

COURS 1 : Conception d'une carte électronique

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants et packages
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématisation
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

1 Les composants électroniques de base

Convention récepteur

I. Les composants électroniques de base

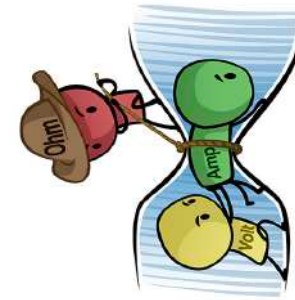
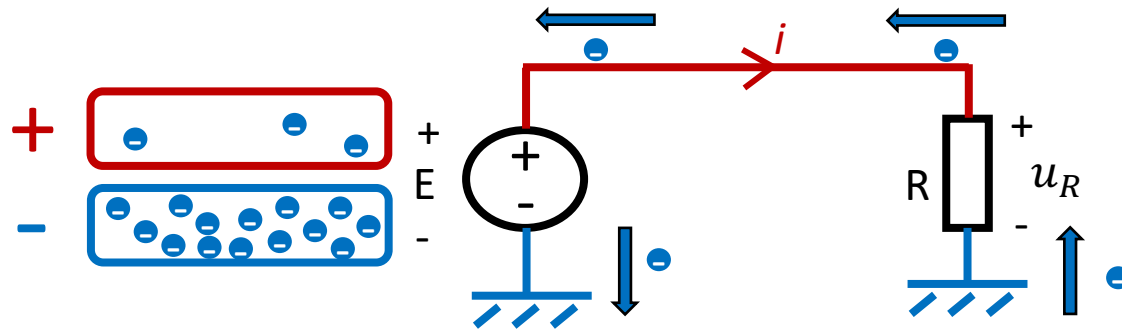
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ Les composants sont passifs : ils se contentent de recevoir de l'énergie électrique délivrée par un ou plusieurs générateur(s).

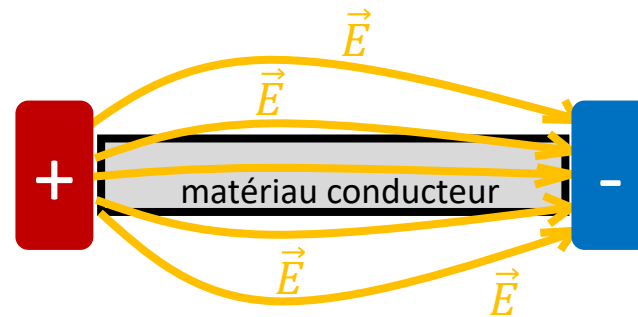
- ▶ la polarité (+) est donnée par le générateur ;
- ▶ les porteurs de charge négatifs (électrons), issus du pôle (-) veulent rejoindre le pôle (+) ;
- ▶ Hors cas du générateur, il en résulte que les tensions et les courants sont de sens opposé.



Loi d'Ohm
 $U = R I$

■ En première approche,

- ▶ en appliquant une différence de potentiel aux bornes d'un matériau conducteur, on génère un champ électrique.
- ▶ La loi de Coulomb donne $\vec{F} = q\vec{E} \Leftrightarrow \vec{F} = -e\vec{E}$: les électrons subissent une force électro-motrice de sens opposé.
 $e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$



→ Tant qu'une différence de potentiel est maintenue et que les électrons ont un chemin (le circuit est fermé), les e^- subissent une force électro-motrice qui les met en mouvement du pôle (-) vers le pôle (+) : un courant ($i = \frac{dq}{dt}$) est établi. Une tension sans courant est possible.

La vitesse de dérive

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

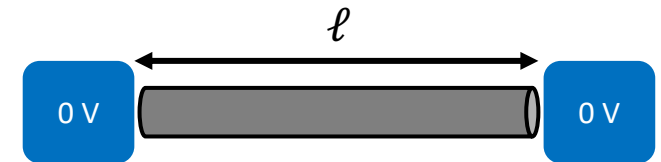
II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ On parle de **vitesse dérive** pour désigner la vitesse moyenne des électrons sous l'effet d'une différence de potentiel (direction opposée à \vec{E})

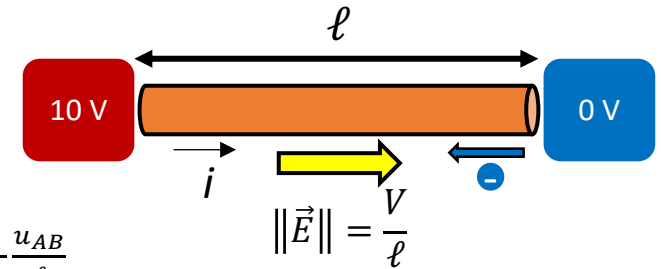
■ en l'absence d'un champs électrique

- ▶ mouvement brownien (thermique) des électrons libres à 20°C $\rightarrow \langle v_e \rangle \sim 10^6 \text{ m/s}$
- ▶ temps caractéristique entre les collisions : $\tau \sim 3 \cdot 10^{-14} \text{ s}$
- ▶ nombre d'électrons libres : $n \sim 10^{29}$ électron par m^3
- ▶ $v_d = 0 \rightarrow$ pas de courant



■ en présence d'un champs électrique

- ▶ Principe Fondamental de la dynamique : $\vec{F} = m\vec{a} \Rightarrow \|\vec{a}\| = \frac{\|\vec{F}\|}{m_e} = \frac{e}{m_e} \|\vec{E}\| = \frac{e}{m_e} \frac{u_{AB}}{\ell}$



Vitesse de dérive

$$v_d = \frac{e}{m_e} \frac{u_{AB}}{\ell} \tau$$

■ Exemple : Fil de cuivre de 10 m soumis à une différence de potentiel de 10 V

- ▶ A.N. : $v_d = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10}{10 \cdot 10^{-30}} \cdot 3 \cdot 10^{-14} = 24 \cdot 10^{-19+29-14} = 24 \cdot 10^{-4} \text{ s} = 2,4 \text{ mm/s}$

Remarque : $t = \frac{d}{v} = \frac{1000}{2,4} \approx 417 \text{ s} \approx 7 \text{ min} !$ 🐌

→ La vitesse de déplacement des e^- dépend du matériau, de sa longueur et de la différence de potentiel appliquée. Elle est relativement lente.

La conduction électrique (1 / 4)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ Le **courant électrique** est un mouvement d'ensemble de porteurs de charge (généralement des électrons) au sein d'un matériau conducteur.

hypothèse : densité volumique de courant \vec{j} uniforme et orthogonale à la section.

Tous les e^- ayant traversé la section \mathcal{A} entre les instants t et $t + dt$ se trouvent dans le cylindre de base \mathcal{A} et de longueur $v_d dt$

On a donc $dq =$ charge ayant traversé \mathcal{A} , soit $dq = qN$ avec N le nb d' e^- dans le cylindre

Or $N = n \mathcal{A} v_d dt$

volume du cylindre

On a donc $dq = q n \mathcal{A} v_d dt$

D'où $i = \frac{dq}{dt} = q n \mathcal{A} v_d$

$$= v_d \mathcal{A} n e = \frac{e}{m_e} \frac{u_{AB}}{\ell} \tau \mathcal{A} n e = \frac{e^2 n \tau}{m_e} \mathcal{A} \frac{u_{AB}}{\ell} = \sigma \mathcal{A} \frac{u_{AB}}{\ell}$$

avec $\sigma = \frac{e^2 n \tau}{m_e}$ **conductivité** du matériau

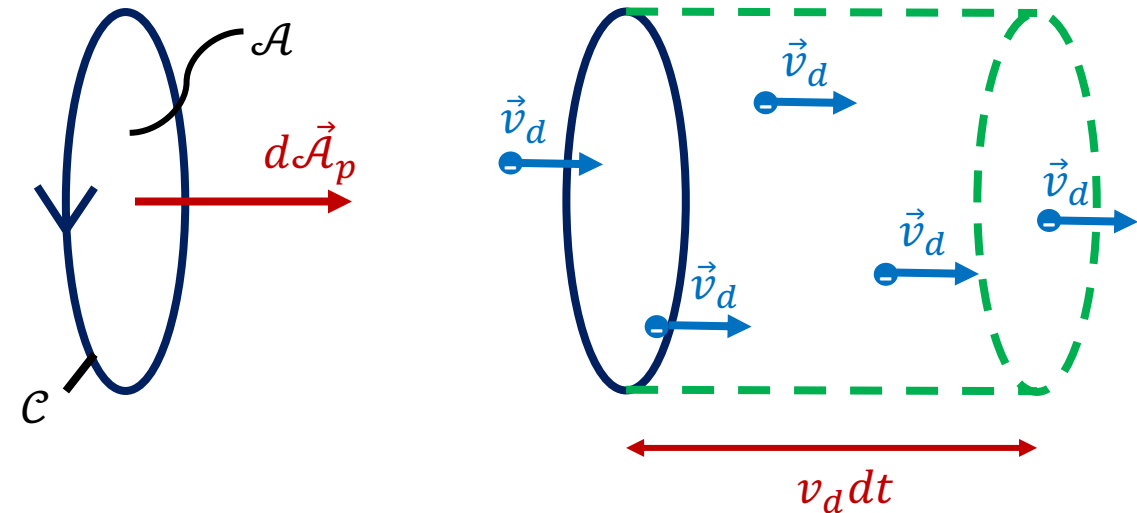
d'où $u_{AB} = \frac{\ell}{\sigma \mathcal{A}} i = Ri$ Loi d'Ohm 🍷

⚠ ℓ en m et \mathcal{A} en m^2

■ Exemple : Fil de carbone de 10 cm, $r = 0,2$ mm soumis à $u = 0,1$ V

► A.N. : $R = \frac{0,1}{2,5 \cdot 10^4 \cdot \pi \cdot (200 \cdot 10^{-6})^2} \approx 32 \Omega$

→ $i = 312,5 \text{ mA}$



Résistance

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{\ell}{\mathcal{A}} = \rho \frac{\ell}{\mathcal{A}}$$

La conduction électrique (2 / 4)

I. Les composants électroniques de base

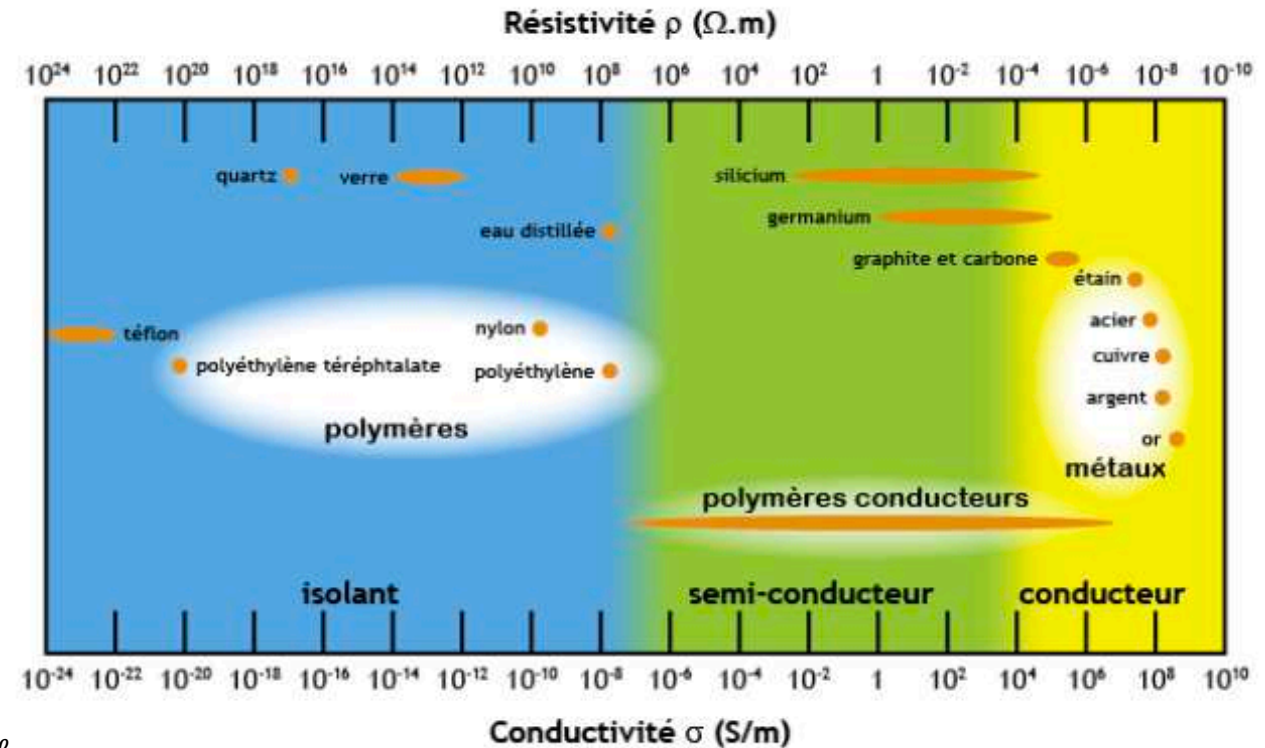
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

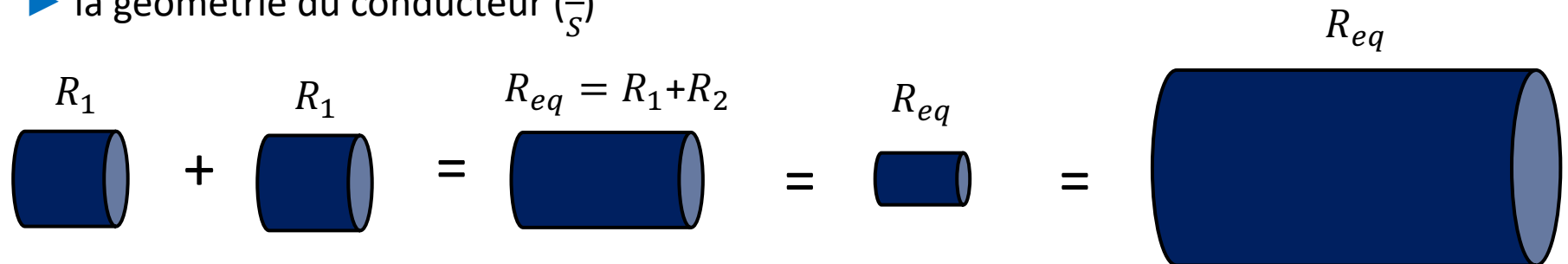
- A. Principe
- B. Schématisation
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

- La résistance d'un matériau est fixée par :
 - ▶ la résistivité du matériau (ρ)

$$R = \rho \frac{\ell}{S}$$



- ▶ la géométrie du conducteur ($\frac{\ell}{S}$)



La conduction électrique (3 / 4)

I. Les composants électroniques de base

A. La conduction électrique

B. Les composants

C. La résistance

D. Le condensateur

E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

A. Principe

B. Schématique

C. Compatibilité électromagnétique

D. Routage

E. Fabrication

$R \neq 0$


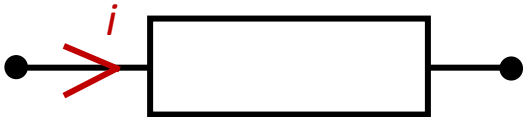


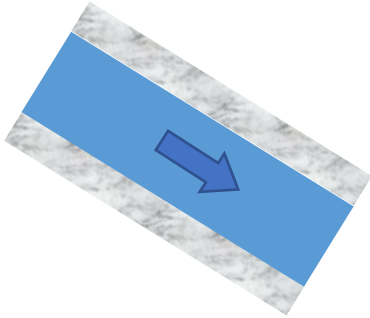
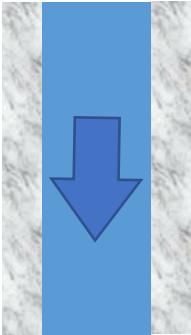
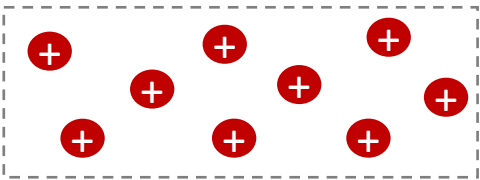
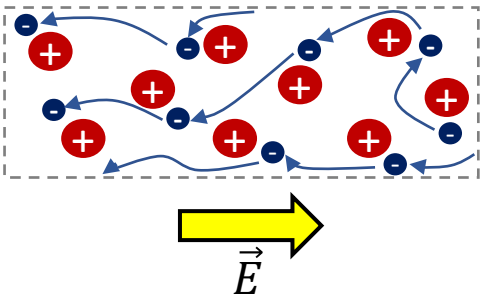
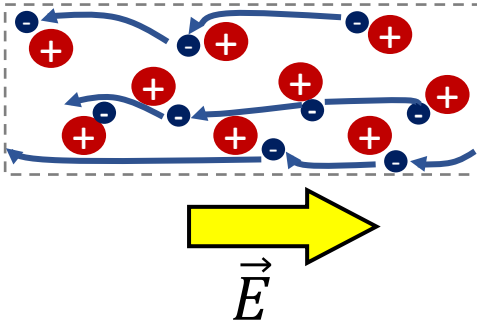
Vue symbolique

Loi d'Ohm
 $U = R I$

Analogie macroscopique

Vue microscopique

Loi d'Ohm locale
 $\vec{j} = \sigma \vec{E}$

$U \rightarrow 0$	$U \neq 0$	$U \rightarrow \infty$
		
		
		

La conduction électrique (4 / 4)

$$U = V_A - V_B > 0$$

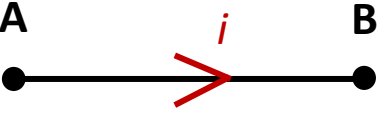

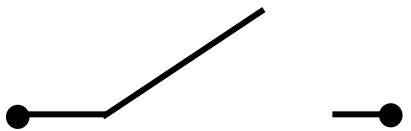
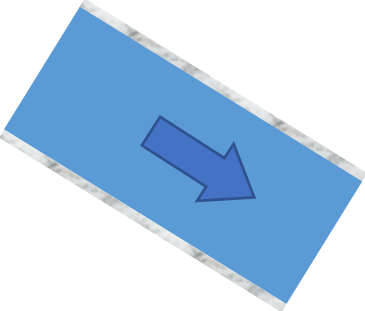
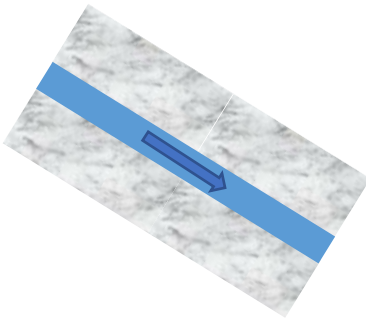

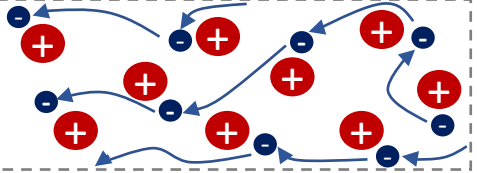
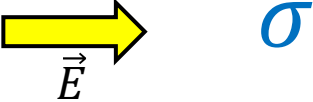
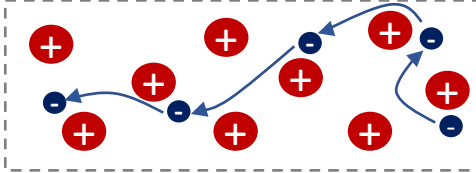
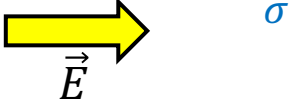
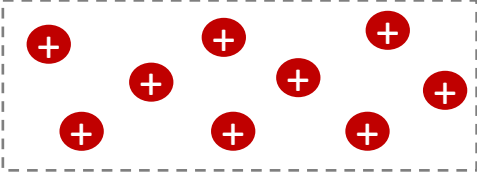
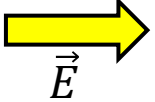
**Vue
symbolique**

Loi d'Ohm
 $U = R I$

**Analogie
macroscopique**

**Vue
microscopique**

Loi d'Ohm
locale
 $\vec{j} = \sigma \vec{E}$

$R \rightarrow 0$	$R \neq 0$	$R \rightarrow \infty$
		
		
 	 	 

I. Les composants électroniques de base

A. La conduction électrique

B. Les composants
C. La résistance
D. Le condensateur
E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

A. Principe
B. Schématique
C. Compatibilité électromagnétique
D. Routage
E. Fabrication

Les composants électroniques (1 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ Les **composants électroniques** sont des éléments conçus de réaliser des fonctions électroniques.

- ▶ un composant est dit **passif** lorsqu'il ne permet pas d'augmenter la puissance d'un signal. La plupart du temps, il la réduit par effet Joule.

Exemples : Résistance, Condensateur, Bobine.

- ▶ un composant est dit **actif** lorsqu'il permet d'augmenter la puissance d'un signal à l'aide d'une alimentation externe. Il s'agit majoritairement de composants à semi-conducteurs.

Exemples : diode, transistor, circuit intégré.

■ Classification par domaines d'application

- ▶ capteur

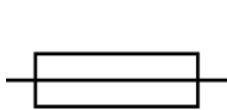
⚡ caméra

⚡ capteur de pression

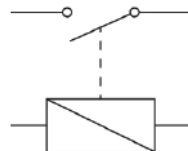
⚡ capteur de champ magnétique
(effet Hall)

...

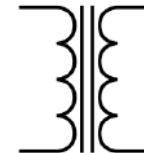
- ▶ électrotechnique / électronique de puissance



⚡ fusible



⚡ relais



⚡ transformateur



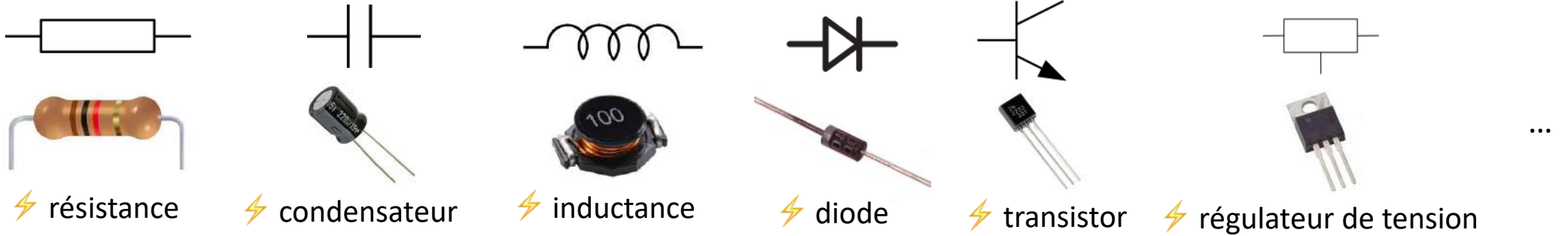
...

Les composants électroniques (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

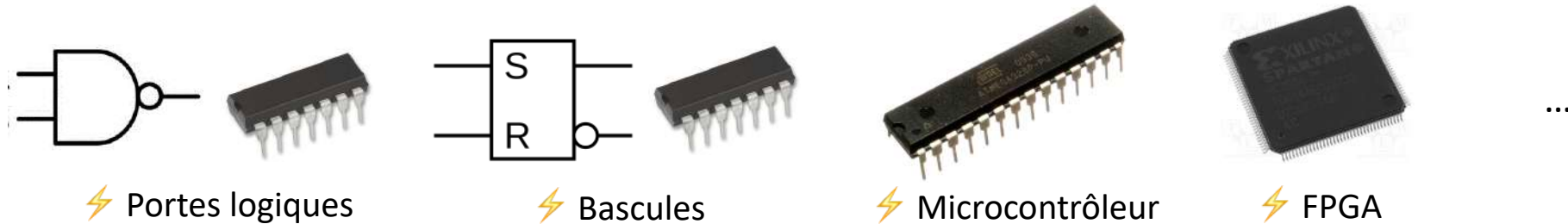
▶ électronique analogique



II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématisation
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

▶ électronique numérique



▶ interface humaine



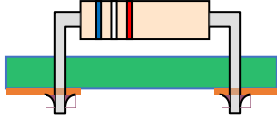





Les boîtiers des composants

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

	 Traversant  Through hole device (THD)	 Monté en surface  Surface Mounted Device (SMD)
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Composants électroniques à pattes que l'on insère dans les trous d'un PCB. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Introduits dans les années 60' ■ populaire à partir des années 80'
avantages 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Connexions plus solides <ul style="list-style-type: none"> ▶ raison pour laquelle les embases de connecteurs sont traversants ▶ encore utilisé dans les applications militaires pour lesquelles les cartes sont soumises à des chocs, de grandes accélérations, <i>etc.</i> ■ facilement remplaçable → adapté pour prototype <ul style="list-style-type: none"> ▶ utilisable sur breadboard 	<ul style="list-style-type: none"> ■ ne nécessite pas de percer des trous, les composants peuvent être placés sur les deux faces ■ meilleurs performances faces au bruit électromagnétique ■ assemblage facilement automatisable ■ composants plus petites ■ la plupart du temps moins chers que les composants traversants
inconvénients 	<ul style="list-style-type: none"> ■ prend plus de place ■ à placer à la main 	<ul style="list-style-type: none"> ■ difficiles à souder ■ Pas adaptés pour des tests rapides ou du prototypage ■ Pas adaptés pour les applications à haute puissance

La résistance (1 / 2)

I. Les composants électroniques de base

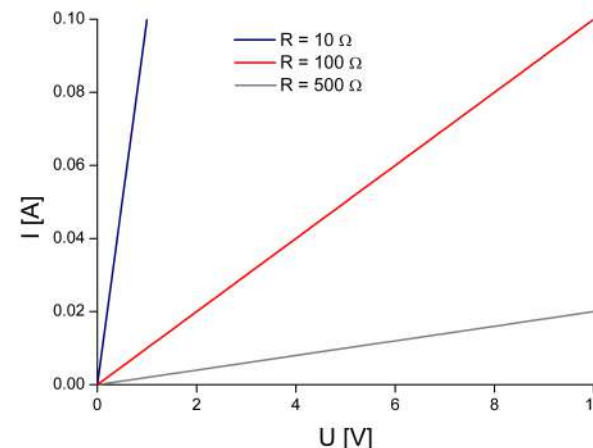
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

- La résistance est un composant passif non polarisé qui implémente la résistance électrique sous forme de composant électronique.
- La résistance est fonction du matériau utilisé et de la géométrie du composant :

$$R = \rho \frac{\ell}{S}$$

- Pour une tension donnée, le courant la traversant est inversement proportionnelle à la résistance (loi d'Ohm).

- Caractéristique courant-tension linéaire régie par la loi d'Ohm :



$$U = RI$$

- La résistivité est fonction de la température :

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

où α est un coefficient variant avec la température (empirique),
 T_0 est la température de référence et ρ_0 est la résistivité à la température T_0 .

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

La résistance (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

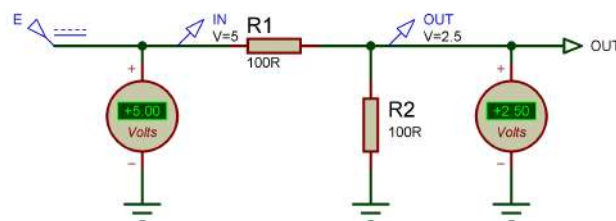
- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ Applications

► abaisser une tension

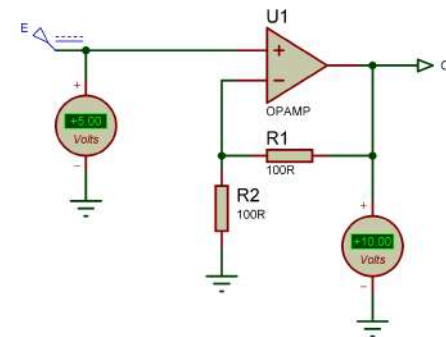
► augmenter une tension

Ex : pont diviseur de tension



$$u_{OUT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{IN}$$

Ex : amplificateur non inverseur

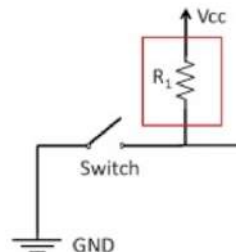


$$u_{OUT} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) u_{IN}$$

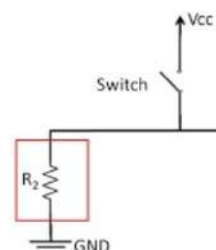
► limiter le courant

► adapter l'impédance d'une ligne de transmission
(limiter les réflexions en HF)

Ex : résistance de tirage



pull-up



pull-down

Typiquement de l'ordre de 10 kΩ pour un courant maximal (*datasheet*)
à l'entrée d'une pin d'un microcontrôleur de quelques dizaines de mA.

- Lorsque $\ell \geq \lambda = \frac{c}{f_{MAX}}$
- **Exemple 1** : signal de 10 MHz : $\lambda = \frac{c}{f_{MAX}} = \frac{2,9 \cdot 10^8}{10 \cdot 10^6} = 29 \text{ m}$
- **Exemple 1** : signal de 1 GHz : $\lambda = \frac{c}{f_{MAX}} = \frac{2,9 \cdot 10^8}{1 \cdot 10^9} = 29 \text{ cm}$
- **Exemple 2** : secteur : 50 Hz : $\lambda = \frac{c}{f_{MAX}} = \frac{2,9 \cdot 10^8}{50} = 5\,800 \text{ km}$

Résistance de terminaison (1 / 2)

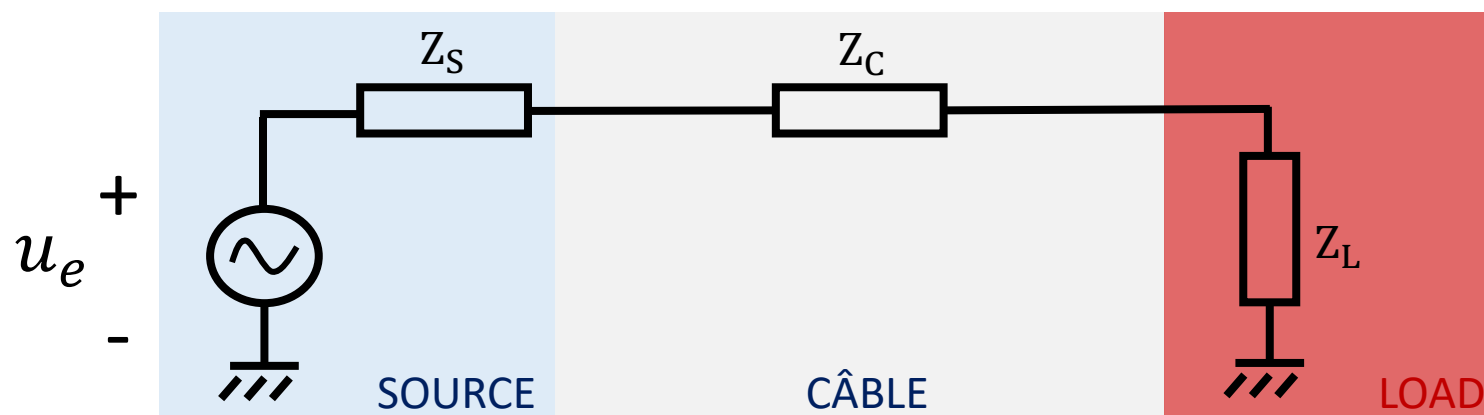
I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

- La tension délivrée à une charge dépend de :
 - ▶ la résistance interne du générateur ;
 - ▶ la résistance du câble.



$$u_s = \frac{Z_L}{Z_S + Z_C} u_e$$

$$\approx \frac{Z_L}{Z_C} u_e$$

Rapport d'ondes stationnaires (*Standing Waves Ratio*)

$$SWR = \frac{Z_L}{Z_C}$$

- Le SWR permet de prédire s'il faut recourir à une **adaptation d'impédance** afin de :
 - ▶ maximiser le transfert de puissance à la charge ;
 - ▶ éliminer la réflexion du signal (une onde est partiellement réfléchie lorsque le milieu dans lequel elle est véhiculée change subitement).

Résistance de terminaison (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

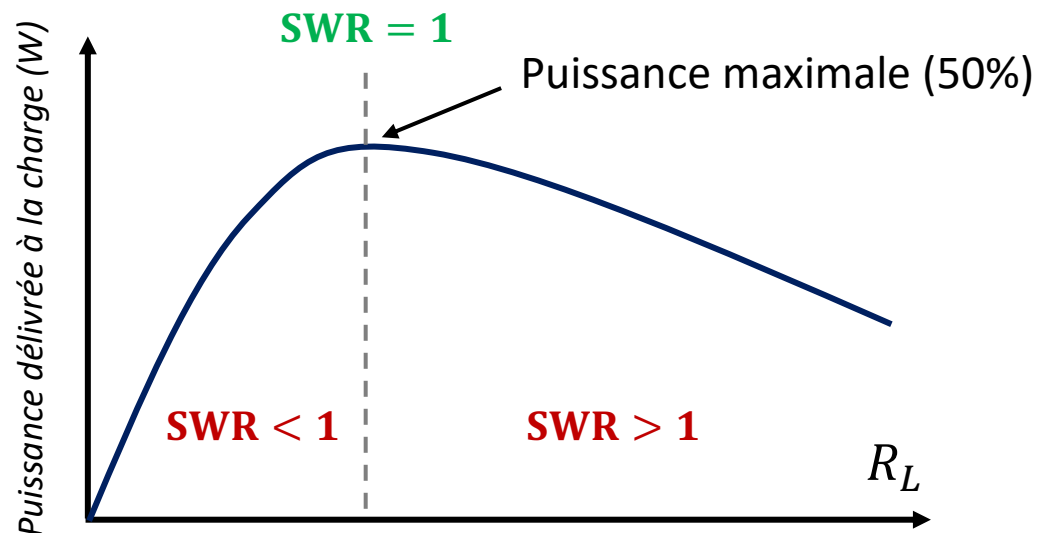
- A. Principe
- B. Schématisation
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ SWR < 1 : perte de puissance

- ▶ $u_S = \frac{Z_L}{Z_C + Z_L} u_e < \frac{u_e}{2}$
- ▶ solution : augmenter l'impédance de la charge en ajoutant une **résistance de terminaison en série**.
- ▶ peut arriver en allongeant le câble

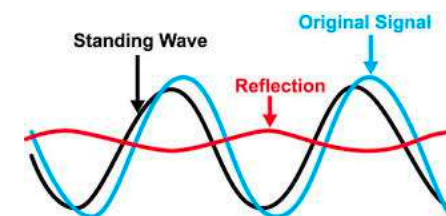
■ SWR > 1 : réflexion

- ▶ solution : abaisser l'impédance de la charge en ajoutant une **résistance de terminaison en parallèle**.
- ▶ peut arriver en tordant ou raccourcissant le câble



■ SWR = 1 : transmission idéale

- ▶ $u_S = \frac{u_e}{2}$
- ▶ augmentation de la tension de source par un facteur 2 pour obtenir 100% de la puissance du signal à la charge.



Les résistances traversantes (1 / 3)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

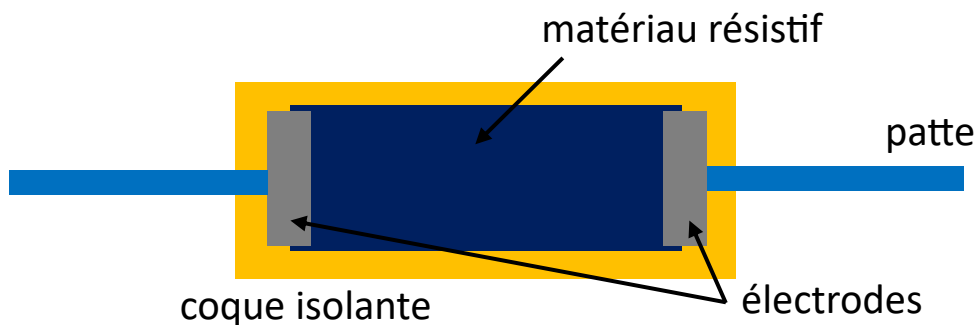
II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ Dans la pratique, les résistances électriques sont instanciées par des résistances, encore appelées **resistor**.

■ Les résistances traversantes comprennent :

- ▶ des **pattes** ;
- ▶ un **corps** fait à partir d'un matériau à haute résistivité ;
- ▶ des **électrodes** reliant les pattes au corps de la résistance ;
- ▶ une **coque** faite en un matériau isolant pour protéger la résistance de son environnement et renseigner sa valeur à l'aide d'un **code couleur** sur une couche de laque protectrice.



■ La résistance au carbone aggloméré

- ▶ le matériau résistif est un mélange de carbone broyé et compressé à chaud (la résistivité dépend du % de carbone) ;
- ▶ les plus anciennes ;
- ▶ peu précises (tolérance 10 à 20%) car la fabrication dépend de la taille des grains, de la pression, etc.



Les résistances traversantes (2 / 3)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

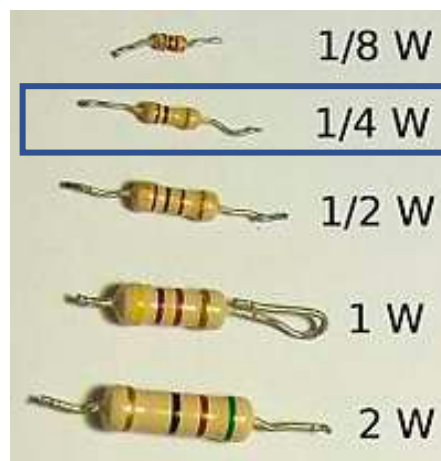
■ La résistance à couche de carbone

- ▶ technologie la plus récente et la plus utilisée ;
- ▶ constituée d'un cylindre en céramique sur lequel a été déposé un film de carbone en hélice pour augmenter le trajet des e^- et donc la résistance ;
- ▶ différents boîtiers selon la puissance maximale (exemple : $I_{MAX} = \frac{0,25}{5} = 50 \text{ mA}$) ;
- ▶ meilleure tolérance : 10%, 5%, 2% ou 1%.

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématisation
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

taille « standard » ➔

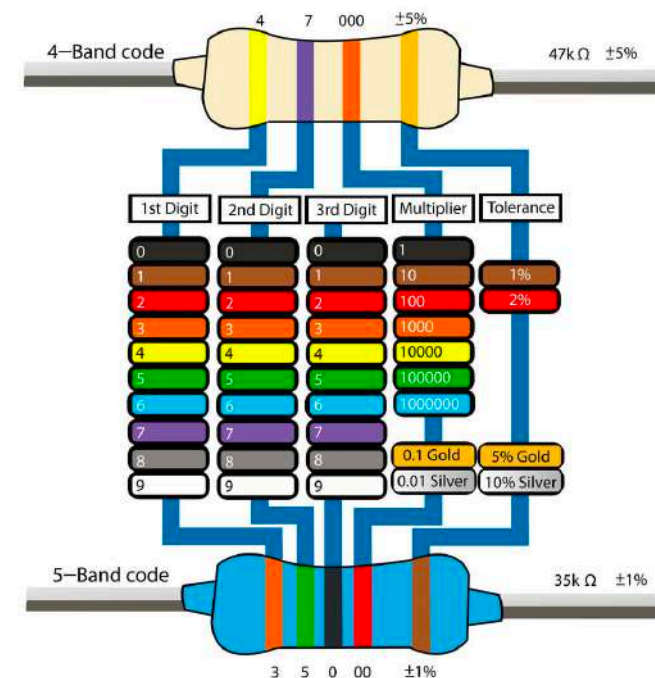


▶ 100 Ω

▶ 1 kΩ

▶ 10 kΩ

▶ 1 MΩ



Les résistances traversantes (3 / 3)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématisation
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

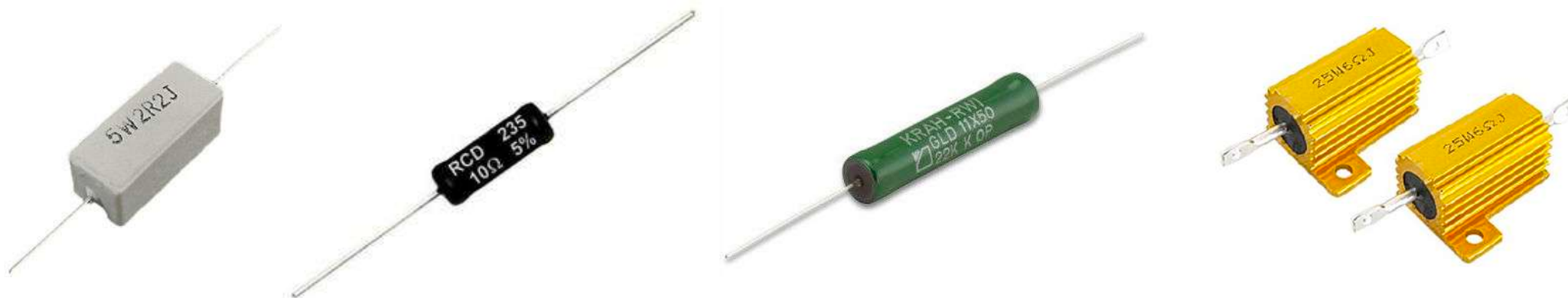
■ La résistance à couches métalliques

- ▶ très précises et très stables dans le temps ;
- ▶ film mince de métal sur un substrat isolant (céramique ou verre). La résistance dépend de l'épaisseur du film et du % de matériau conducteur dans le film ;
- ▶ puisque le film est mince, elles ne peuvent pas supporter de grandes puissances ;
- ▶ reconnaissables par leur couleur bleu ;
- ▶ plus coûteuses car plus difficile à fabriquer.



■ La résistance bobinée

- ▶ supporte de plus grandes puissances → alimentations ;
- ▶ fil fait en un matériau de haute résistivité enroulé sur un tube en céramique ;
- ▶ de part leur bobinage, elles présentent une petite inductance → pas utilisé en HF.



Les résistances variables (1 / 2)

I. Les composants électroniques de base

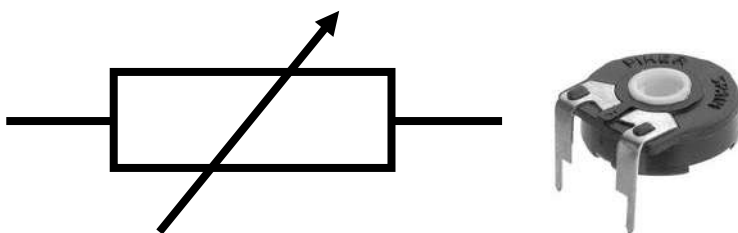
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ La résistance variable

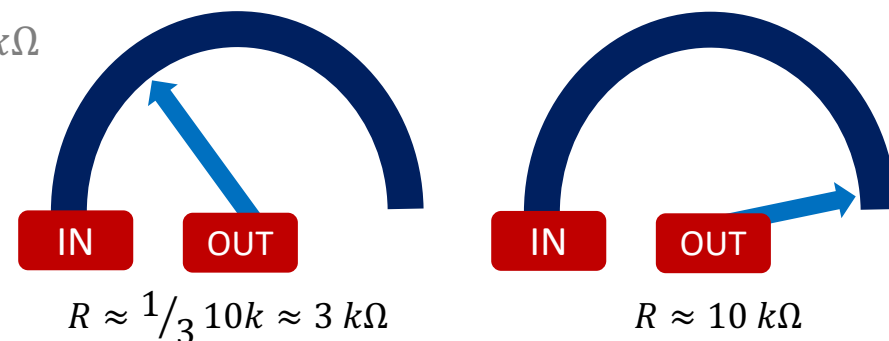
- ▶ l'interaction externe (mécanique) induit un changement de résistance ;
- ▶ constitué d'une piste circulaire en carbone sur laquelle vient frotter un contact que l'on peut déplacer à l'aide d'un tournevis.



Exemple : $R_{MAX} = 10\text{ k}\Omega$

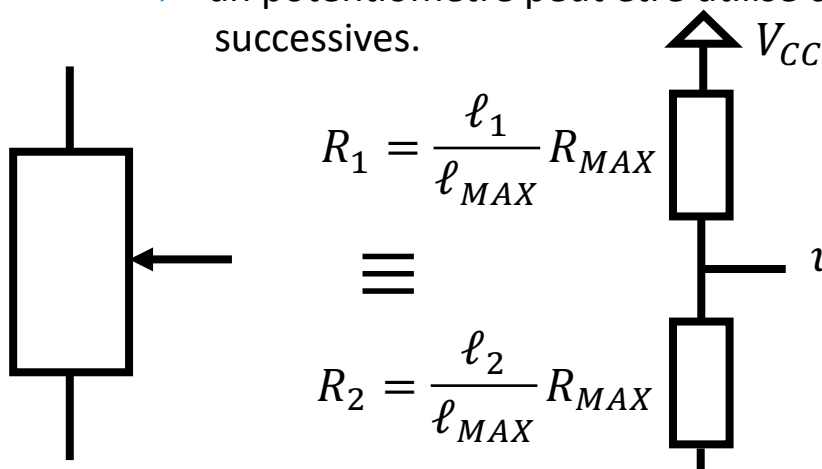
$$R = \frac{\rho}{S} \ell$$

donc $R \propto \frac{\ell}{\ell_{MAX}} R_{MAX}$



■ Le potentiomètre

- ▶ l'interaction externe (mécanique) induit un changement de différence de potentiel ;
- ▶ un potentiomètre peut être utilisé comme résistance variable à condition de n'utiliser que 2 bornes successives.

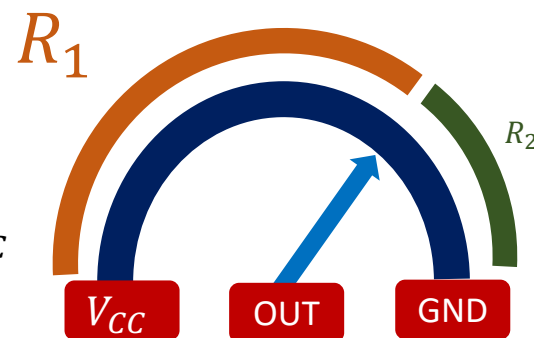


$$R_1 = \frac{\ell_1}{\ell_{MAX}} R_{MAX}$$

≡

$$R_2 = \frac{\ell_2}{\ell_{MAX}} R_{MAX}$$

$$u_{OUT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$



Les résistances variables (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

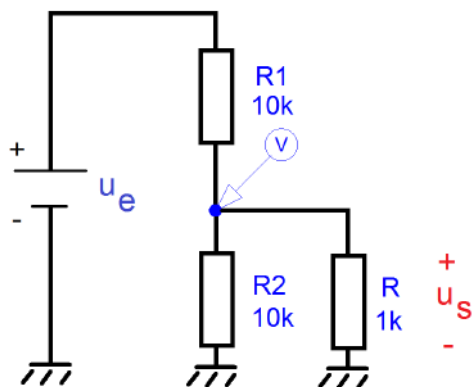
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ Remarque sur l'utilité d'un AOP suiveur de tension 🤔

Sans suiveur



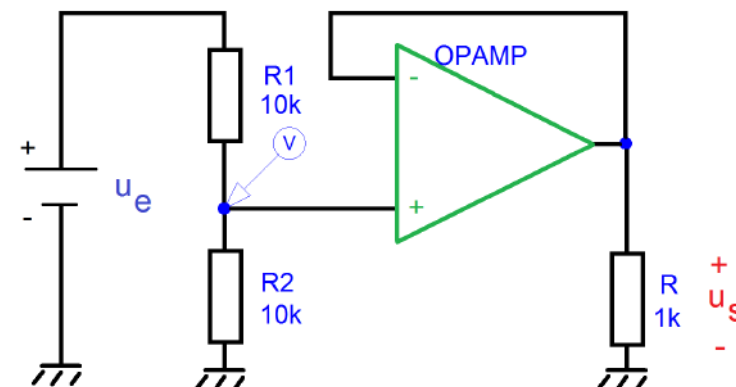
➤ Sans la résistance R ,

$$u_s = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_e = \frac{10k}{10k + 10k} 5 = 2,5 \text{ V}$$

➤ Avec la résistance R ,

$$u_s = \frac{\frac{R R_2}{R + R_2}}{R_1 + \frac{R R_2}{R + R_2}} u_e = \frac{\frac{1k \cdot 10k}{1k + 10k}}{10k + \frac{1k \cdot 10k}{1k + 10k}} 5 = 0,42 \text{ V}$$

Avec suiveur



➤ Sans la résistance R ,

$$u_s = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_e = \frac{10k}{10k + 10k} 5 = 2,5 \text{ V}$$

➤ Avec la résistance R ,

$$u_s = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_e = \frac{10k}{10k + 10k} 5 = 2,5 \text{ V}$$

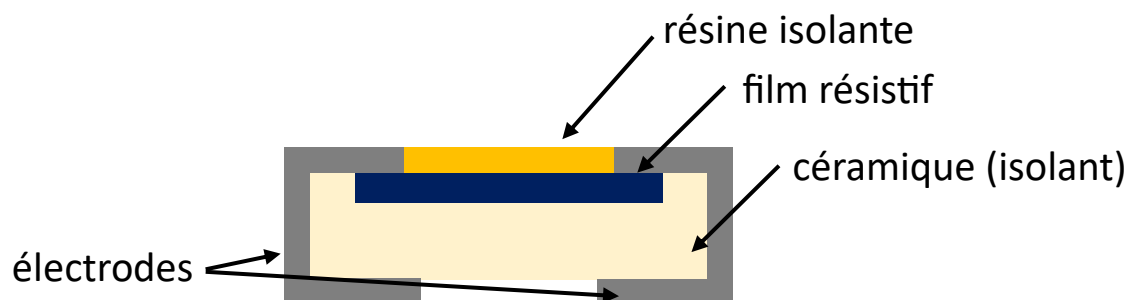
→ Un AOP monté en suiveur de tension (*buffer*) permet de maintenir la tension en sortie d'un pont diviseur de tension / potentiomètre constante quelque soit la charge que l'on a en aval.

Les résistances de surface (1 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

- Presque toujours des **résistances à film mince**. Puisque $R = \rho \frac{\ell}{S}$ la finesse du film agit directement sur R (les e^- ont plus de mal à passer) ;
- de part leur petite taille, les résistances de surface ne supportent que des petites puissances (de $\frac{1}{10}$ à $\frac{1}{4}$ Watt) ;
- Le film est déposé sur une pièce en céramique (isolante) et relié à des électrodes. Le tout est protégé par une résine isolante sur laquelle est inscrite un code correspondant à la valeur de la résistance.



47 Ω



6.80 Ω



0.010 Ω

■ Système de codage à 3 caractères

- ▶ utilisé pour les résistances de tolérance standard ;
- ▶ les deux premiers chiffres sont les chiffres significatifs et le dernier est le multiplicateur ;
- ▶ ex : "100" correspond à $10 \cdot 10^0 = 10 \Omega$;
- ▶ Les résistances de moins de 10 Ω utilisent la lettre 'R' pour renseigner la virgule (ex : 4R7).

■ Système de codage à 4 caractères

- ▶ Résistances à haute tolérance : un chiffre significatif supplémentaire.
- ▶ ex : "4702" correspond à 47,0 k Ω

Les résistances de surface (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

■ Système de codage série E

- ▶ ex série E96, 1% de tolérance ;
- ▶ deux chiffres pour coder trois chiffres significatifs et une lettre pour le multiplicateur.

1 décoder les chiffres significatifs

Ex : 65 correspond à 464

00-	10-	20-	30-	40-	50-	60-	70-	80-	90-
000	124	158	200	255	324	412	523	665	845
01-	11-	21-	31-	41-	51-	61-	71-	81-	91-
100	127	162	205	261	332	422	536	681	866
02-	12-	22-	32-	42-	52-	62-	72-	82-	92-
102	130	165	210	267	340	432	549	698	887
03-	13-	23-	33-	43-	53-	63-	73-	83-	93-
105	133	169	215	274	348	442	562	715	909
04-	14-	24-	34-	44-	54-	64-	74-	84-	94-
107	137	174	221	280	357	453	576	732	931
05-	15-	25-	35-	45-	55-	65-	75-	85-	95-
110	140	178	226	287	365	464	590	750	953
06-	16-	26-	36-	46-	56-	66-	76-	86-	96-
113	143	182	232	294	374	475	604	768	976
07-	17-	27-	37-	47-	57-	67-	77-	87-	
115	147	187	237	301	383	487	619	787	
08-	18-	28-	38-	48-	58-	68-	78-	88-	
118	150	191	243	309	392	499	634	806	
09-	19-	29-	39-	49-	59-	69-	79-	89-	
121	154	196	249	316	402	511	649	825	

2 décoder le multiplicateur

Ex : C correspond à 10^2

--Z	--Y	--X
-000	-00	-0
--A	--B	--C
- - -	+0	+00
--D	--E	--F
+000	+0 000	+00 000



1 Ω



47.5 Ω



301 Ω

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

Modèle de la résistance réelle

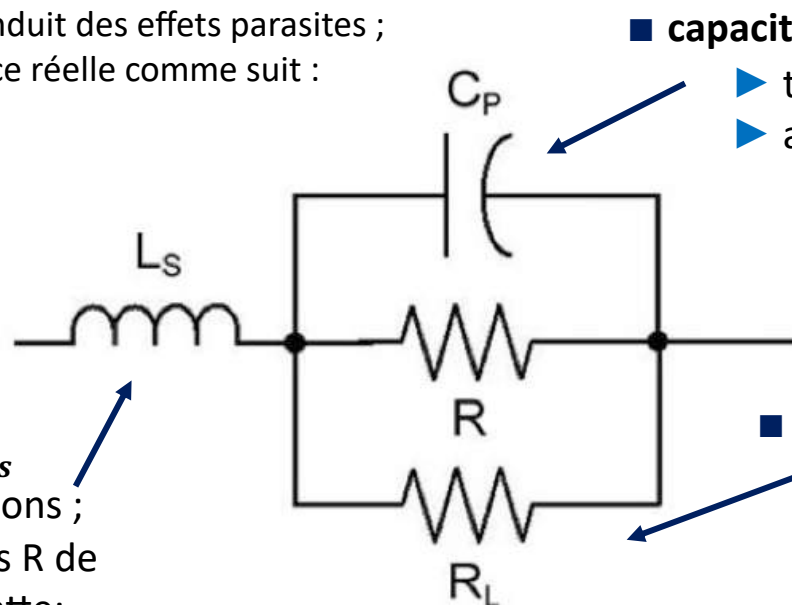
I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

- La fabrication des composants induit des effets parasites ;
- On peut modéliser une résistance réelle comme suit :



■ capacitance parallèle parasite C_p

- ▶ très petite capacité formée par les électrodes ;
- ▶ a un effet aux (très) hautes fréquences

■ inductance série parasite L_s

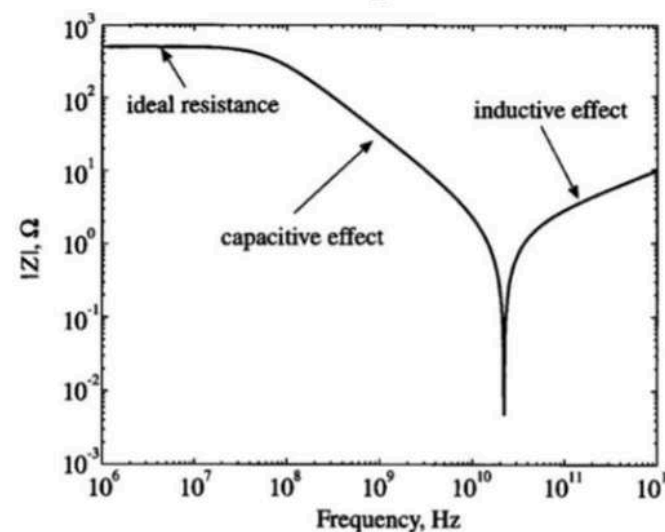
- ▶ créée par les connexions ;
- ▶ L_s amoindrie dans les R de surface car pas de patte ;
- ▶ a un effet aux (très) hautes fréquences

■ résistance parallèle de fuite R_L

- ▶ due à un courant de fuite au niveau des matériaux isolants ;
- ▶ impact non négligeable si R est grande et aux hautes tensions.

■ Par conséquent, l'impédance d'une résistance devient fonction de la fréquence aux (très) hautes fréquences.

- Pour les basses fréquences, la résistance est idéale et $Z_R = R$



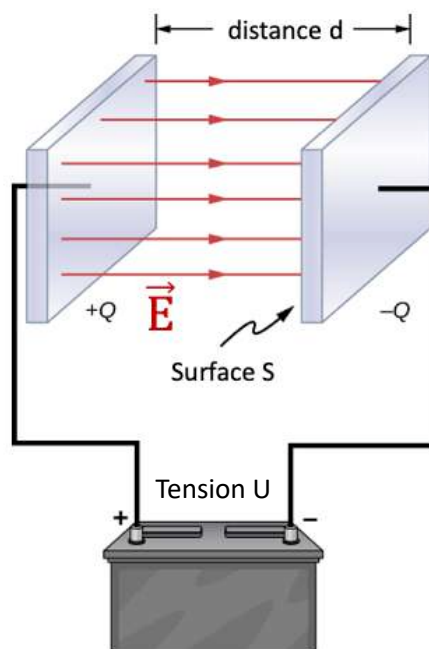
Le condensateur (1 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. **Le condensateur**
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



■ Le condensateur est un composant électronique permettant de stocker des charges qui peuvent être restituées au circuit lorsque nécessaire.

■ Ils sont constitués d'au moins deux armatures conductrices séparées par une ou plusieurs couches d'un matériau isolant : le **diélectrique**.

■ Ils sont caractérisés par leur capacité C exprimée en Farad et qui traduit leur capacité à accumuler des charges lorsqu'ils sont soumis à une certaine différence de potentiel :

$$C = \frac{q}{u} \quad (1)$$



■ La capacité est fonction de la géométrie du condensateur et des propriétés du diélectrique :

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

où $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ est la permittivité diélectrique et traduit la réponse du milieu à un champ électrique.
et $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$ est la permittivité du vide.

matériau	vide	Air sec	papier	plexiglas	marbre	verre	Eau pure
Permittivité relative	1	1,0006	2,3	3,5	4	5	78,5

Pour une charge ponctuelle $\|\vec{E}\| = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \frac{|q|}{r^2}$
donc plus ε est grand et plus le matériau isole des champs électriques.

■ Relation caractéristique
(1) donne $q = Cu$. Or, $i = \frac{dq}{dt}$ donc

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

Le condensateur (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur**
- E. Les circuits intégrés

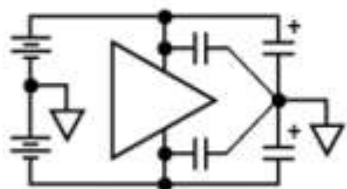
■ Choix d'un condensateur

- ▶ traversant ou de surface
- ▶ capacitance C
- ▶ Tension de service U_{MAX}

■ Applications

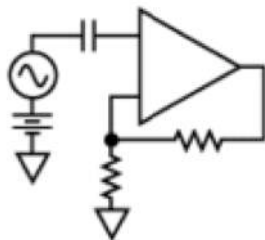
▶ découplage

→ Débruiter un signal



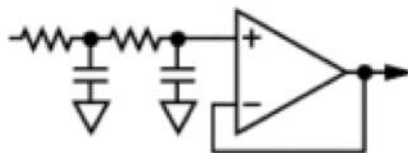
▶ couplage

→ Bloquer la composante continue (offset) d'un signal



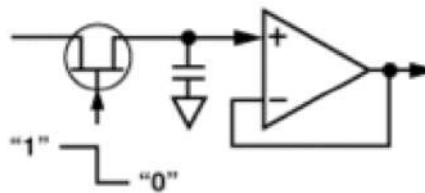
▶ filtrage

→ Ne laisser passer qu'une gamme de fréquence choisie



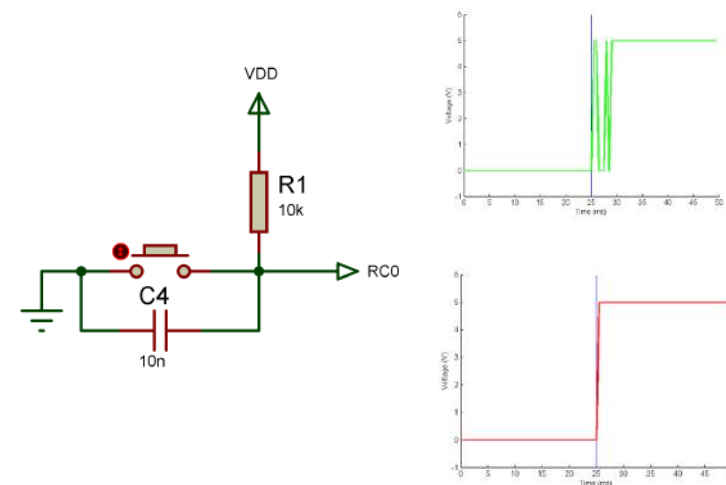
▶ blocage (échantillonnage)

→ Maintenir constante la valeur d'un signal afin de laisser le temps à l'ADC de convertir



▶ anti-rebond

→ Atténuer les impulsions parasites générées lors de l'appui sur un bouton



▶ temporisation

Ex : cadencement du NE555

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

Condensateurs de découplage

I. Les composants électroniques de base

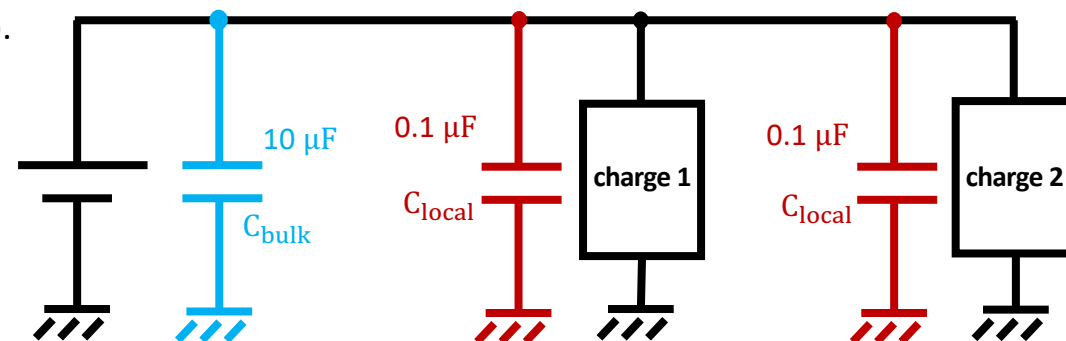
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ Rendre les alimentations idéales en découplant la composante alternative

- ▶ délivrer un signal constant (DC) aux charges ;
- ▶ ramener à la masse les hautes fréquences (bruit, AC).



■ Typiquement, deux types :

- ▶ condensateur de découplage en volume
 - Puisque $C = \frac{q}{u}$, on a $q = C \cdot u \rightarrow$ rôle de réservoir
- ▶ condensateur de découplage local
 - Puisque $Z_C = \frac{1}{jC\omega}$, les bruits et parasites (hautes fréquences) sont envoyés à la masse.

type	fréquence	Capacitance [F]	technologie
volume	basse	10 μ	électrolytique
local	modérée	0,1 μ = 100 n	
	haute	0,000 1 μ = 100 p	céramique

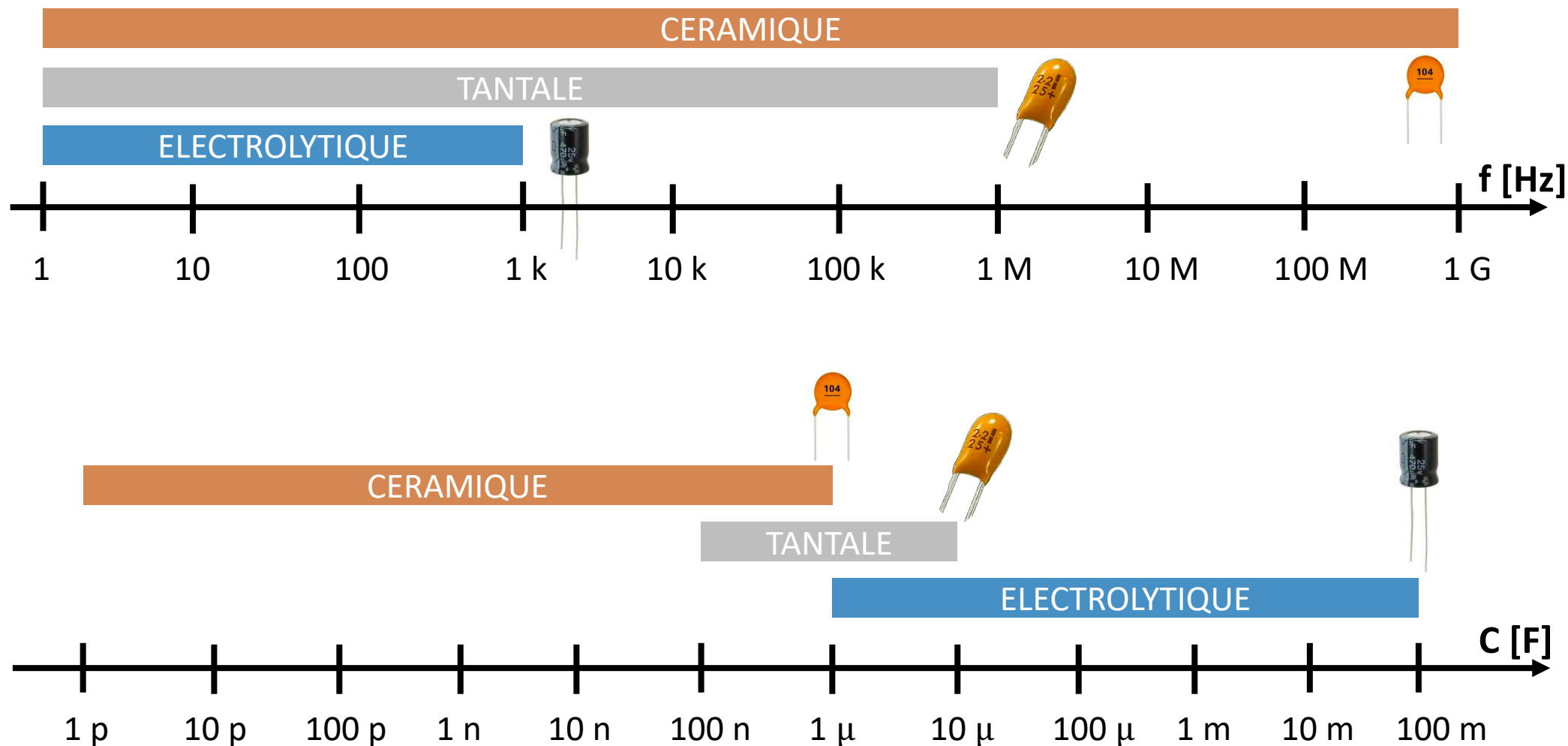
Condensateurs traversants (1 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



Condensateurs traversants (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. **Le condensateur**
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

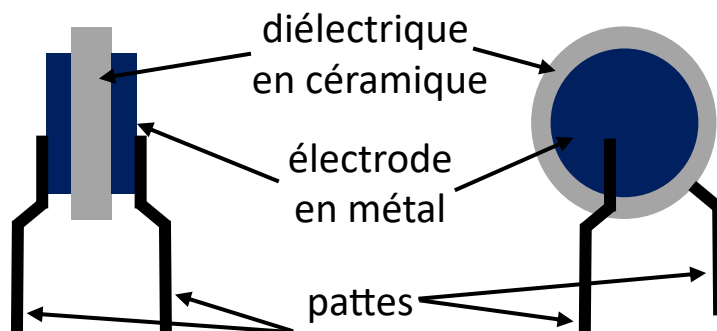
■ condensateurs non polarisés



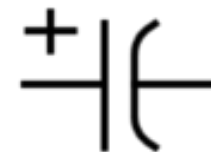
- ▶ petites valeurs ($\leq 1 \mu\text{F}$) ;
- ▶ supporte de grandes tensions, typiquement, $50 \leq U_{SERVICE} \leq 250 \text{ V}$;
- ▶ souvent, la valeur est directement écrite dessus
 - Multiplicateur implicite : μF (ex : 0.1 \rightarrow 0,1 μF) ;
 - Multiplicateur inscrit (ex : 4n7 \rightarrow 4.7 nF).

▶ condensateur céramique

- Valeur affichée sous forme de 3 chiffres ;
- 2 chiffres significatifs ;
- 1 multiplicateur au-delà du pF.
- Exemple : "104 »
 - $\rightarrow 10 \cdot 10^4 \text{ pF} = 0.1 \mu\text{F}$:



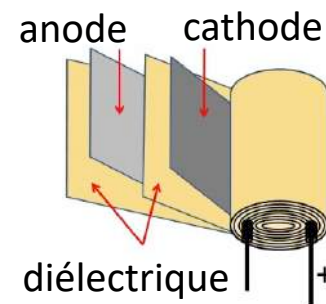
■ condensateurs polarisés



- ▶ grandes valeurs ($\geq 1 \mu\text{F}$) ;

▶ condensateurs électrolytiques

- Peuvent surchauffer si connectés avec la mauvaise polarité ;
- Peuvent être **axiaux** (moins haut mais plus d'aire sur le PCB) ou **radiaux** (prennent moins de place sur le PCB mais sont plus hauts) ;
- Les valeurs de C et de V sont clairement lisibles ;
- Les tensions de service peuvent être basses \rightarrow à vérifier systématiquement !



axial



radial

▶ condensateurs au tantale

- More expensive but very small \rightarrow large C in small space ;



Condensateurs de surface

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

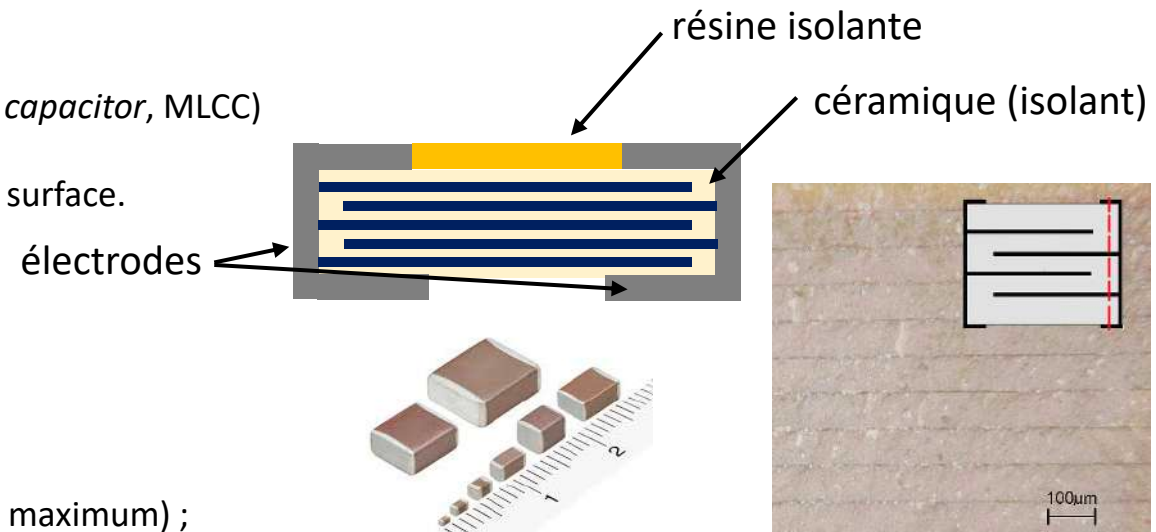
II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

- les condensateurs de surface ne sont pas polarisés ;

■ Condensateurs céramique multicouche (*multilayer ceramic capacitor, MLCC*)

- ▶ Les plus utilisés ;
- ▶ Même package que pour les résistances montées en surface.



■ Condensateurs électrolytiques de surface

- ▶ de plus en plus utilisées ;
- ▶ possibilité d'avoir de grandes valeurs de capacité ;
- ▶ faible coût ;
- ▶ deux numérotations :
 - Valeur en μF (ex : 47 10V \rightarrow 47 μF , pour 10 V maximum) ;
 - Code : une lettre indiquant la tension de service puis trois chiffres : 2 pour les chiffres significatifs et un pour le multiplicateur au-delà du pF (ex : G106 \rightarrow 10 μF , pour 4 V maximum).

Lettre	e	G	J	A	C	D	E	V	H
Tension de service	2.5	4	6.3	10	16	20	25	35	50

■ Condensateurs au tantale de surface

- ▶ pour les grandes valeurs



Modèle du condensateur réel

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

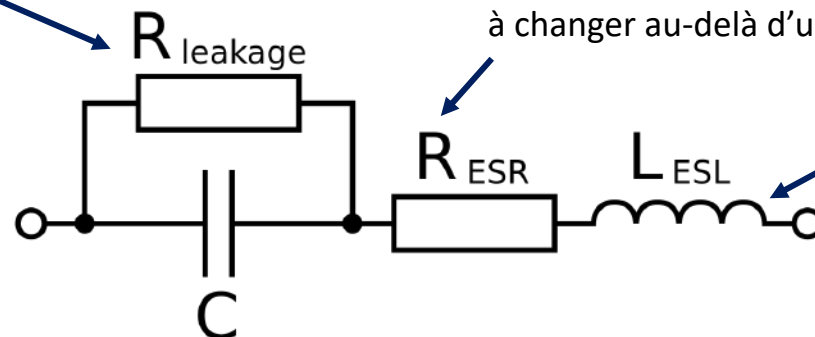
II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématisation
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

- La fabrication des composants induit des effets parasites ;
- On peut modéliser une résistance réelle comme suit :

■ résistance parallèle de fuite R_L

- ▶ due à un courant de fuite au niveau des matériaux isolants ;
- ▶ particulièrement important pour les condensateurs électrolytiques (de l'ordre de 5-20 nA par μF)



■ résistance série parasite R_{ESR}

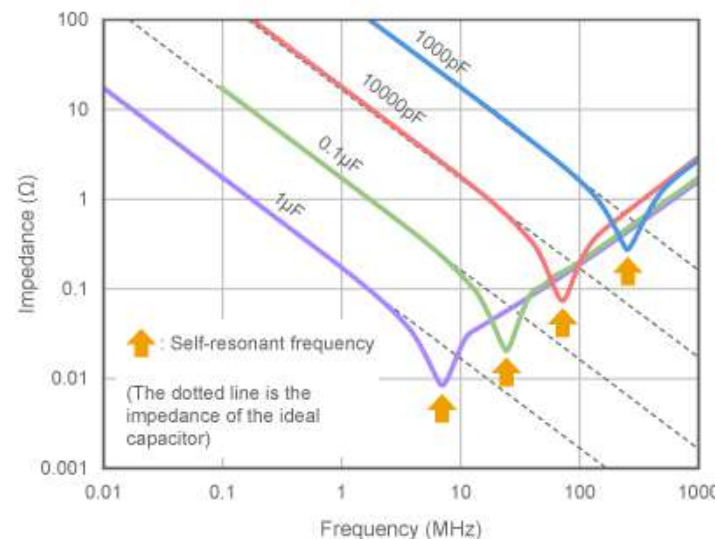
- ▶ résistance apportée par les connexions ;
- ▶ dissipation de courant aux hautes fréquences
- ▶ donne une idée de la vieillesse du condensateur : de quelques $0,1 \Omega$ à quelques Ω en fonction de C et de la tension, à changer au-delà d'un facteur x10

■ inductance série parasite L_{ESL}

- ▶ créée par les connexions et les armatures ;
- ▶ particulièrement élevée pour les C électrolytiques de part leur géométrie

■ Par conséquent, l'impédance d'une résistance devient fonction de la fréquence aux (très) hautes fréquences.

- Pour les basses fréquences, la capacitance est idéale et $Z_C = \frac{1}{2\pi f C}$ soit une pente de $\frac{1}{2\pi C}$ dans un tracé logarithmique de $Z_C(f)$



Les circuits intégrés (1 / 2)

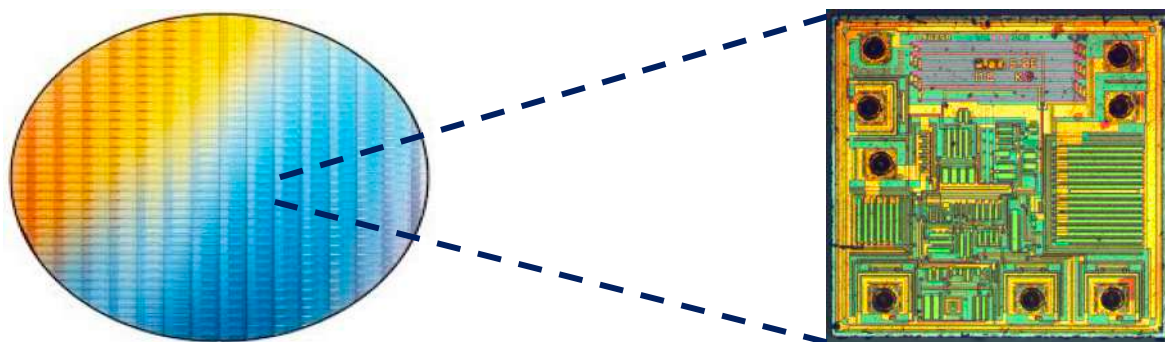
I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

■ Les **circuits intégrés** (CI) sont le résultat de l'assemblage de multiples couches de matériaux semi-conducteurs sur un **die de Silicium** de quelques dizaines de μm^2 , ensuite encapsulé dans un **boîtier** afin d'être manipulable par l'homme.

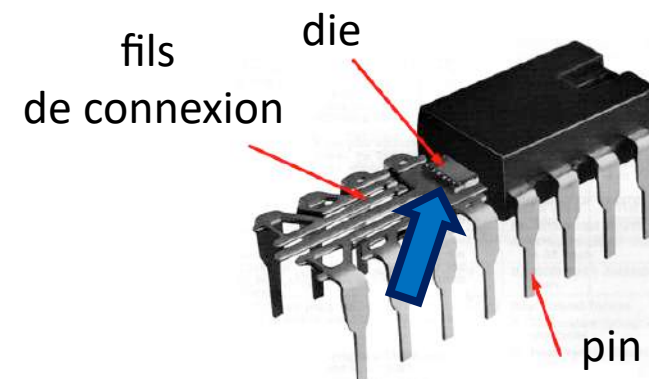
■ Ex : AOP, NE555, portes logiques, microcontrôleurs, FPGAs, etc.

■ La connexion entre le die et les pattes du circuit intégré se fait à l'aide petits fils d'or.



Wafer de Silicium

die



■ Les CI sont polarisés dans la mesure où chaque pin a un rôle unique.

- ▶ la pin n° 1 est renseignée un petit disque ou par une encoche sur la partie supérieure, auquel cas la pin 1 est sur la gauche ;
- ▶ la numérotation des pins suit le sens antihoraire.

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

Les circuits intégrés (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ CI traversants

■ Package Dual in Line (PDIP)

- ▶ boîtier traversant le plus communément utilisé ;
- ▶ forme rectangulaire à deux rangées symétriques ;
- ▶ chaque centre de pin est espacé de 0.1" (2.54mm), espacement standard approprié aux breadboards ;
- ▶ de 4 à 64 pins ;



DIP-4



DIP-28



DIP-64

- ▶ peuvent être soudés directement sur un PCB ou en utilisant un socket.

- Ils permettent de placer et de remplacer un CI sans souder / dessolder ;
- ils sont utilisés pour :
 - les phases de **prototypages**, permettant ainsi de changer rapidement le CI ;
 - pour remplacer facilement un CI fragile qui aurait été endommagé ;
 - permet de développer une carte où le CPU sera au choix.



DIP socket



ZIF socket

■ CI de surface

■ Small-Outline (SOP)

- ▶ parmi les boîtiers de surface les plus faciles à souder ;
- ▶ espacement standard entre les centres des pins de 0.05" (1.27mm) ;
- ▶ SSOP (shrink small-outline package) ;
- ▶ TSOP (thin small-outline package) ;
- ▶ TSSOP (thin-shrink small-outline package).



SOP-8



TSSOP-20



TQFP-100

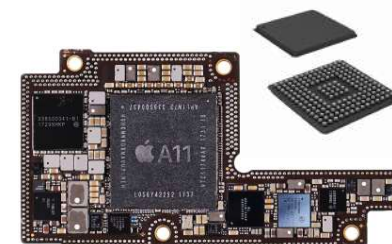


■ Quad Flat packages (QFP)

- ▶ boîtier carré ayant des pins sur ses 4 faces ;
- ▶ de 8 (32 au total) à 70 (280 au total) pins par face ;
- ▶ Les pins sont espacées d'une distance variant de 0,4 à 1 mm ;
- ▶ thin (TQFP)
- ▶ very thin (VQFP)
- ▶ low-profile (LQFP).

■ Matrice de bille (Ball grid array, BGA)

- ▶ composé d'une matrice de billes de soudures
- ▶ compact, haute densité



2

Le Circuit imprimé

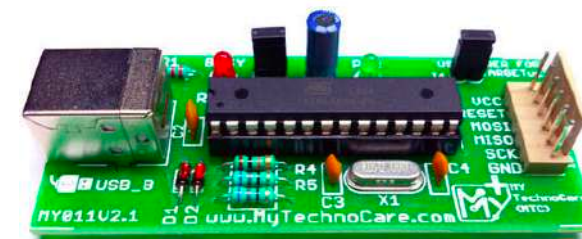
Le circuit imprimé (1 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

■ Rôles

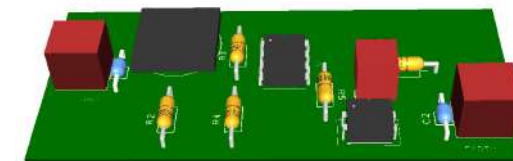
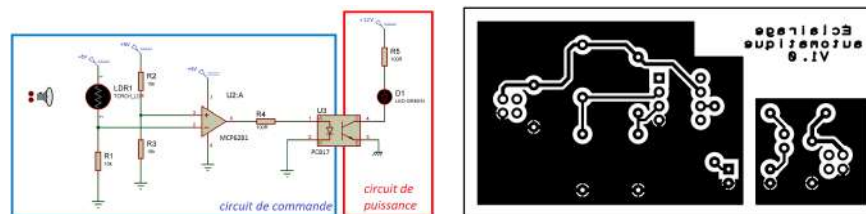
- ▶ Liaison mécanique entre les composants
- ▶ Assurer la conduction électrique entre les composants
- ▶ Protéger le système des perturbations électromagnétiques



■ Processus de fabrication

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



Spécifications (fonctionnelles et techniques)

Conception de la carte

Fabrication

Tests et validations

Édition de la schématique

Routage du masque

Cahier des charges (CDC)

Netlist

Fichiers Gerber

PCB

Rapport de validation (RV)

Dossier de fabrication (DF)

Le circuit imprimé (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

- Un PCB peut avoir 1 à 30 couches ;
- Norme : standard américain : **IPC** (*Institute of Printed Circuits*)
- Cela prend des années avant de faire de bons routages ;
 - ▶ Router une carte comportant des signaux à haute fréquence implique une maîtrise théorique et pratique

- Les premiers PCB ont été conçus par des anglo-saxons
 - ▶ les dimensions sont exprimées en **inches** et **mils** 🤖 ;
 - ▶ l'épaisseur des conducteurs est mesurée en **onces** (oz) ;

1 inch = 25.4 mm
1 mil = 0.0254 mm

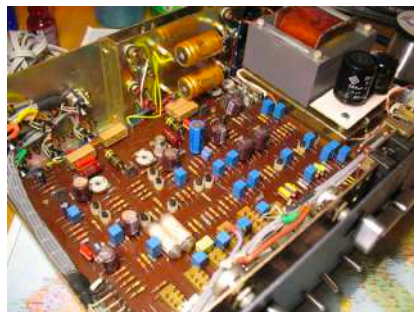
0.5 oz = 17.5 μm
1.0 oz = 35.0 μm
2.0 oz = 70.0 μm
3.0 oz = 105.0 μm

II. Le circuit imprimé

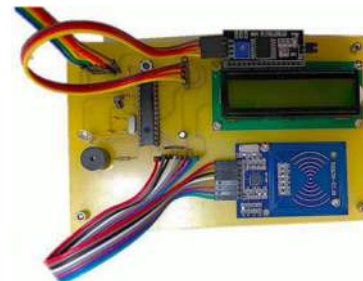
- A. Principe
- B. Schématisation
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

- Historique des PCB
 - ▶ avec le développement du télégraphe, du téléphone et de la radio, succession de brevets au XX^{ème} siècle ;
 - ▶ 1903 : Albert Hanson (All.) met au point un système de fils conducteurs collés sur un papier de paraffine ;
 - ▶ 1913 : Arthur Berry (Angl.) met au point un procédé de fabrication de circuits en déposant une couche de cuivre sur un conducteur qui est ensuite gravée
- Matériau

- ▶ anciens circuits (~1970) : **bakélite**
 - Couleur marron, cassant



- ▶ de nos jours : **epoxy et / ou fibre de verre**
 - Couleur blanc verdâtre translucide
 - Parfois recouvert d'un vernis protecteur



Projet techno ING4 SE 🤖



La schématique (1 / 2)

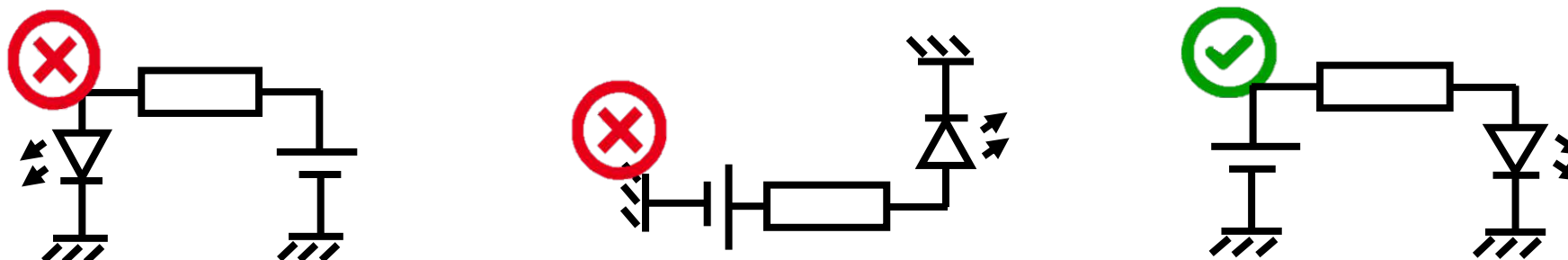
I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

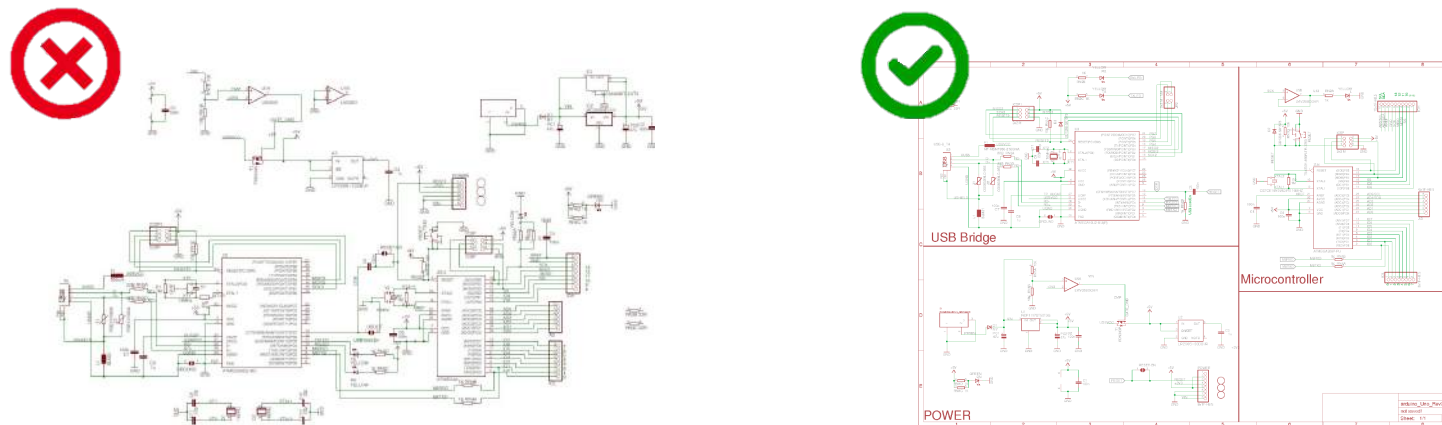
- La **schématique** est comme la recette de cuisine en électronique. Elle montre :
 - ▶ Quels composants utiliser ;
 - ▶ Comment ils sont connectés entre eux.
- Elle permet de générer la **netlist** : une description des connexions électriques du circuit sous forme de tableau
- Une bonne schématique doit être lisible et se lit de gauche à droite, et de haut en bas.

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. **Schématique**
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



- Une bonne schématique est organisée par blocs fonctionnels

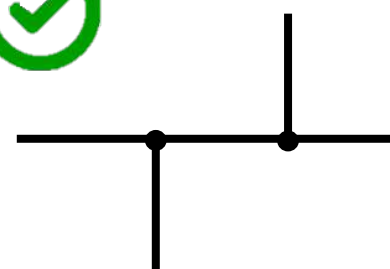
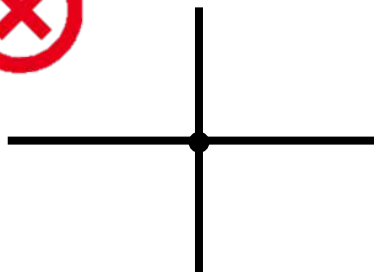


La schématique (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

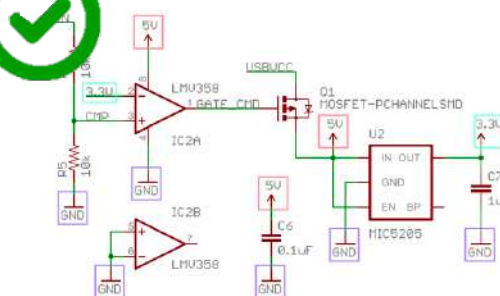
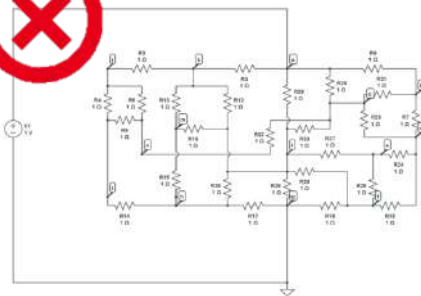
- Une bonne schématique doit est explicite et les croisements sont renseignées par des nœuds.



II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

- Les signaux et alimentations sont désignés par des labels.



- On utilise des abréviations normées pour les valeurs des composants et les valeurs sont standardisées :
 - ▶ préfixes communs pour les résistances : $k = 10^3$, $M = 10^6$
 - ▶ préfixes communs pour les capacitances : $p = 10^{-12}$, $n = 10^{-9}$ et $\mu = 10^{-6}$
- On reporte la forme de certains signaux lorsque cela peut simplifier la lecture d'un circuit complexe.
- On renseigne une désignation fonctionnelle, le nom du concepteur, une date et un numéro de version dans le coin inférieur droit.

Alimentations et masses

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

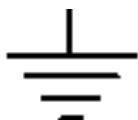
■ Les alimentations

	Technologie TTL (transistors BJT)	Technologie CMOS (transistors MOSFET)
Alimentation positive	VCC (collecteur)	VDD (drain)
alimentation négative	VEE (émetteur)	VSS (source)

■ La masse

- ▶ par définition, un potentiel de 0 V ;
- ▶ toutes les mêmes masses sont connectées entre elles.
- ▶ parfois à séparer pour éviter la diaphonie entre circuits (numérique vs analogique, commande vs puissance, *etc.*)

■ Terre



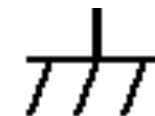
- ▶ 0 V absolu
- ▶ masse pour les circuits numériques

■ Masse



- ▶ 0 V de référence pour les signaux
- ▶ masse pour les circuits analogiques (plus bruités)

■ Châssis



- ▶ connecté au châssis du circuit
- ▶ moins utilisé
- ▶ protection contre les chocs électriques

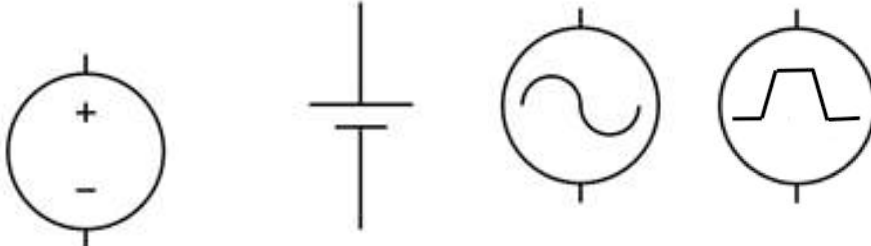

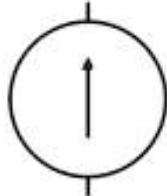

Les générateurs (1 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

	Idéal (indépendant du reste du circuit)	Commandé (dépendant d'au moins une grandeur du reste du circuit)
Source de tension (maintient une tension constante à ses bornes)	 <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> VDC VSINE VPULSE </div>	 <p><u>Exemple</u> modèle d'AOP réel : $u_{OUT} = A_{vd}(V^+ - V^-)$ 🧐</p>
Source de courant (adapte la tension pour maintenir un courant constant)		 <p><u>Exemple</u> modèle d'Ebers-Moll (transistor bipolaire)</p>

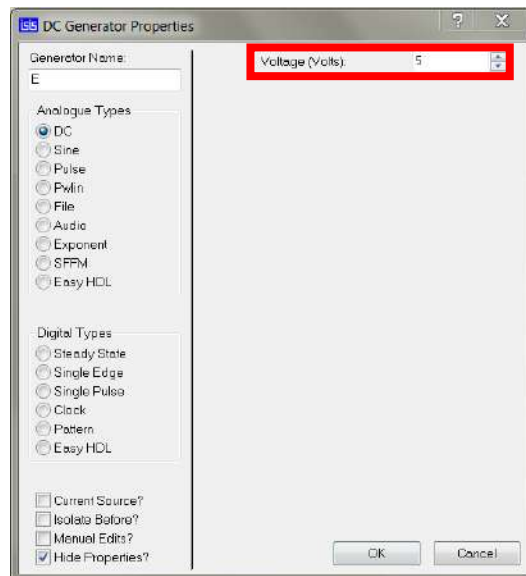
Les générateurs (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

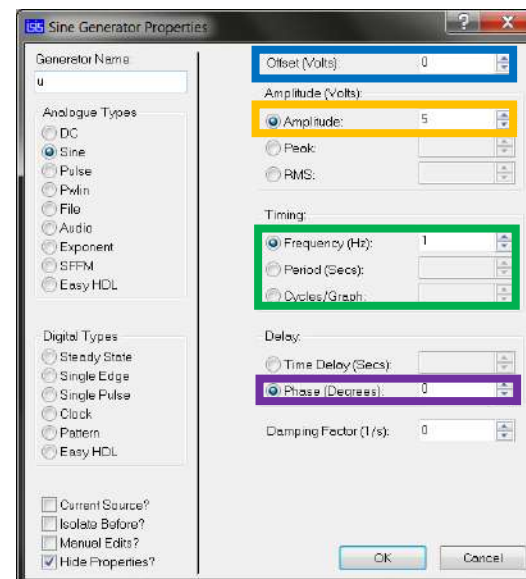
II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



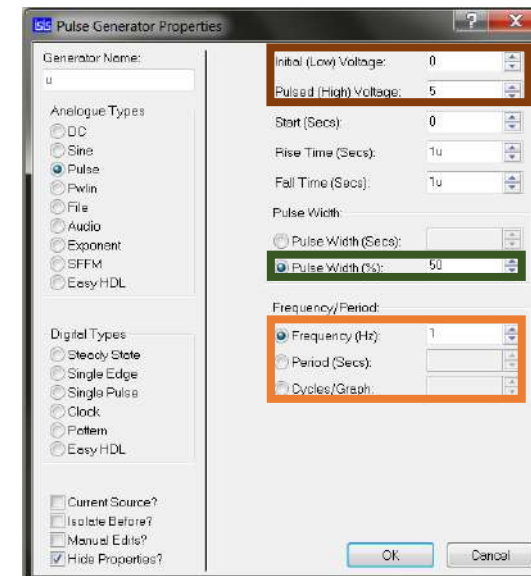
DC

$$E = k$$



SINE

$$u(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + V_{OFF}$$



PULSE

$$u(t) = \begin{cases} V_H & \text{si } t \leq \alpha T \\ V_L & \text{si } t > \alpha T \end{cases}$$

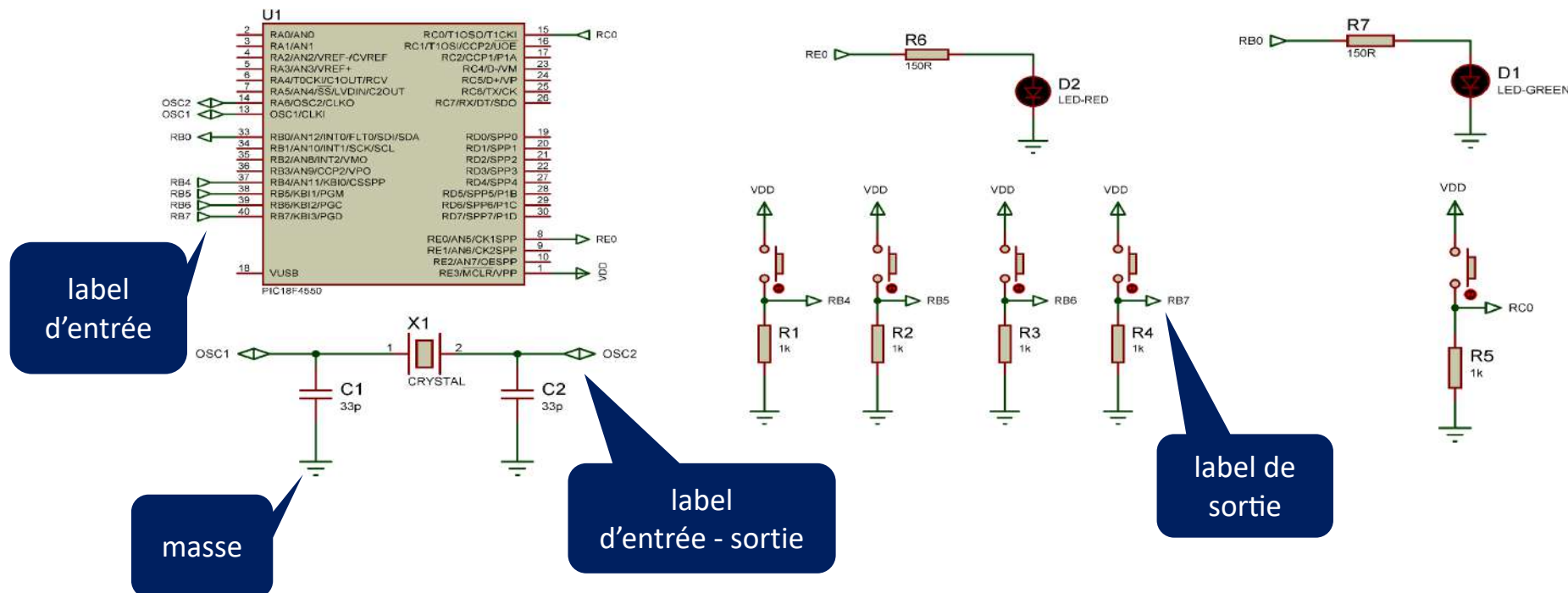
Les labels

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



Les composants

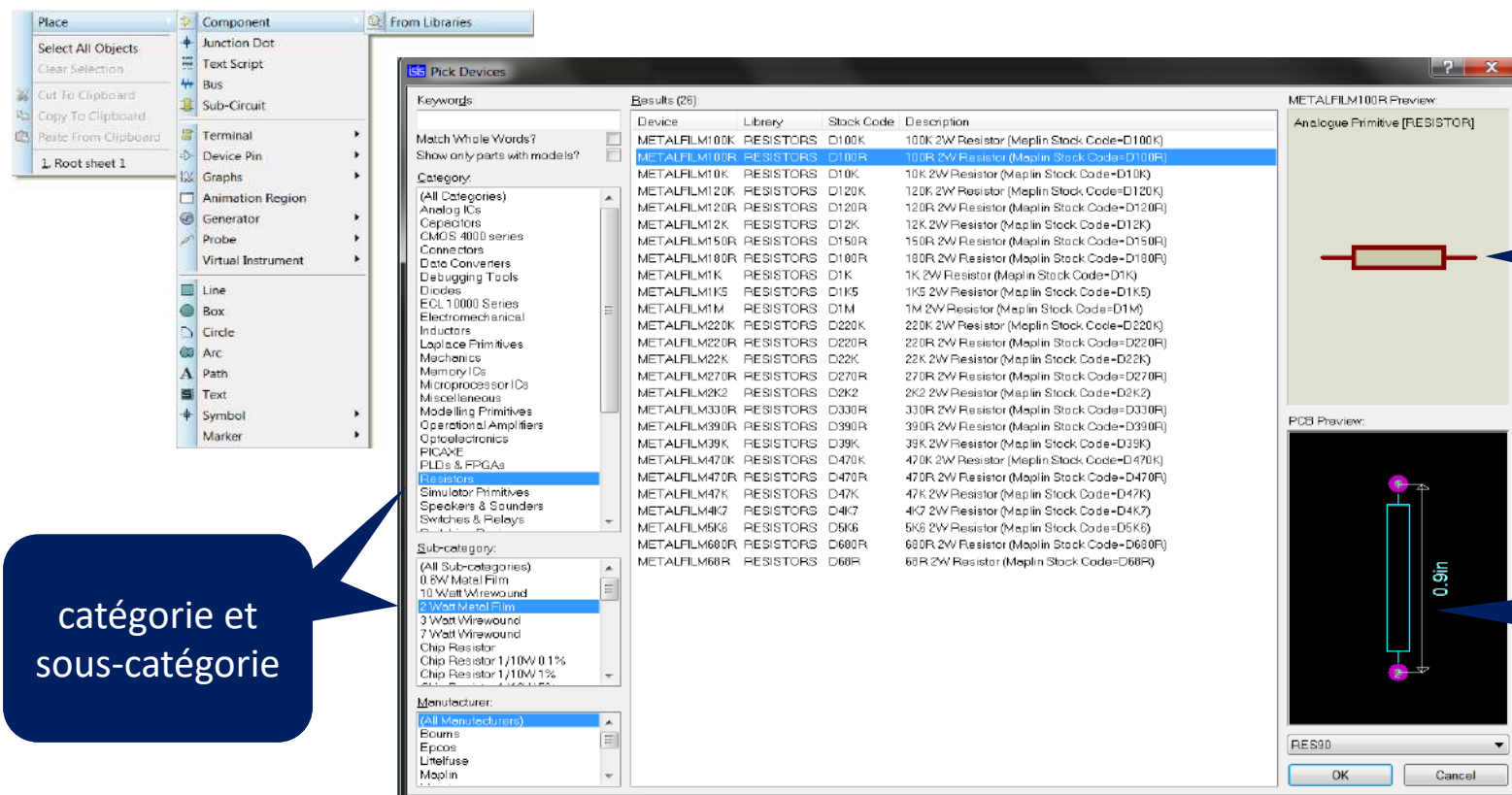
I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

- Proteus simule principalement de « vrais composants »
- Les composants « GENERIC » n'ont parfois pas de modèle mathématique associé et ne peuvent donc pas être simulés.

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



Les outils de mesure (DC)

I. Les composants électroniques de base

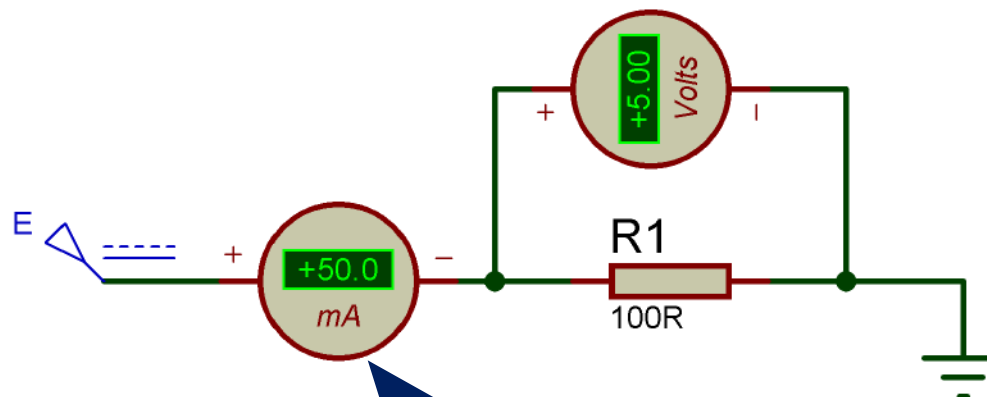
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



- Le voltmètre mesure une différence de potentiel → à brancher en parallèle
- L'ampèremètre mesure un courant → à brancher en série dans une boucle fermée



Bien souvent, il est nécessaire de choisir le calibre en double-cliquant sur le DC Ammeter (A, mA ou μ A) car ce dernier ne peut afficher que 3 chiffres significatifs.

Les graphiques (1 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

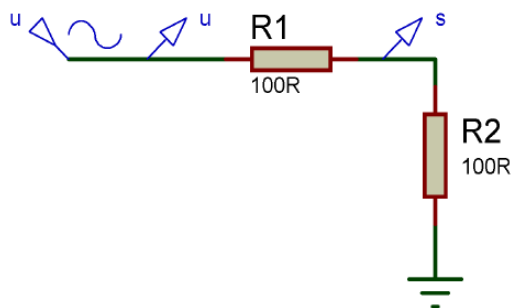
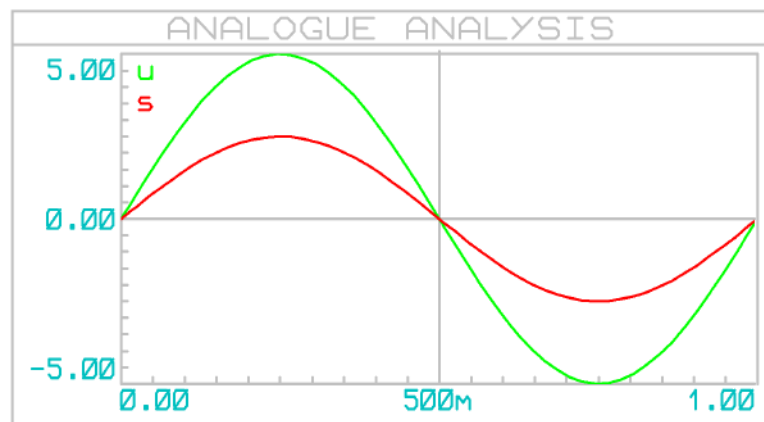
II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



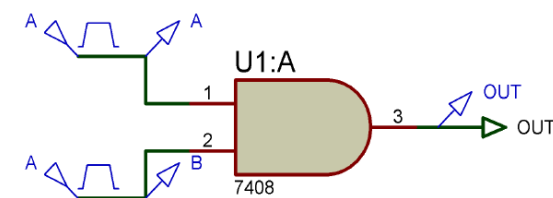
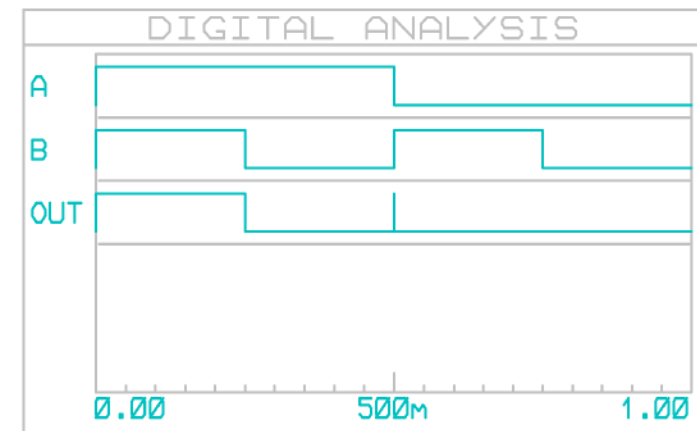
Simulation analogique

ANALOGUE ANALYSIS



Simulation numérique

DIGITAL ANALYSIS



Les graphiques (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

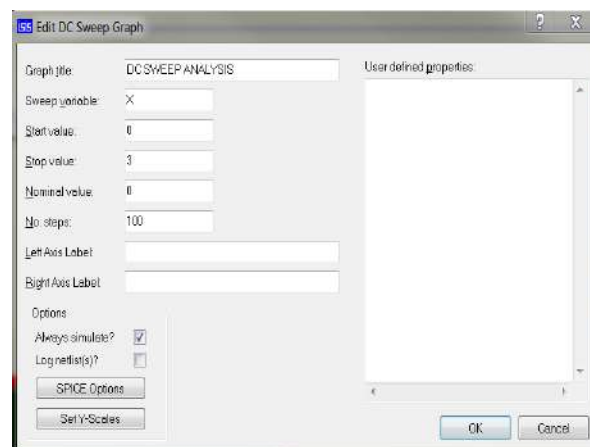
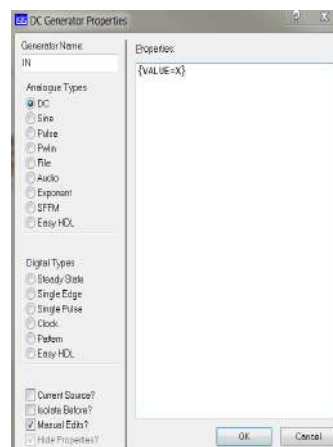
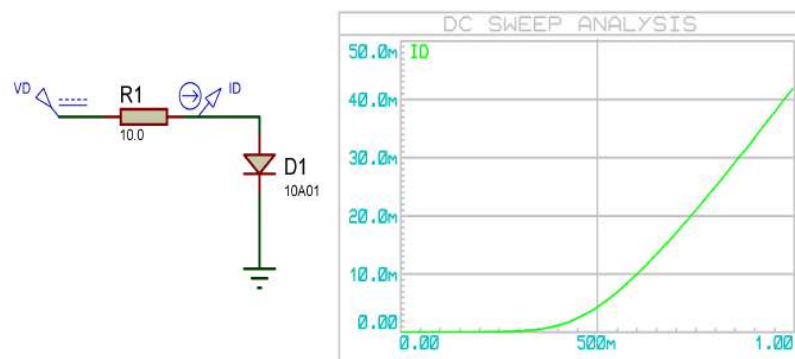
II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



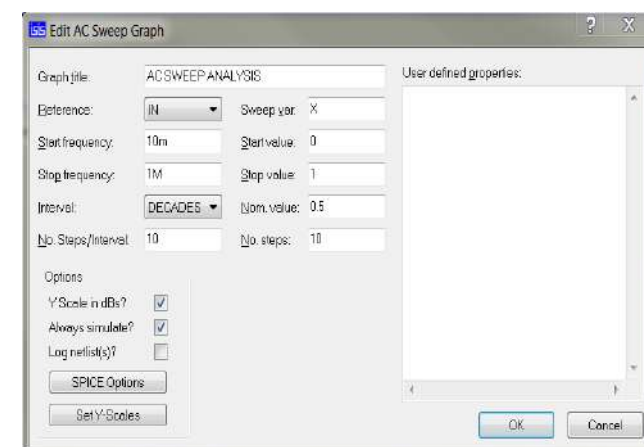
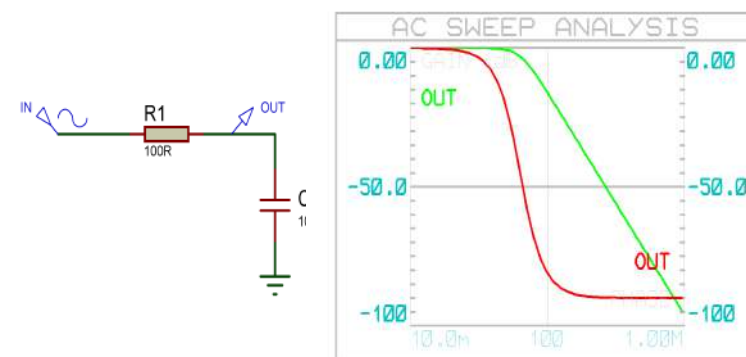
Balayage en amplitude

DC Sweep



Balayage en fréquence

AC Sweep



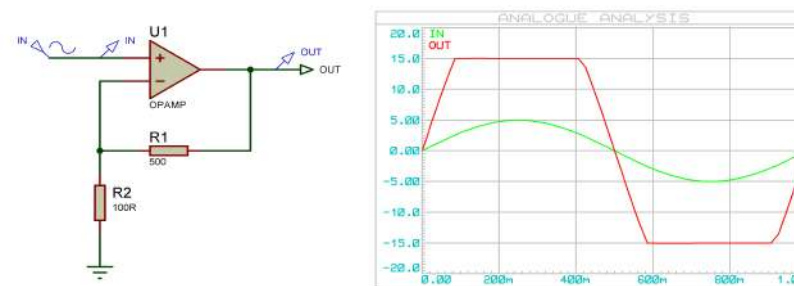
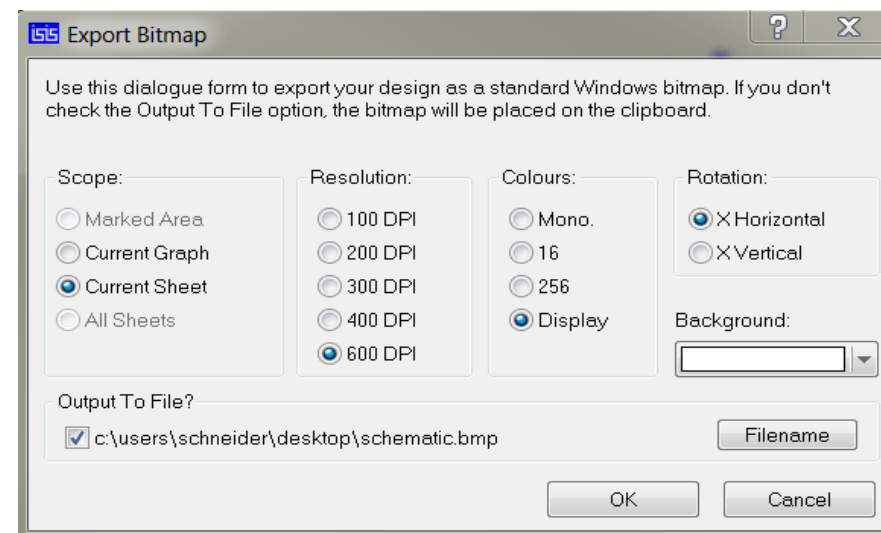
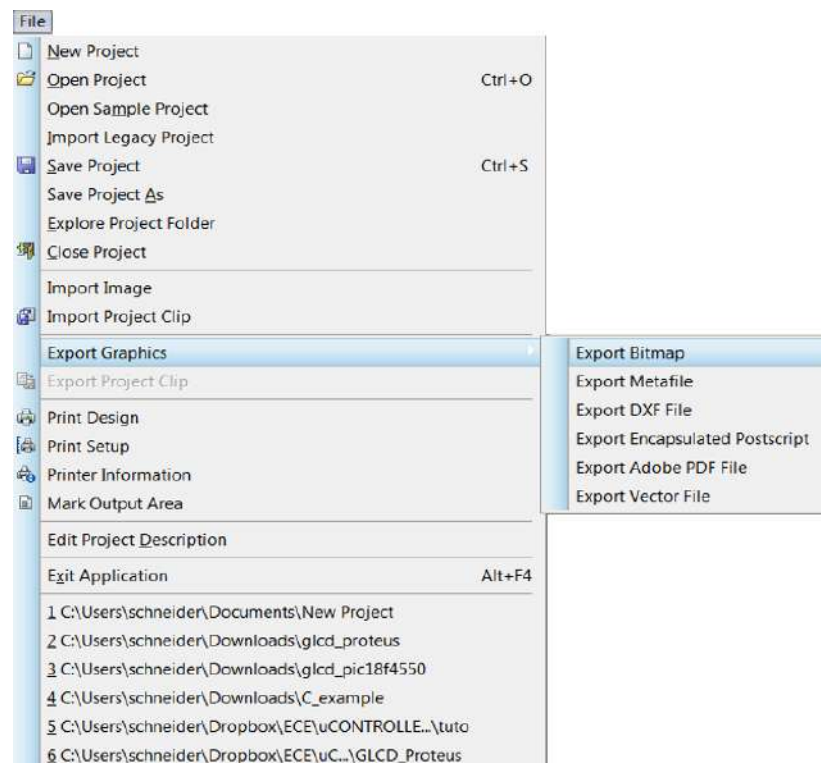
Export d'une schématique

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



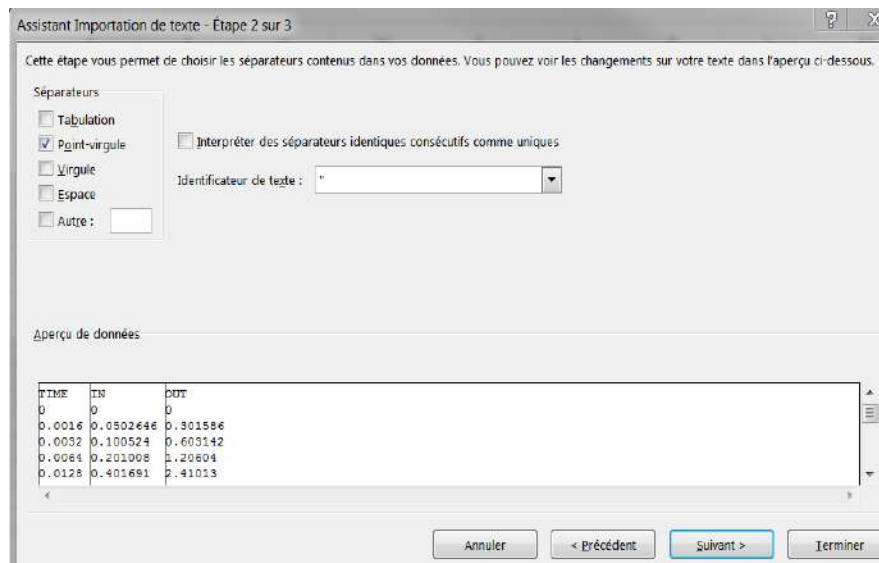
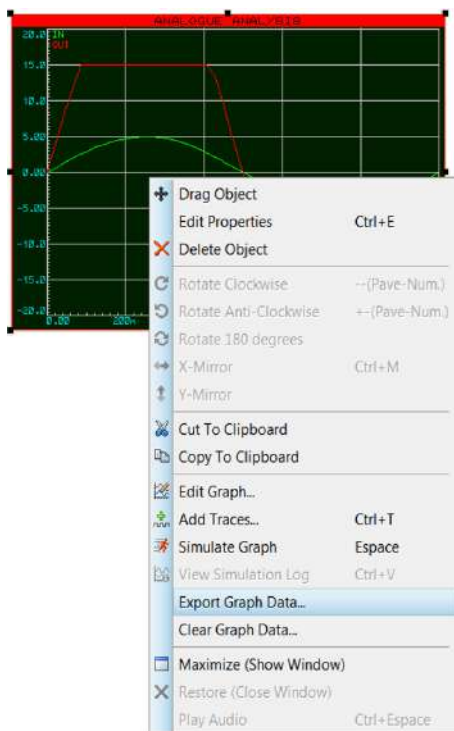
Export de résultats de simulation

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



■ PROTEUS exporte un fichier .dat.

■ Pour le lire sur Excel :

- ① ouvrir Excel, Fichier > nouveau et sélectionner le fichier .dat
- ② sélectionner « Point-virgule » dans « Séparateurs »
- ③ enregistrer le fichier converti au format .xls

	A	B	C
1	TIME	IN	OUT
2	0	0	0
3	0.0016	0.0502646	0.301586
4	0.0032	0.100524	0.603142
5	0.0064	0.201008	1.20604
6	0.0128	0.401691	2.41013
7	0.0256	0.800784	4.80468
8	0.0456	1.41305	8.47824
9	0.0656	2.00302	12.0181
10	0.0856	2.56141	15.0119
11	0.1056	3.07941	15.0327
12	0.1256	3.54884	15.04
13	0.1456	3.9623	15.0407
14	0.1656	4.31327	15.0414
15	0.1856	4.59623	15.0369
16	0.2056	4.80669	15.0325
17	0.2256	4.94136	15.0221
18	0.2456	4.99809	15.0231
19	0.2656	4.976	15.0241
20	0.2856	4.87544	15.0226

Compatibilité électromagnétique (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

■ La Compatibilité électromagnétique concerne l'aptitude d'un circuit électronique à fonctionner correctement dans un environnement électromagnétique sans induire de perturbations électromagnétiques à son environnement ou sur lui-même.

■ On parle de couplage pour désigner le transfert d'énergie d'un milieu vers un autre (ex : piste électrique, fil électrique, fibre optique, etc.).

■ Les mécanismes peuvent être scindés en deux catégories :

II. Le circuit imprimé

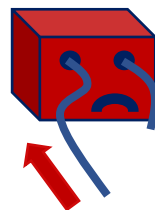
- A. Principe
- B. Schématique
- C. **Compatibilité électromagnétique**
- D. Routage
- E. Fabrication

► couplage par conduction

émission
par conduction



susceptibilité
par conduction



Couplage
conductif

► couplage par rayonnement

émission
par rayonnement



susceptibilité
par rayonnement



Couplage
capacitif

Couplage
inductif

Couplage
électromagnétique

Couplage conductif (1 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

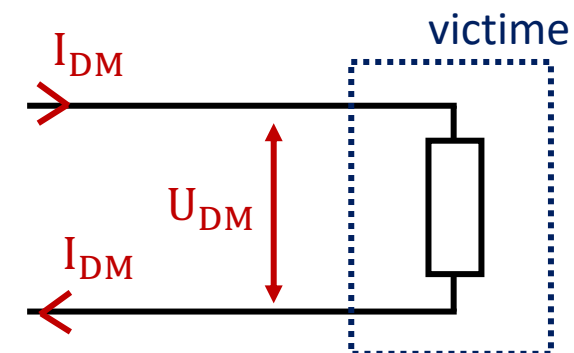
- A. Principe
- B. Schématique
- C. **Compatibilité électromagnétique**
- D. Routage
- E. Fabrication

■ Le couplage conductif a lieu entre une source et un récepteur lorsque ces derniers sont reliés par un contact physique (ex : une ligne de transmission, un fil, un cable, une piste de PCB, etc.)

■ Il existe deux modes de couplage conductif :

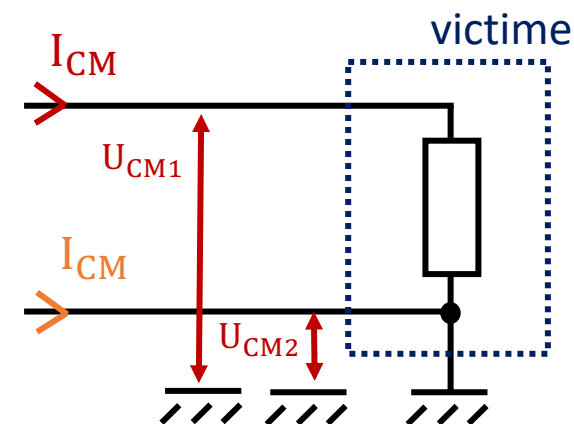
► mode différentiel

- La différence de potentiel apportée à un système correspond à la différence de potentiel entre les deux conducteurs reliant les pôles de ce système (ex : prise électrique domestique)
- Le courant résultant vient d'un des fils et repart par l'autre fil : le courant circule dans des directions opposées dans les deux conducteurs.



► mode commun

- Le signal (et le bruit) circulent dans la même direction et reviennent à la masse ;
- **LE principal problème en couplage conductif**

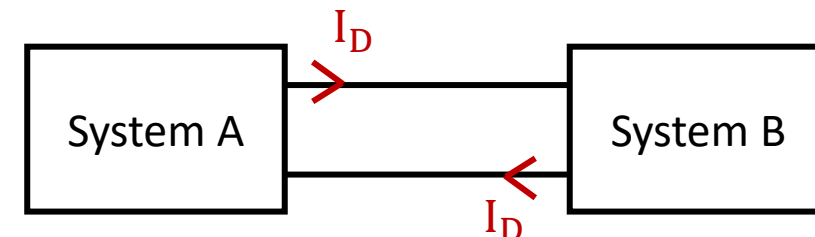


Couplage conductif (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

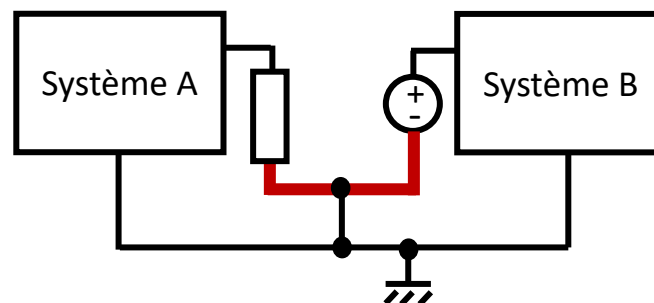
■ en mode différentiel, les signaux sur les deux lignes sont déphasés



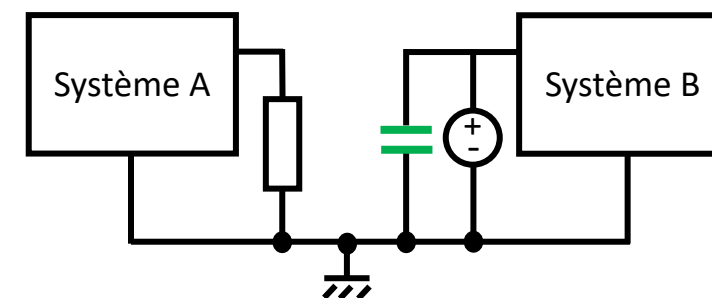
■ en mode commun, lorsqu'une source d'interférence (ex : sortie du système A) partage une connexion à la masse avec une victime (ex : entrée du système B), tout bruit venant de A se propage dans B : on parle de **couplage par impédance commune**.

- ▶ une solution est de réduire le fil de connexion en commun à un point unique ;
- ▶ dans tous les cas, l'ajout de condensateurs de découplage est bénéfique

problème



solution



Couplage capacitif

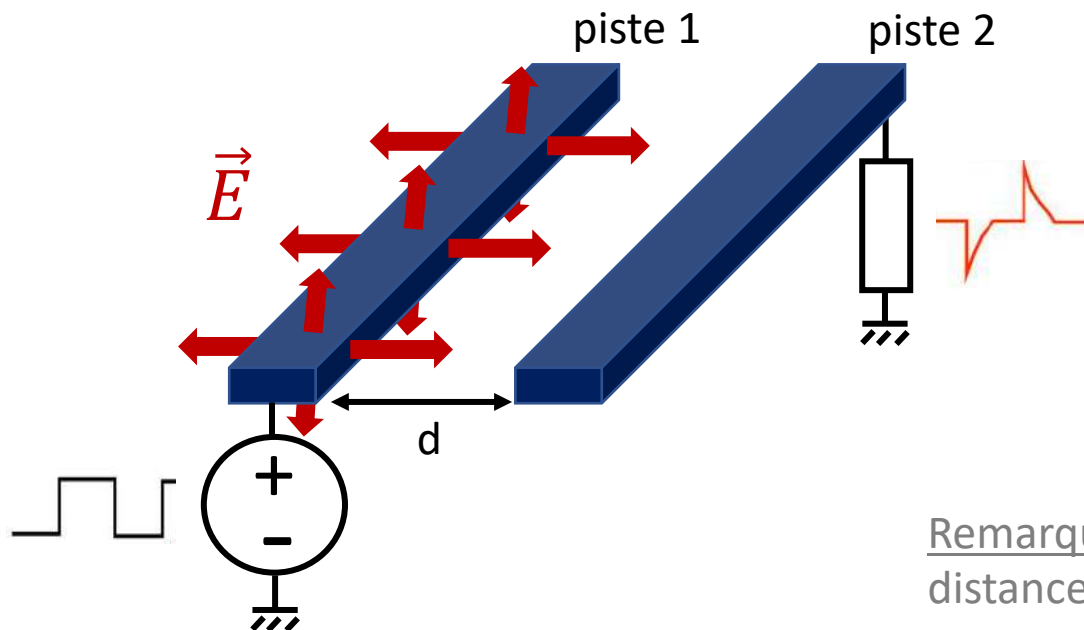
I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

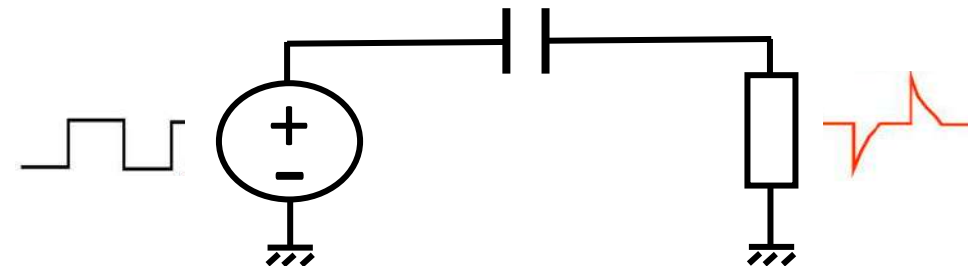
- A. Principe
- B. Schématique
- C. **Compatibilité électromagnétique**
- D. Routage
- E. Fabrication

■ Lorsque deux conducteurs sont proches, un phénomène de **diaphonie** peut avoir lieu. On parle de couplage capacitif ou de couplage électrostatique.



modèle

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_0 A}{d}$$



Remarque : la capacité est inversement proportionnelle à la distance entre deux conducteurs.

■ Tout bruit présent sur la piste 1 engendre du bruit sur la piste 2 par couplage capacitif.

■ solution : éloigner les pistes

► $\lim_{d \rightarrow \infty} \frac{\epsilon_0 \epsilon_0 A}{d} = 0$ or $C = 0$ implique un circuit ouvert et donc pas de diaphonie.

Couplage inductif (1 / 2)

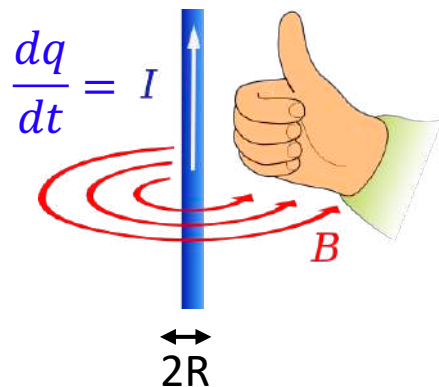
I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

- Tout conducteur parcouru par un courant répand un champ magnétique radialement autour de lui.



Loi de Biot et Savart

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{d\vec{l} \wedge \vec{u}}{r^2}$$

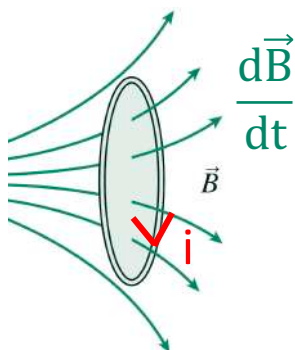


Fil infini

$$\vec{B}(r) = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \vec{u}_\theta$$

→ Tout conducteur parcouru par un courant génère un champ \vec{B} .
Plus l'on est loin d'un fil et plus son champ magnétique est faible.

- Tout conducteur parcouru par un courant répand un champ magnétique radialement autour de lui.



Loi de Faraday

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Circuit fermé = boucle

$$\rightarrow e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

→ Tout circuit fermé est susceptible de générer une force électromotrice induite.

Couplage inductif (2 / 2)

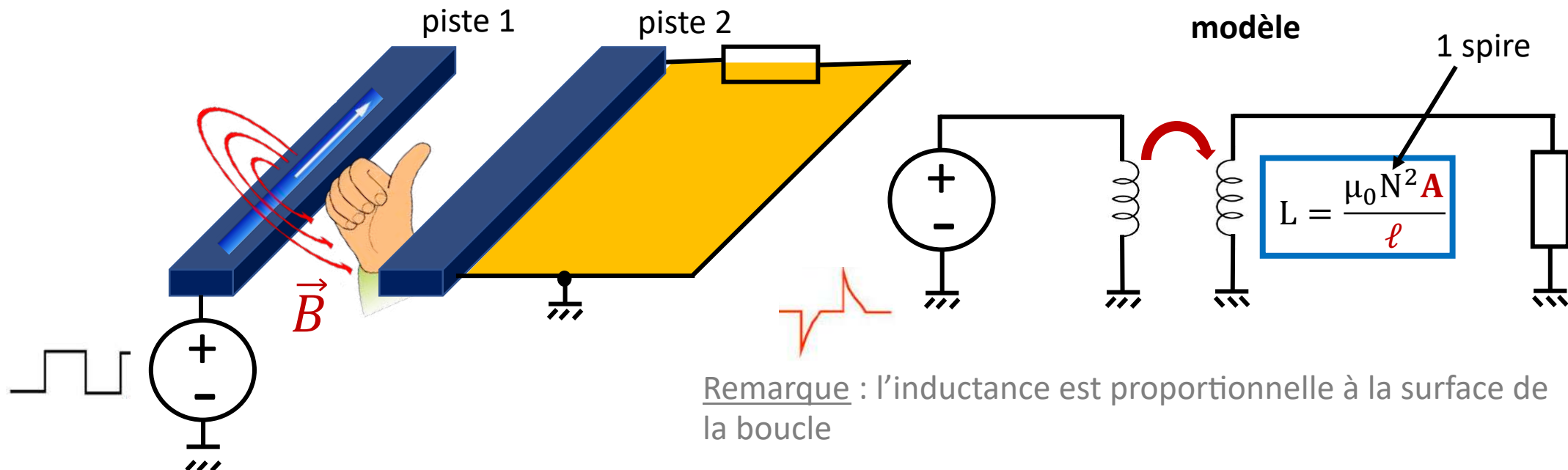
I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. **Compatibilité électromagnétique**
- D. Routage
- E. Fabrication

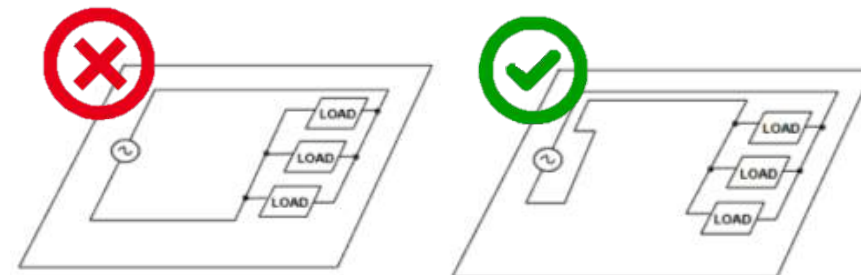
■ Ce champ peut causer de la **diaphonie** sur toute autre piste formant une boucle.



■ Tout bruit présent sur la piste 1 engendre du bruit sur la piste 2 par couplage inductif.

■ solution :

▶ éviter les boucles réduire / réduire leur surface.



Couplage électromagnétique

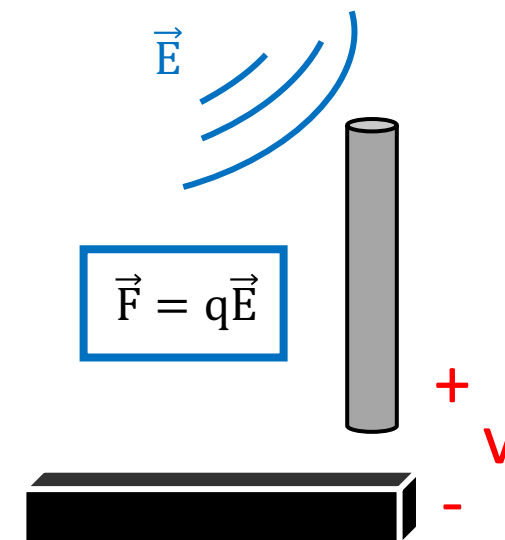
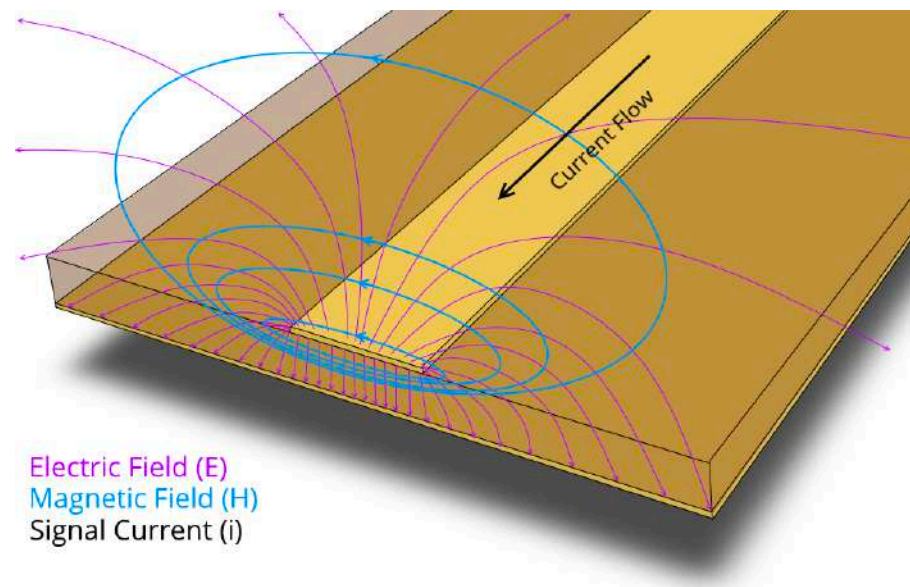
I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. **Compatibilité électromagnétique**
- D. Routage
- E. Fabrication

■ Les ondes électromagnétiques peuvent être émises et réceptionnées par des antennes (pin non connectée, angle droit, etc.). On parle de **couplage électromagnétique** lorsqu'une onde émise par un circuit (signal alternatif) est réceptionnée par un autre.



- Les e^- contenus dans l'antenne de réception, se mettent en mouvement sous l'action d'un champ électrique oscillant, donnant lieu à une tension alternative ;
- solution : éviter les angles droits et les angles vifs.

Effet de peau

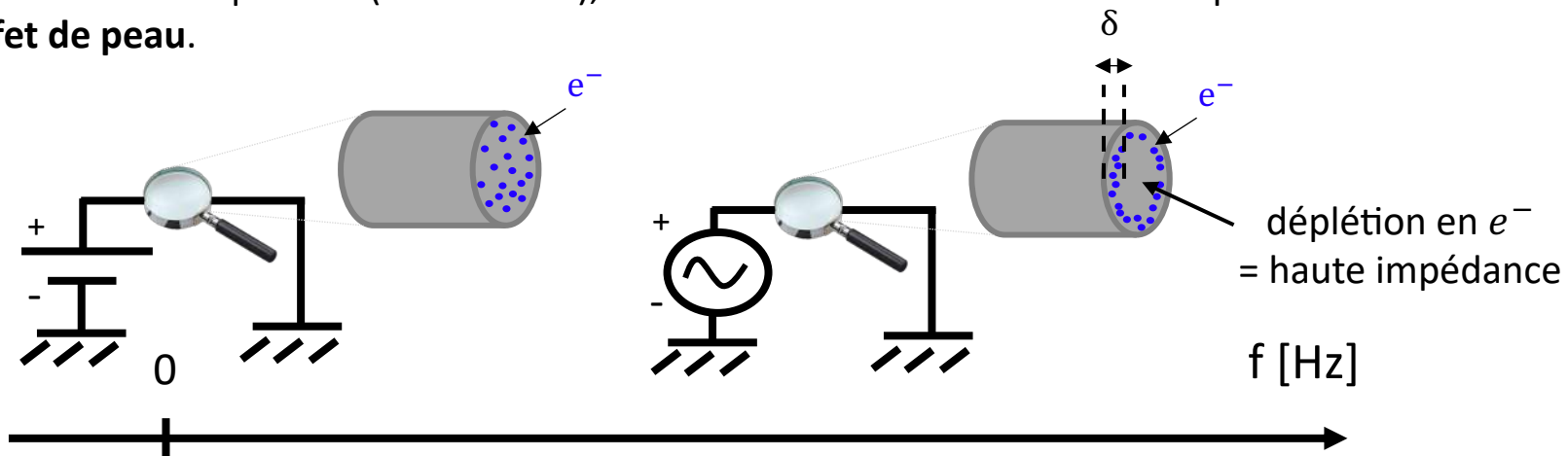
I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. **Compatibilité électromagnétique**
- D. Routage
- E. Fabrication

■ aux hautes fréquences (≥ 10 MHz), le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs. Il s'agit de l'**effet de peau**.



$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\pi f}}$$

■ aux hautes fréquences, la tension alternative fait vibrer les e^- , ce qui génère des champs magnétiques dans le conducteur dont la résultante a tendance à pousser les e^- vers la surface du conducteur.

■ l'**épaisseur de peau** δ est une première approximation de la largeur de la zone où se concentre le courant dans un conducteur. En conséquence, la résistance augmente.

Exemple : fil de cuivre

$f [Hz]$	50	60	10 k	100 k	1 M	1 G	1 T
δ	9,4 mm	8,6 mm	0,7 mm	0,2 mm	$66 \mu m$	$2,1 \mu m$	66 nm

■ solution : utiliser des **fils torsadés** afin d'augmenter la surface utile pour les e^-

▶ à éviter pour les longues distances car R augmenterait à nouveau avec ℓ ($R = \rho \frac{L}{A}$)



Le routage

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

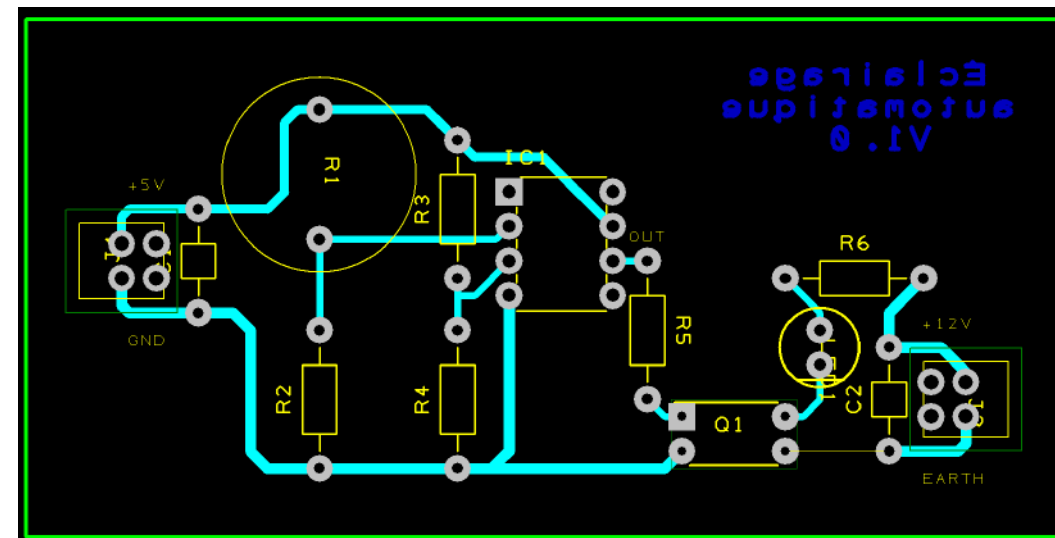
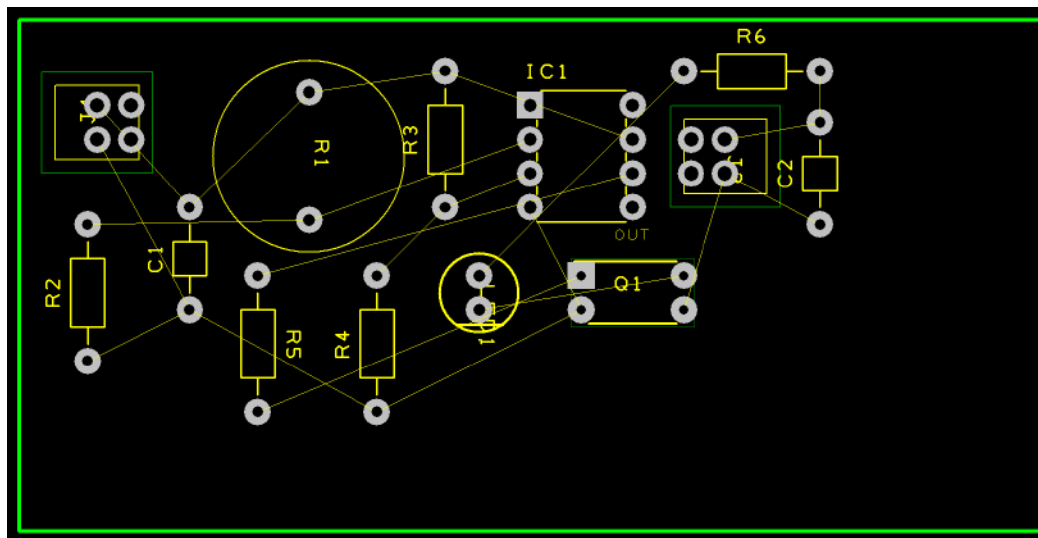
- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ Le **routage** de circuit imprimés est une opération qui consiste à spécifier comment les signaux électriques vont d'un composant à un autre : leur indiquer la route à prendre en traçant les pistes électriques physiques.

■ Pour des applications simples, le routage n'est pas d'une grande importance. Cependant, dans certains cas (hautes fréquences, audio, etc.), la qualité du routage est d'une grande importance puisque le circuit est directement impacté par la CEM.

■ Dans la pratique, on commence par importer la netlist. Cela permet au logiciel de :

- ▶ importer les empreintes (*footprint*) des composants ;
- ▶ tracer un chevelu entre ces derniers : relier par un fil fictif les pattes des composants devant être connectés au même potentiel, et les plus proches;



Conseils pour le routage (1 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. **Routage**
- E. Fabrication

- Commencer par placer les composants en fonction de leur fonctionnalité.
 - ▶ Un bon routage est lisible, le signal se propage de la gauche vers la droite ;
 - ▶ Si le circuit comprend de l'analogique et du numérique, les blocs fonctionnels sont clairement séparés ;
 - ▶ Les connecteurs sont situés sur les bords ou dans les coins de la carte ;
 - ▶ Les composants communicants avec des éléments en dehors de la carte doivent le plus proche possible du connecteur dédié.
- S'il n'y a pas de contrainte de taille et de densité, utiliser des composants traversants en simple couche (cas du TP1) ;
- Tous les signaux correspondant à la communication avec une même autre carte doivent passer par la même nappe de fils ;
- Les puristes et les curieux pourront consulter les documentations de l'IPC 🧐.

Conseils pour le routage (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

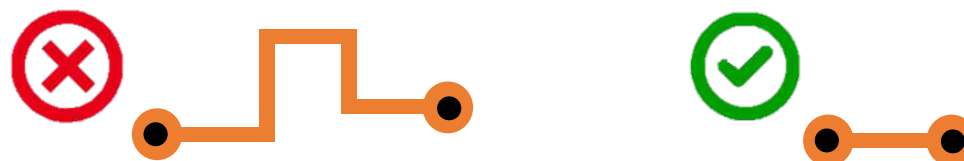
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

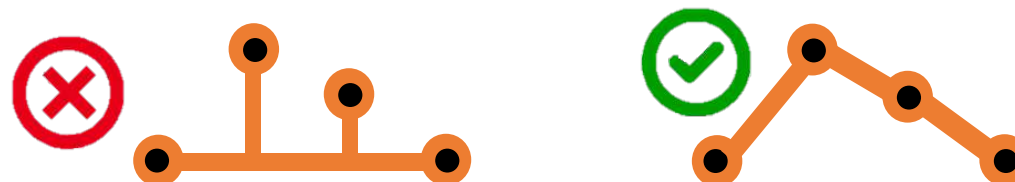
- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. **Routage**
- E. Fabrication

■ Voici quelques astuces à garder en tête lors du routage de PCB :

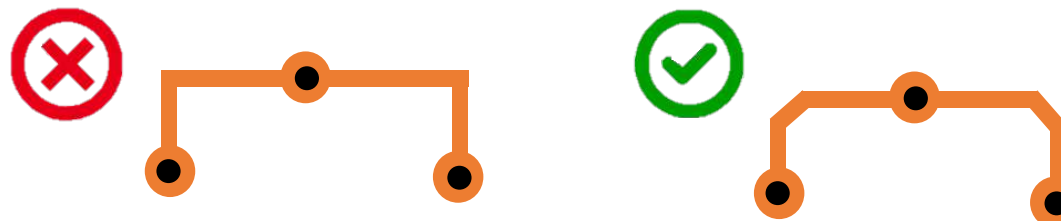
▶ tracer des pistes les plus courtes possibles en HF. Si besoin, rapprocher les composants ;



▶ éviter les réseaux ramifiés par des pistes ;



▶ éviter les angles droits car les champs s'y concentrent, et les pointes sont des antennes.
(penser à l'analogie avec la mécanique des fluide : dans un angle droit, l'eau s'écoule moins bien)



Pins non connectées

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

- une pin non connectée n'est pas connectée à la masse, on la considère en haute impédance, et c'est accessoirement une antenne !
 - ▶ à connecter à la masse.

- Si la *datasheet* mentionne "NC" (*not connected*), il n'y a pas besoin de connecter la pin.

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



LM741 Operational Amplifier

1 Features

- Overload Protection on the Input and Output
- No Latch-Up When the Common-Mode Range is Exceeded

2 Applications

- Comparators
- Multivibrators
- DC Amplifiers
- Summing Amplifiers
- Integrator or Differentiators
- Active Filters

3 Description

The LM741 series are general-purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439, and 748 in most applications.

The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and output, no latch-up when the common-mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

The LM741C is identical to the LM741 and LM741A except that the LM741C has their performance ensured over a 0°C to +70°C temperature range, instead of -55°C to +125°C.

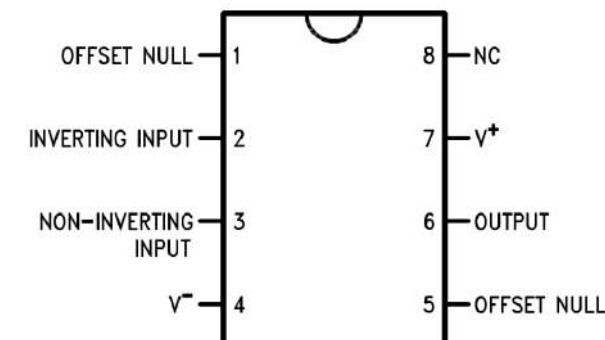
Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM741	TO-99 (8)	9.08 mm × 9.08 mm
	CDIP (8)	10.16 mm × 6.502 mm
	PDIP (8)	9.81 mm × 6.35 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.



8-Pin CDIP or PDIP
Top View



Largeur des pistes

I. Les composants électroniques de base

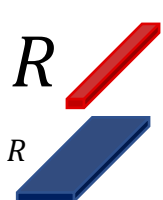
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ Le passage d'un courant électrique dans un matériau électrique induit des déperditions de chaleur par effet Joule. Il en est de même dans les pistes en cuivre des PCB.

■ L'augmentation de la largeur des pistes permet de moins chauffer les pistes ($R = \rho \frac{\ell}{S}$) ;



- ▶ des pistes trop fines sont plus résistives, chauffent davantage et peuvent brûler et peuvent être difficile à graver ;
- ▶ des pistes trop larges sont moins résistives, supportent donc plus de courant mais prennent par définition plus de place.

■ Pour le TP1, on peut prendre :

- ▶ 0,8 mm pour les pistes de puissance et de masse (« *power* ») ;
- ▶ 0,5 mm pour les pistes de signaux.

Remarque : ces dimensions dependent de l'épaisseur de la couche de cuivre et peuvent donc varier d'un PCB à un autre.

■ La documentation IPC-2221 propose des largeurs de pistes en fonction de la l'épaisseur de cuivre et du courant maximal nécaissaire pour une piste.

■ Les pistes des couches internes peuvent moins bien dissiper la chaleur de part la mauvaise conduction thermique du plastique isolant. Les pistes des couches internes doivent donc être au moins deux fois plsu larges que sur les couches internes.

Alimentation et plan de masse

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ Un **plan de masse ou d'alimentation** est un plan de cuivre permettant respectivement d'avoir à portée un retour à la masse ou un point d'alimentation.

■ Un plan permet de :

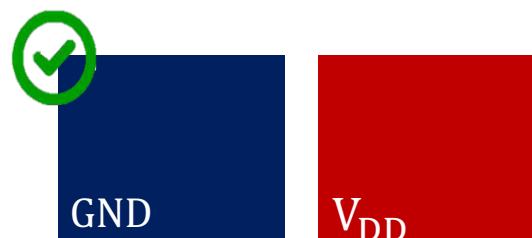
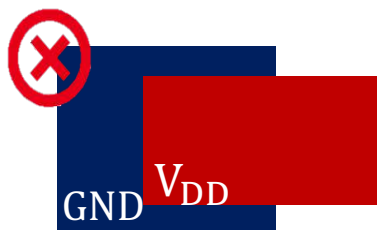
- ▶ d'avoir à proximité un chemin stable, de basse impédance pour tous les signaux de masse de la carte ;
- ▶ de limiter la diaphonie en remplissant l'espace entre des pistes qui y seraient sujettes ;
- ▶ faire en sorte que la carte ne chauffe moins (faible impédance).

Remarque : Si les deux sont employés sur une même carte, il est d'usage de les positionner sur des faces opposées afin de limiter la capacitance entre ces deux plans.

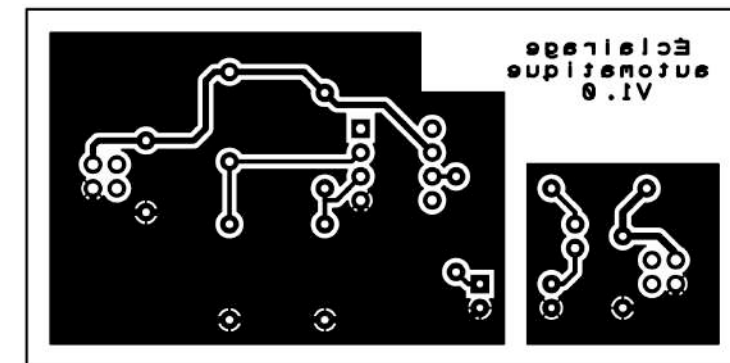
■ S'il n'est pas possible d'ajouter un plan de masse à un PCB :

- ▶ éviter absolument les boucles de masse pour ne pas bruyter la masse ;
- ▶ élargir au maximum les pistes de masse.

■ Si les deux sont employés sur une même carte, éviter de les superposer (diaphonie capacitive).



■ Le recours à un optocoupleur est un moyen de séparer deux plans de masse (commande / puissance, analogique / numérique)



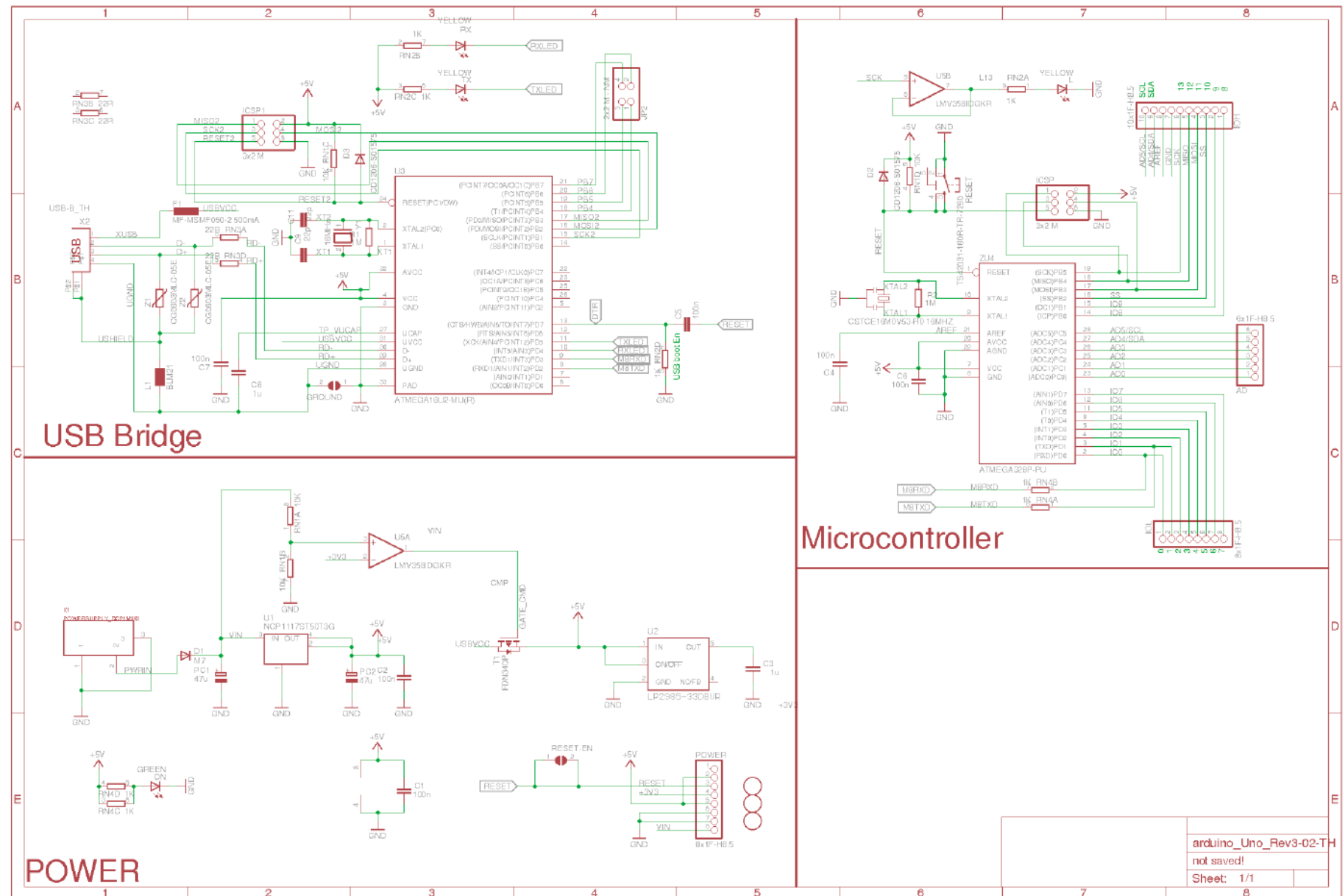
Arduino Uno (1 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



arduino_Uno_Rev3-02-TH
not saved!
Sheet: 1/1

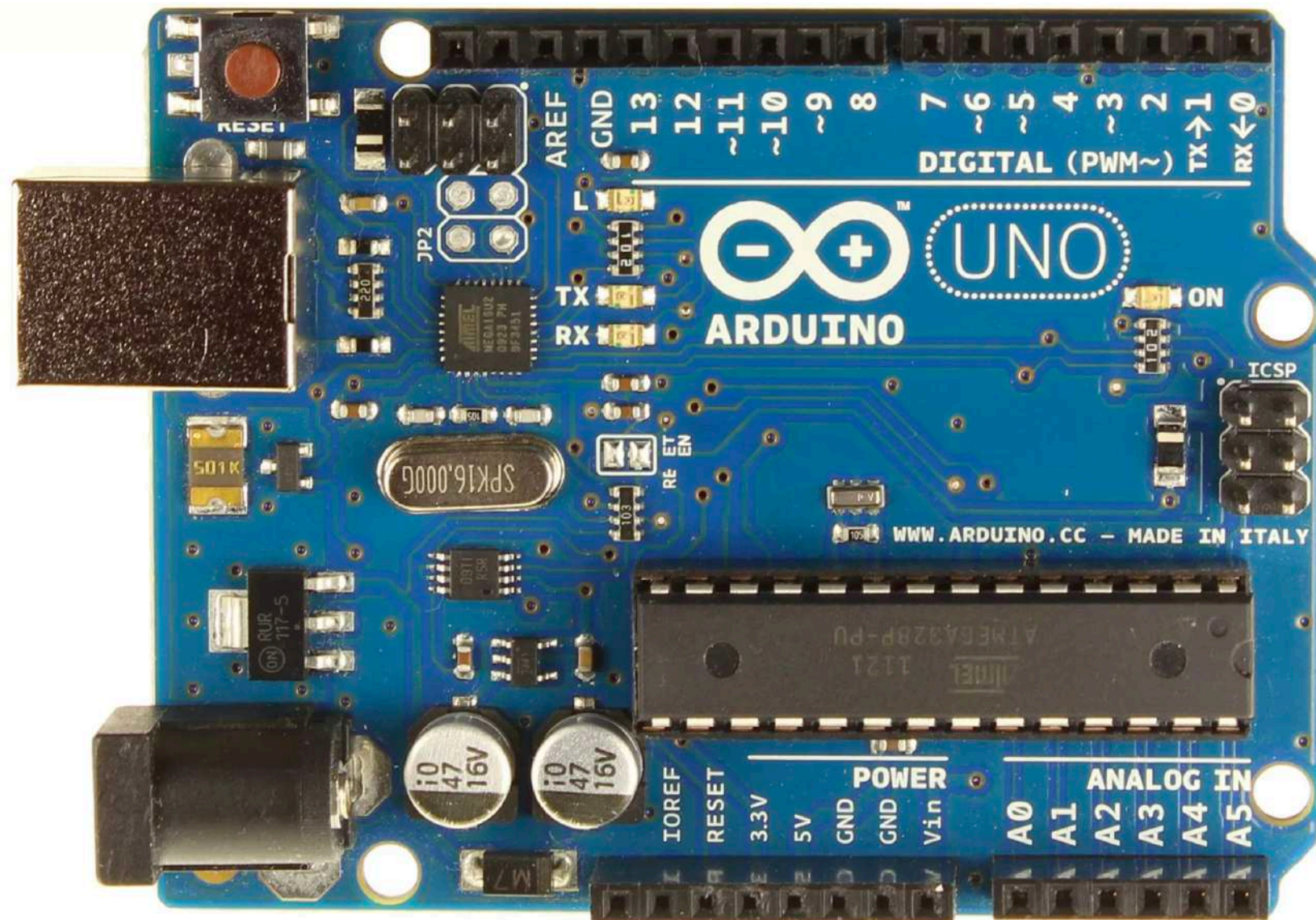
Arduino Uno (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



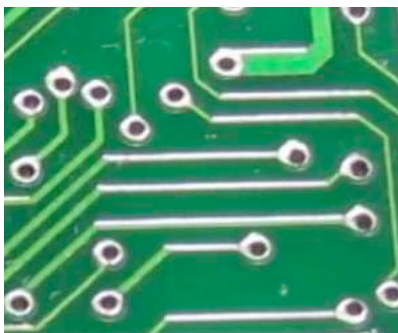
Vias, chip on board et package on package

I. Les composants électroniques de base

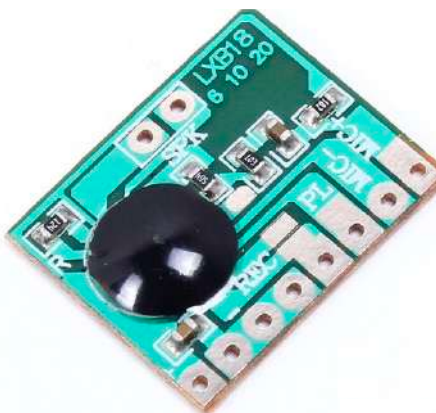
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

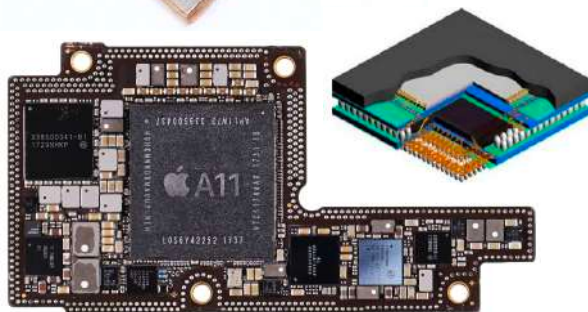
- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



- Les **vias** sont des connexions entre les couches. Il s'agit de trous conducteurs permettant de relier deux couches de cuivre ensemble ;
- Les circuits simple face ne comportent pas de via, les liaisons électriques se font dans l'unique couche conductrice ;
- En HF, les vias introduisent des capacités de 0,3 à 0,8 pF et des inductances de 1 à 4 nH et sont donc à éviter.



- Les **chip on board** sont des circuits intégrés qui sont directement insérés sur le PCB, sans boîtier.
- Cela leur permet d'être plus compact, plus léger et moins coûteux.



- Le design en **package on package** permet de superposer plusieurs circuits intégrés verticalement dans un même package en matrice de billes.
- Cela permet d'augmenter la densité d'un circuit et donc de le miniaturiser. Exemples : iPhone, Raspberry 1, etc.

Fabrication d'un PCB (1 / 3)

I. Les composants électroniques de base

- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

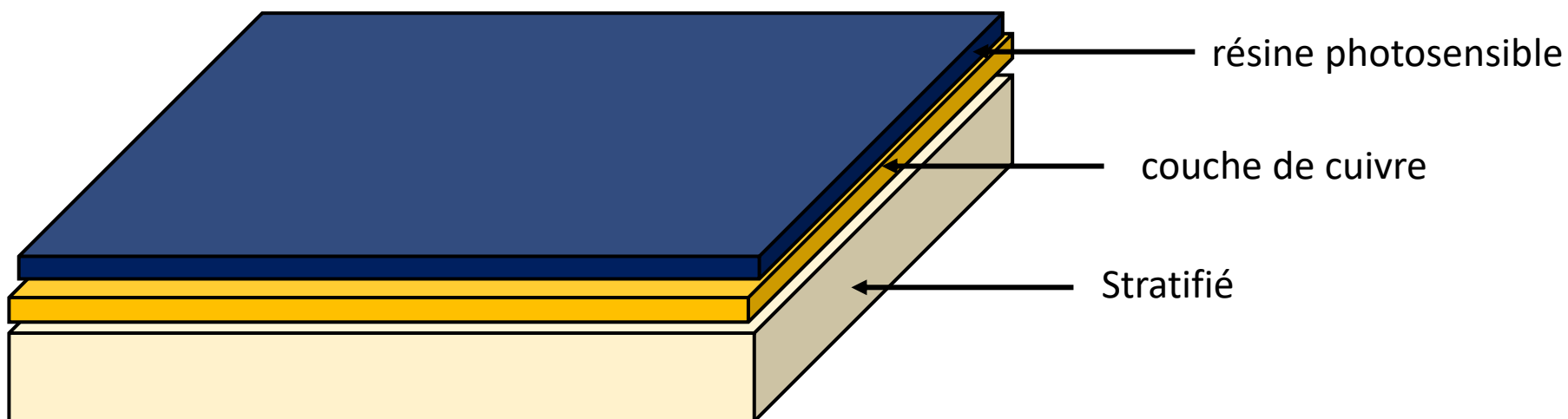
- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. **Fabrication**

■ Le point de départ pour un circuit simple couche est une plaque de matériau isolant appelé **stratifié** sur lequel est collé une fine couche de cuivre sur toute la surface.

- ▶ typiquement de la **résine époxy** encore appelée FR-4, utilisée pour les applications à basse fréquence ;
- ▶ ou d'autres types de résine comme la résine polymide ou des matériaux à base de téflon pour les hautes fréquences.

■ Pour la suite des opérations, il est plus pratique d'acheter une plaque à résine présensibilisée, auquel cas la couche de cuivre est recouverte d'un film photosensible.

■ Typiquement, la gravure se fait par **photolithographie**.



Fabrication d'un PCB (2 / 3)

I. Les composants électroniques de base

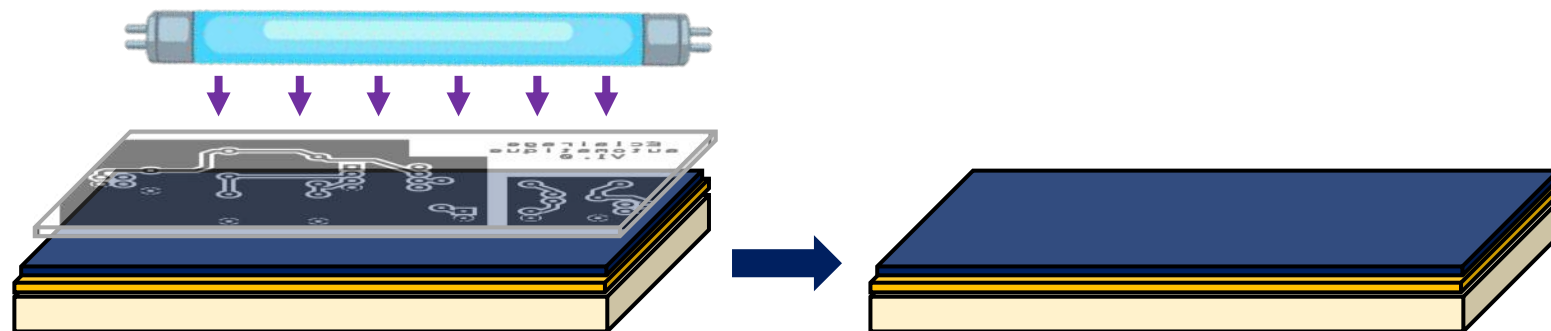
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

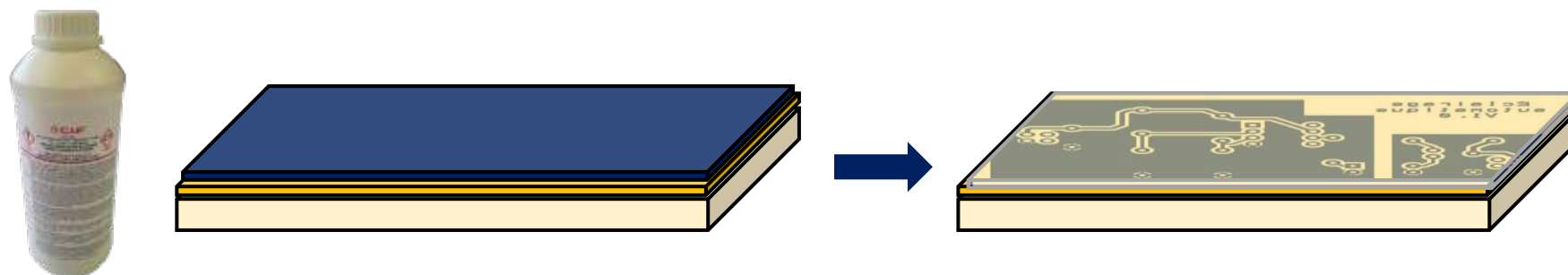
① insolation

- ▶ une source de lumière UV permet de polymériser le film et ainsi de constituer des zones de protection pour le cuivre (zones protégées par le masque) ou non (zones insolées).



② révélation

- ▶ un bain de quelques secondes dans du révélateur positif (hydroxyde de sodium) permet de retirer les zones polymérisées ;
- ▶ Ces zones se retrouvent alors sans protection et sont donc prêtes à être retirées par gravure chimique.



Fabrication d'un PCB (3 / 3)

I. Les composants électroniques de base

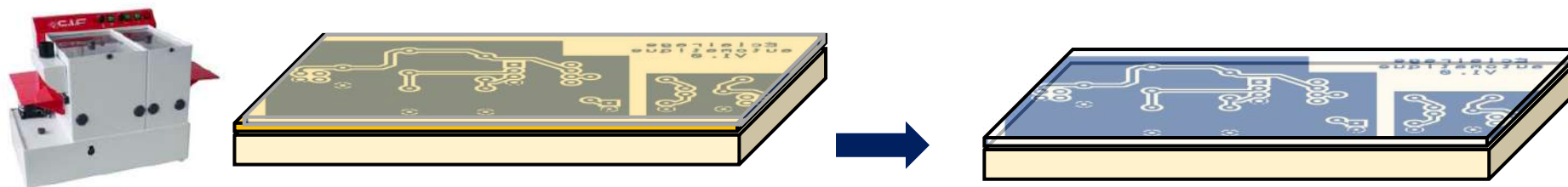
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

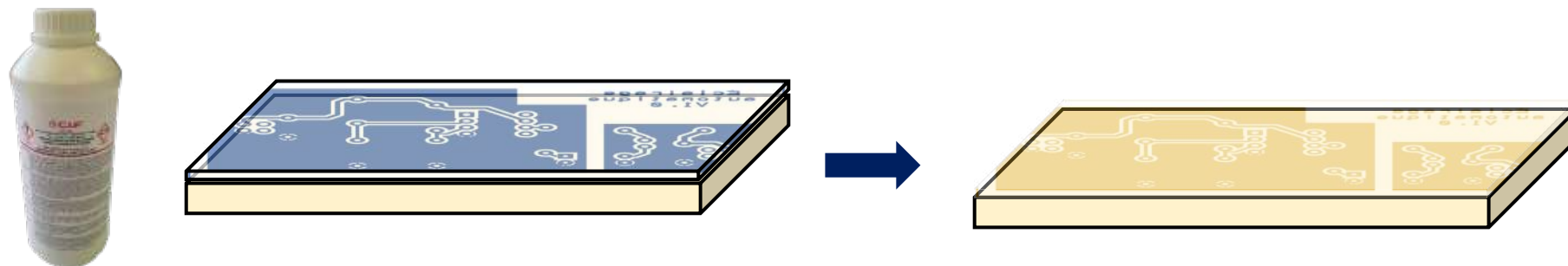
③ gravure chimique

- ▶ retrait du cuivre dans les zones non protégées par le film de résine par action mécanique et chimique avec du perchlorure de fer.



④ révélation

- ▶ un second bain de quelques secondes dans du révélateur positif (hydroxyde de sodium) permet de retirer la résine ayant précédemment servi à protéger le cuivre lors de la phase de gravure.



Résumé du cours 1

I. Les composants électroniques

- principe fondamental de la dynamique → vitesse de dérive : les e^- se déplacent relativement lentement du pôle (-) vers le pôle (+) sous l'effet d'un \vec{E} induit par une d.d.p.
- estimation de $i = \frac{dq}{dt}$ → loi d'Ohm, notion de conductivité électrique
- composants électroniques
 - ▶ classification par domaine d'application (capteur, électrotechnique, analogique, numérique, IHM)
 - ▶ classification par boîtier (traversant, de surface)
- la résistance
 - ▶ applications (abaisser ou augmenter une tension, limiter le courant, adapter l'impédance d'une ligne de transmission)
 - ▶ résistances traversantes (couche de carbone, couches métalliques, bobinées) résistances de surface (film mince)
 - ▶ résistance variable et potentiomètre
 - ▶ modèle de la résistance réelle
- le condensateur
 - ▶ applications (découplage, couplage, filtrage, blocage, anti-rebond, temporisation)
 - ▶ condensateurs traversants (non-polarisé : céramique, polarisé : électrolytique et tantale) et condensateurs de surface
 - ▶ modèle du condensateur réel
- les circuits intégrés
 - ▶ CI à boîtier traversant et de surface

Résumé du cours 1

II. Le circuit imprimé

- processus de fabrication (spécifications, schématique, routage, fabrication, test et validation)
- la schématique
- les alimentation, générateurs, labels
- introduction à la compatibilité électromagnétique
 - ▶ couplage conducteur
 - ▶ couplage capacitif
 - ▶ couplage inductif
 - ▶ couplage électromagnétique
 - ▶ effet de peau
- le routage
 - ▶ par bloc fonctionnel, lisible de gauche à droite, plan de masse, largeur de piste
- fabrication d'un PCB par photolithographie.