



UNIVERSITÉ DE  
SHERBROOKE

## PPPPP02

Qu'est-ce qu'une impédance?

Pascal-Emmanuel Lachance

# Table des matières

- ① Qu'est-ce qu'une impédance?
- ② Pourquoi une impédance?
- ③ Où une impédance?
- ④ Quand une impédance?
- ⑤ Comment une impédance?
- ⑥ Qui une impédance?



# Qu'est-ce qu'une impédance?

## 1 Qu'est-ce qu'une impédance?

- Réactance
- Réactance Capacitive
- Réactance Inductive
- Ligne de transmission

## 2 Pourquoi une impédance?

## 3 Comment une impédance?

# Warning - Attention



$$ax=0 \xrightarrow{4P} (z \equiv x)$$
$$x) (b+1) > \cos\left[\frac{3\pi}{14}\right] ab=ba \xrightarrow{\frac{1}{8}S(2P,3)} (b+1) > \cos\left[\frac{3\pi}{14}\right] ab=ba \xrightarrow{\frac{1}{8}S(2P,3)}$$
$$c \int \frac{x}{\sqrt[3]{1-x^3}} dx + \cos ax \cdot bx \cdot cx = (ax \cdot b) \cdot cx \int \frac{x}{\sqrt[3]{1-x^3}} dx + \cos ax \cdot bx \cdot cx = (ax \cdot b) \cdot cx$$

Log<sub>2</sub>(1-x) + sin<sub>2</sub>( $\frac{\pi}{14}$ )

$ax \cdot bc \cdot (b+c) \dots$

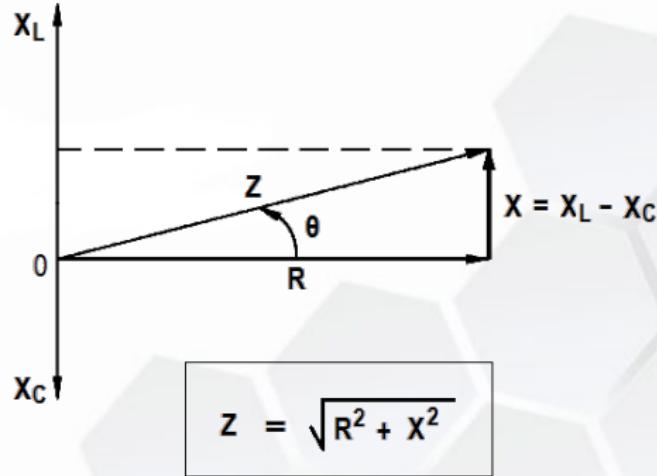
La section suivante contient des  
**équations mathématiques**

$\sum N_{i=2} \%$

$$3 > -4 \left\{ \begin{array}{l} \frac{xx+yy}{xy} a^4 ? \frac{5}{4} \cdot \frac{9}{4} \\ \frac{1}{2} \infty * \left\{ \begin{array}{l} \frac{xx+yy}{xy} a^4 ? \frac{5}{4} \cdot \frac{9}{4} \\ \sin\left[\frac{\pi}{14}\right] \end{array} \right. \end{array} \right.$$
$$\div \sqrt{2} \infty * \left\{ \begin{array}{l} \frac{xx+yy}{xy} a^4 ? \frac{5}{4} \cdot \frac{9}{4} \\ \sin\left[\frac{\pi}{14}\right] \end{array} \right. \div \sqrt{ }$$
$$b \sqrt{\frac{1}{3}ab} SH \supset P MS^{(1)} + \frac{ab}{7^a+3^b} \sqrt{\frac{1}{3}ab} SH \supset P MS^{(1)} + \frac{ab}{7^a+3^b}$$
$$ax=0 \xrightarrow{4P} (z \equiv x)$$
$$x) (b+1) > \cos\left[\frac{3\pi}{14}\right] ab=ba \xrightarrow{\frac{1}{8}S(2P,3)} (b+1) > \cos\left[\frac{3\pi}{14}\right] ab=ba \xrightarrow{\frac{1}{8}S(2P,3)}$$
$$c \int \frac{x}{\sqrt[3]{1-x^3}} dx + \cos ax \cdot bx \cdot cx = (ax \cdot b) \cdot cx \int \frac{x}{\sqrt[3]{1-x^3}} dx + \cos ax \cdot bx \cdot cx = (ax \cdot b) \cdot cx$$

- Dénoté  $Z$ , en  $\Omega$
- Résistance électrique à une certaine fréquence
- Composé de:
  - Résistance ( $R$ )
  - Réactance Inductive ( $X_L$ )
  - Réactance Capacitive ( $X_C$ )
- Les réactances s'opposent sur l'axe imaginaire!

$$V = ZI$$



# Qu'est-ce qu'une impédance?

## 1 Qu'est-ce qu'une impédance?

- Réactance
  - Réactance Capacitive
  - Réactance Inductive
  - Ligne de transmission

## 2 Pourquoi une impédance?

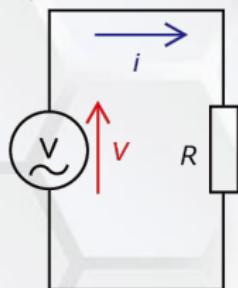
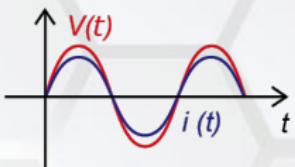
## 3 Comment une impédance?

- Opposition à un courant alternatif
  - Posé par une bobine (Réactance Inductive  $X_L$ )
  - Posé par un condensateur (Réactance Capacitive  $X_C$ )
- Pas de dissipation en chaleur!
- Emmagasine l'énergie et la relâche plus tard
  - Champ magnétique ( $X_L$ )
  - Champ électrique ( $X_C$ )
- Entraîne un changement de phase dans un signal!

# Différence de phase entre réactances

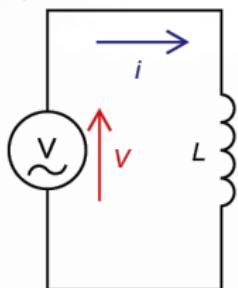
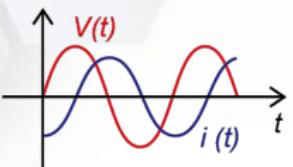


Voltage and current  
are in phase



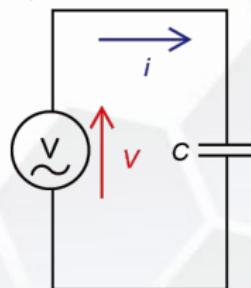
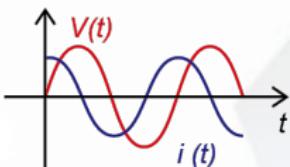
$$i(t) = \frac{V_{max}}{R} \sin \omega t$$

The current lags behind the  
voltage by a phase of  $90^\circ$



$$i(t) = \frac{V_{max}}{\omega L} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

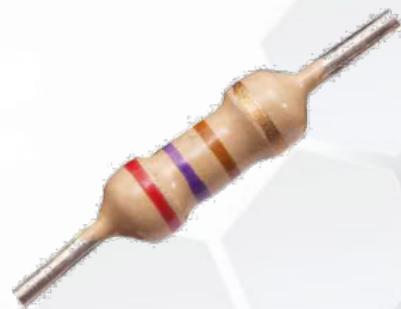
The current leads the  
voltage by a phase of  $90^\circ$



$$i(t) = \omega C V_{max} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

- S'oppose à tout courant
- Mauvais conducteur d'électricité
- Friction / Restriction
- Dissipe l'énergie en chaleur
- *Fonctionne pareillement à toutes fréquences*

$$V = RI$$



# Qu'est-ce qu'une impédance?

## 1 Qu'est-ce qu'une impédance?

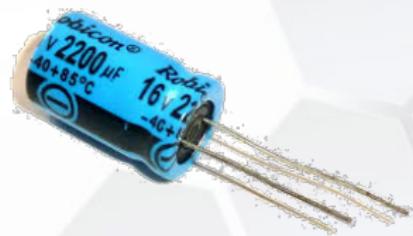
- Réactance
- Réactance Capacitive
- Réactance Inductive
- Ligne de transmission

## 2 Pourquoi une impédance?

## 3 Comment une impédance?

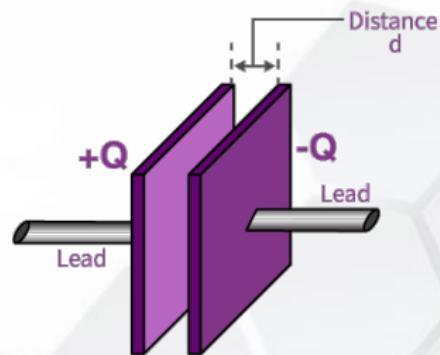
- S'oppose aux changements de tension
- Ne conduit pas en DC
- Emmagasine l'énergie dans les champs électriques
- Charges accumulées sur les plaques du condensateur
- *Conduit plus à des fréquences plus élevées*

$$Q = CV$$



- Deux plaques espacées, avec un matériau entre les plaques
- Des charges s'accumulent entre les plaques
- Différence de potentiel entre les plaques
- Énergie emmagasinée dans les champs électriques

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$$



- Quantité de Charge = Capacitance \* Tension
  - Dérivée selon le temps
  - Ampère = Coulomb / Seconde
- 
- Plus de courant passe au travers du cap quand changements de tension
  - Plus un changement est rapide ( $\frac{dV}{dt}$ ), plus de courant passe

$$Q = CV$$

$$\frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt}$$

$$I = C \frac{dV}{dt}$$

Posons  $V = \sin(2\pi ft) = e^{j2\pi ft} = e^{j\omega t}$

$$I = C \cdot \frac{de^{j\omega t}}{dt}$$

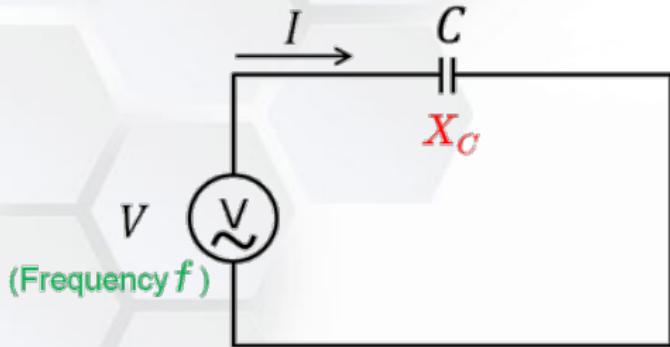
$$I = Cj\omega \cdot e^{j\omega t}$$

$$I = Cj\omega \cdot V$$

$$\frac{V}{I} = \frac{1}{Cj\omega}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

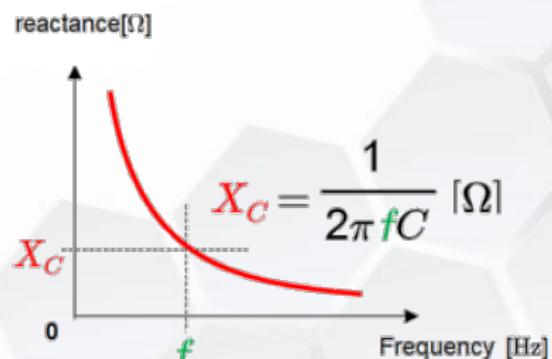
Capacitive reactance :  $X_C$



$C$  [F] : Capacitance

$V$  [V] : Alternating Voltage

$I$  [A] : Alternating Current



$$X_C \propto 1/f$$

# Qu'est-ce qu'une impédance?

## 1 Qu'est-ce qu'une impédance?

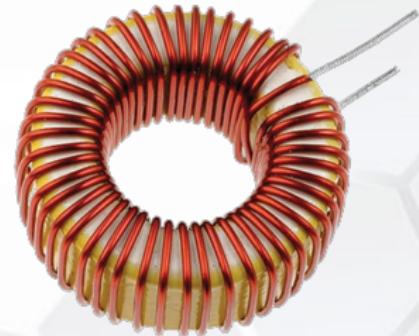
- Réactance
- Réactance Capacitive
- Réactance Inductive
- Ligne de transmission

## 2 Pourquoi une impédance?

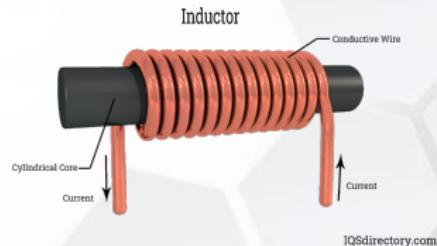
## 3 Comment une impédance?

- S'oppose aux changements de courant
- Conduit en DC
- Emmagasine l'énergie dans les champs magnétique
- *Conduit plus à des basses fréquences*

$$L = \frac{V \cdot dt}{I}$$



- Bobine de fil enroulé autour d'un matériau
- Flux magnétique généré par un  $\frac{dI}{dt}$  dans le fil
- Flux magnétique fait circuler du courant dans les conducteurs autour
  - *Self-induction*
  - Inclut la boucle elle-même
- Énergie emmagasinée dans les champs magnétiques



$$L = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 A}{l}$$

- Inductance = Tension / taux de change du courant
- Déjà dérivée selon le temps
- Plus de tension aux bornes de l'inductance quand changement de courant
- Plus un changement est rapide ( $\frac{di}{dt}$ ), plus la tension monte.

$$L = \frac{V \cdot s}{I}$$

$$V = L \frac{di}{dt}$$

Posons  $I = \sin(2\pi ft) = e^{j2\pi ft} = e^{j\omega t}$

$$V = L \cdot \frac{de^{j\omega t}}{dt}$$

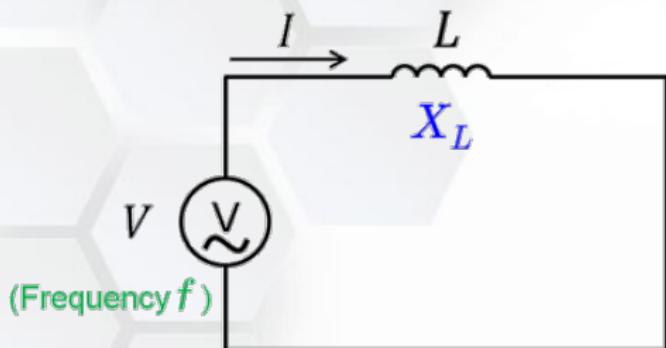
$$V = Lj\omega \cdot e^{j\omega t}$$

$$V = Lj\omega \cdot I$$

$$\frac{V}{I} = Lj\omega$$

$$X_L = 2\pi fL$$

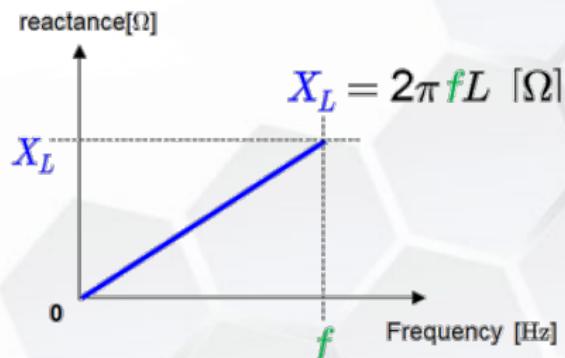
Inductive reactance :  $X_L$



$L$  [H] : Inductance

$V$  [V] : Alternating Voltage

$I$  [A] : Alternating Current

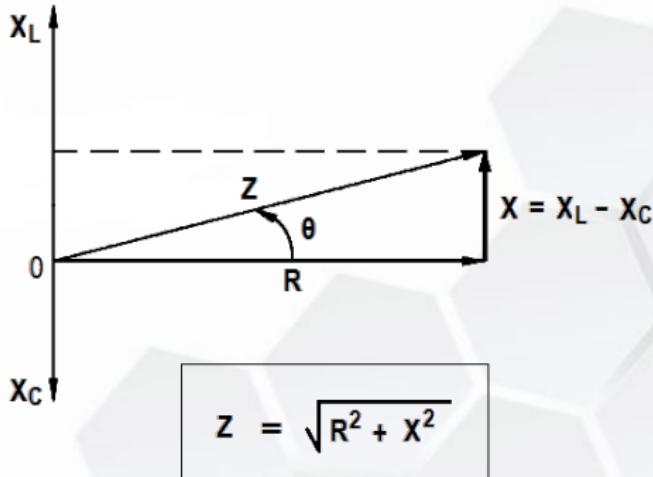


$$X_L \propto f$$

- Complexe
- Amplitude défini la "résistance" réelle du circuit
- Résistance d'un circuit à une certaine fréquence
- Phase défini le décalage du courant par rapport à la tension

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$X_L = 2\pi f L$$



# Qu'est-ce qu'une impédance?

## 1 Qu'est-ce qu'une impédance?

- Réactance
- Réactance Capacitive
- Réactance Inductive
- Ligne de transmission

## 2 Pourquoi une impédance?

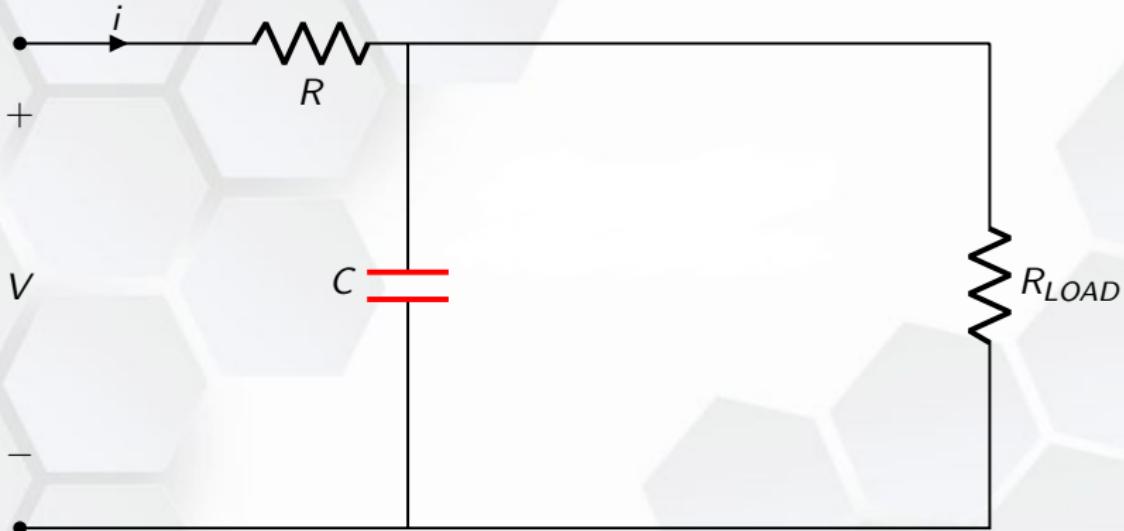
## 3 Comment une impédance?

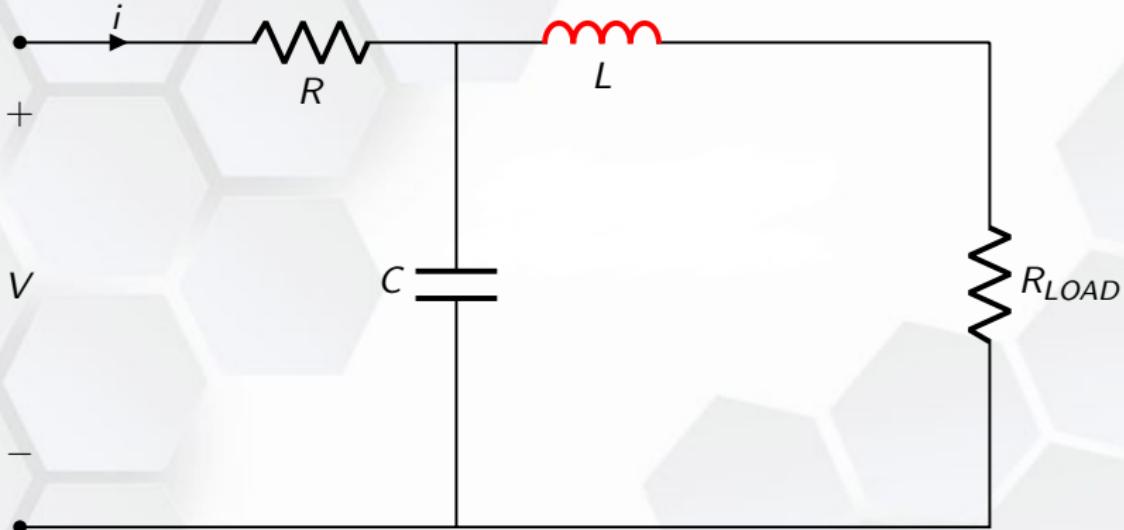
# Circuit électrique de base



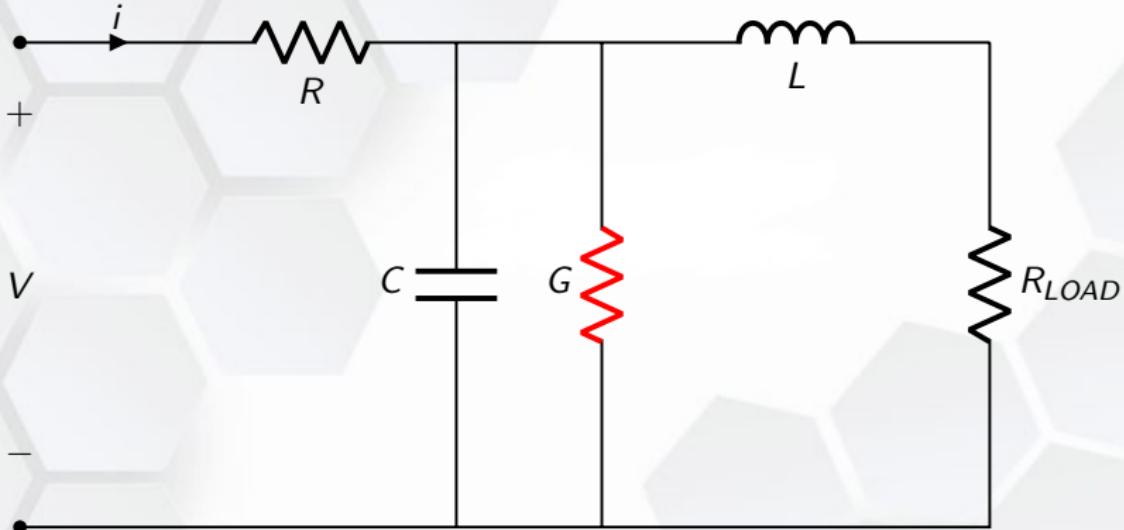
# Circuit électrique - Résistance Parasite



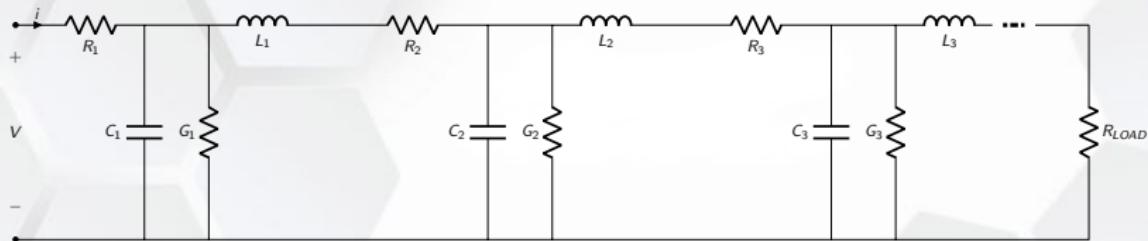




# Circuit électrique - Conductance Parasite

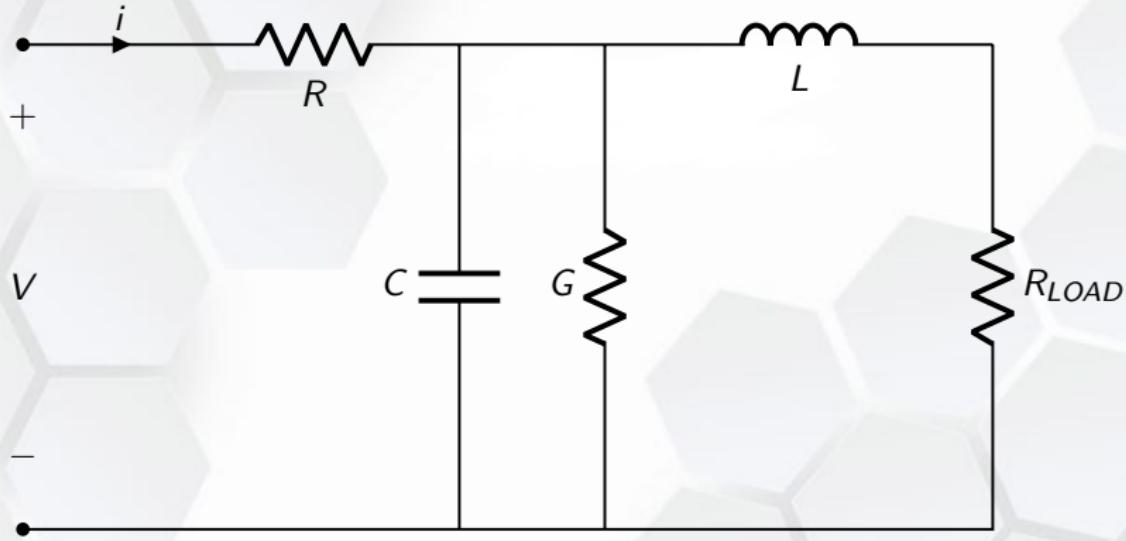


# Ligne de transmission



$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

$$G[S] = \frac{1}{R}$$



# Ligne de transmission - Impédance Caractéristique

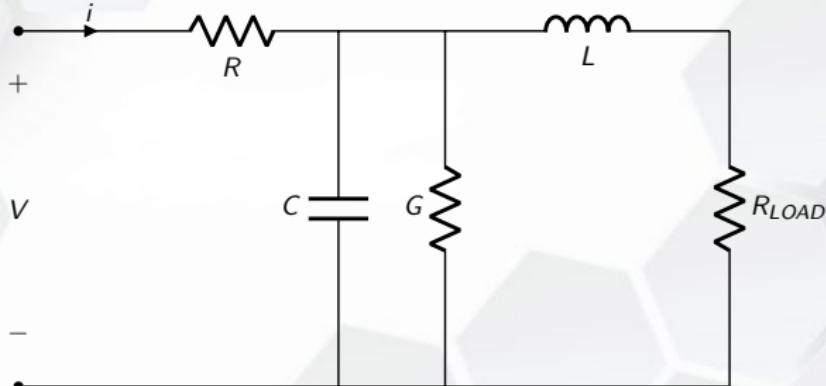


$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

$$G \rightarrow 0$$
$$R \ll \omega L$$

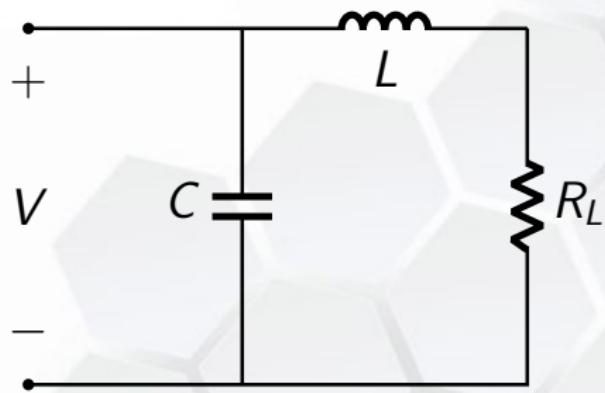
$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$



- Ne dépend pas de la fréquence
- Tout circuit a un  $Z_0$
- Ratio tension/courant se déplaçant
- $Z_0$  ne dépend que de la géométrie du circuit
- Ratio du E-field vs H-field

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$



# Pourquoi une impédance?

1 Qu'est-ce qu'une impédance?

2 Pourquoi une impédance?

- Power Factor
- Réflexions sur un circuit ouvert
- Réflexions sur un circuit ouvert 2
- Que se passe-t'il?
- Réflexions sur un circuit fermé
- Donc, pourquoi une impédance?
- 3e impédance cachée!

3 Comment une impédance?

# Pourquoi une impédance?

1 Qu'est-ce qu'une impédance?

2 Pourquoi une impédance?

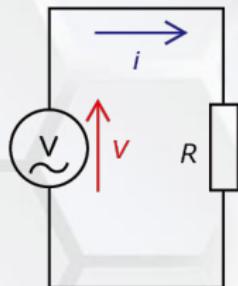
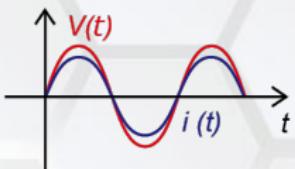
- Power Factor
- Réflexions sur un circuit ouvert
- Réflexions sur un circuit ouvert 2
- Que se passe-t'il?
- Réflexions sur un circuit fermé
- Donc, pourquoi une impédance?
- 3e impédance cachée!

3 Comment une impédance?

# Différence de phase entre réactances

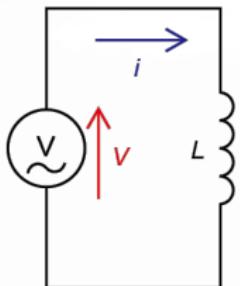
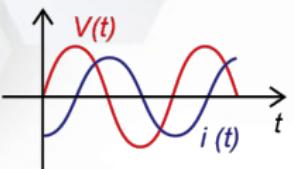


Voltage and current  
are in phase



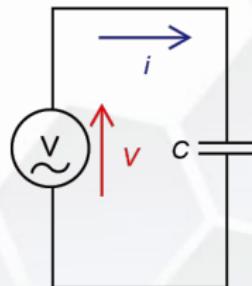
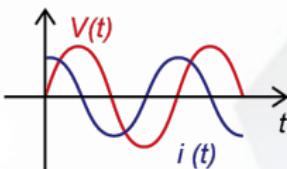
$$i(t) = \frac{V_{max}}{R} \sin \omega t$$

The current lags behind the  
voltage by a phase of  $90^\circ$



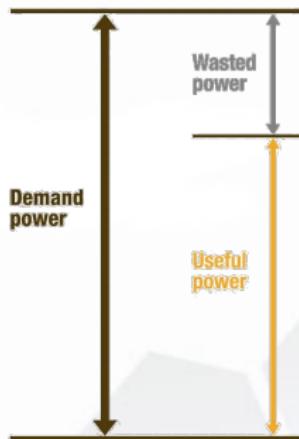
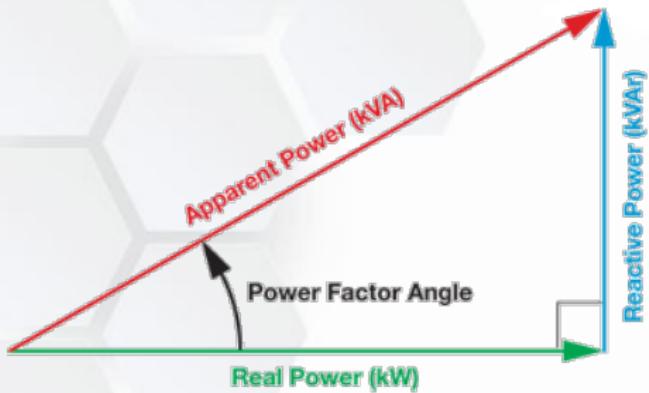
$$i(t) = \frac{V_{max}}{\omega L} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

The current leads the  
voltage by a phase of  $90^\circ$



$$i(t) = \omega C V_{max} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

- Ratio du *vrai* power ( $kW$ ) au power *apparent* ( $kVA$ ).
- Avec impédance imaginaire vient puissance imaginaire
- Seule la puissance réelle est utile



# Pourquoi une impédance?

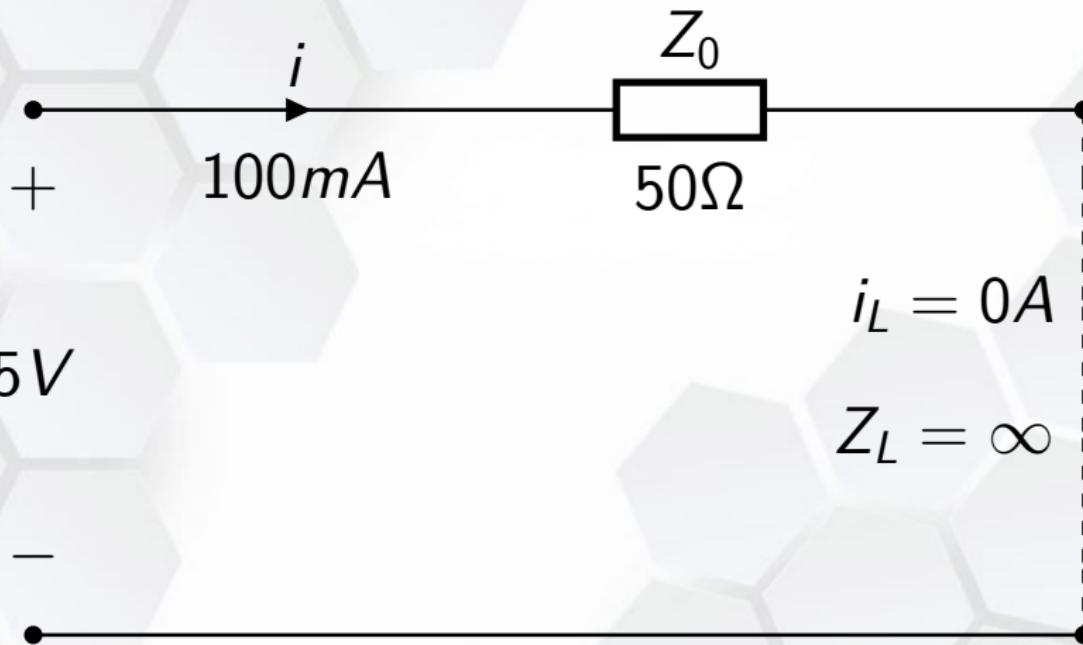
1 Qu'est-ce qu'une impédance?

2 Pourquoi une impédance?

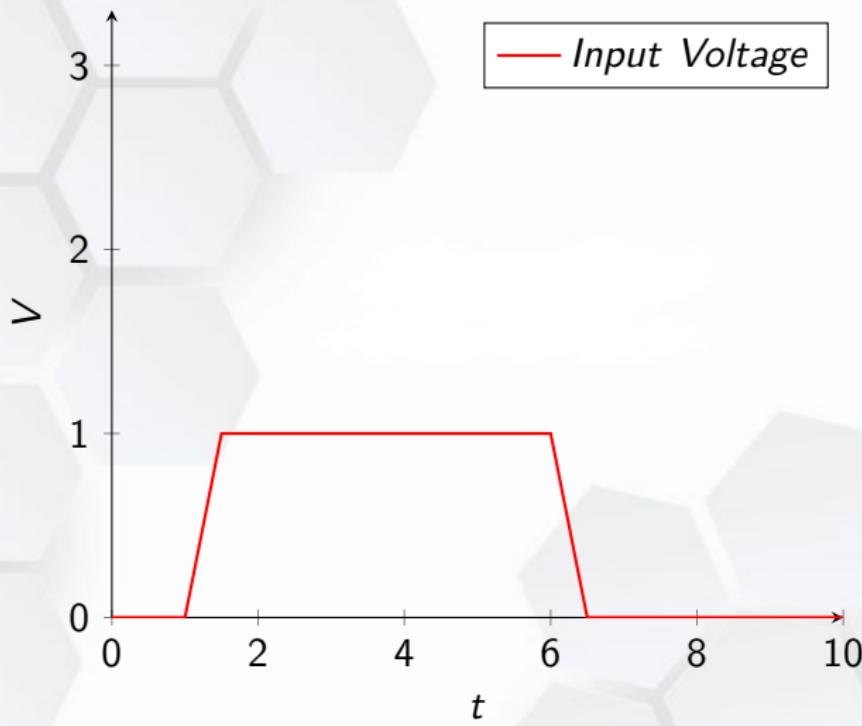
- Power Factor
- Réflexions sur un circuit ouvert
- Réflexions sur un circuit ouvert 2
- Que se passe-t'il?
- Réflexions sur un circuit fermé
- Donc, pourquoi une impédance?
- 3e impédance cachée!

3 Comment une impédance?

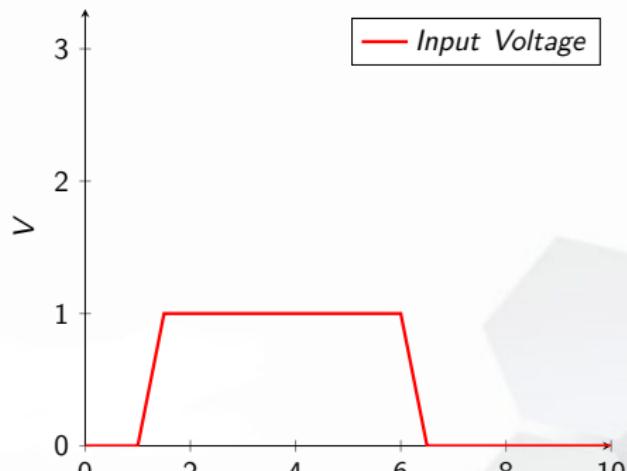
$$i = \frac{V}{Z_0}$$

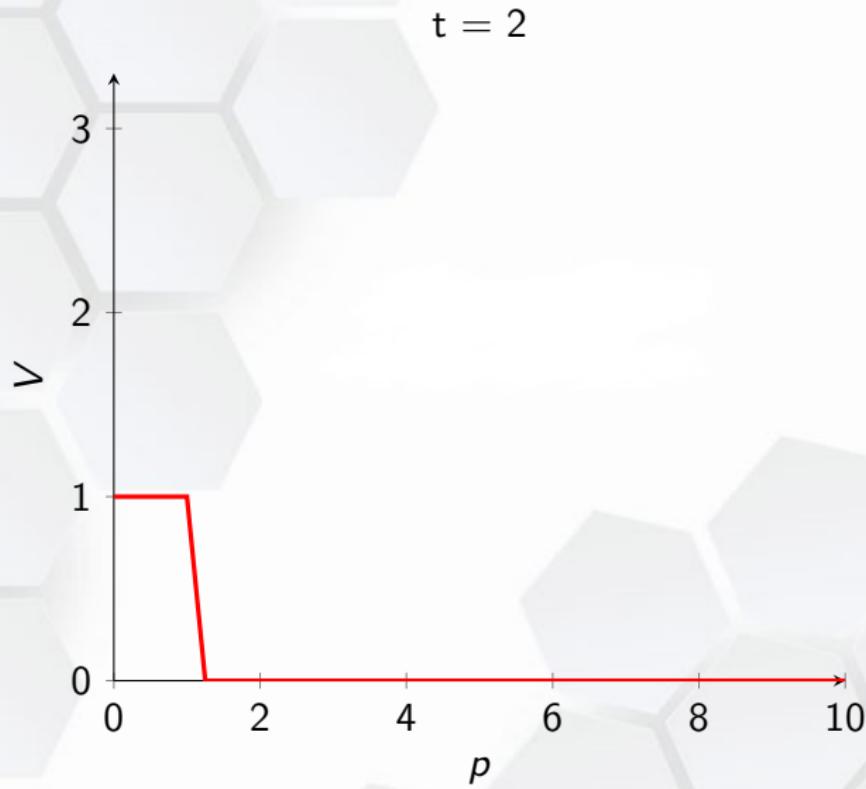


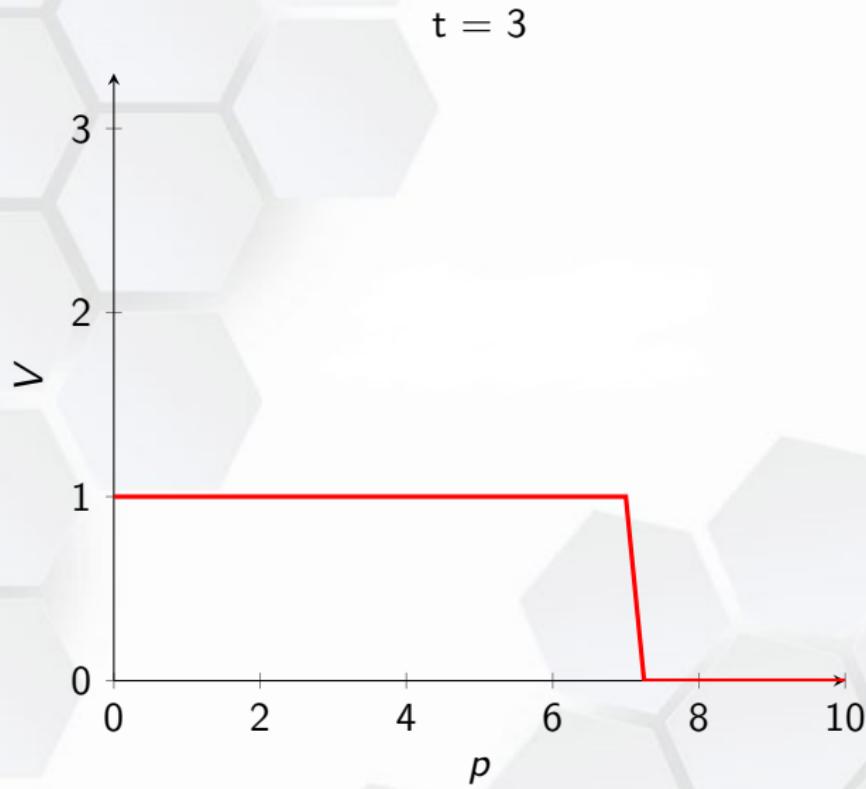
# Circuit Ouvert - Onde à envoyer

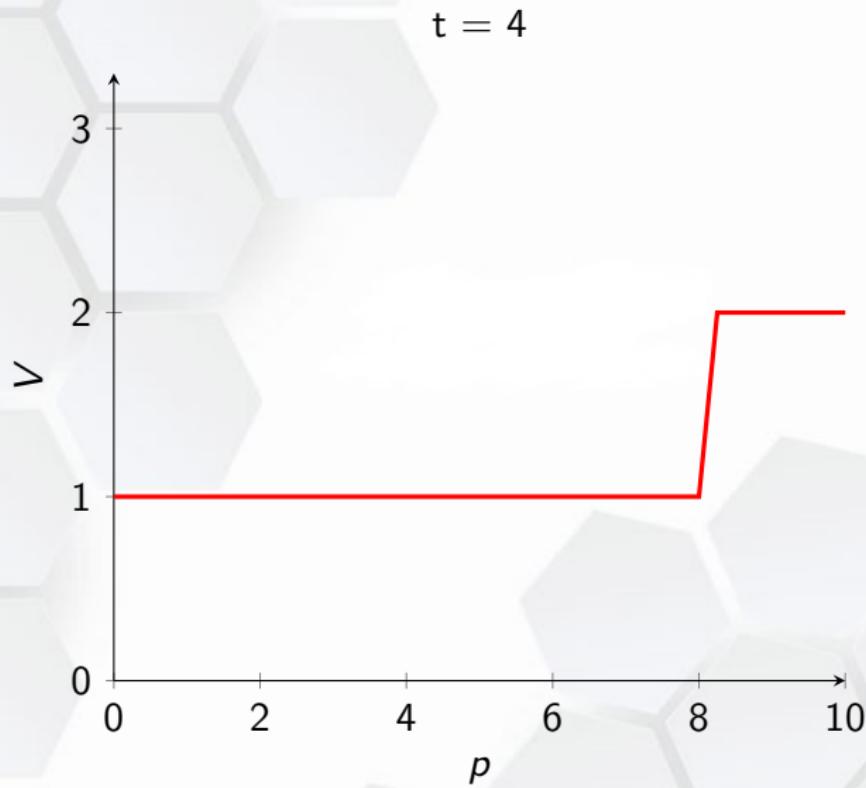


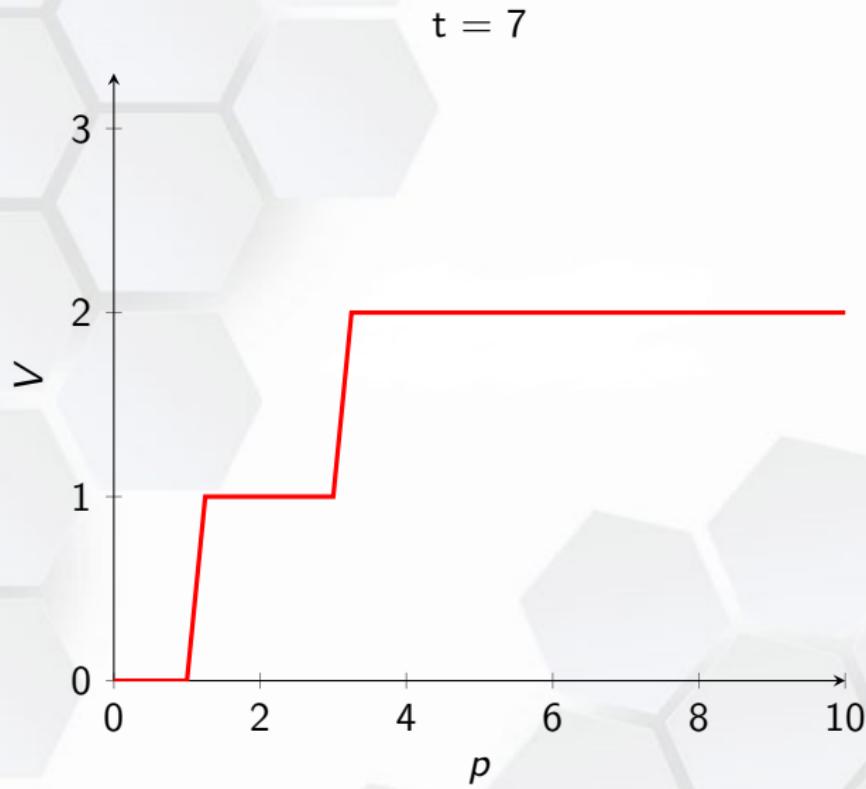
- Impulsion très courte
- (Impulsion fini avant réflexion)
- Circuit ouvert au bout
- Signal réfléchit avec 2x amplitude

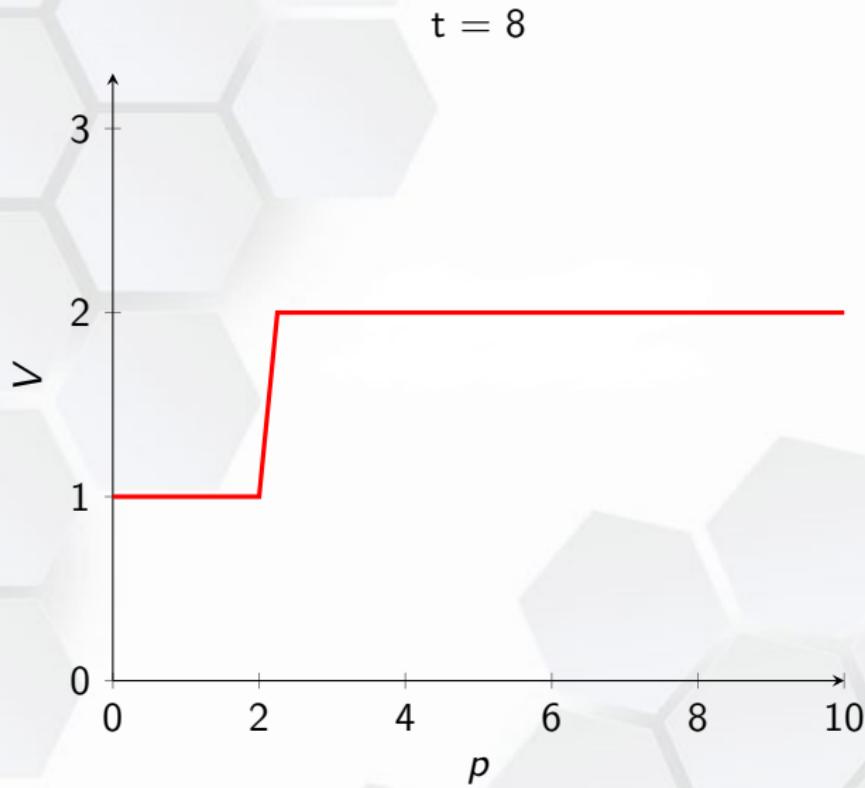




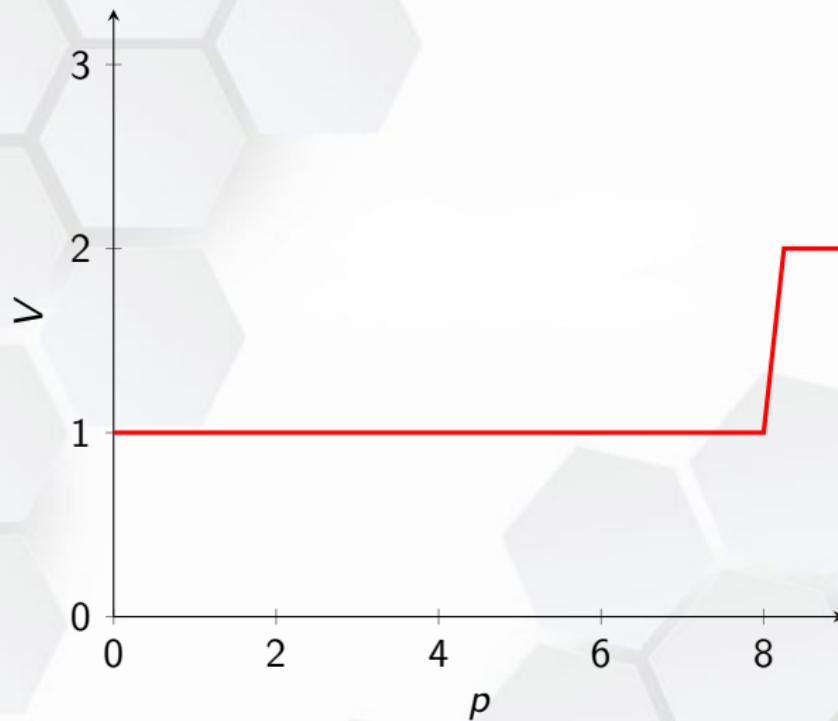


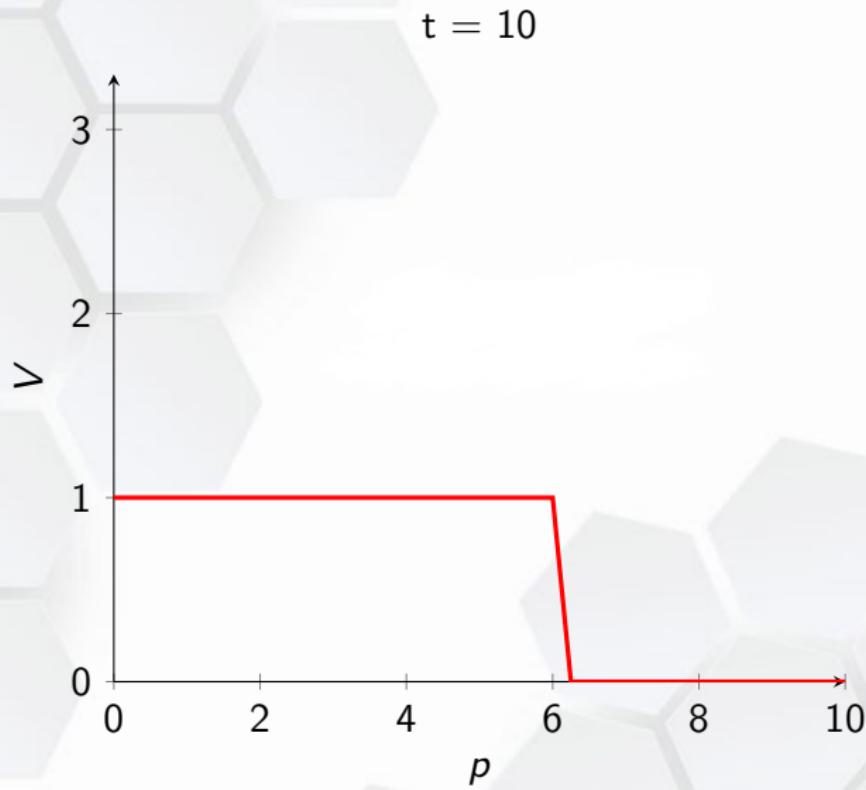


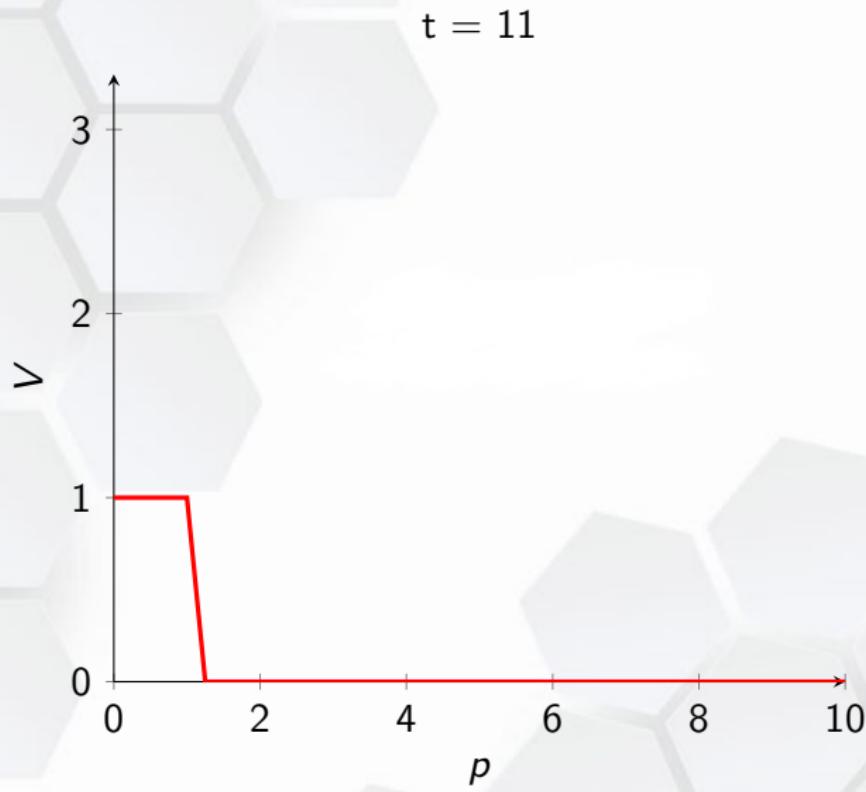




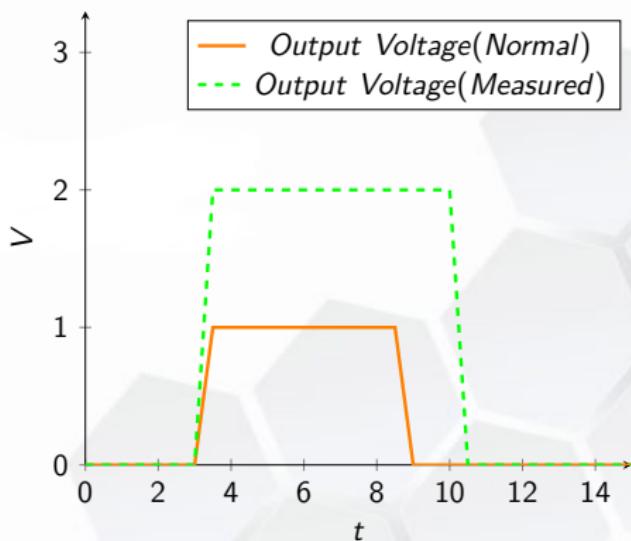
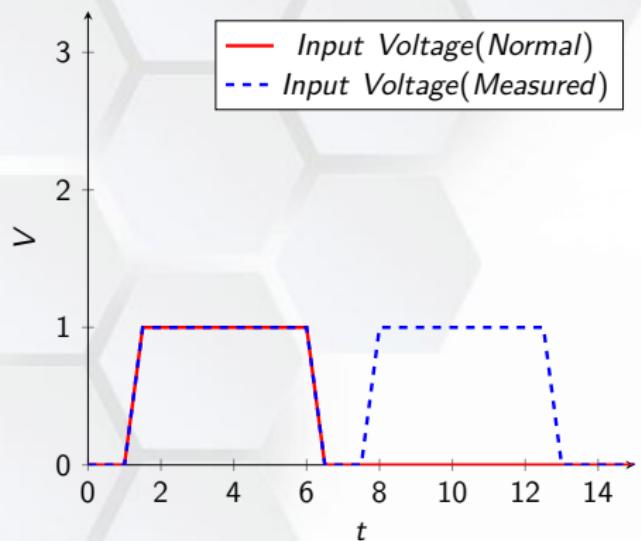
$t = 10$







# Circuit Ouvert - Vraie forme d'onde



- Oscilloscope à l'entrée
- Réflexion en phase avec signal
- Pulse suivi d'un autre
- Délai = temps aller-retour du signal
- Peut endommager la load



# Pourquoi une impédance?

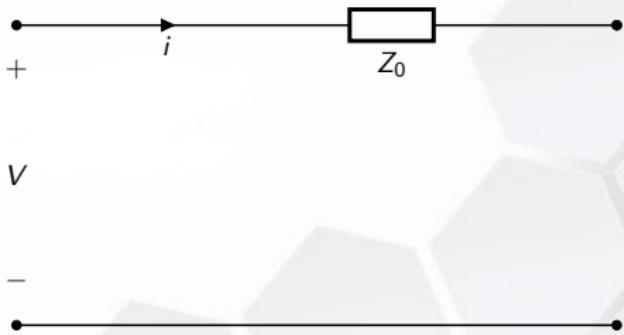
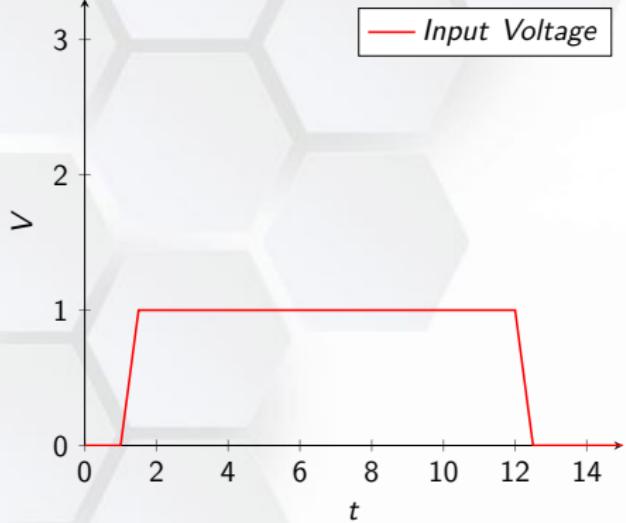
1 Qu'est-ce qu'une impédance?

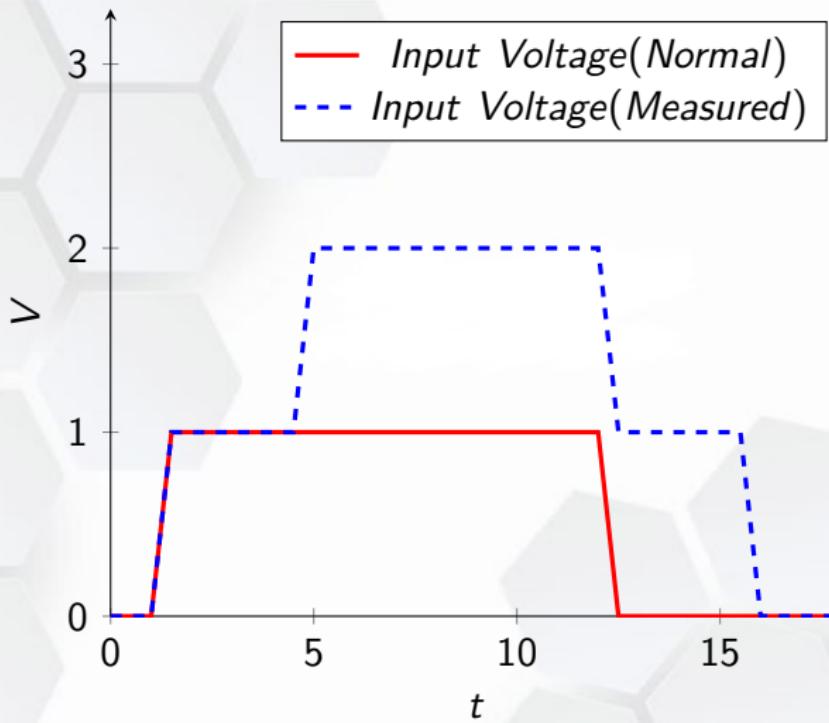
2 Pourquoi une impédance?

- Power Factor
- Réflexions sur un circuit ouvert
- Réflexions sur un circuit ouvert 2**
- Que se passe-t'il?
- Réflexions sur un circuit fermé
- Donc, pourquoi une impédance?
- 3e impédance cachée!

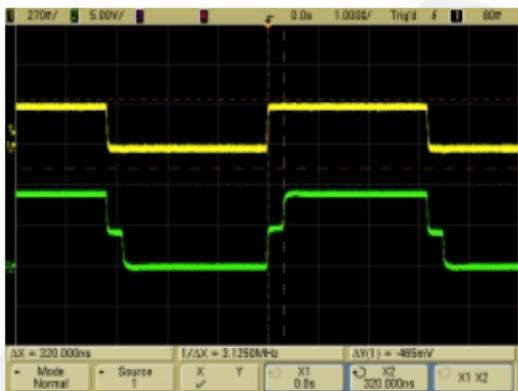
3 Comment une impédance?

# Circuit Ouvert 2 - Onde à envoyer





- Oscilloscope à l'entrée
- Pulse plus long
- Délai de propagation  $ps < \text{pulse}$
- Peut endommager la load
- Peut endommager la source



# Pourquoi une impédance?

1 Qu'est-ce qu'une impédance?

2 Pourquoi une impédance?

- Power Factor
- Réflexions sur un circuit ouvert
- Réflexions sur un circuit ouvert 2
- Que se passe-t'il?
- Réflexions sur un circuit fermé
- Donc, pourquoi une impédance?
- 3e impédance cachée!

3 Comment une impédance?

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = -\frac{I_r}{I_i}$$

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = -\frac{I_r}{I_i}$$

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

$$Z_L = Z_0$$

$$\Gamma = \frac{0}{Z_L + Z_0}$$

$$\Gamma = 0$$

$$V_r = 0$$

Pas de réflexion!

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = -\frac{I_r}{I_i}$$

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

$$Z_L = Z_0$$

$$\Gamma = \frac{0}{Z_L + Z_0}$$

$$\Gamma = 0$$

$$V_r = 0$$

Pas de réflexion!

$$Z_L = \infty$$

$$\Gamma = \frac{\infty}{\infty}$$

$$\Gamma = 1$$

$$V_r = V_i$$

Même tension réfléchie  
que rentrante

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = -\frac{I_r}{I_i}$$

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

$$Z_L = Z_0$$

$$\Gamma = \frac{0}{Z_L + Z_0}$$

$$\Gamma = 0$$

$$V_r = 0$$

Pas de réflexion!

$$Z_L = \infty$$

$$\Gamma = \frac{\infty}{\infty}$$

$$\Gamma = 1$$

$$V_r = V_i$$

Même tension réfléchie  
que rentrante

$$Z_L = 0$$

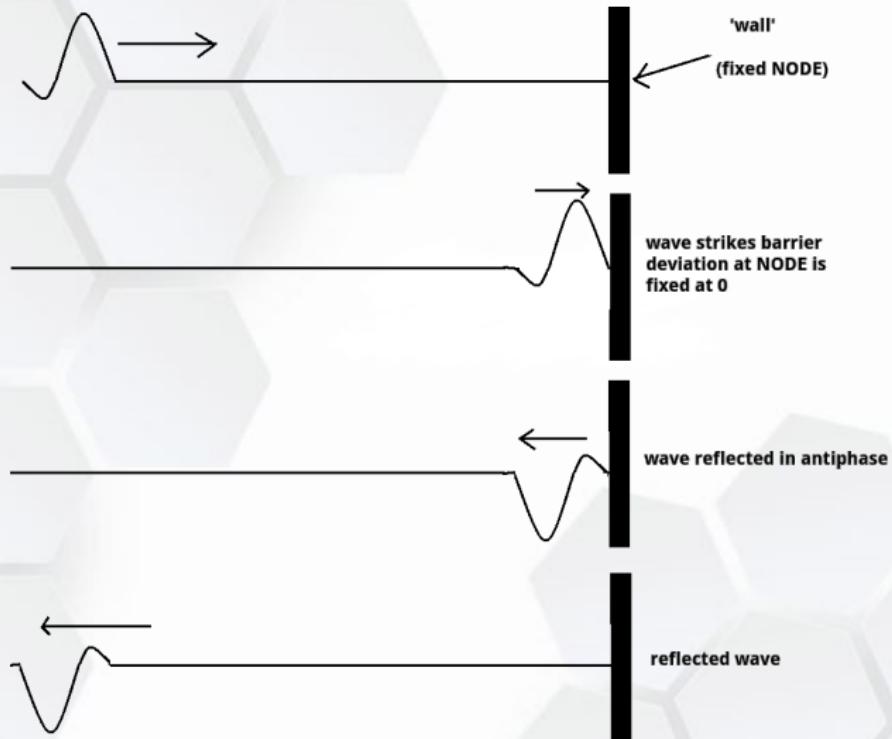
$$\Gamma = -\frac{Z_0}{Z_0}$$

$$\Gamma = -1$$

$$V_r = -V_i$$

Tension réfléchie  
négative?

# Circuit Fermé - Analogie



# Mismatch d'impédance



# Pourquoi une impédance?

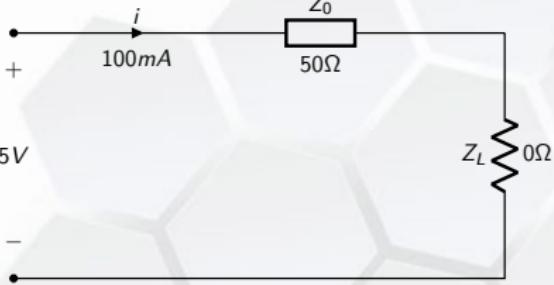
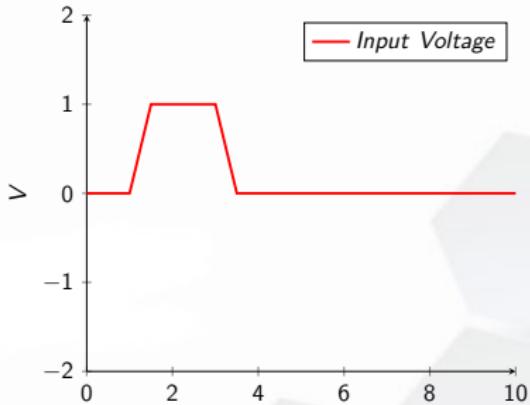
1 Qu'est-ce qu'une impédance?

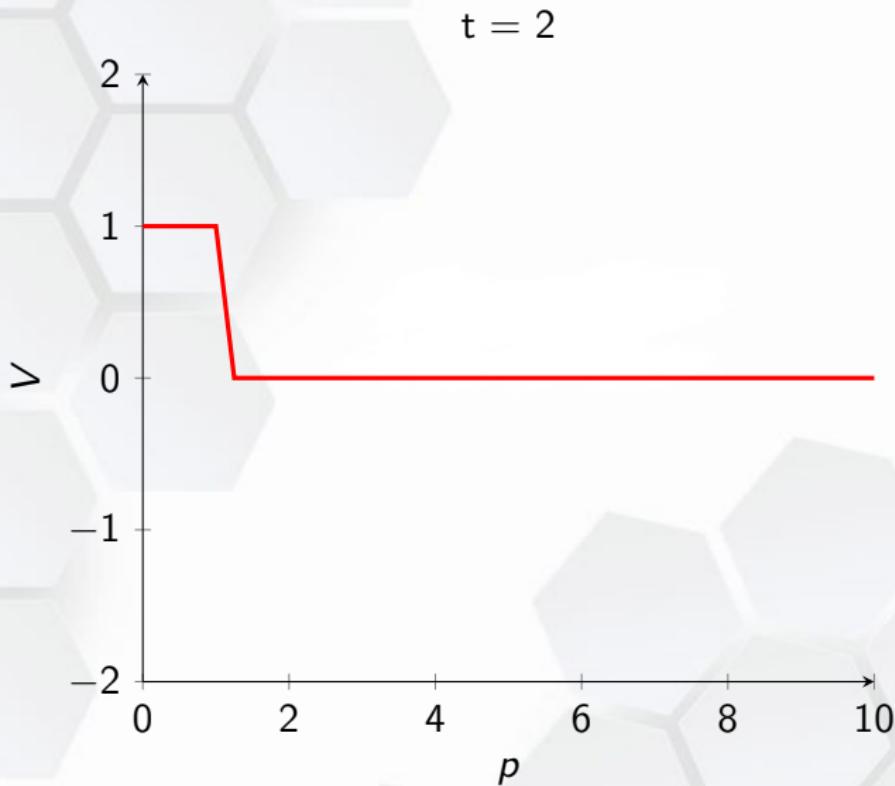
2 Pourquoi une impédance?

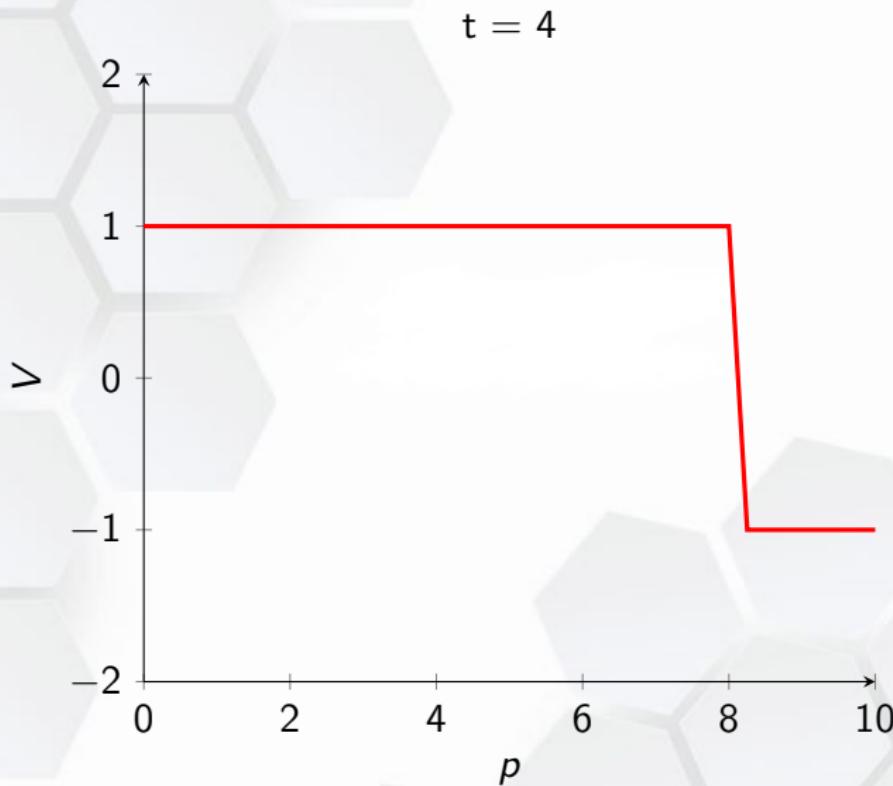
- Power Factor
- Réflexions sur un circuit ouvert
- Réflexions sur un circuit ouvert 2
- Que se passe-t'il?
- **Réflexions sur un circuit fermé**
- Donc, pourquoi une impédance?
- 3e impédance cachée!

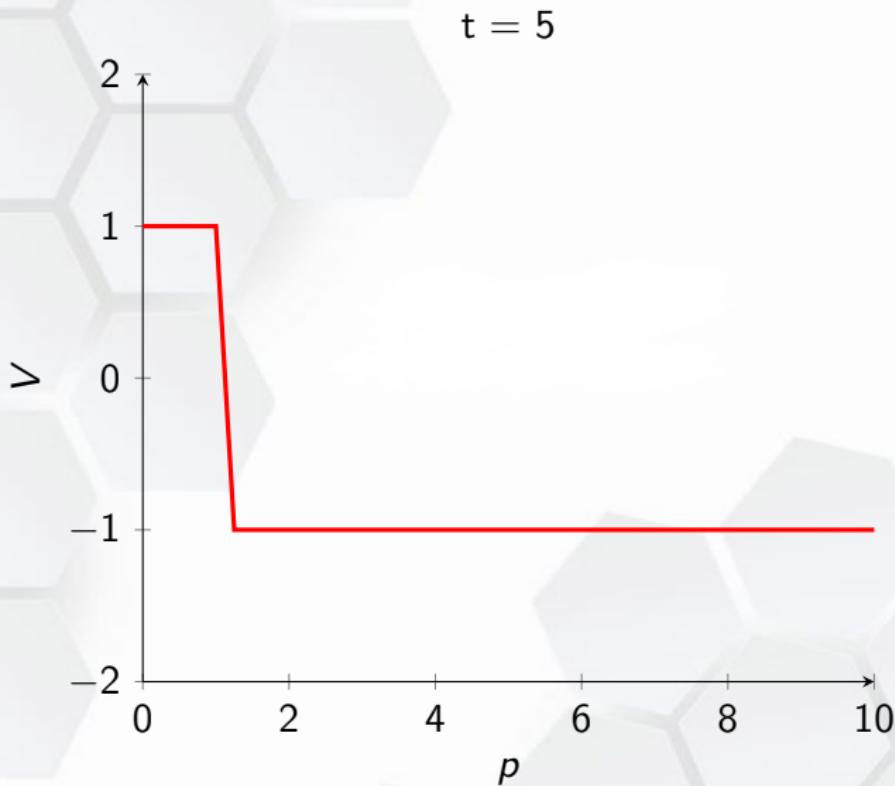
3 Comment une impédance?

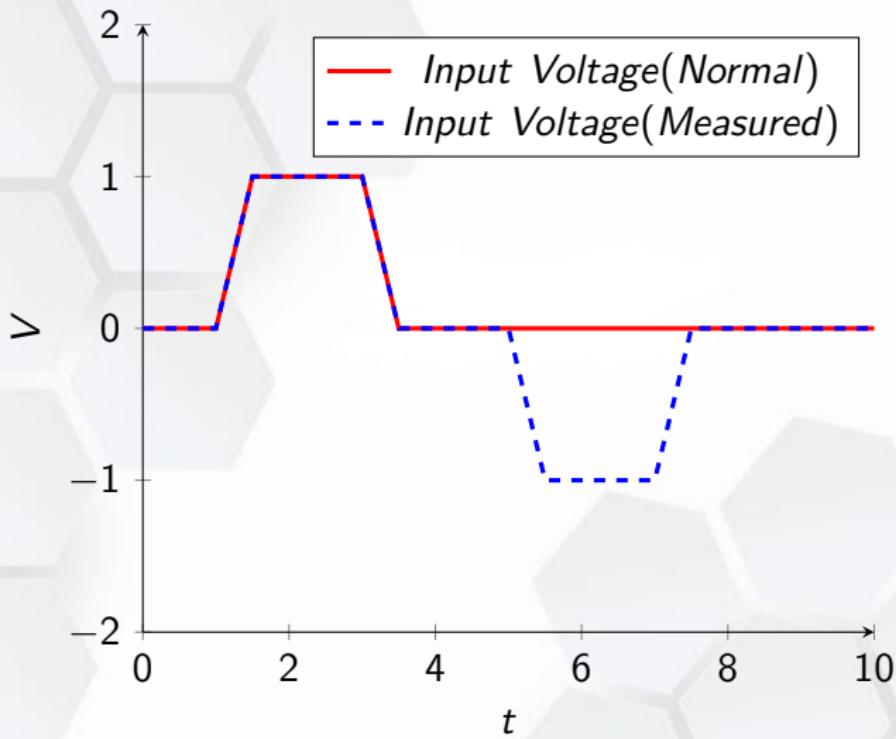
- Impulsion courte
- Circuit fermé au bout
- Signal négatif réfléchit











- Oscilloscope à l'entrée
- Pulse court suivi d'un pulse négatif
- Même durée
- Délai de propagation  $ps < \text{pulse}$
- Peut endommager la load
- Peut endommager la source



# Pourquoi une impédance?

1 Qu'est-ce qu'une impédance?

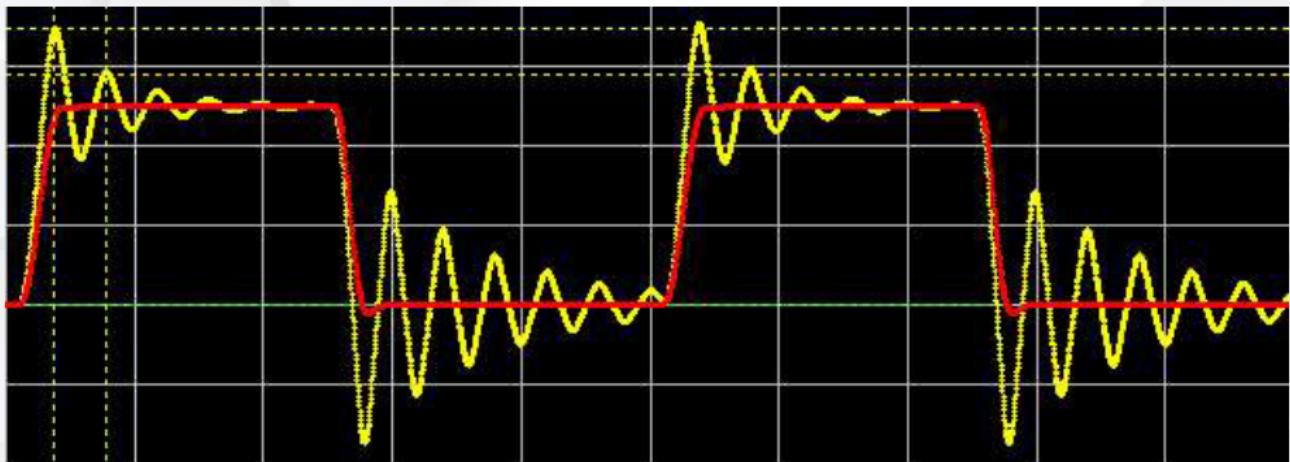
2 Pourquoi une impédance?

- Power Factor
- Réflexions sur un circuit ouvert
- Réflexions sur un circuit ouvert 2
- Que se passe-t'il?
- Réflexions sur un circuit fermé
- Donc, pourquoi une impédance?**
- 3e impédance cachée!

3 Comment une impédance?

- Power Factor (efficacité)
- Réflections

- Endommager les composantes
- Intégrité du signal
- Normes de protocole



# Pourquoi une impédance?

1 Qu'est-ce qu'une impédance?

2 Pourquoi une impédance?

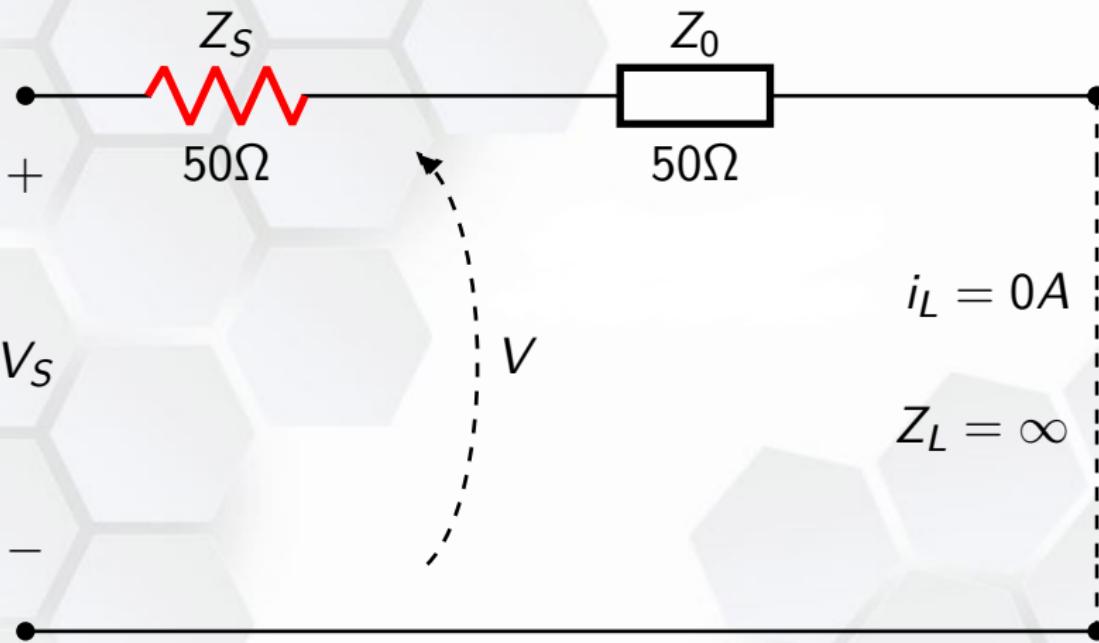
- Power Factor
- Réflexions sur un circuit ouvert
- Réflexions sur un circuit ouvert 2
- Que se passe-t'il?
- Réflexions sur un circuit fermé
- Donc, pourquoi une impédance?
- 3e impédance cachée!

3 Comment une impédance?

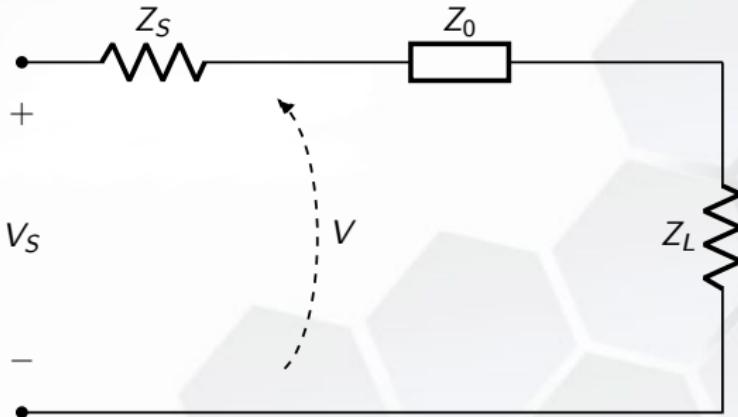
## 2 Impédances



### 3 Impédances



- L'impédance  $Z_0$  est en tout point du conducteur
- Les points aux bouts doivent être matchés
- $Z_0 = Z_S = Z_L$
- Réflexion à la source possible!



# Comment une impédance?

1 Qu'est-ce qu'une impédance?

2 Pourquoi une impédance?

3 Comment une impédance?

- Matching à la source
- Matching à la load
- Matching du conducteur
- Impédance Différentielle
- Résumé

# Comment une impédance?

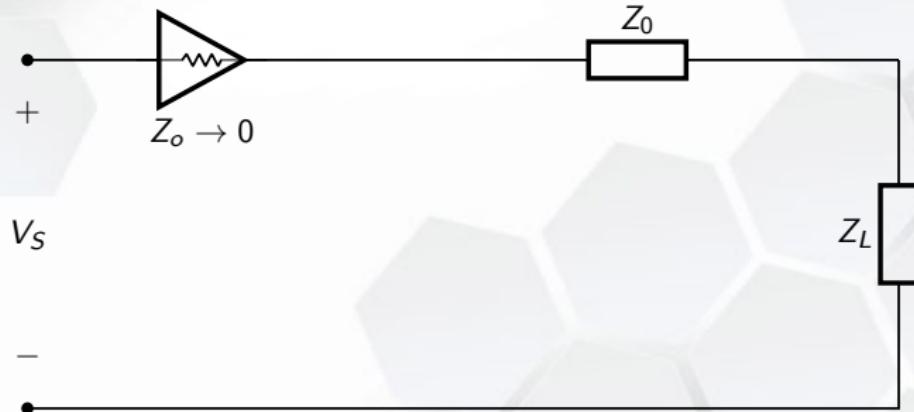
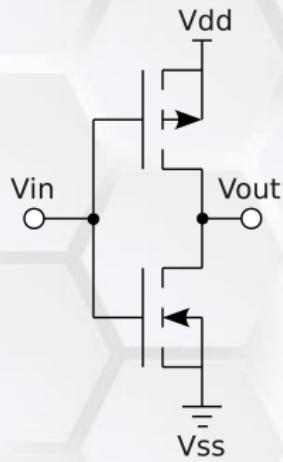
1 Qu'est-ce qu'une impédance?

2 Pourquoi une impédance?

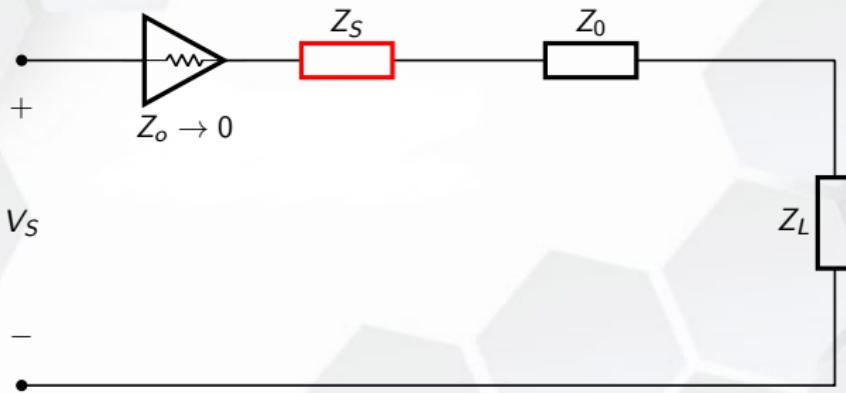
3 Comment une impédance?

- Matching à la source
- Matching à la load
- Matching du conducteur
- Impédance Différentielle
- Résumé

- Plupart des circuits avec sortie CMOS
- $Z_o \rightarrow 0\Omega$



- Ajouter une résistance externe!
- Très proche de la sortie
- Valider  $Z_o$  du IC
- $Z_S = Z_0 - Z_o$



# Comment une impédance?

1 Qu'est-ce qu'une impédance?

2 Pourquoi une impédance?

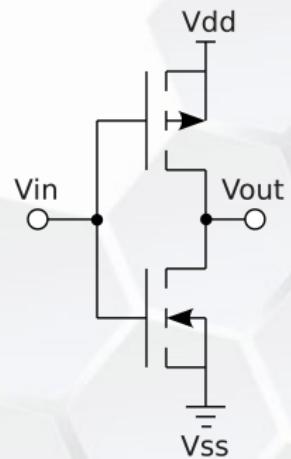
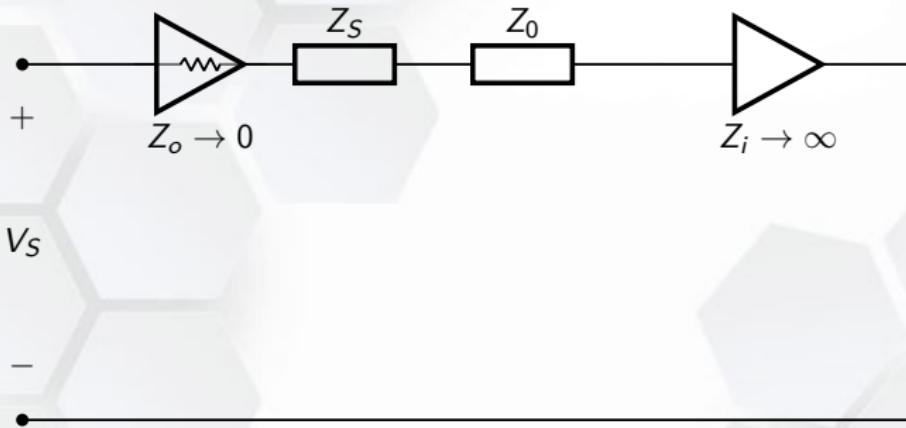
3 Comment une impédance?

- Matching à la source
- Matching à la load
- Matching du conducteur
- Impédance Différentielle
- Résumé

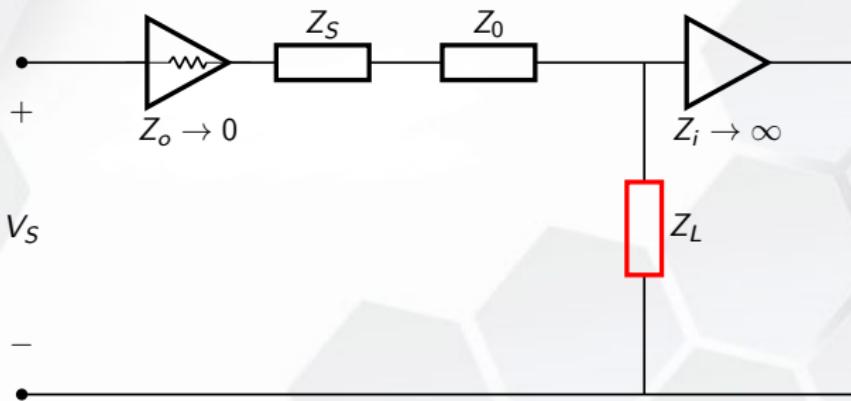
# Matching à la load



- Plupart des circuits avec entrée CMOS
- $Z_L \rightarrow \infty \Omega$



- Ajouter une résistance externe!
- Très proche de l'entrée
- Valider  $Z_i$  du IC
- $Z_L = Z_0 - \frac{Z_0}{Z_i}$



# Comment une impédance?

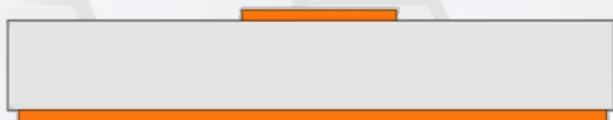
1 Qu'est-ce qu'une impédance?

2 Pourquoi une impédance?

3 Comment une impédance?

- Matching à la source
- Matching à la load
- Matching du conducteur**
- Impédance Différentielle
- Résumé

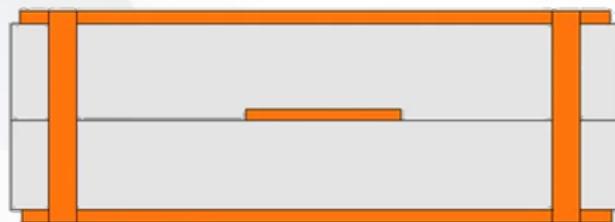
- L'impédance caractéristique  $Z_0$  d'une ligne de transmission
- Ne dépend que de la *géométrie* de la ligne de transmission
- Contrôle les éléments capacitifs et inductifs parasites, qui dominent
- Augmenter largeur de trace → plus de capacitance
- Augmenter distance entre les traces → plus d'inductance
- *Dans un PCB, l'inductance parasite domine toujours!*



Microstrip

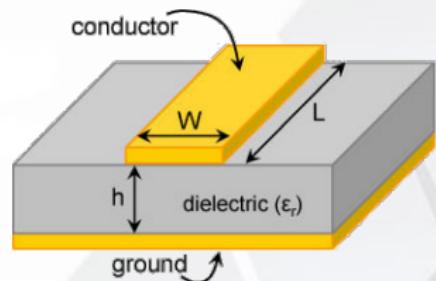


Coplanar waveguide



Stripline

- Trace sur le TOP / BOTTOM du PCB
- Plan de retour en-dessous de la trace
- Diélectrique d'un seul côté
- Signal plus rapide
- EMI



- Norme IPC-2141
- Approximation empirique

- Norme IPC-2141
- Approximation empirique

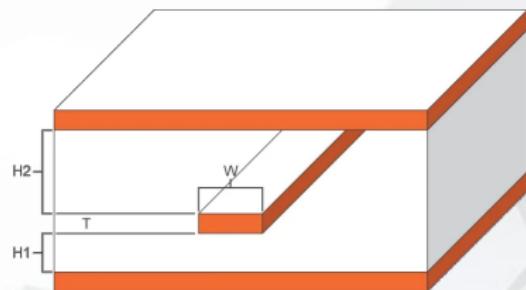
$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left( 8 \frac{H}{W} + 0.25 \frac{W}{H} \right), & \text{if } \frac{W}{H} < 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \cdot \left( \frac{W}{H} + 1.393 + \frac{2}{3} \ln \left( \frac{W}{H} + 1.444 \right) \right)}, & \text{if } \frac{W}{H} \geq 1 \end{cases}$$

$$\epsilon_{eff} := \begin{cases} \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \cdot \left( \left( 1 + 12 \frac{H}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} + 0.04 \left( 1 - \frac{W}{H} \right)^2 \right), & \text{if } \frac{W}{H} < 1 \\ \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \cdot \left( 1 + 12 \frac{H}{W} \right)^{-\frac{1}{2}}, & \text{if } \frac{W}{H} \geq 1 \end{cases}$$

- Utiliser des calculateurs en ligne
- Dimensions de la trace
  - Largeur
  - Épaisseur métal
  - Distance au plan
  - Constante diélectrique  $\epsilon$
  - Gap entre métaux



- Trace sur une couche interne du PCB
- Plan de retour de chaque bord de la trace
- Diélectrique des deux côtés
- Signal plus lent
- Moins de radiation



# Comment une impédance?

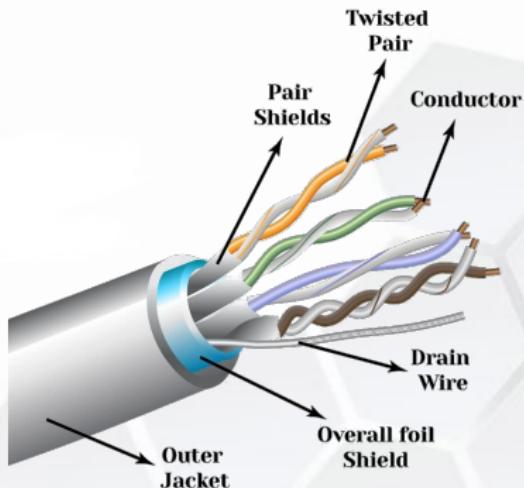
1 Qu'est-ce qu'une impédance?

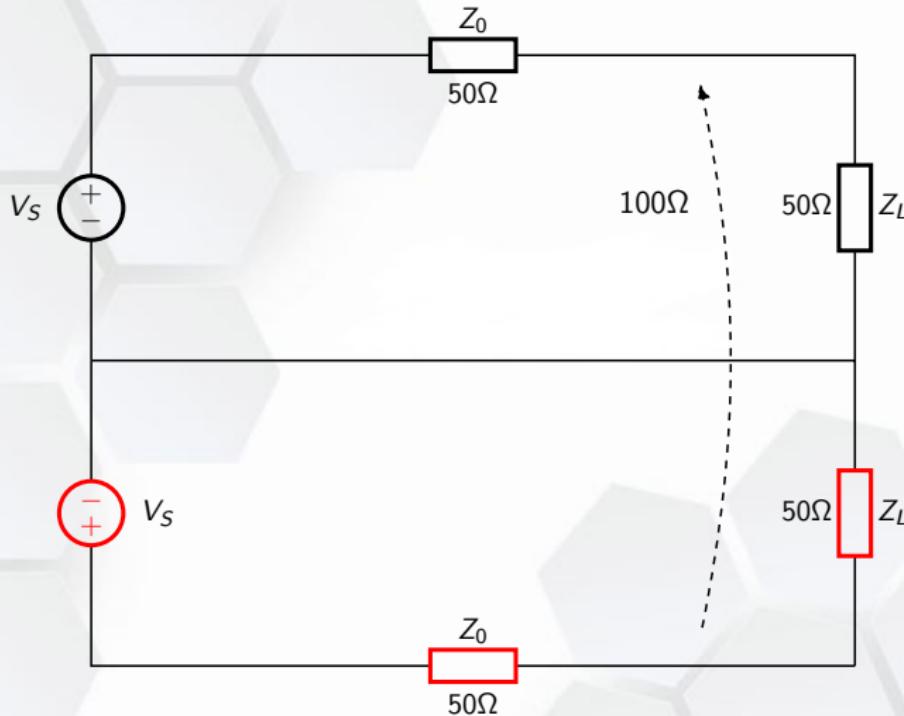
2 Pourquoi une impédance?

3 Comment une impédance?

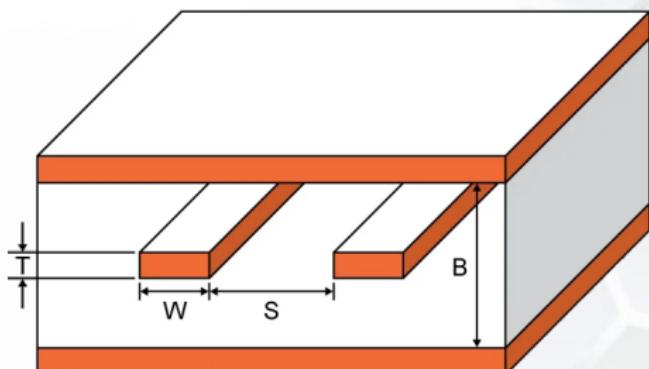
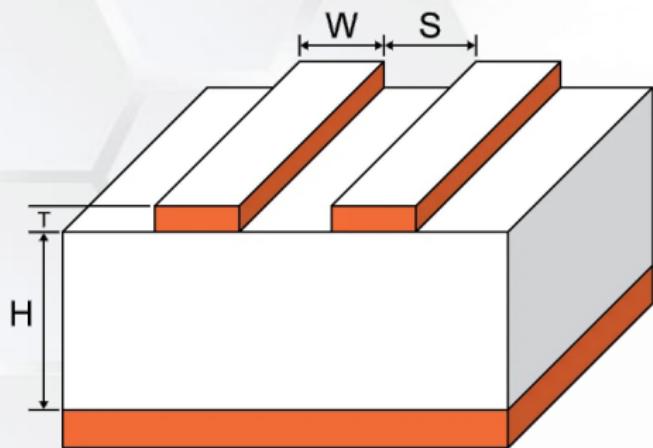
- Matching à la source
- Matching à la load
- Matching du conducteur
- **Impédance Différentielle**
- Résumé

- Paire de signal inverse envoyés ensemble
- Affectés par le bruit également
- Annulent leur bruits respectifs
- Impédance Single-Ended
- Impédance Différentielle





- Il y a deux impédances à prendre en compte!
  - Single-Ended
  - Differential
- Differential = 2· Single-Ended
- Géométries différentes



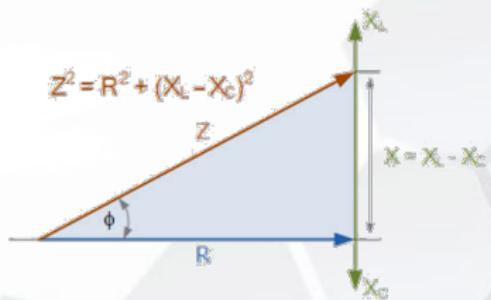
# Comment une impédance?

- 1 Qu'est-ce qu'une impédance?
- 2 Pourquoi une impédance?
- 3 Comment une impédance?
  - Matching à la source
  - Matching à la load
  - Matching du conducteur
  - Impédance Différentielle
  - Résumé

- Impédance

- Composé de résistance et de réactance
- Résistance à une certaine fréquence

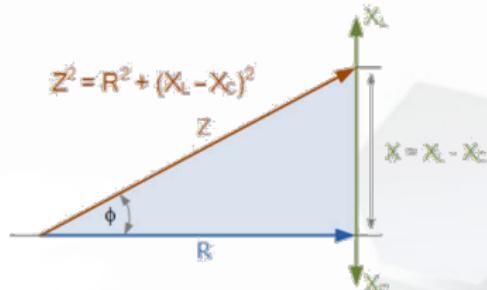
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$



- Impédance

- Composé de résistance et de réactance
- Résistance à une certaine fréquence

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

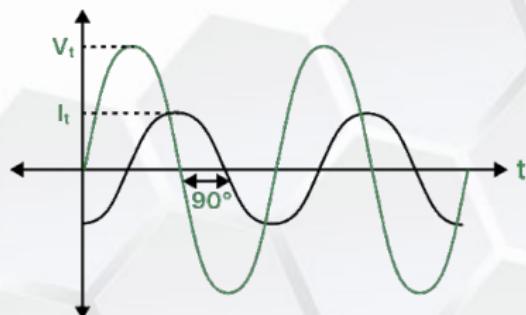


- Réactance

- Résistance à une certaine fréquence
- Emmagasine l'énergie dans les champs
- Déphasage

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

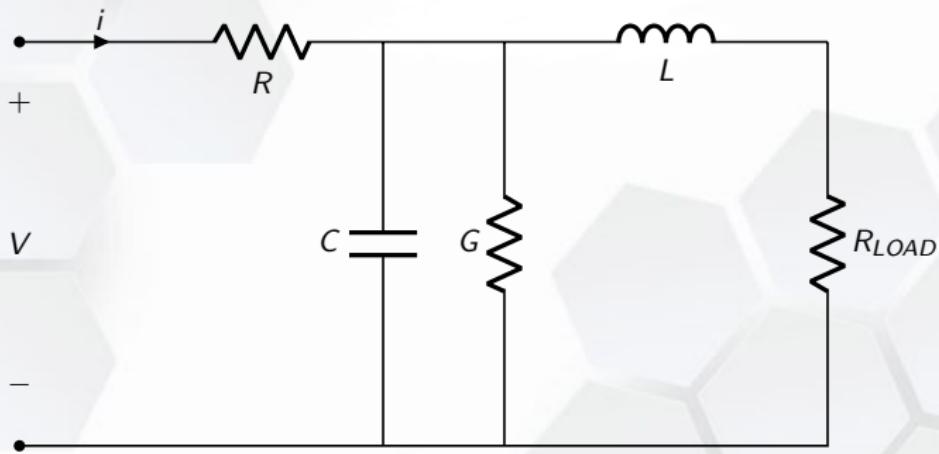
$$X_L = 2\pi f L$$



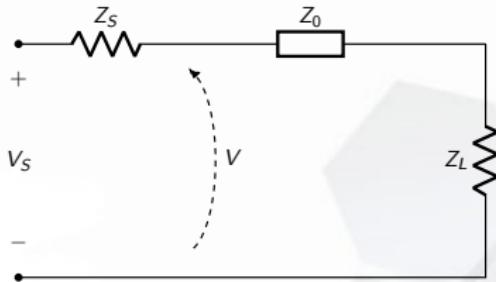
- Tout circuit a des composants parasites
- Impédance caractéristique  $Z_0$
- Ratio tension/courant se déplaçant
- Dépend de la géométrie du circuit

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$



- Lorsque  $Z_0 \neq Z_S \neq Z_L$ 
  - Pas assez de courant peut passer
  - Trop de courant est demandé



$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

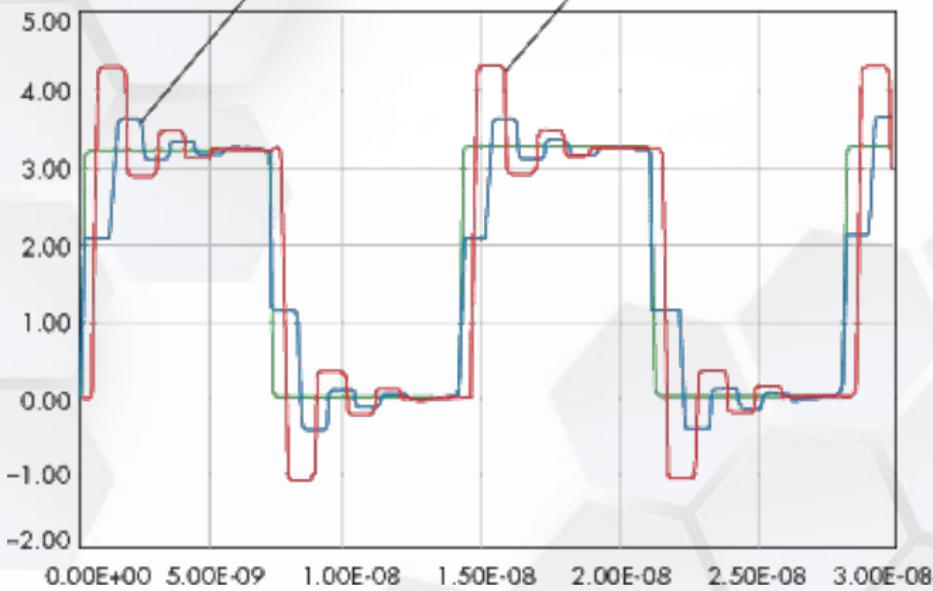
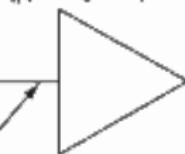
# Réflexion de signal



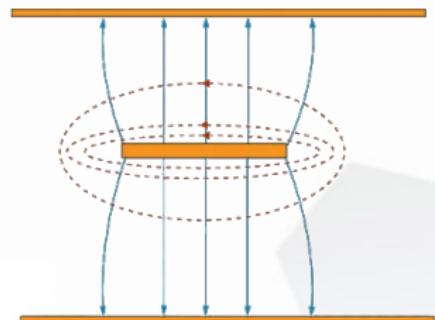
$Z_{\text{OUT}} = 25 \Omega$



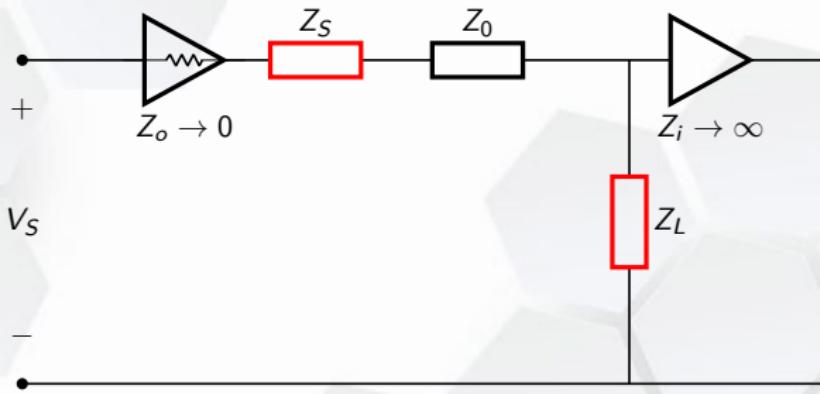
$Z_{\text{IN}} = \text{high impedance}$



- 3 Impédances à prendre en compte
- Source & Load
  - Rajouter une résistance en série
  - Rajouter une résistance en parallèle
- $Z_0$  du conducteur
  - Contrôler la géométrie
  - Impédance différentielle



Electric and Magnetic Fields





Merci!