

Cours de CEM

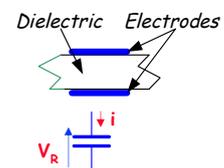
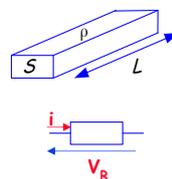
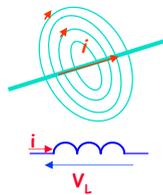
- Modélisation des composants passifs

Modélisation des composants passifs Origine des éléments parasites

■ **Lois physiques de l'électricité et de l'électromagnétisme**

- Les composants passifs possèdent des éléments parasites qui limitent leurs utilisations.
- Ils sont dus aux lois physiques électriques et à leur technologie de construction.

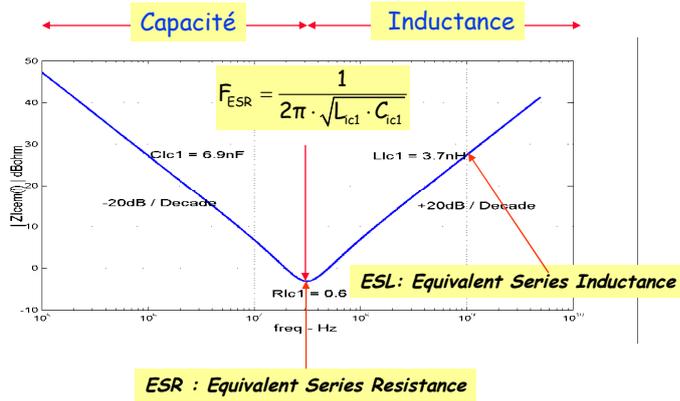
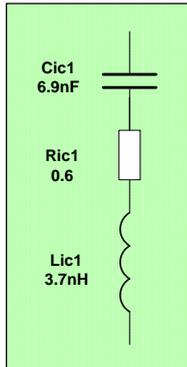
D'où viennent ils?	$L = \frac{\Phi}{i}$	$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$	$C = 8.85pF \cdot \epsilon_r \cdot \frac{S}{h}$
---------------------------	----------------------	------------------------------	---



Effets parasites	$v_L = L \cdot \frac{di}{dt}$	$V_R = R \cdot i$	$i_c = C \cdot \frac{dv_c}{dt}$
-------------------------	-------------------------------	-------------------	---------------------------------

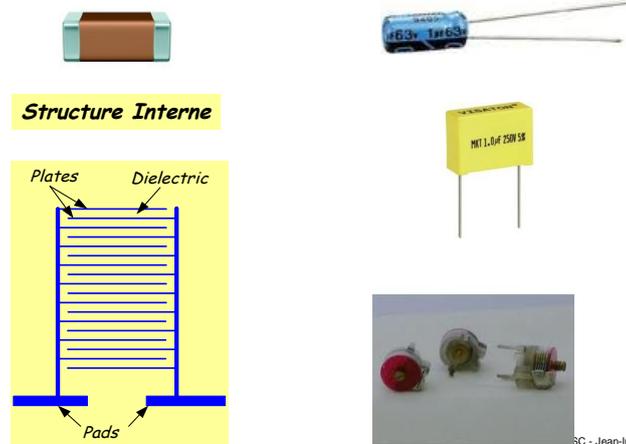
■ Les éléments parasites d'un condensateur (L et R)

- Exemple: Z(f) d'une capacité réelle.



■ Les éléments parasites d'un condensateur (L et R)

- Exemples
 - Où sont les éléments parasites?

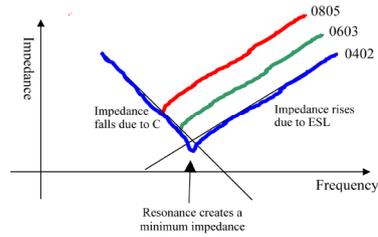
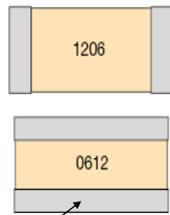


■ Les éléments parasites d'un condensateur (L et R)

▪ Choix du boîtier

- L'ESL produit une impédance nuisible dans les découplages.
- Plus L'ESL est petite et mieux c'est.

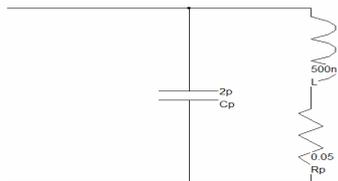
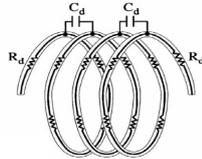
Package	ESL (pH)
0201	400
0402	550
0603	700
0805	800
1206	1250
0612	63



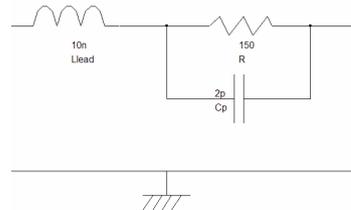
Plus large moins inductif

■ Exemples de modèles pour une inductance et une résistance

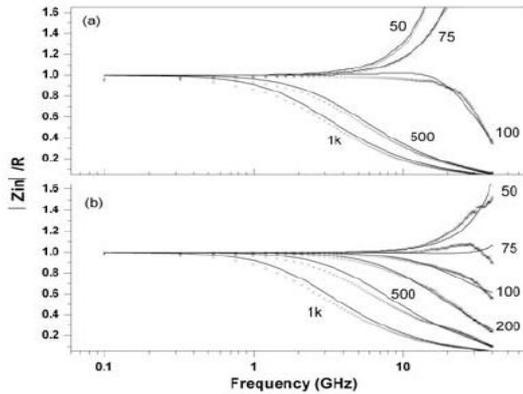
Inductance



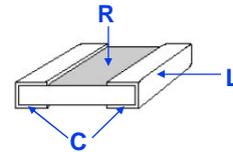
Résistance



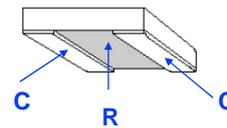
- Exemples de modèles pour une inductance et une résistance
 - ▀ Résistances UHF et SHF
 - "Flip" et "Wrap around" résistance



Wrap around resistance



Flip resistance



ARALA – F4GSC - Jean-luc Levant May 12

7

- La loi d'Ohm
 - ▀ En Basse Fréquence, la résistance est
 - Inversement proportionnelle à la surface de la section du conducteur,
 - Dépend du matériau

$$R (\Omega) = \frac{U}{I} = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

Matériau	Cuivre	Aluminium	Or	Argent	Tungstène
$\rho(\Omega m)$	1.7×10^{-8}	2.7×10^{-8}	2.2×10^{-8}	1.6×10^{-8}	5.5×10^{-8}

- ▀ En moyenne fréquence, effet de peau ($f >$ quelques 10KHz)
 - La section du conducteur varie en fonction de la racine carrée de la fréquence.
 - Le courant tend à se propager à la surface du conducteur, « effet de peau ».
 - La section efficace diminue et la résistance augmente.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \cdot \pi \cdot f}}$$

Matériau	1KHz	1MHz	10MHz	100MHz	1GHz	10GHz
Cuivre (μm)	2100	66	21	6.6	2.1	0.66
Aluminium (μm)	2700	85	27	8.5	2.7	0.85

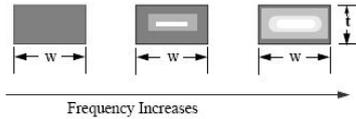
ARALA – F4GSC - Jean-luc Levant May 12

8

■ Loi d'Ohm

▪ Effet de peau

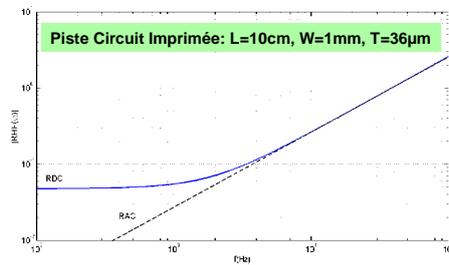
- Exemple pour une piste circuit imprimée:
 - L'effet de peau augmente la résistance du conducteur et apporte un déphasage.



$$R_{HF}(f) = R_{DC} + R_{AC} \cdot (1 + j \cdot \sqrt{f})$$

$$R_{AC}(\Omega) = \rho \cdot \frac{L}{\delta \cdot W}$$

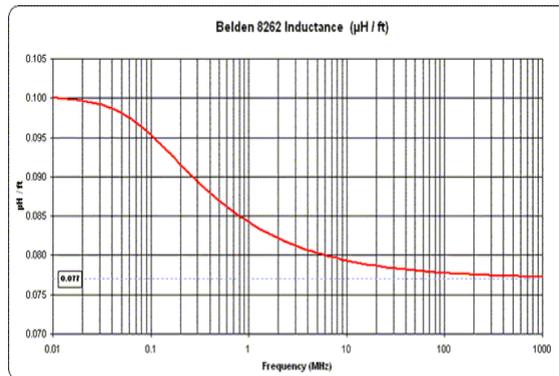
Avec: RDC = Résistance en continu,
 RAC = Résistance en haute fréquence
 W(m) = largeur de la piste,
 L (m) = longueur de la piste
 δ (m) = épaisseur de peau à la fréquence f



La résistance est 47mΩ en basse fréquence (RDC).
 Elle est de 2.5Ω à 100KHz.

■ Inductance

- La valeur de l'inductance varie avec l'effet de peau (~20% plus faible en haute fréquence).



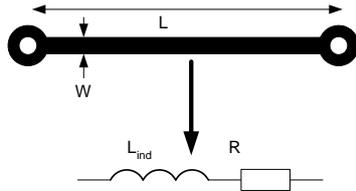
A 10KHz L=100nH
 A 100MHz L=78nH

Modélisation des composants passifs

Résistance Réelle

■ Modèle d'une piste de Circuit imprimé

- Les pistes de circuits imprimés (PCB)
- En première approximation une piste circuit imprimé peut être représentée à partir d'une impédance série de type Résistance/Inductance.



Pour le cuivre

$$R_{PCB} \text{ (m}\Omega\text{)} = 0.5 \cdot \frac{L}{W}$$

$$R_{Fil} \text{ (m}\Omega\text{)} = 17 \cdot \frac{L}{S}$$

$$L_{Pcb/Fil} = 10 \text{ nH/cm}$$

$$Z_{cond} = R + j \cdot L\omega$$

Exemple: Pour une piste PCB de 10cm long et de 1mm de large, R_{PCB} ? L_{PCB} ?

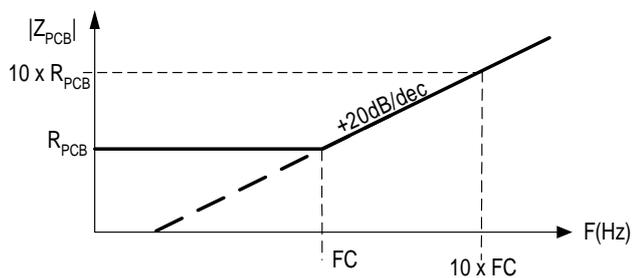
$$R_{PCB} = 50 \Omega \quad L_{PCB} = 100 \text{ nH}$$

Modélisation des composants passifs

Résistance Réelle

■ Les pistes de circuits imprimés (PCB)

- Représenter rapidement le profil d'impédance d'une piste PCB.



$$R_{PCB} = 50 \Omega$$

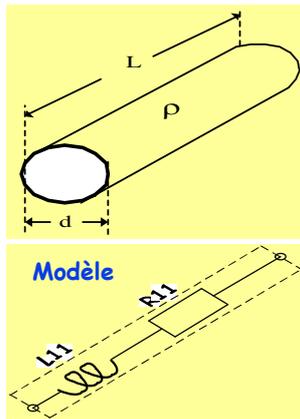
$$L_{PCB} = 100 \text{ nH}$$

$$FC = \frac{1}{2\pi \cdot \frac{L_{PCB}}{R_{PCB}}}$$

Exemple : FC pour l'exemple précédent

$$FC = \frac{1}{2\pi \cdot \frac{100 \text{ nH}}{50}} = 80 \text{ MHz}$$

- **Modèle d'un conducteur cylindrique loin de toute masse métallique**
 - ▀ La capacité d'un câble isolé est faible et ignorée.

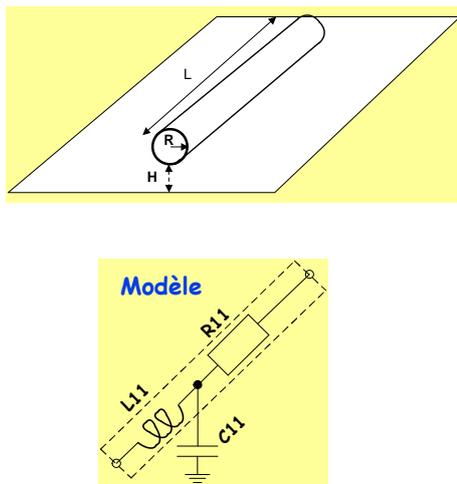


$$L_{11}(H) = (2 \cdot 10^{-7}) \cdot \left[\ln\left(4 \cdot \frac{L}{d}\right) - 0.75 \right] \cdot L$$

$$R_{11}(\Omega) = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

$S(m^2)$, surface du conducteur.
 $D(m)$, diamètre du conducteur.
 $L(m)$, longueur du conducteur.

- **Modèle d'un conducteur cylindrique au-dessus d'un plan de masse.**



$$C_{11}(pF) = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8.85}{\cosh^{-1}\left(2 \cdot \frac{H}{R}\right)} \cdot L \cong \frac{2 \cdot \pi \cdot 8.85}{\ln\left(2 \cdot \frac{H}{R}\right)} \cdot L$$

$$L_{11}(H) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot H}{d}\right) \cdot L$$

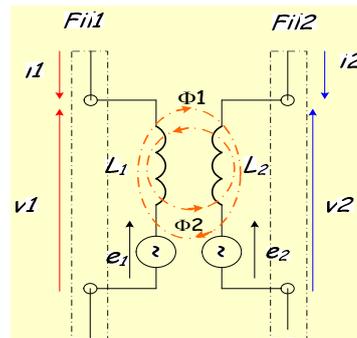
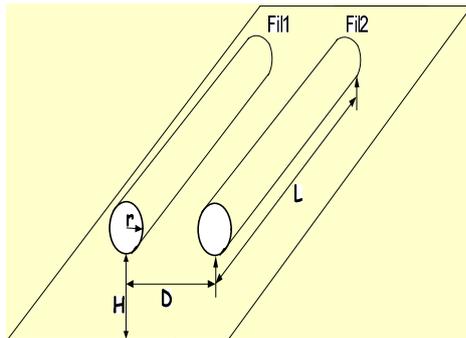
$$R_{11}(\Omega) = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

$H(m)$, hauteur du conducteur par rapport au plan de masse
 $R(m)$, rayon du conducteur
 $L(m)$, longueur du conducteur
 $d(m)$, diamètre du conducteur

Modélisation des composants passifs

Inductance Réelle

- **Modèle de deux conducteurs cylindriques séparés par une distance D au-dessus d'un plan de masse.**
 - Rappels sur le couplage magnétique entre deux inductances proches.



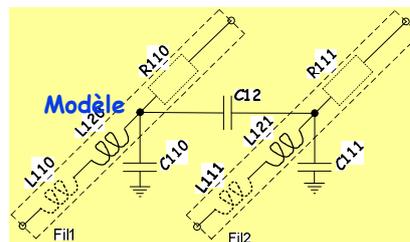
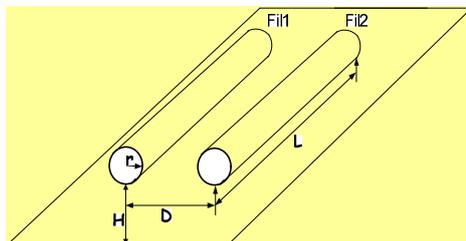
$$V1(t) = L1 \cdot \frac{di1}{dt} \pm M \cdot \frac{di2}{dt} \quad v2(t) = L2 \cdot \frac{di2}{dt} \pm M \cdot \frac{di1}{dt}$$

ARALA - F4GSC - Jean-luc Levant May 12 15

Modélisation des composants passifs

Inductance Réelle

- **Modèle de deux conducteurs cylindriques séparés par une distance D au-dessus d'un plan de masse.**
 - L11 et C11 pour chacun des fils séparés auxquels sont rajoutés une inductance et capacité mutuelle.



$$C12(\text{pF}) = 27.8 \cdot \frac{\ln \left[1 + \left(\frac{2 \cdot h}{D} \right)^2 \right]}{\left[\ln \left(\frac{4 \cdot h}{D} \right) \right]^2} \cdot L \quad L12(\text{H}) = 10^{-7} \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{2 \cdot h}{D} \right)^2 \right) \cdot L \quad D(\text{m}), \text{ distance entre les deux conducteurs.}$$

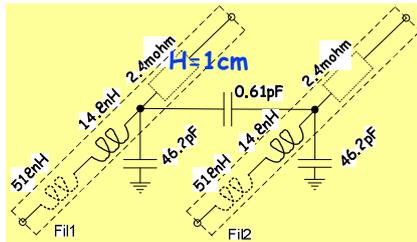
Modélisation des composants passifs

Inductance Réelle

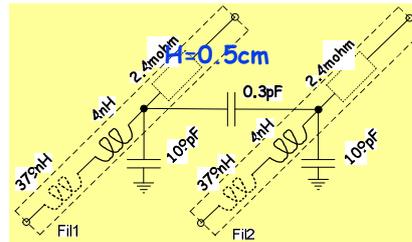
- Modèle de deux conducteurs cylindriques séparés par une distance D au-dessus d'un plan de masse.

- Exemple pour 2 hauteurs différentes

- L=1m, d=3mm, D=5cm



$L_{11}=518\text{nH}$, $R_{11}=2.4\text{m}\Omega$, $C_{11}=46.2\text{pF}$,
 $L_{12}=14.8\text{nH}$, $C_{12}=0.61\text{pF}$



$L_{11}=379\text{nH}$, $R_{11}=2.4\text{m}\Omega$, $C_{11}=109\text{pF}$,
 $L_{12}=4\text{nH}$, $C_{12}=0.3\text{pF}$

ARALA - F4GSC - Jean-luc Levant May 12 17

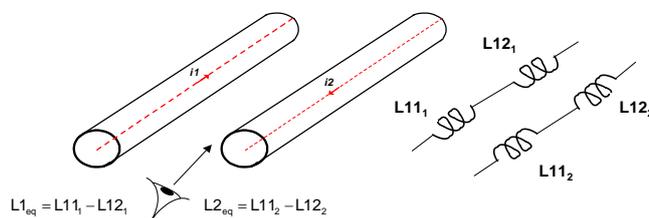
Modélisation des composants passifs

Inductance Réelle

- Modèle de deux conducteurs cylindriques séparés par une distance D.

- Inductance équivalente de la boucle de mode différentiel.

- Deux conducteurs sont parcourus par un courant i_1 pour l'un et i_2 pour l'autre. I_1 et i_2 sont de même amplitude mais de phase opposé.



Si les conducteurs sont égaux
 $L_{\text{boucle}}=2*(L_{11x}-L_{12x})$
 Coefficient de couplage magnétique
 $k = \frac{L_{12x}}{\sqrt{L_{11_1} \cdot L_{11_2}}}$

Exemple: $L_{11}=518\text{nH}$, $L_{12}=14.8\mu\text{H}$

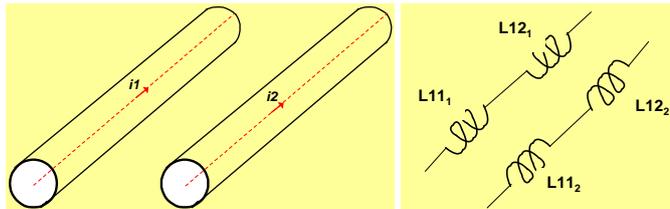
$L_{\text{boucle}}=1\mu\text{H}$

ARALA - F4GSC - Jean-luc Levant May 12 18

Modélisation des composants passifs

Inductance Réelle

- **Modèle de deux conducteurs cylindriques séparés par une distance D.**
 - **Inductance équivalente de la boucle de mode commun.**
 - Les courants i_1 et i_2 sont de même amplitude et en phase.



Si les conducteurs ont les mêmes dimensions

$$L_{11_1} = L_{11_2}$$

$$L_{12_1} = L_{12_2}$$

$$L_{\text{Boucle}} = \frac{L_{11} + L_{12}}{2}$$

$$L_{\text{Boucle}} = \frac{L_{11}}{2} \cdot (1+k)$$

Exemple : $L_{11}=518\mu H$, $L_{12}=14.8nH$

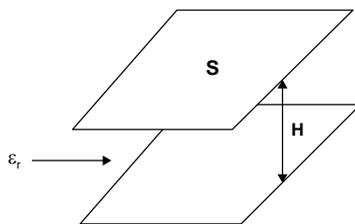
$L_{\text{boucle}}=0.51\mu H$

ARALA – F4GSC - Jean-luc Levant May 12 19

Modélisation des composants passifs

Capacité

- **Modèle de capacité de deux plans conducteurs:**
 - Deux plans conducteurs et séparés par un isolant constituent une capacité plan.
 - L'inductance des plans sont négligées.



$$C(F) = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{H}$$

ϵ_0 , permittivité du vide, 8.85pF

ϵ_r , permittivité du matériau, ex 4.5 pour l'époxy.

$S(m^2)$, surface des plans

$H(m)$, hauteur entre les deux plans.

Exemple: Deux plans de 10cm x 10cm
Séparés par une épaisseur d'air de 10cm.

$C=0.0885pF$.

ARALA – F4GSC - Jean-luc Levant May 12 20