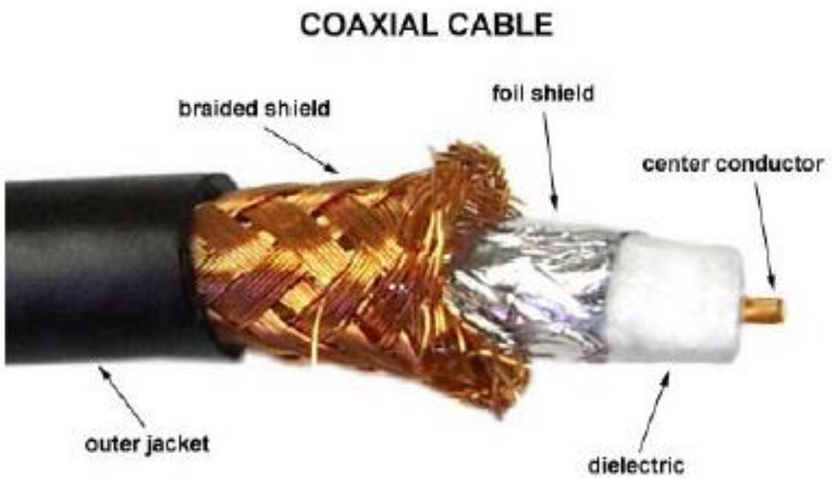
λ : Longueur d'onde

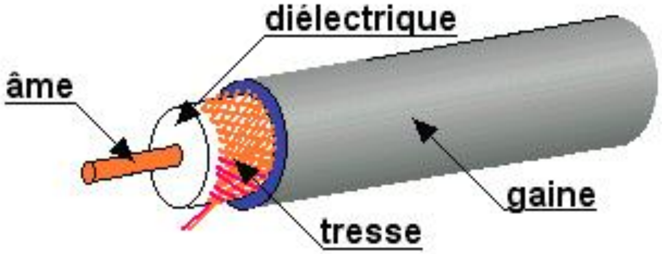
f : fréquence

Exemple : onde électromagnétique f=300 MHz dans le vide (V_p = 3 10^8 m/s), λ = 1 m .

Le câble coaxial

Le câble coaxial

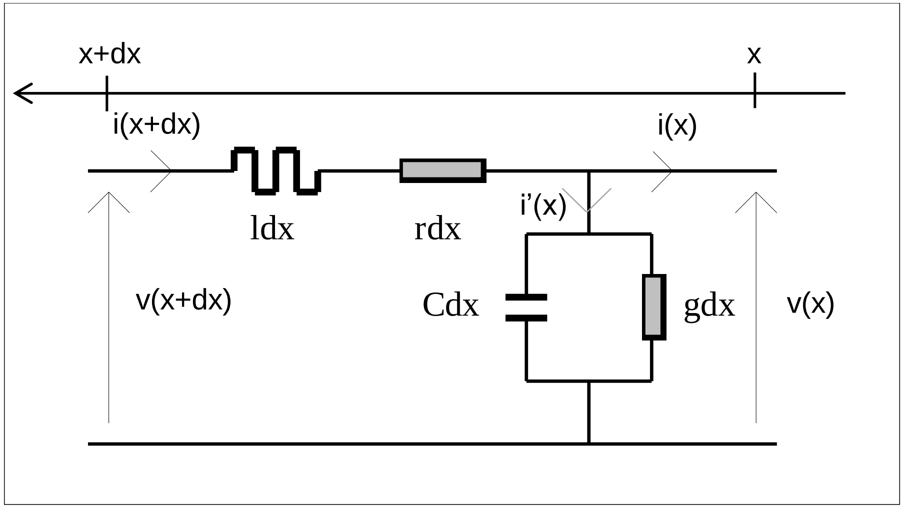




Le câble coaxial

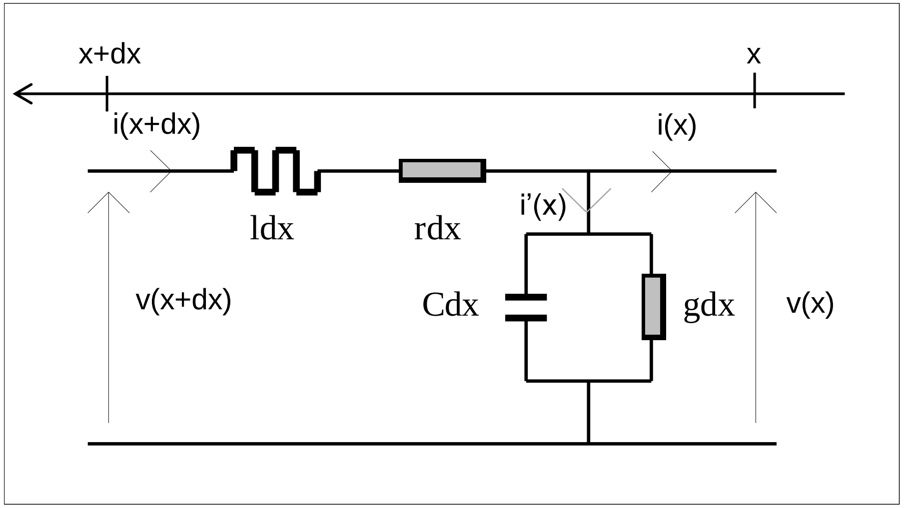
En BF on a juste 2 courts-circuits qui relient une générateur à une charge

En HF on doit considérer le phénomène de propagation on modélise alors chaque tronçon de la ligne par le circuit :



Equations de propagation

Si on applique la loi de la maille et la loi du noeud,
v(x,t) et i(x,t) vérifient les équations :

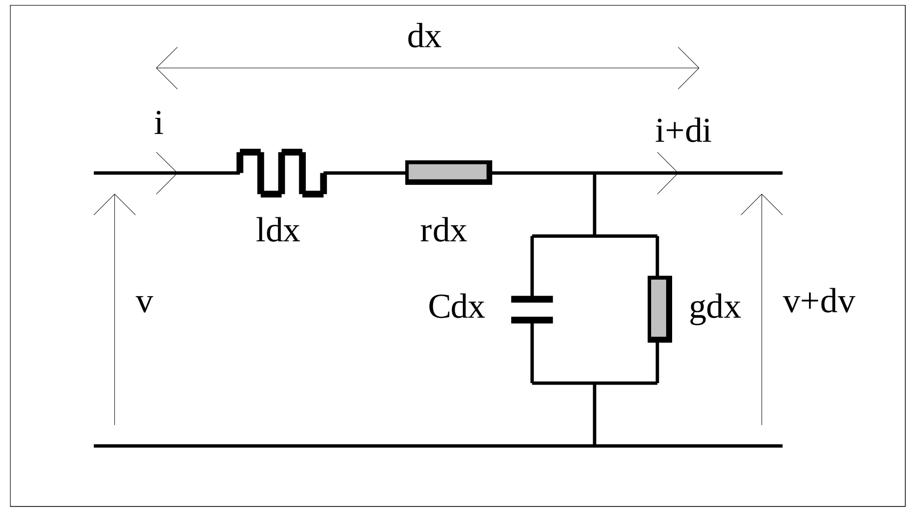


$$\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = lC\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} + (rC + \mathrm{lg})\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} + rg.v(x,t)$$

$$\frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x^2} = lC\frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial t^2} + (rC + \mathrm{lg})\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + rg.i(x,t)$$

Equations de propagation

Si on considère une ligne sans perte,
C'est à dire r= 0 et g = ∞



$$\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = lC\,\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2}$$

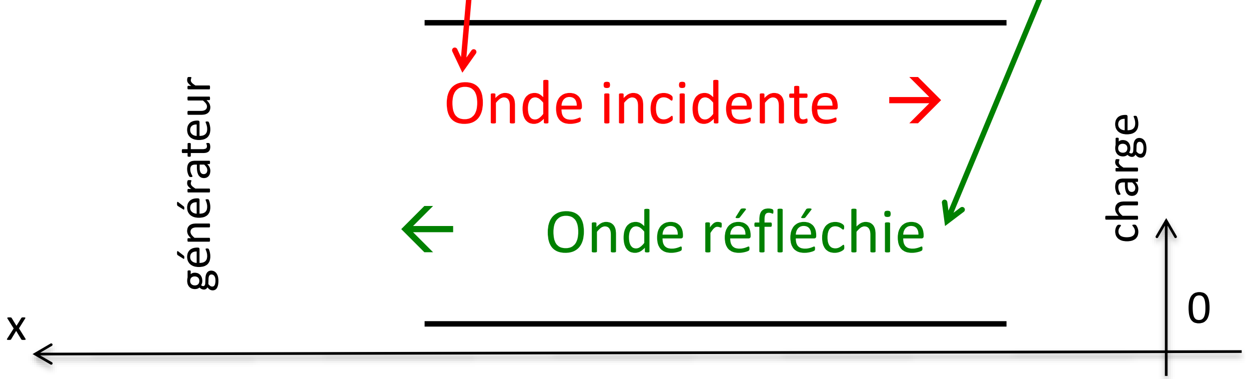
$$\frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x^2} = lC\,\frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial t^2}$$

Câble coaxial en régime sinusoïdal

La résolution des équations de propagation donne :

$$v(x,t) = V' e^{j(\omega t+\beta x)} + V'' e^{j(\omega t-\beta x)}$$

$$i(x,t) = I' e^{j(\omega t+\beta x)} + I'' e^{j(\omega t-\beta x)}$$



Câble coaxial en régime sinusoïdal

La résolution des équations de propagation donne :

$$v(x,t) = V' e^{j(wt+bx)} + V'' e^{j(wt-bx)}$$

$$i(x,t) = I' e^{j(wt+bx)} + I'' e^{j(wt-bx)}$$

avec

$$b = w\sqrt{lC}$$

Pulsation $w = \dfrac{2p}{T}$

$b = \dfrac{2p}{l}$ Constante de propagation

T est la période dans le temps

λ est la période dans l'espace

vitesse de propagation

$$V_p = \frac{w}{b}, \quad V_p = \frac{1}{\sqrt{lC}}$$

La vitesse de propagation est donnée par le rapport de la pulsation sur la constante de propagation

Impédance caractéristique

On peut montrer que la tension et le courant peuvent s'écrire :

$$v(x,t) = V'e^{j(wt+bx)} + V''e^{j(wt-bx)}$$

$$i(x,t) = \frac{1}{Z_C}\left(V'e^{j(wt+bx)} - V''e^{j(wt-bx)}\right)$$

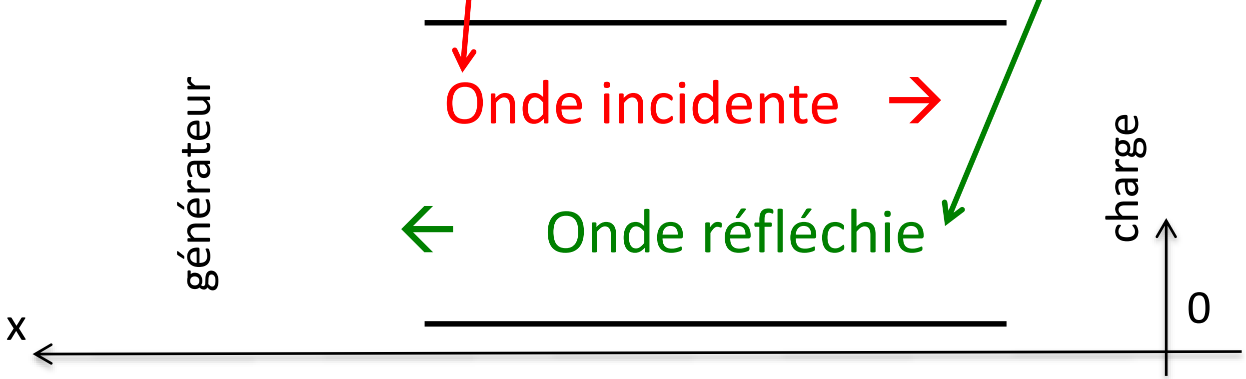
$$Z_C = \sqrt{\frac{l}{C}}$$

Câble coaxial en régime sinusoïdal

La résolution des équations de propagation donne :

$$v(x,t) = V' e^{j(\omega t + \beta x)} + V'' e^{j(\omega t - \beta x)}$$

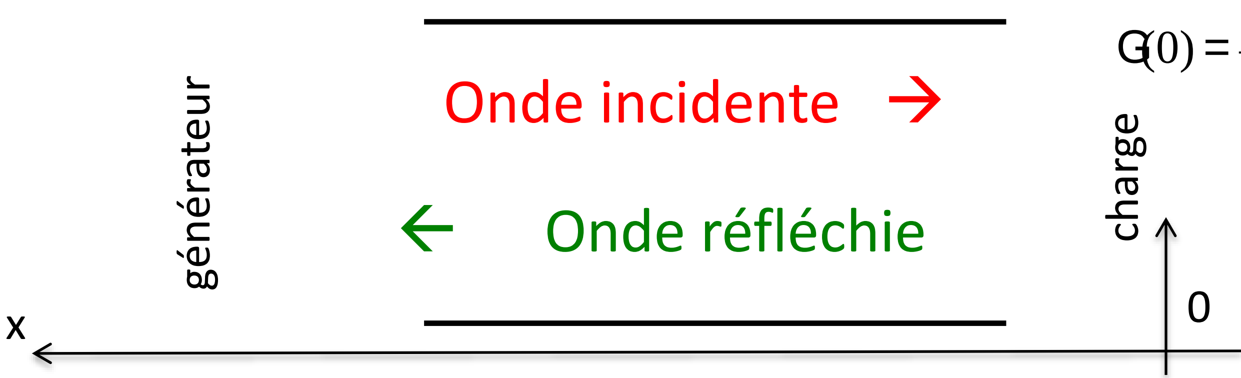
$$i(x,t) = I' e^{j(\omega t + \beta x)} + I'' e^{j(\omega t - \beta x)}$$



Coefficient de réflexion

$$\Gamma(x) = \frac{V'' e^{j(\omega t - \beta x)}}{V' e^{j(\omega t + \beta x)}}, \qquad \Gamma(x) = \frac{V''}{V'} e^{-j2\beta x}$$

Quand on se déplace le long du câble, le module du coefficient de réflexion est constant, seule sa phase varie.



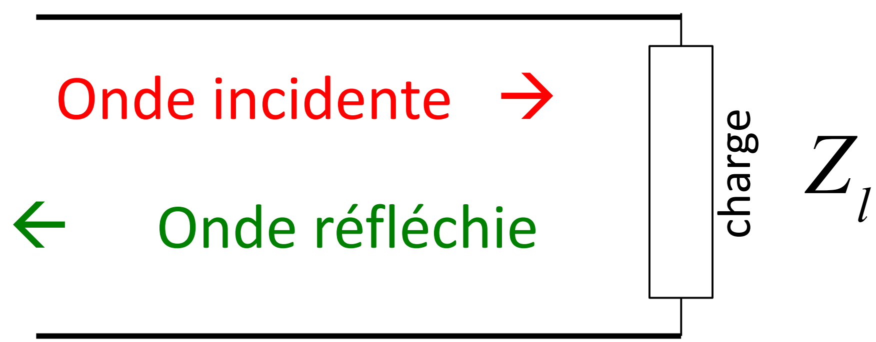
$$\Gamma(0) = \frac{V''}{V'} = \left|\frac{V''}{V'}\right| e^{j\varphi} \quad avec \quad \varphi = 0 \quad ou \quad \pi$$

Coefficient de réflexion

En bout de ligne , au niveau de la charge Z_l (x=0)

$$\Gamma(0) = \frac{V''}{V'} = \left|\frac{V''}{V'}\right| e^{j\varphi} \quad avec \quad \varphi = 0 \quad ou \quad \pi$$

$$\Gamma(0) = \frac{Z_l - Z_c}{Z_l + Z_c}$$



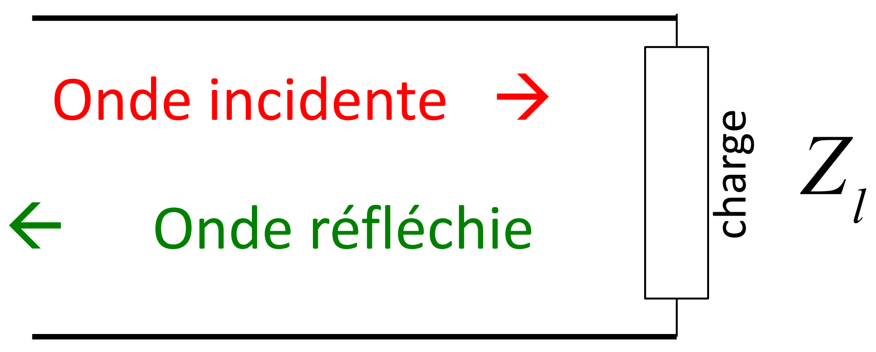
https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-on-a-string/latest/wave-on-a-string_en.html

Rapport d'Onde Stationnaire

$$ROS = \frac{|V'| + |V''|}{|V'| - |V''|} \qquad ROS = \frac{1 + |G|}{1 - |G|}$$

http://www.walter-fendt.de/html5/phen/standingwavereflection_en.htm

https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-on-a-string/latest/wave-on-a-string_en.html

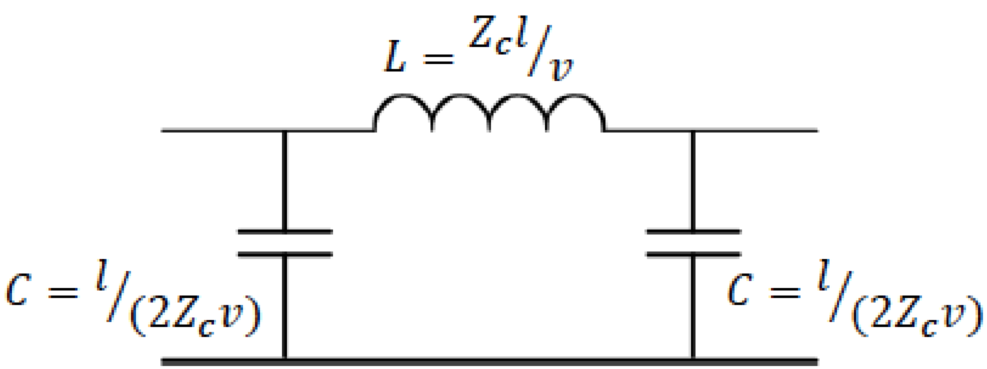


Influence des câbles en électronique numérique

Problématique:

Aux fréquences élevées, l'impédance des fils d'alimentation a une influence sur la tension aux bornes des circuits

Schéma équivalent (modèle en Π) d'un tronçon de ligne sans pertes et de longueur $l < \lambda$



v : vitesse de propagation
Z_c : impédance caractéristique

Exemple: câble coaxial RG58 :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \qquad Z_c = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\, ln\frac{D}{d}$$

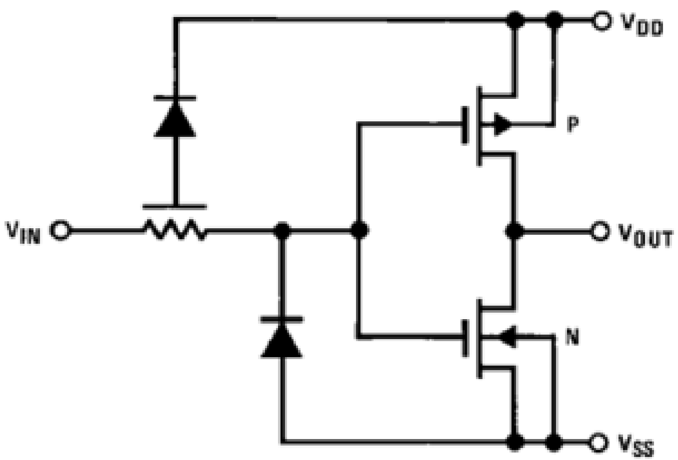
$$v \simeq 2.10^8 \text{m/s} \qquad Z_c = 50\Omega$$

l=40 cm, v = 2 10^8 ms^{-1} → L =100 nH et C = 20 pF

Influence des câbles en électronique numérique

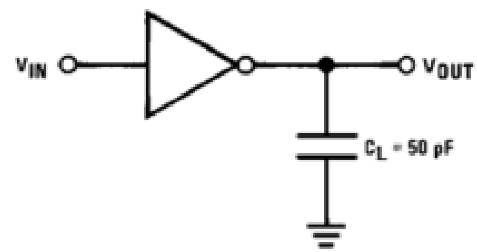
Cas de l'inverseur CMOS (CD4069)

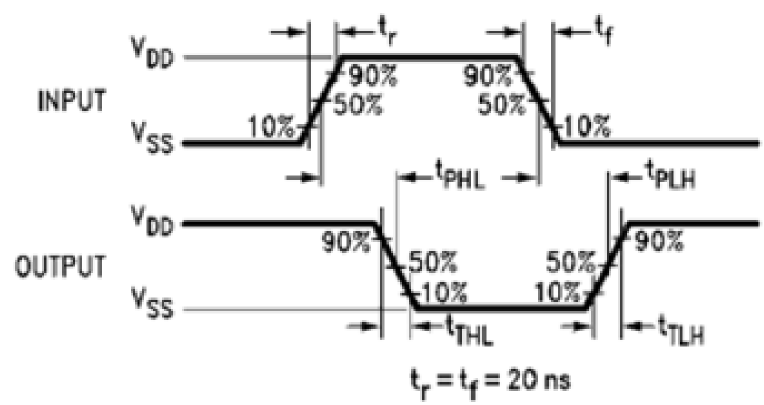
Architecture interne



Extrait datasheet CD4069UBC
www.fairchildsemi.com

Caractéristiques dynamiques





Hypothèses:

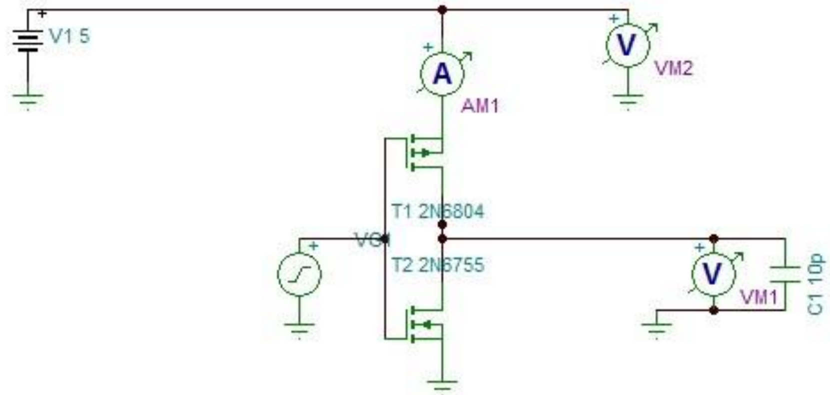
MOS passant = résistance

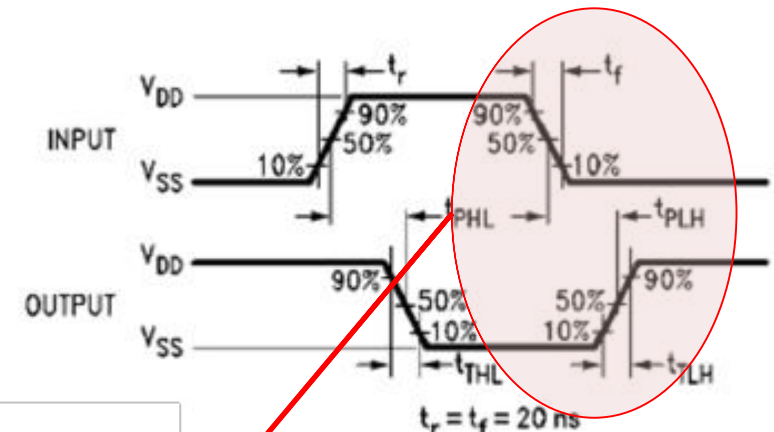
MOS bloqué = circuit ouvert

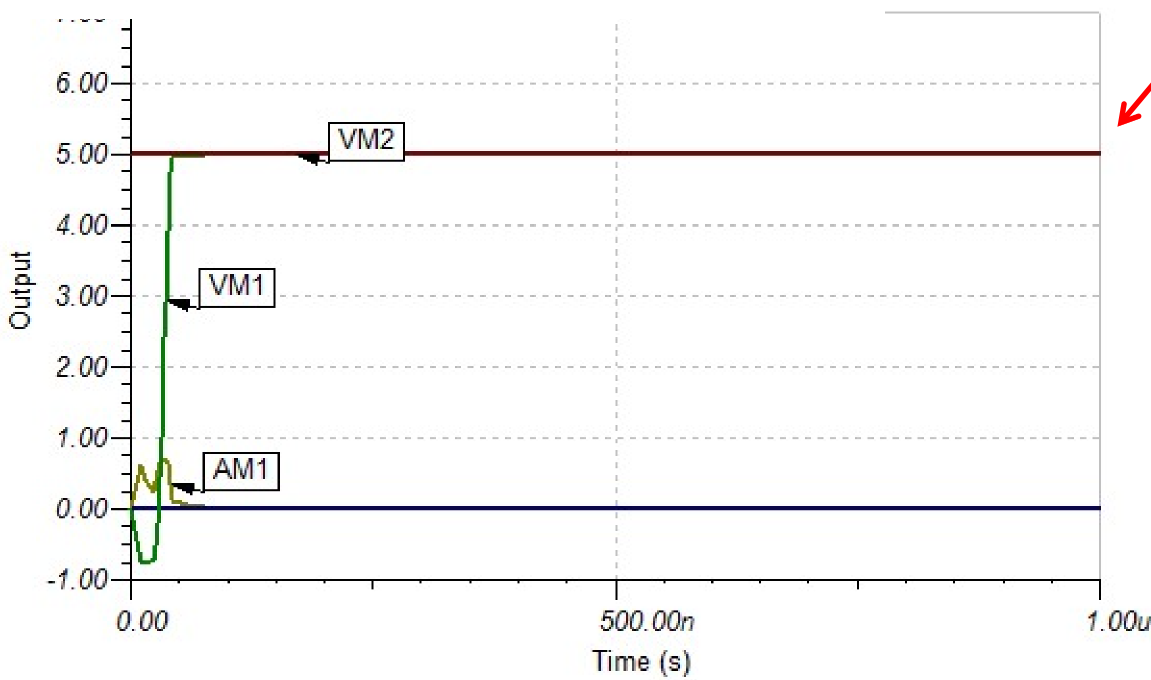
Temps de montée t_{TLH} = 80ns (typ. @V_{DD}=5V)

$$R_{PMOS} = \Delta t_{TLH} / 2{,}2 C_L \simeq 730\Omega$$

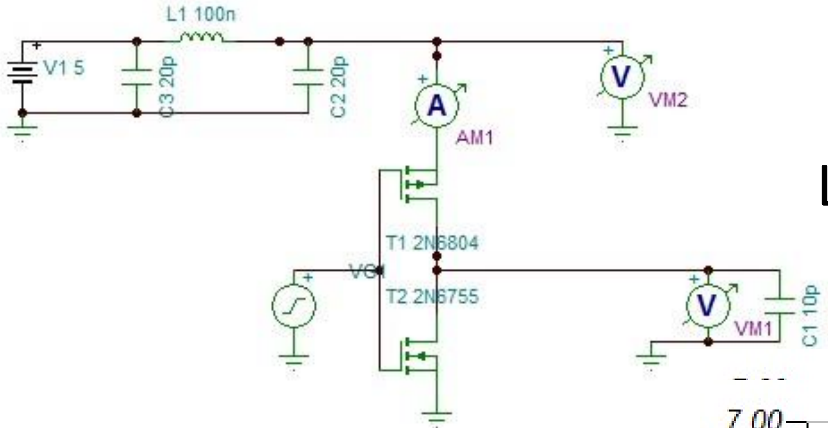
Inverseur CMOS avec ligne d'alimentation idéale





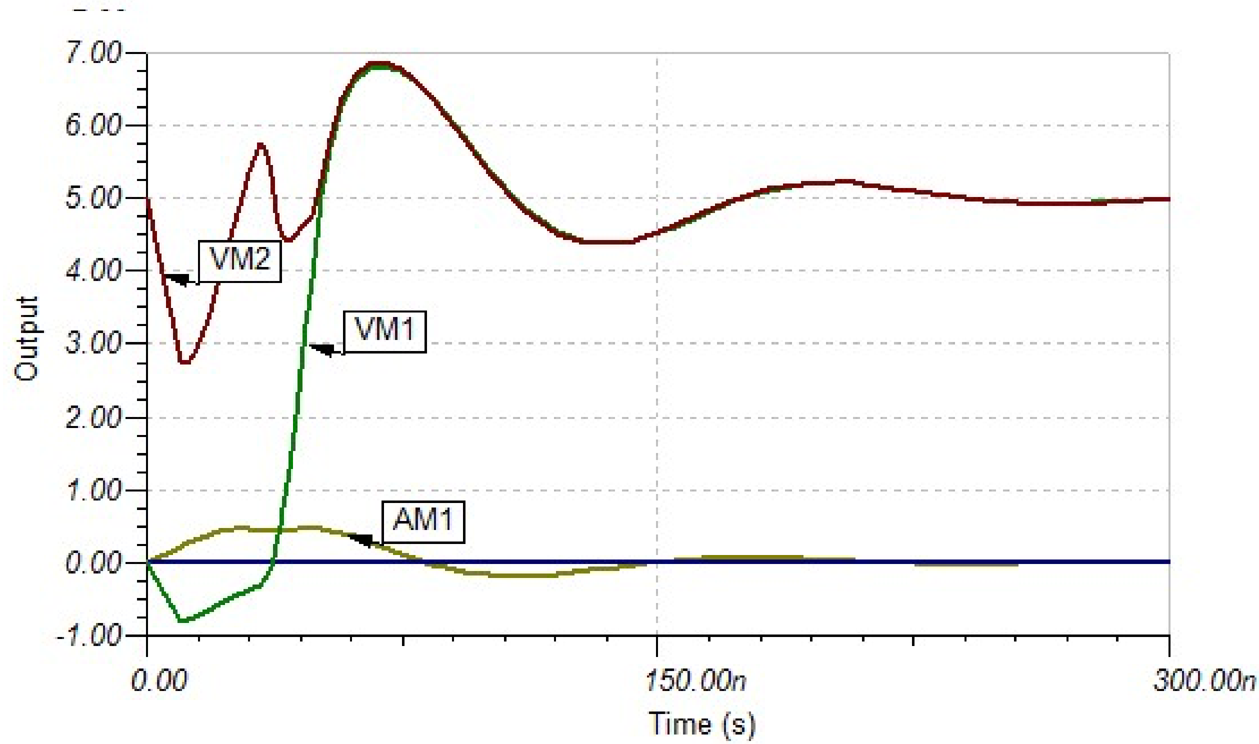


Inverseur CMOS avec ligne d'alimentation réelle

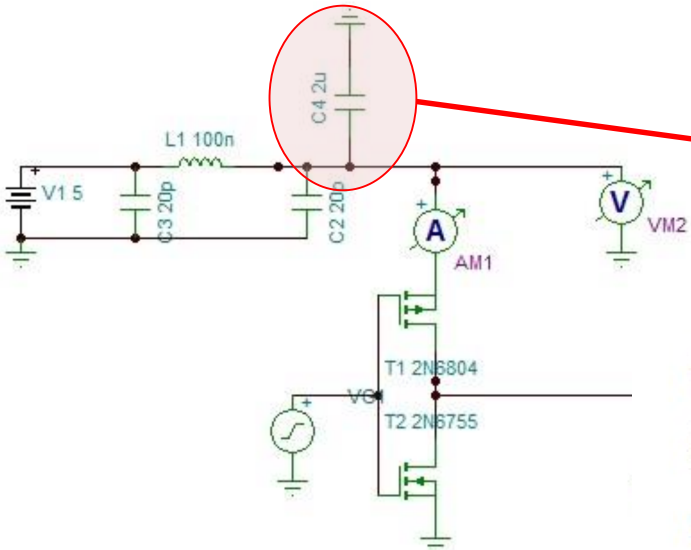


La tension d'alimentation n'arrive plus !

Pour résoudre ce problème on place au plus près du circuit CMOS un condensateur dit de découplage entre l'entrée V_{DD} et la masse

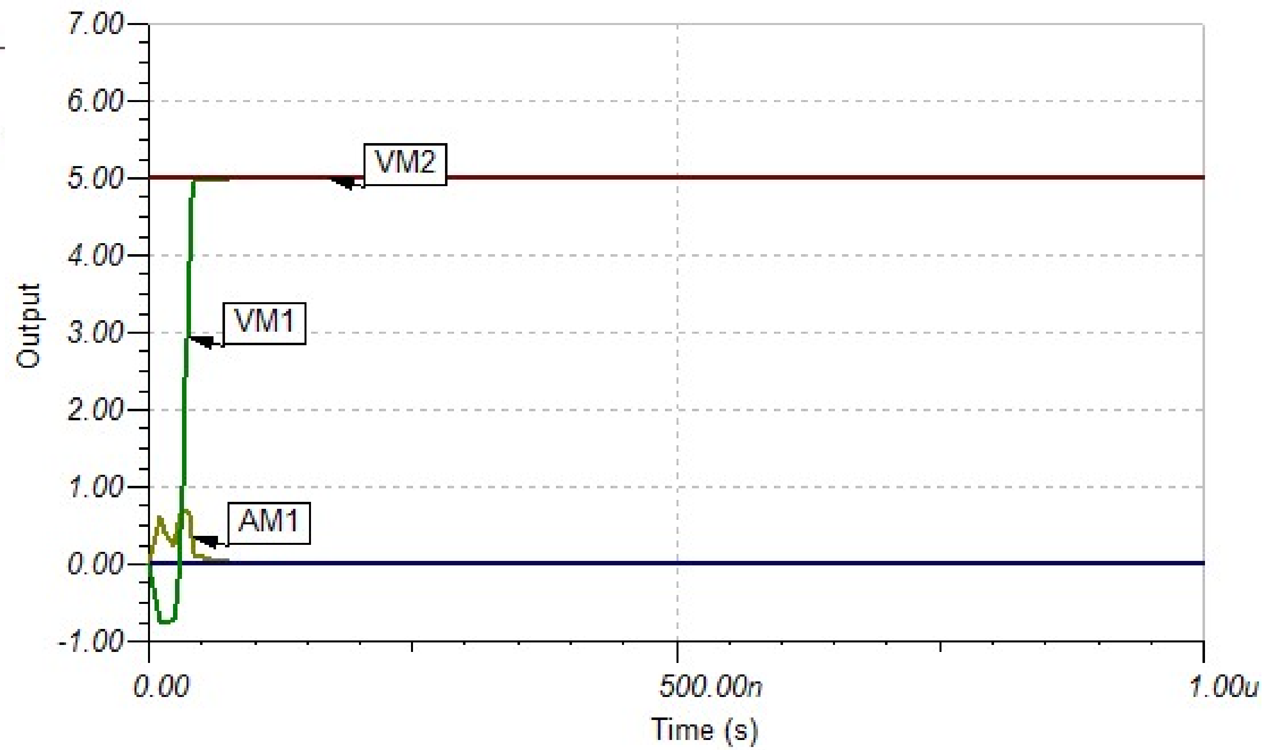


Inverseur CMOS avec ligne d'alimentation réelle et capacité de découplage



Condensateur de découplage

Le condensateur de découplage agit comme un réservoir de charge

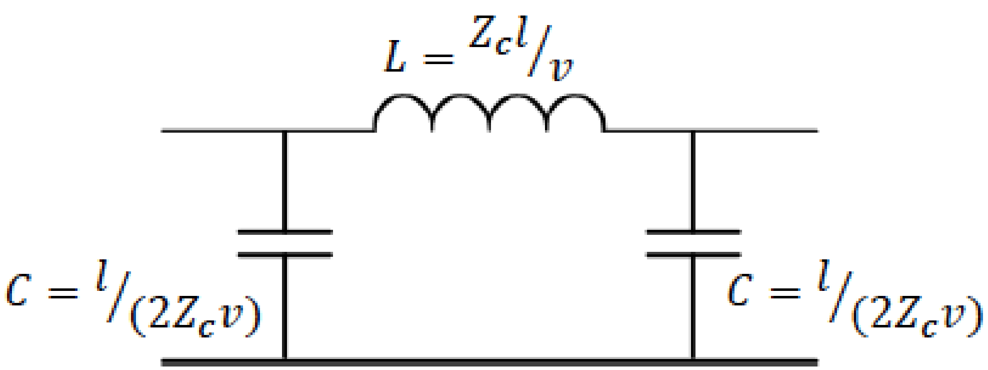


Influence des câbles en électronique numérique

Problématique:

Aux fréquences élevées, l'impédance des fils d'alimentation a une influence sur la tension aux bornes des circuits

Schéma équivalent (modèle en Π) d'un tronçon de ligne sans pertes et de longueur $l < \lambda$



v : vitesse de propagation

Z_c : impédance caractéristique

Exemple: câble coaxial RG58 :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \qquad Z_c = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\, ln\frac{D}{d}$$

$$v \simeq 2.10^8 \mathrm{m/s} \qquad Z_c = 50\Omega$$