

Les composants et le PCB



Cours 1 : Les composants et le PCB

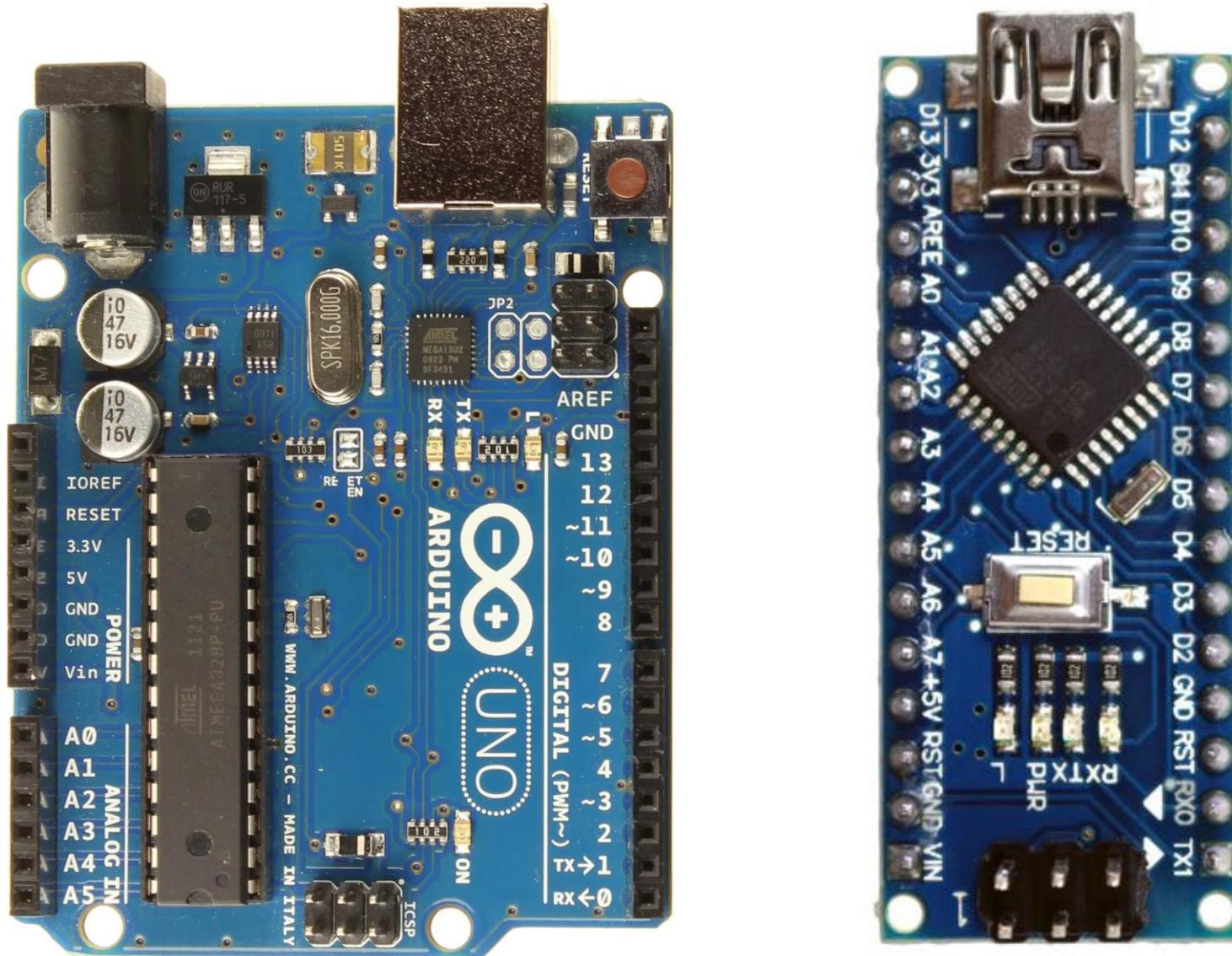
I. Les composants électroniques de base

- 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. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

#inception



1 Les composants électroniques de base

Tension et courant...

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

+

-



+

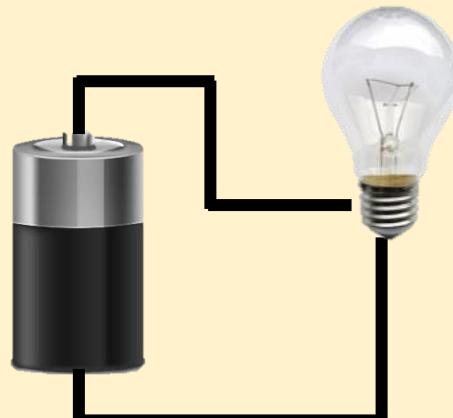
-



Pas de courant \Rightarrow pas de tension



Pas de tension \Rightarrow pas de courant



Convention récepteur

I. Les composants électroniques de base

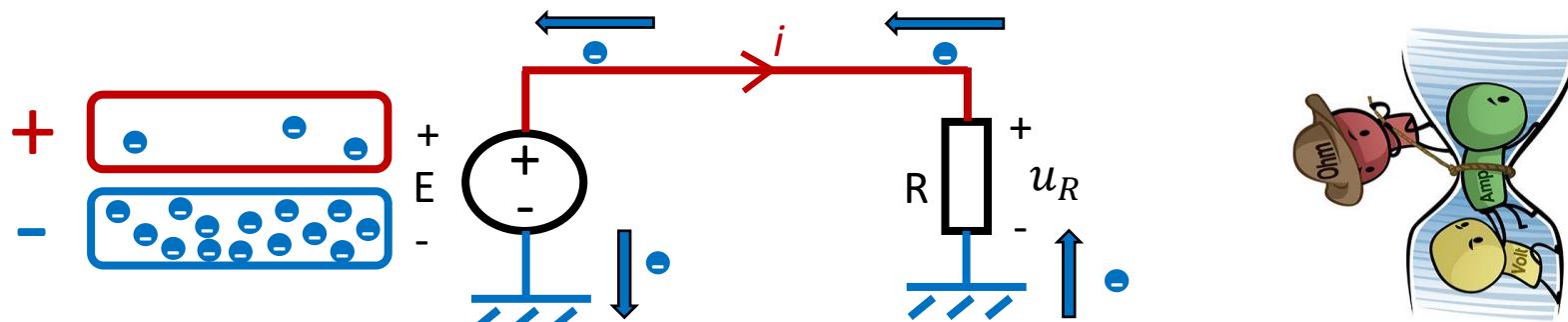
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

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.

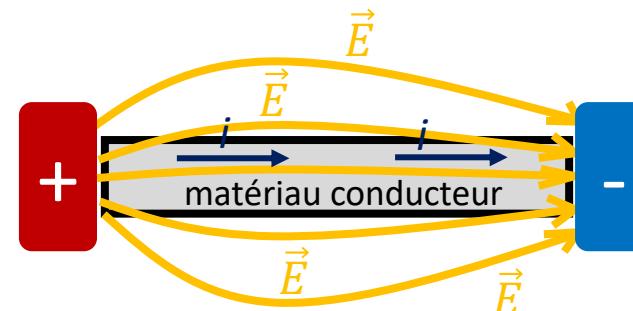
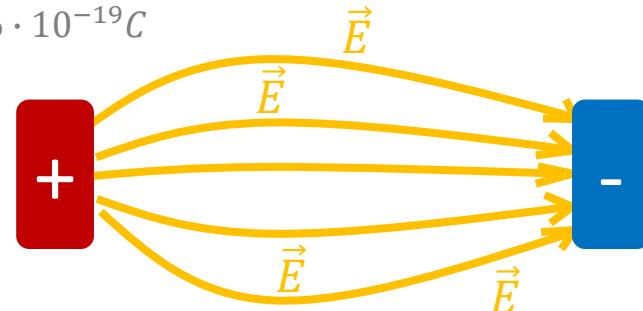


$$\text{Loi d'Ohm} \\ U=R I$$

■ 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.

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

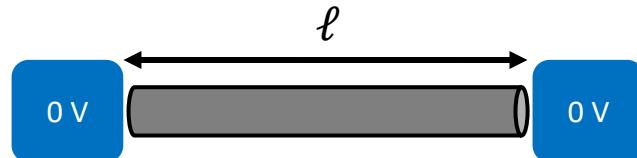
- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

La vitesse de dérive

■ 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})

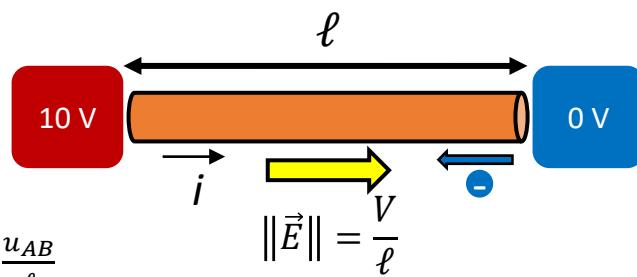
■ en l'absence d'un champs électrique

- ▶ 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 : $n \sim 10^{29} \text{ électron par m}^3$
- ▶ $v_d = 0 \rightarrow$ 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

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

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

$$\blacktriangleright \text{A.N.} : v_d = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10} \cdot 3 \cdot 10^{-14} = 0,5 \cdot 10^{-19+31-14} = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ s} = 5 \text{ mm/s}$$

Remarque : $t = \frac{d}{v} = \frac{1000}{5} \approx 2000 \text{ s} \approx 33 \text{ min!}$

Autre modèle : e^- amortis par une force de frottement visqueuse : modèle de Drude

→ 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 $N = n \underbrace{\mathcal{A}v_c dt}_{\text{volume du cylindre}}$

volume du cylindre

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

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

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

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

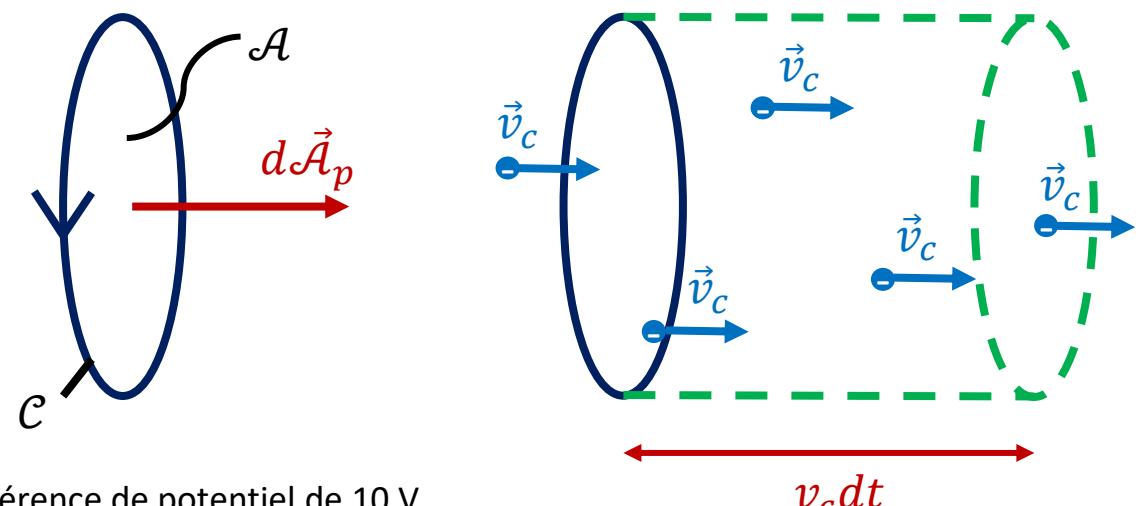
$$\text{d'où } u_{AB} = \frac{\ell}{\sigma \mathcal{A}} i = R i \quad \text{Loi d'Ohm 😊}$$

⚠ ℓ en m et \mathcal{A} en m^2

■ Exemple : Fil de carbone de 10 cm, $r = 0,2$ mm soumis à une différence de potentiel de 10 V

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

$$\rightarrow i = 312,5 \text{ mA}$$



Résistance

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

La conduction électrique (2 / 4)

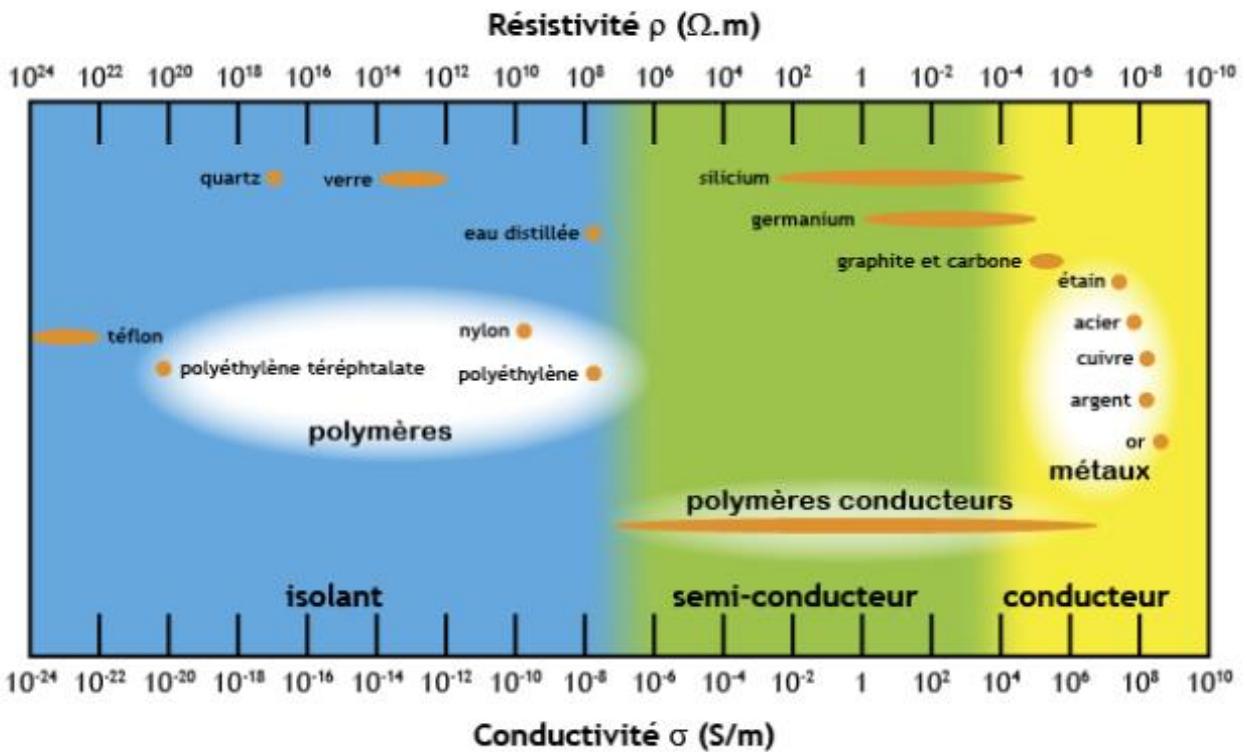
I. Les composants électroniques de base

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

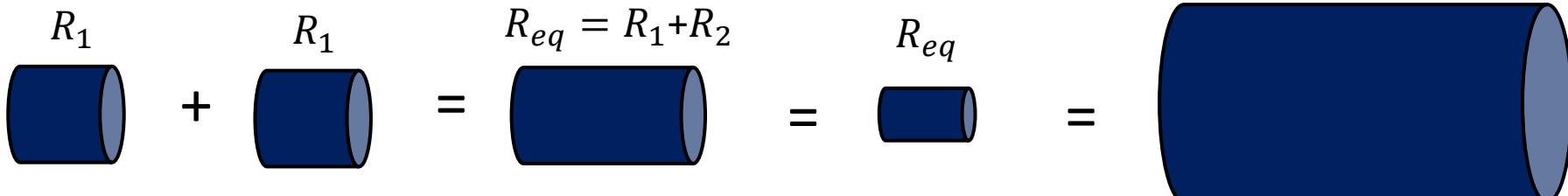
II. Le circuit imprimé

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

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



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



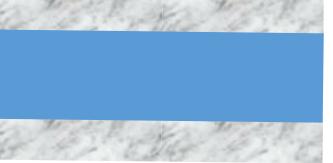
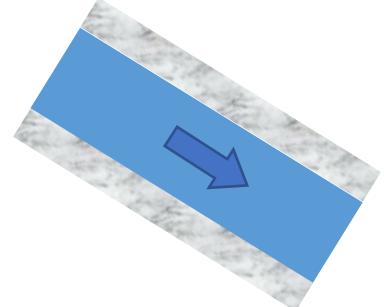
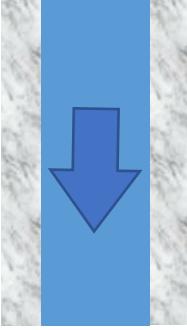
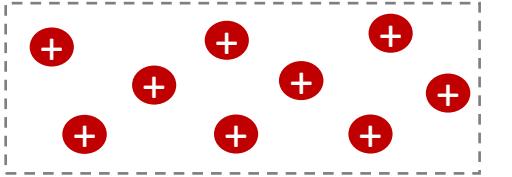
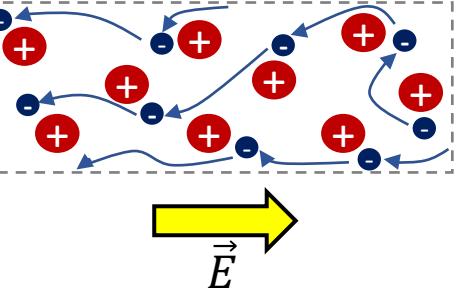
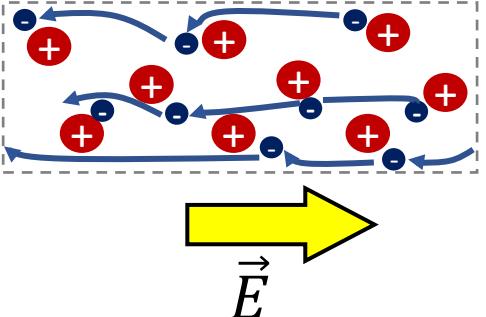
La conduction électrique (3 / 4)

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

$R \neq 0$	$U \rightarrow 0$	$U \neq 0$	$U \rightarrow \infty$
Vue symbolique Loi d'Ohm $U = R I$	R 	R 	R 
Analogie macroscopique			
Vue microscopique Loi d'Ohm locale $\vec{j} = \sigma \vec{E}$			

La conduction électrique (4 / 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

$$U = V_A - V_B > 0$$

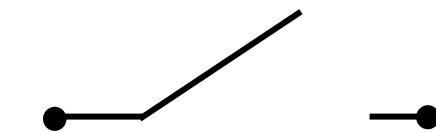
$$R \rightarrow 0$$

$$R \neq 0$$

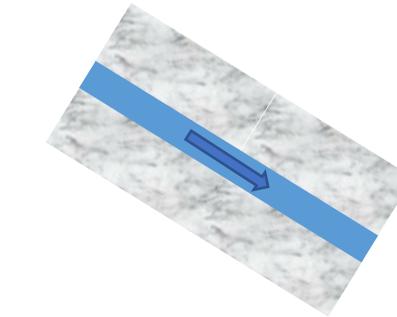
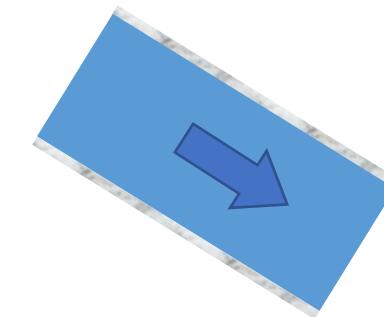
$$R \rightarrow \infty$$

Vue symbolique

Loi d'Ohm
 $U = R I$

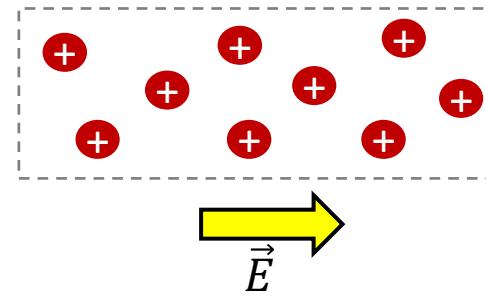
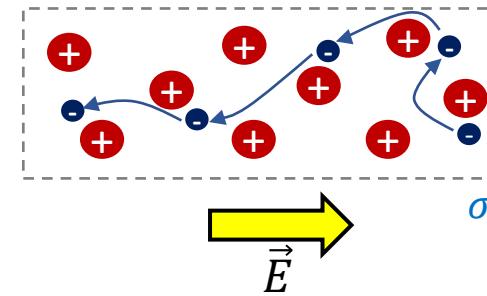
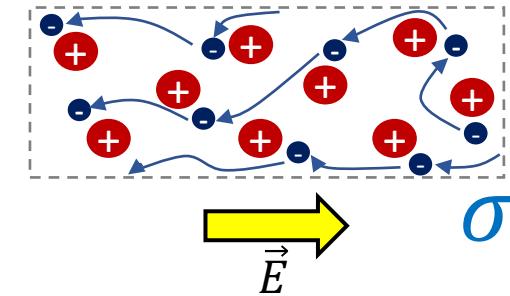


Analogie macroscopique



Vue microscopique

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



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.

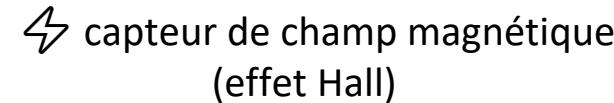
Exemples : Résistance, Condensateur, Bobine.

▶ 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.

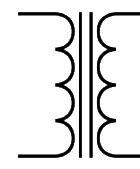
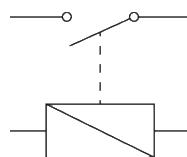
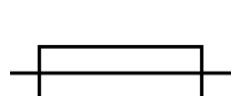
■ Classification par domaines d'application

▶ capteur



...

▶ électrotechnique / électronique de puissance



...

Les composants électroniques (2 / 2)

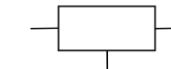
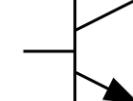
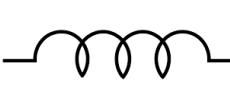
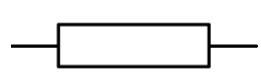
I. Les composants électroniques de base

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

II. Le circuit imprimé

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

► électronique analogique



...

⚡ résistance

⚡ condensateur

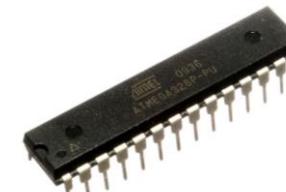
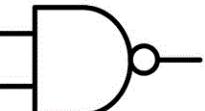
⚡ inductance

⚡ diode

⚡ transistor

⚡ régulateur de tension

► électronique numérique



...

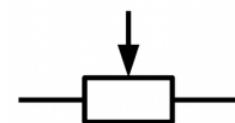
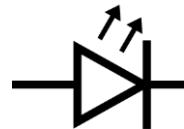
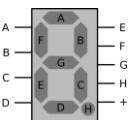
⚡ Portes logiques

⚡ Bascules

⚡ Microcontrôleur

⚡ FPGA

► interface humaine



...

⚡ Afficheurs

⚡ Interrupteurs

⚡ Buzzers

⚡ LED

⚡ Potentiomètres

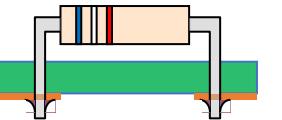
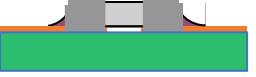
Les boîtiers des composants

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

	 <p>Traversant Through hole device (THD)</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Composants électroniques à pattes que l'on insère dans les trous d'un PCB. 	 <p>Monté en surface Surface Mounted Device (SMD)</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Introduits dans les années 60' ■ populaire à partir des années 80'
avantages 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Connections 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, etc. ■ 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 ■ meilleures performances faces au bruit électromagnétique ■ assemblage facilement automatisable ■ composants plus petits ■ 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

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

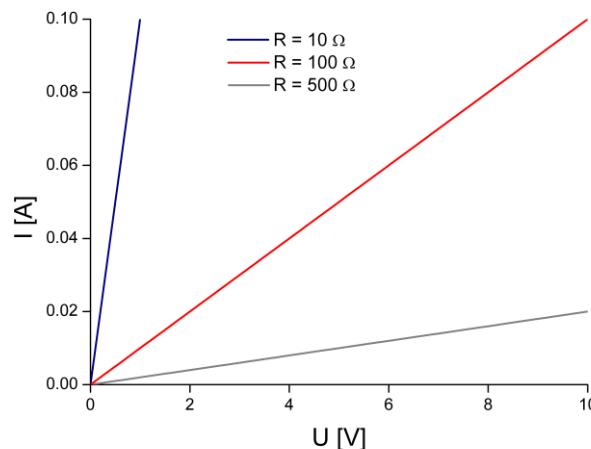
- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

La résistance (1 / 2)

- 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 :



$$I = \frac{1}{R} U$$

- La résistivité croît avec la température (Loi de Matthiessen) :

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

$T \nearrow \Rightarrow \rho \nearrow$

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 .

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

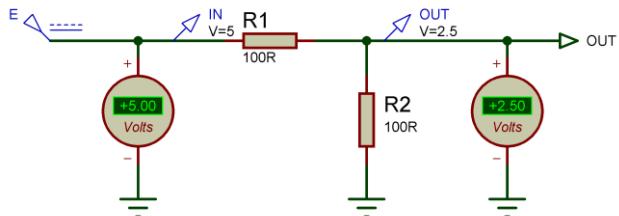
- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

La résistance (2 / 2)

■ Applications

► abaisser une tension

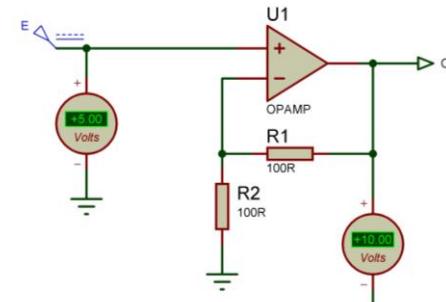
Ex : pont diviseur de tension



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

► augmenter une tension

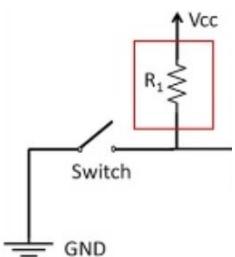
Ex : amplificateur non inverseur



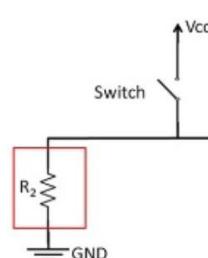
$$u_{\text{OUT}} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) u_{\text{IN}}$$

► limiter le courant

Ex : résistance de tirage



pull-up



pull-down

Typiquement de l'ordre de $10 \text{ k}\Omega$ pour un courant maximal (*datasheet*) à l'entrée d'une pin d'un microcontrôleur de quelques dizaines de mA.



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

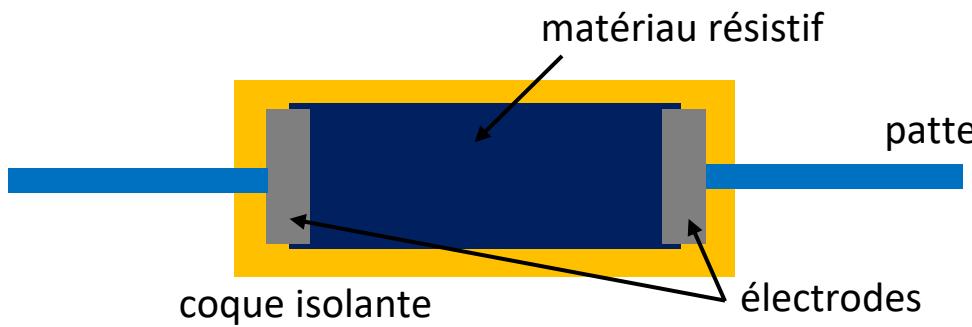
II. Le circuit imprimé

- 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

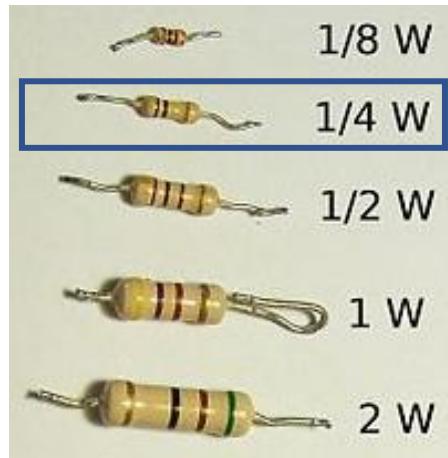
II. Le circuit imprimé

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

■ 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 boîtier selon la puissance maximale (exemple : $I_{MAX} = \frac{0,25}{5} = 50 \text{ mA}$) ;
- ▶ meilleure tolérance : 10%, 5%, 2% ou 1%.

taille « standard » →



▶ 100 Ω



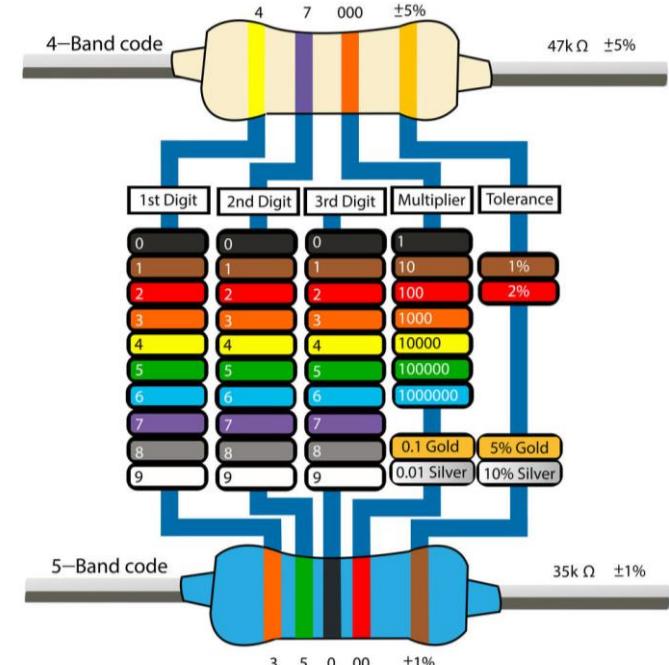
▶ 1 k Ω



▶ 10 k Ω



▶ 1 M Ω



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. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

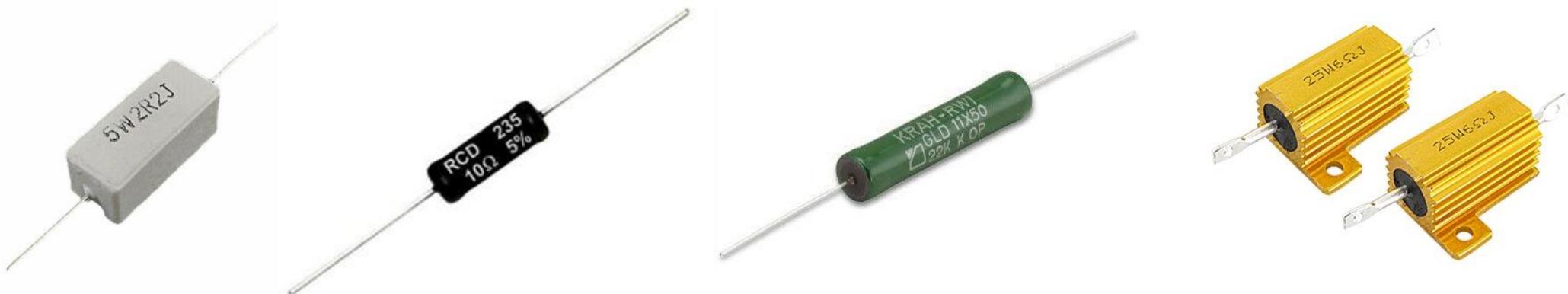
■ La résistance à couches métalliques

- ▶ 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.



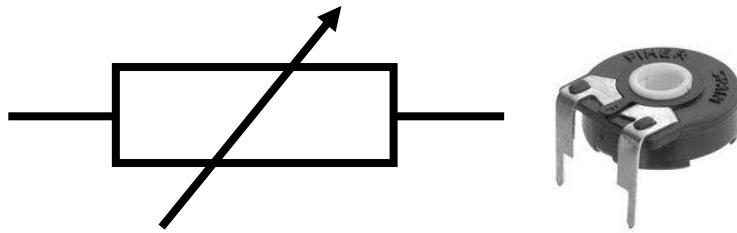
Les résistances variables (1 / 2)

I. Les composants électroniques de base

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

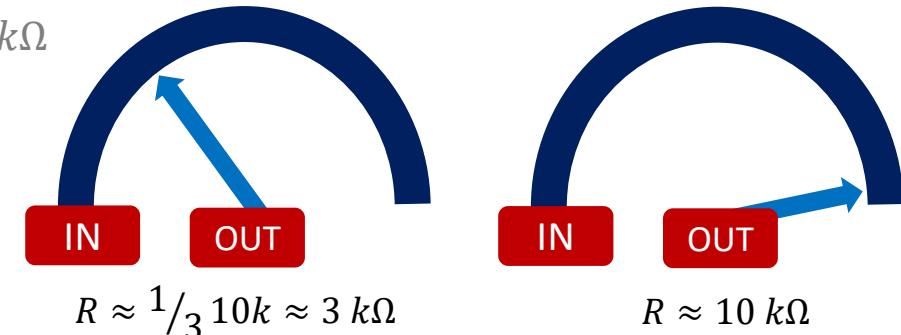
II. Le circuit imprimé

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



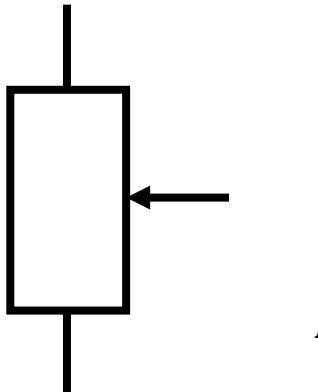
Exemple : $R_{MAX} = 10 \text{ k}\Omega$

$$R = \frac{\rho}{\frac{s}{\ell}} \quad \text{donc } R \propto \frac{\ell}{\ell_{MAX}} R_{MAX}$$



■ Le potentiomètre

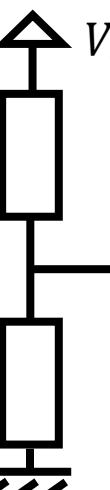
- ▶ l'interaction externe (mécanique) induit un changement de différence de potentiel ;
- ▶ un potentiomètre peut être utilisé comme résistance variable à condition de n'utiliser que 2 bornes successives.



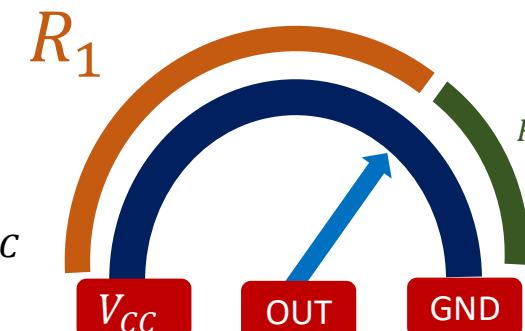
$$R_1 = \frac{\ell_1}{\ell_{MAX}} R_{MAX}$$

\equiv

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



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



Les résistances variables (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

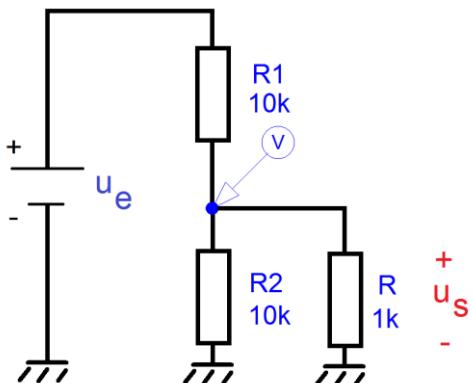
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

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 ☺

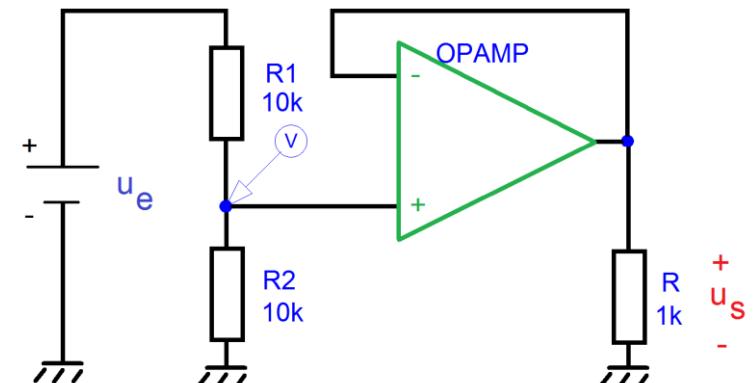
Sans suiveur



➤ 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,
 $u_s = \frac{\frac{RR_2}{R+R_2}}{\frac{RR_2}{R+R_2} + \frac{1k \cdot 10k}{1k+10k}} u_e = \frac{\frac{1k \cdot 10k}{1k+10k}}{10k + \frac{1k \cdot 10k}{1k+10k}} 5 = 0,42 \text{ V}$

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)

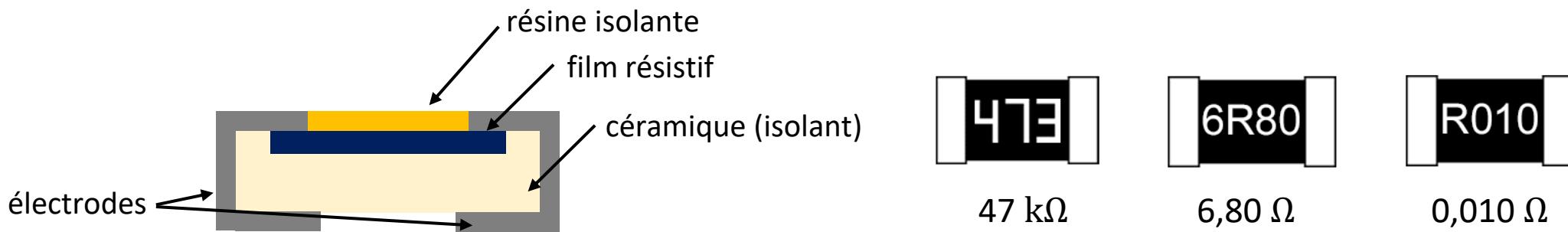
I. Les composants électroniques de base

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

II. Le circuit imprimé

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

- 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.



■ 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 10Ω 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 $47,0 \text{ k}\Omega$

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

II. Le circuit imprimé

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

■ 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

01Y

1 Ω

66X

47.5 Ω

47A

301 Ω

Modèle de la résistance réelle

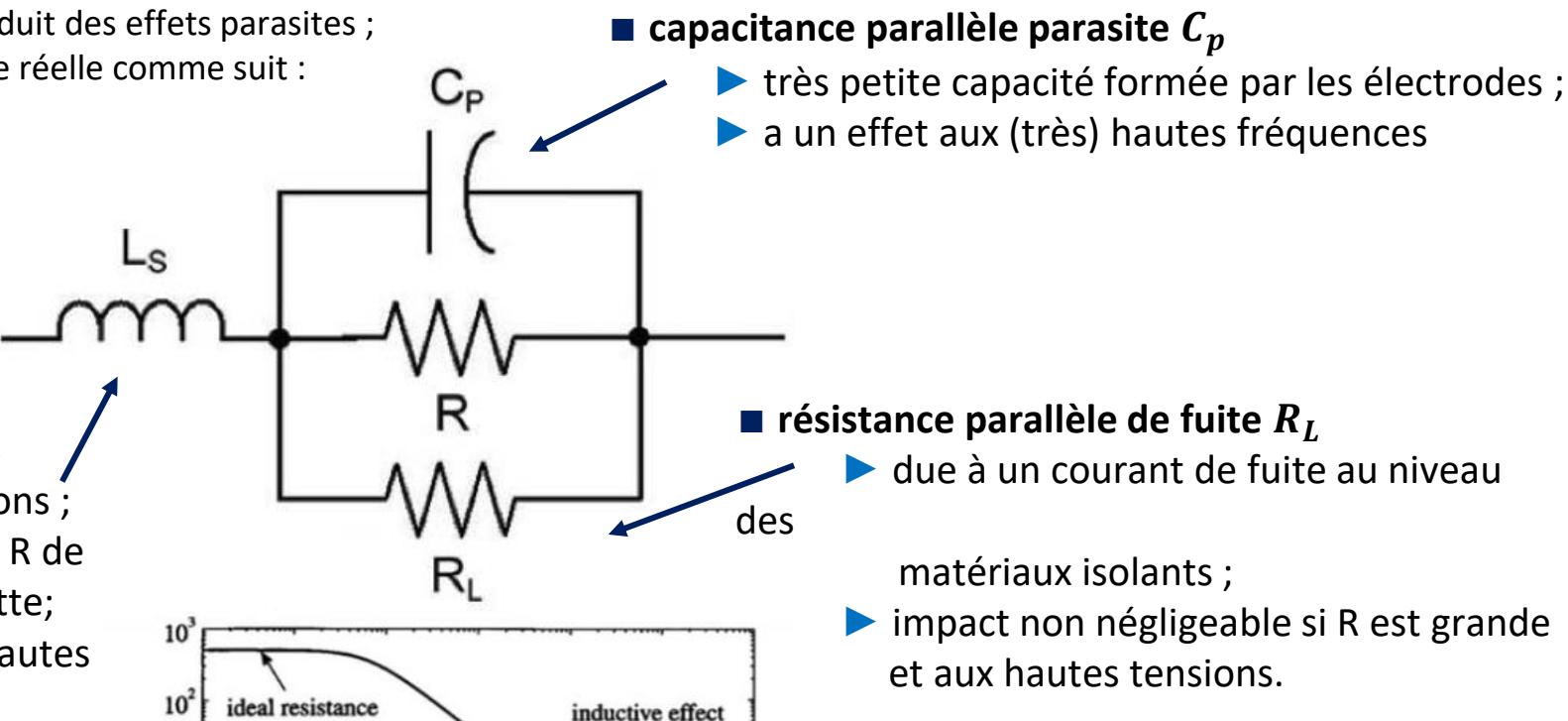
I. Les composants électroniques de base

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

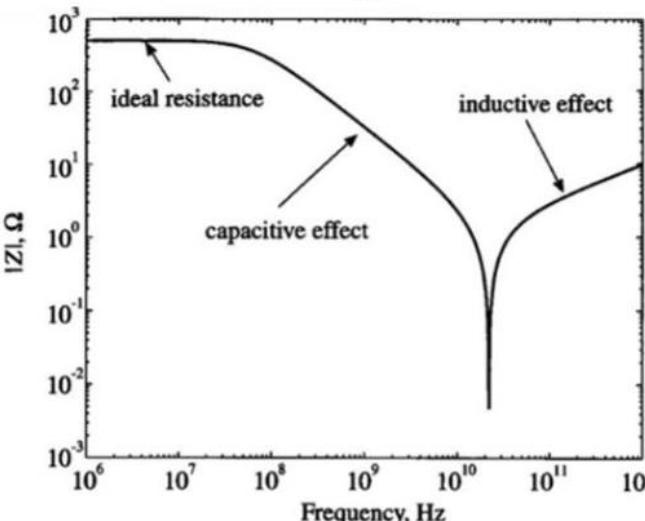
II. Le circuit imprimé

- 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 :



- 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 $Z_R = R$



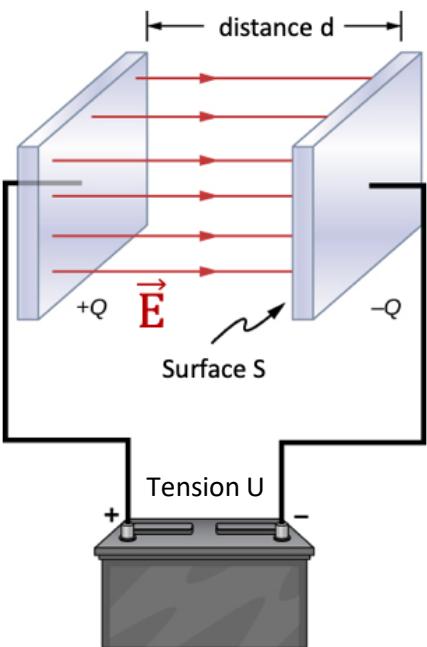
Le condensateur (1 / 2)

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 matériaux 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 :

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

où $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ est la permittivité diélectrique et traduit la réponse du milieu à un champ électrique.
et $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$ 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 $\|\vec{E}\| = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{|q|}{r^2}$
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

II. Le circuit imprimé

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

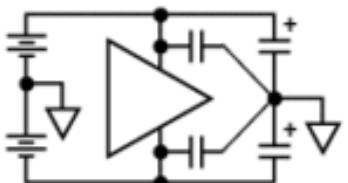
■ Choix d'un condensateur

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

■ Applications

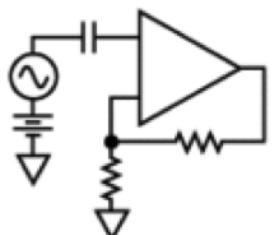
▶ découplage

→ Débruiter un signal



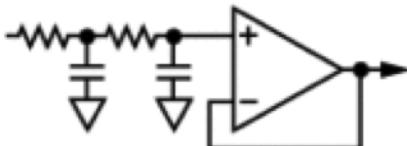
▶ couplage

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



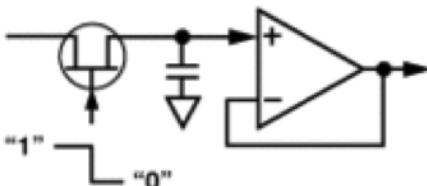
▶ filtrage

→ Ne laisser passer qu'une gamme de fréquence choisie



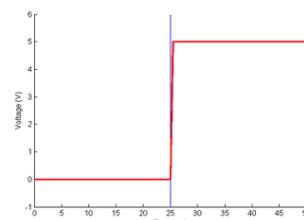
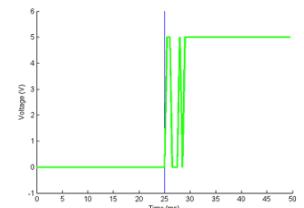
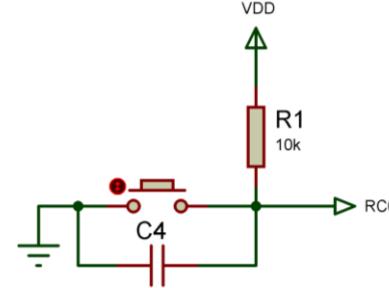
▶ blocage (échantillonnage)

→ 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

Condensateurs de découplage

I. Les composants électroniques de base

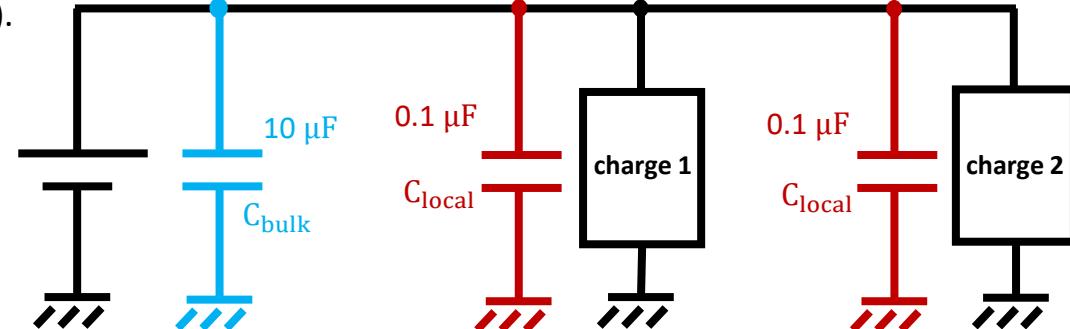
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

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 envoyées à la masse.

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

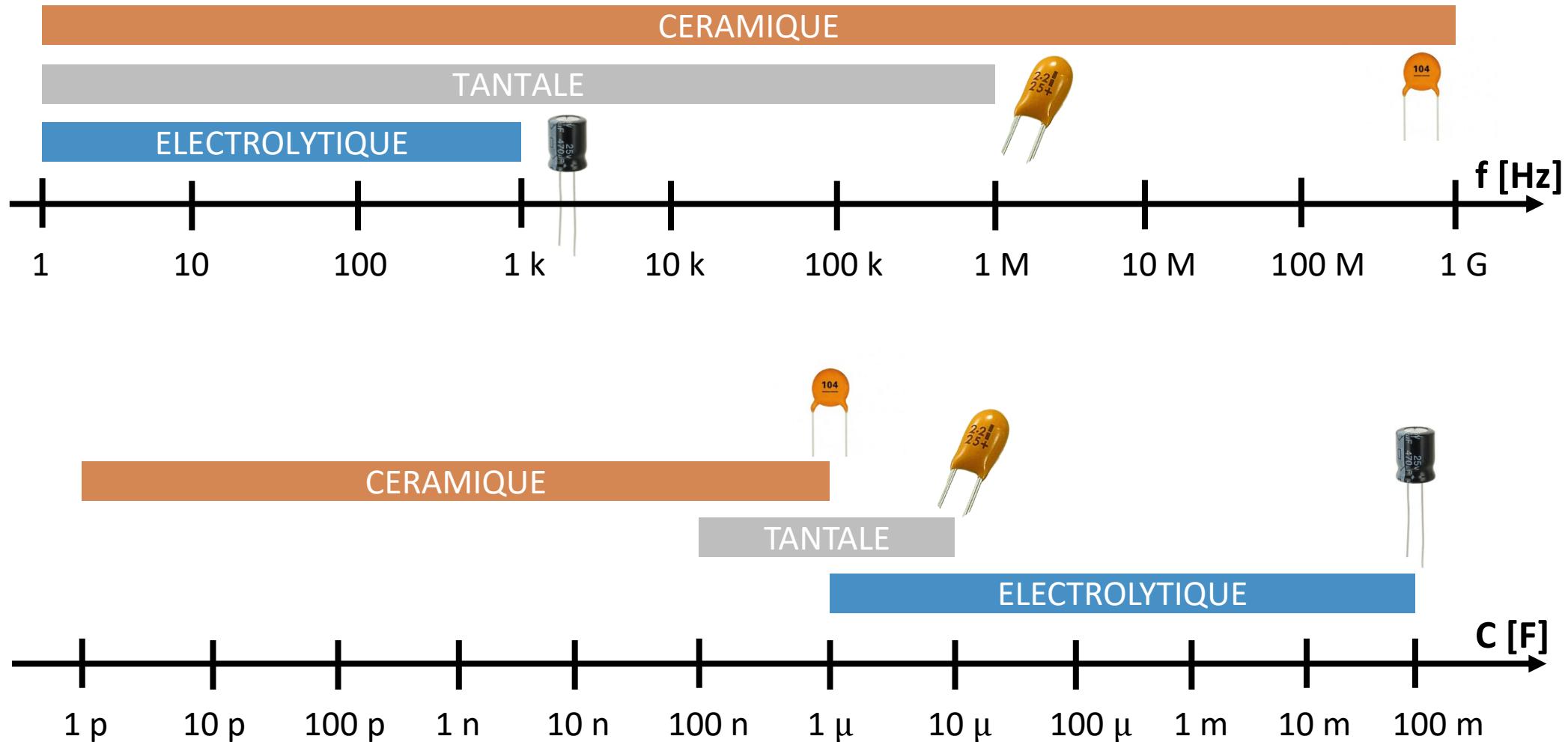
Condensateurs traversants (1 / 2)

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)

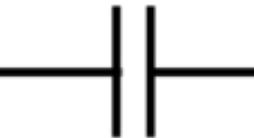
I. Les composants électroniques de base

- 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

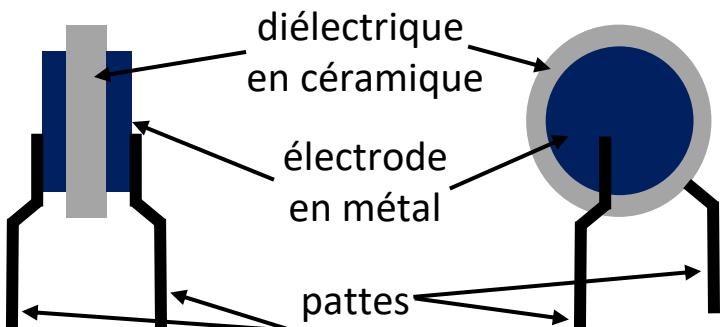
■ condensateurs non polarisés



- ▶ 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 : $0.1 \rightarrow 0.1 \mu\text{F}$) ;
 - Multiplicateur inscrit (ex : $4n7 \rightarrow 4.7 \text{ nF}$).

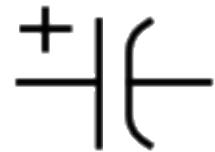
▶ condensateur céramique

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



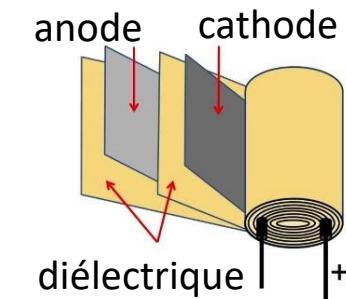
■ condensateurs polarisés

- ▶ 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
 - à vérifier systématiquement !



▶ condensateurs au tantale

- More expensive but very small → large C in small space ;



Condensateurs de surface

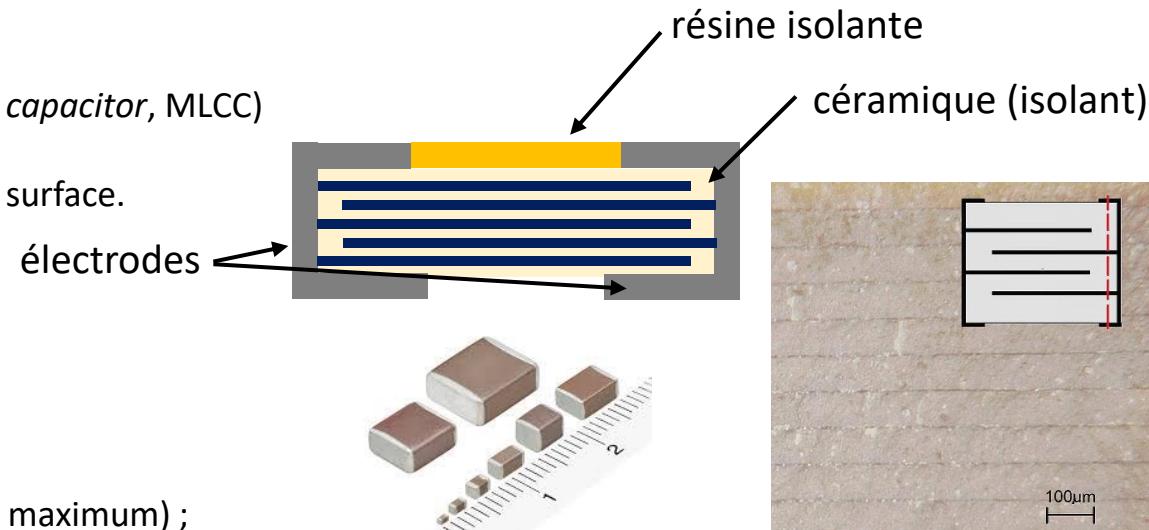
I. Les composants électroniques de base

- 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 tantalum 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

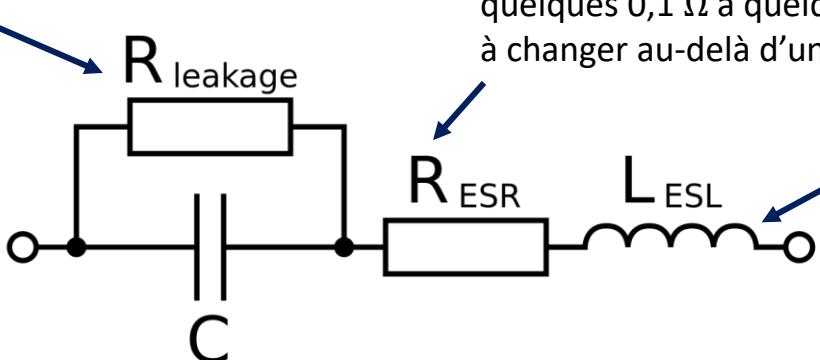
II. Le circuit imprimé

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

- La fabrication des composants induit des effets parasites ;
- On peut modéliser un condensateur réel comme suit :

■ résistance parallèle de fuite R_L

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



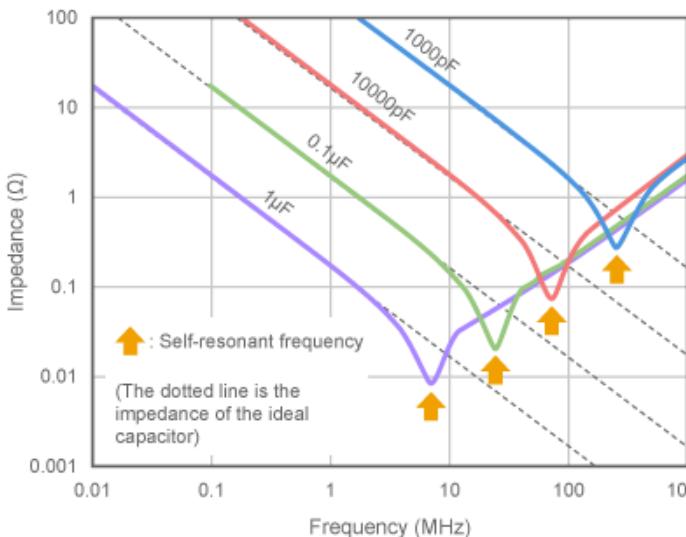
■ résistance série parasite R_{ESR}

- ▶ résistance apportée par les connections ;
- ▶ dissipation de courant aux hautes fréquences
- ▶ donne une idée de la vieillesse du condensateur : de quelques 0,1 Ω 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

$$Z_C = \frac{1}{2\pi f C} \text{ (condensateur idéal)}$$



Condensateur réel @ hautes fréquences

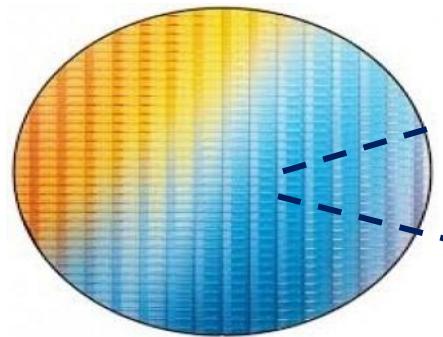
Les circuits intégrés (1 / 2)

I. Les composants électroniques de base

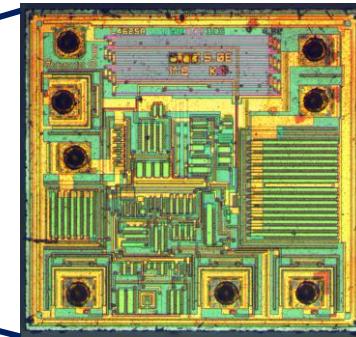
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. **Les circuits intégrés**

II. Le circuit imprimé

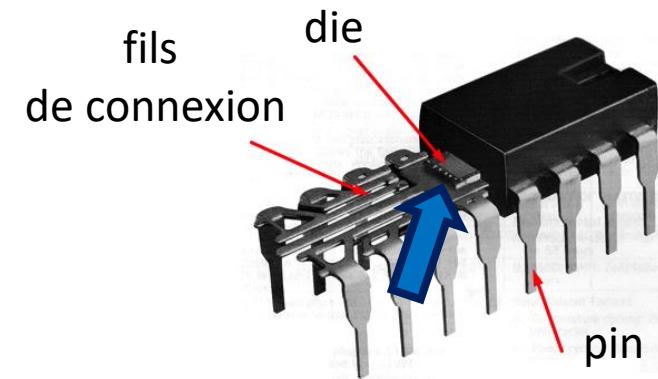
- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



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.

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 / dessouder ;
- 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

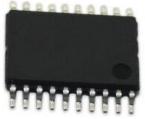
■ CI de surface

■ 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

■ 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).



TQFP-100

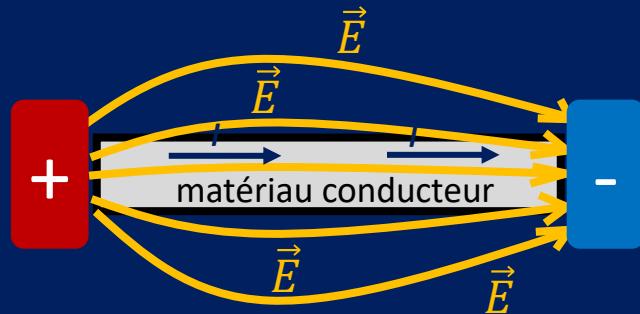


■ Matrice de bille (Ball grid array, BGA)

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



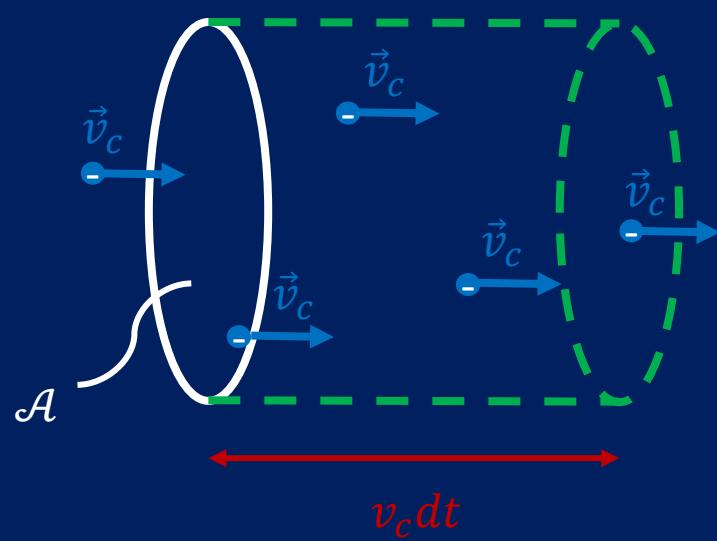
Résumé intermédiaire : les composants



$$\vec{F} = q\vec{E}$$

Vitesse moyenne des électrons (thermique) à 20°C : $\langle v_e \rangle \sim 10^6 \text{ m/s}$

Vitesse de dérive (en réponse au champs électrique) à 20°C à 10V : $v_d = \frac{e}{m_e} \frac{u_{AB}}{\ell} \tau \sim 5 \text{ mm/s}$



$$i = \frac{dq}{dt} = v_c dt \underbrace{\mathcal{A}}_{\text{volume}} n q$$

charge densité

$$u = Ri$$

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

matériau
géométrie

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

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

II. Le circuit imprimé

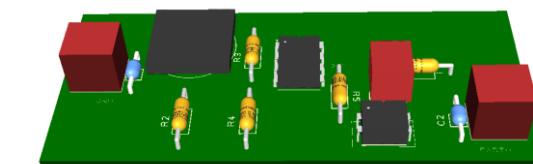
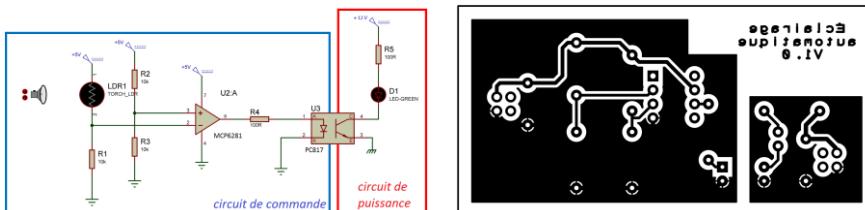
- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ Rôles

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



■ Processus de 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

II. Le circuit imprimé

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

- 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

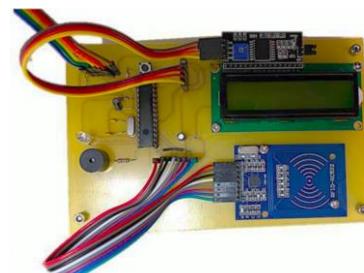
- Historique des PCB
 - ▶ avec le développement du télégraphe, du téléphone et de la radio, succession de brevets au XX^{ème} siècle ;
 - ▶ 1903 : Albert Hanson (All.) met au point un système de fils conducteurs collés sur un papier de paraffine ;
 - ▶ 1913 : Arthur Berry (Angl.) met au point un procédé 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

II. Le circuit imprimé

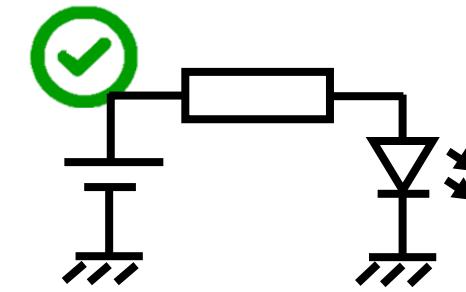
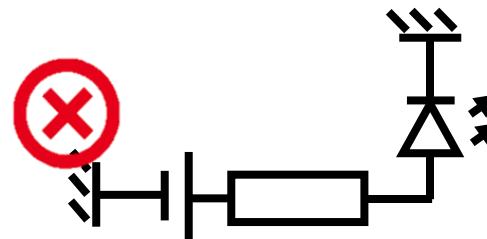
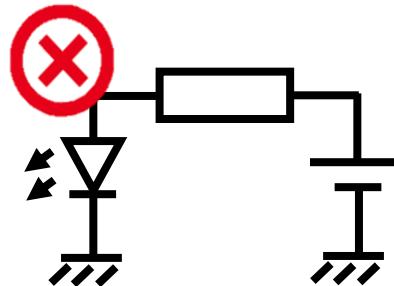
- A. Principe
- B. Schématique**
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ La **schématique** est comme la recette de cuisine en électronique. Elle montre :

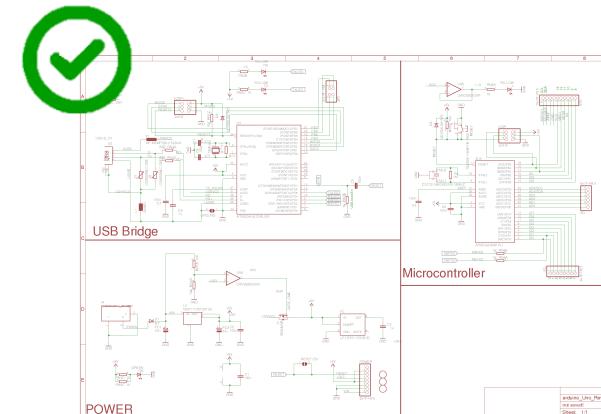
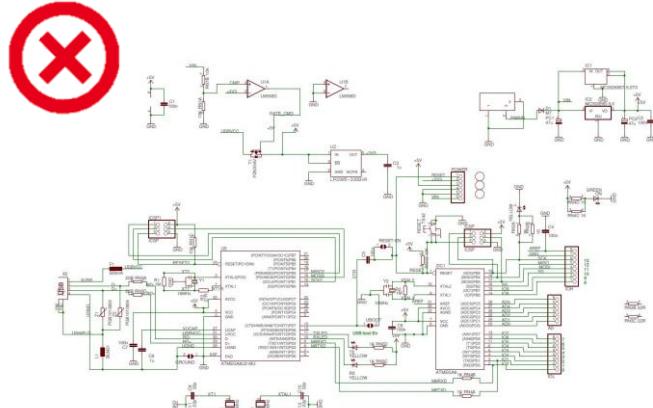
- ▶ Quels composants utiliser ;
- ▶ Comment ils sont connectés entre eux.

■ 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.



■ 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

II. Le circuit imprimé

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

- Une bonne schématique doit être explicite et les croisements sont renseignés par des nœuds.



- 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 capacités : p = 10^{-12} , n = 10^{-9} et u = 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

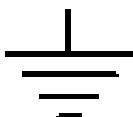
■ Les alimentations

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

■ La masse

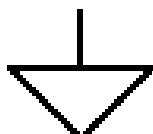
- ▶ par définition, un potentiel de 0 V ;
- ▶ toutes les mêmes masses sont connectées entre elles.
- ▶ parfois à séparer pour éviter la diaphonie entre circuits (numérique vs analogique, commande vs puissance, etc.)

■ Terre



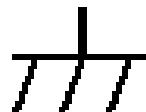
- ▶ 0 V absolu
- ▶ masse pour les circuits numériques

■ 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

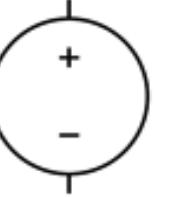
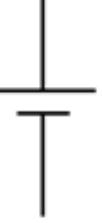
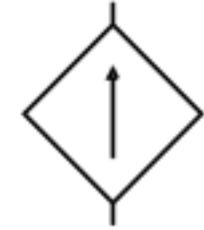
Les générateurs (1 / 2)

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)	 VDC	 VSINE	 VPULSE
Source de courant (adapte la tension pour maintenir un courant constant)			 <u>Exemple</u> modèle d'AOP réel : $u_{OUT} = A_{vd}(V^+ - V^-)$ 

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

II. Le circuit imprimé

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

■ La **Compatibilité électromagnétique (EMC)** 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 :

▶ couplage par conduction

émission
par conduction



susceptibilité
par conduction



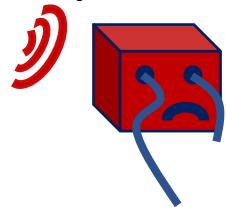
Couplage conductif

▶ couplage par rayonnement

émission
par rayonnement



susceptibilité
par rayonnement



Couplage capacatif

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

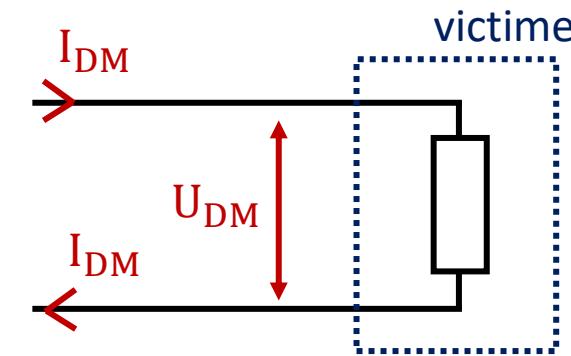
- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ 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 :

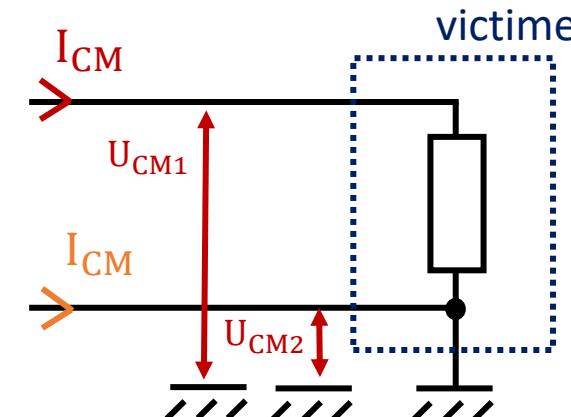
► mode différentiel

- Le bruit et le signal se propagent dans un sens opposé entre la source et la masse (eg : prises électriques)
- Une solution est d'ajouter un filtre passe-bas en amont.



► mode commun

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



I. Les composants électroniques de base

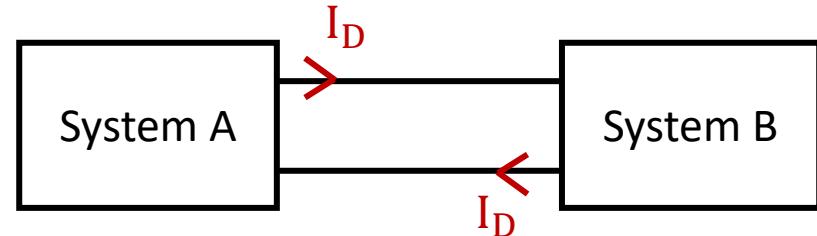
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

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

Couplage conductif (2 / 2)

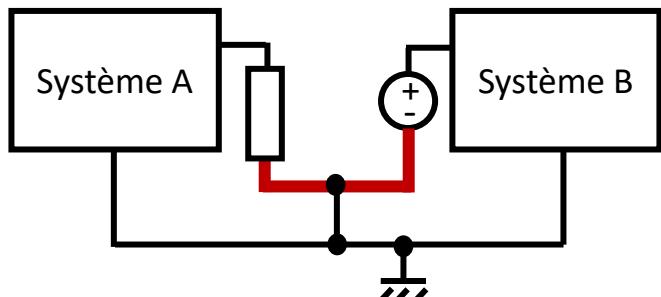
- en mode différentiel, les signaux sur les deux lignes sont déphasés



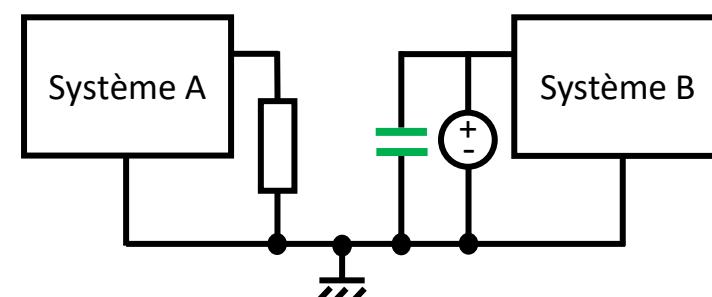
- en mode commun, lorsqu'une source d'interférence (ex : sortie du système A) partage une connexion à la masse avec une victime (ex : entrée du système B), tout bruit venant de A se propage dans B : on parle de **couplage par impédance commune**.

- ▶ 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



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

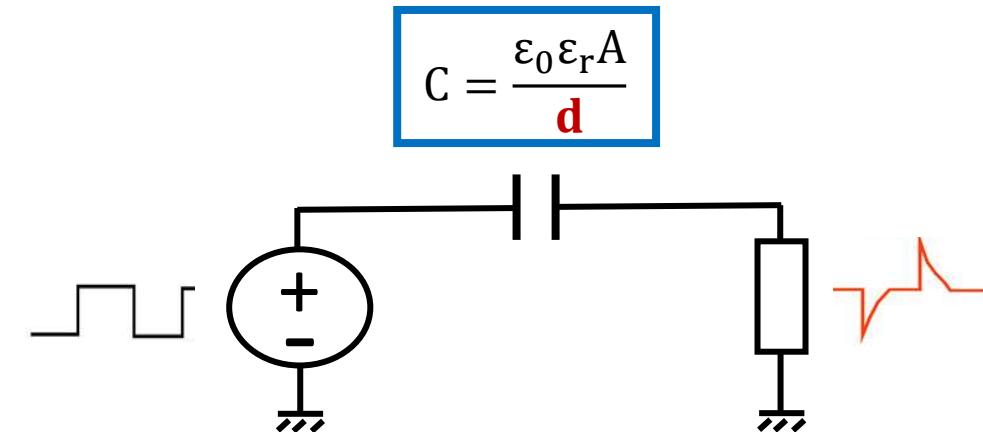
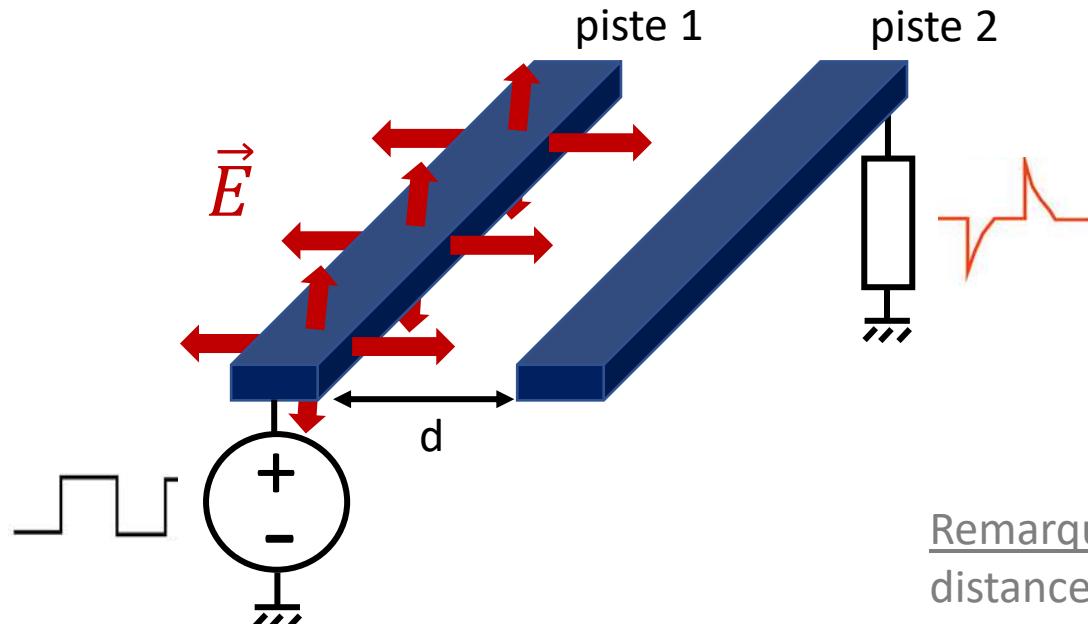
- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

Couplage capacitif

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

modèle

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



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

► $\lim_{d \rightarrow \infty} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} = 0$ donc pas de diaphonie.

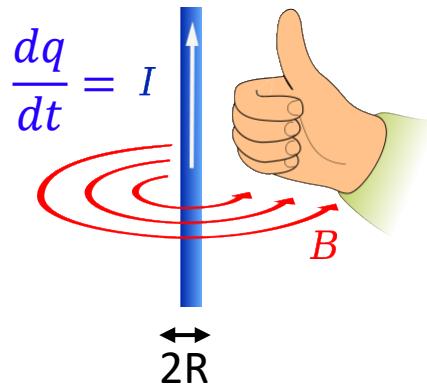
Couplage inductif (1 / 2)

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



Loi de Biot et Savart

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

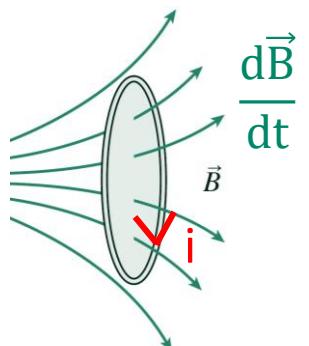


Fil infini

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

→ 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.

■ Les boucles sont sujettes à une tension induite par une variation de champ magnétique.



Loi de Faraday

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

Circuit fermé = boucle

$$e = -\frac{d\mathbf{B}\cdot\mathbf{A}}{dt}$$

→ Éviter les boucles

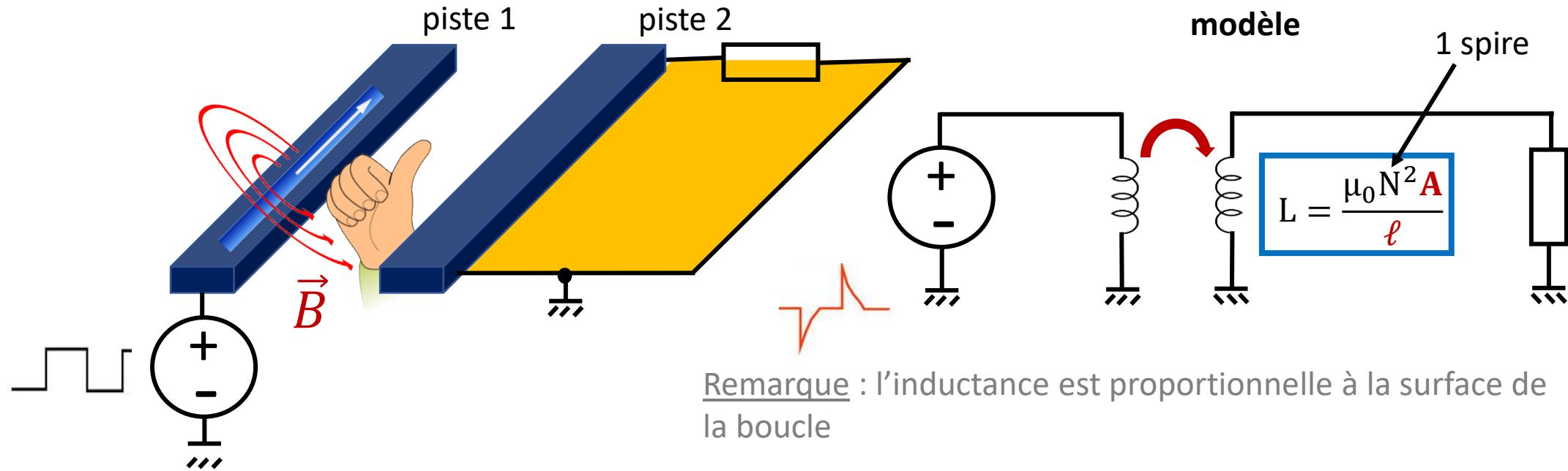
Couplage inductif (2 / 2)

I. Les composants électroniques de base

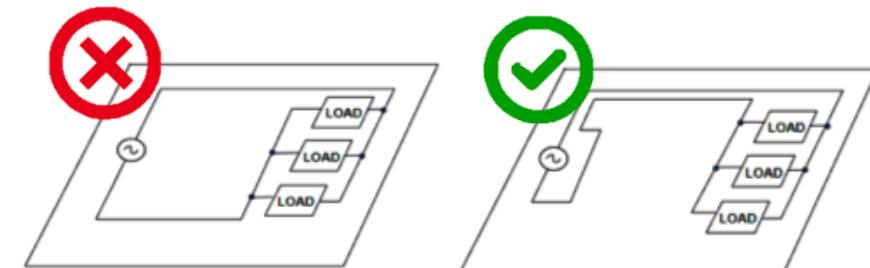
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

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



- 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.



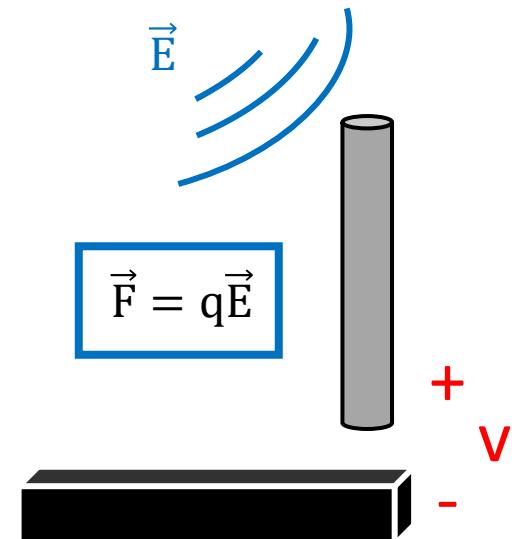
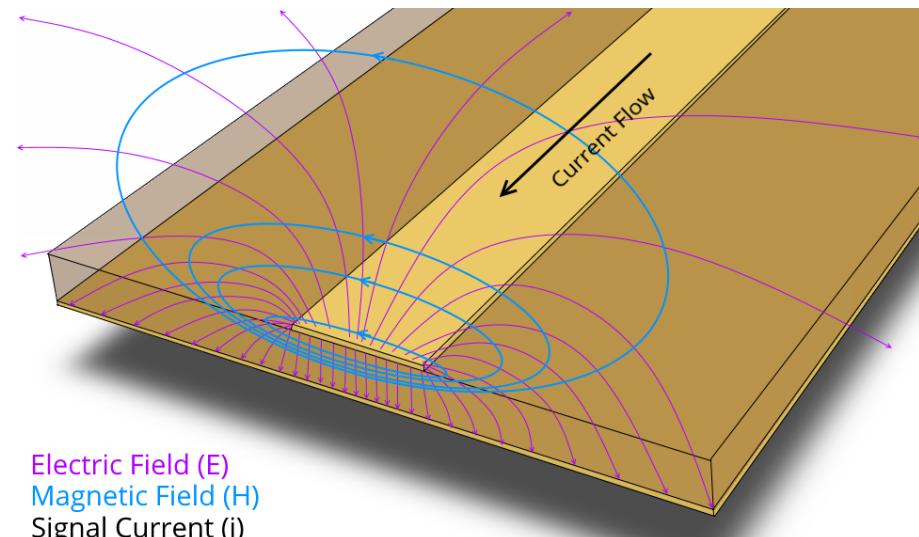
Couplage électromagnétique

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 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

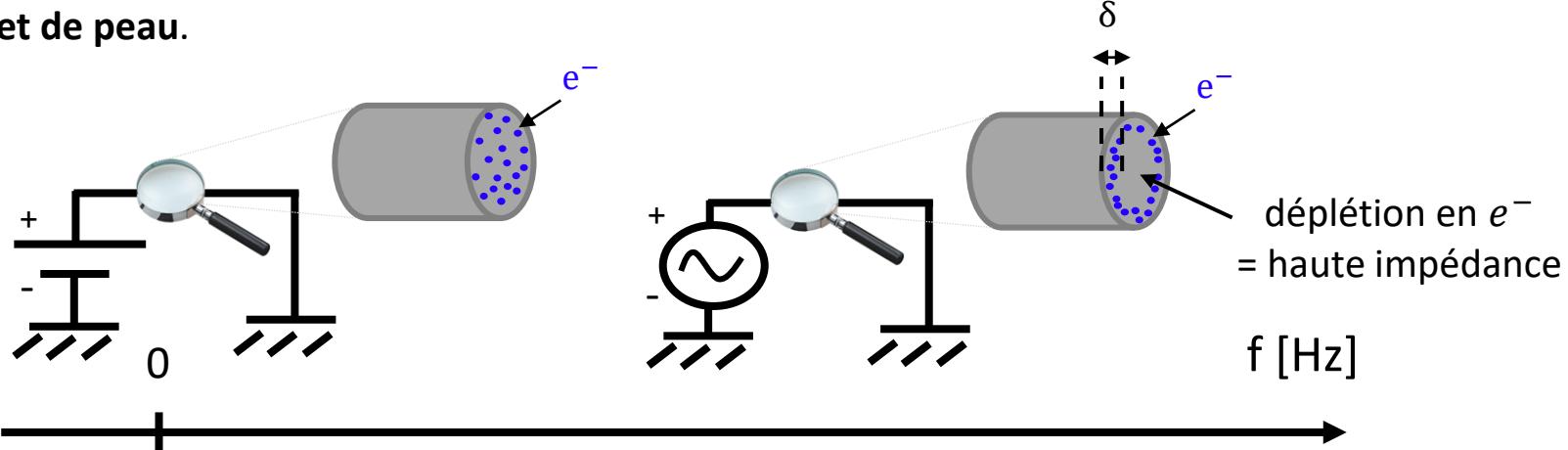
I. Les composants électroniques de base

- 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 ($\gtrsim 10s$ MHz), le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs. Il s'agit de l'**effet de peau**.



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

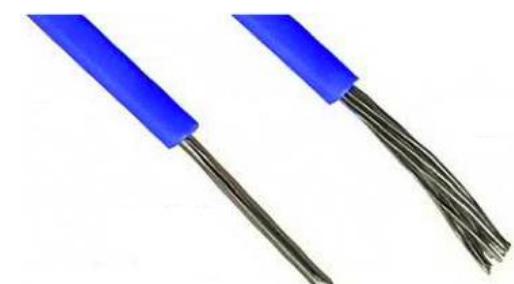
- aux hautes fréquences, la tension alternative fait vibrer les e^- , ce qui génère des champs magnétiques dans le conducteur dont la résultante a tendance à pousser les e^- vers la surface du conducteur.
- l'**épaisseur de peau** δ est une première approximation de la largeur de la zone où se concentre 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 μm	2,1 μm	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 ($R = \rho \frac{L}{A}$)



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

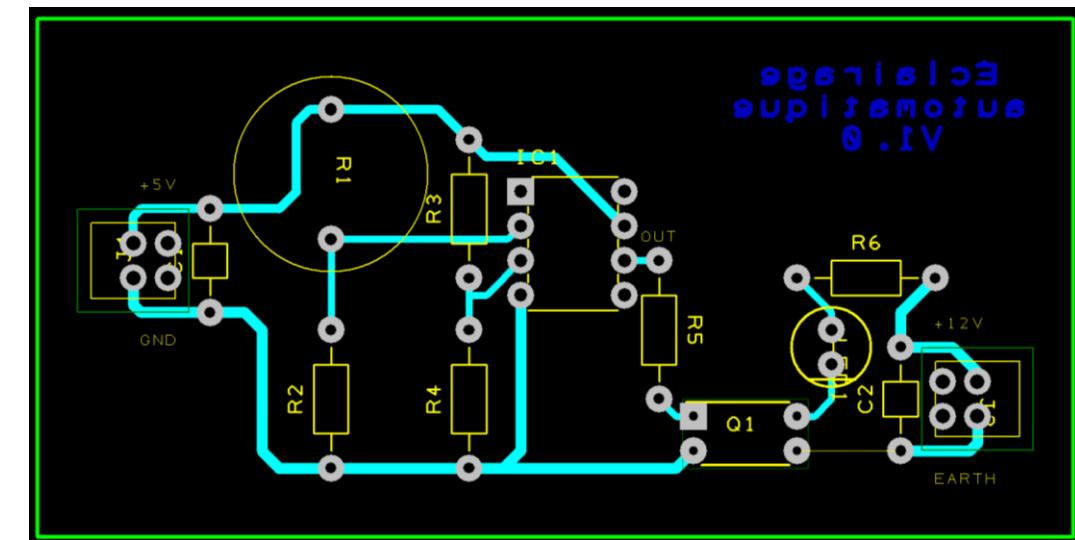
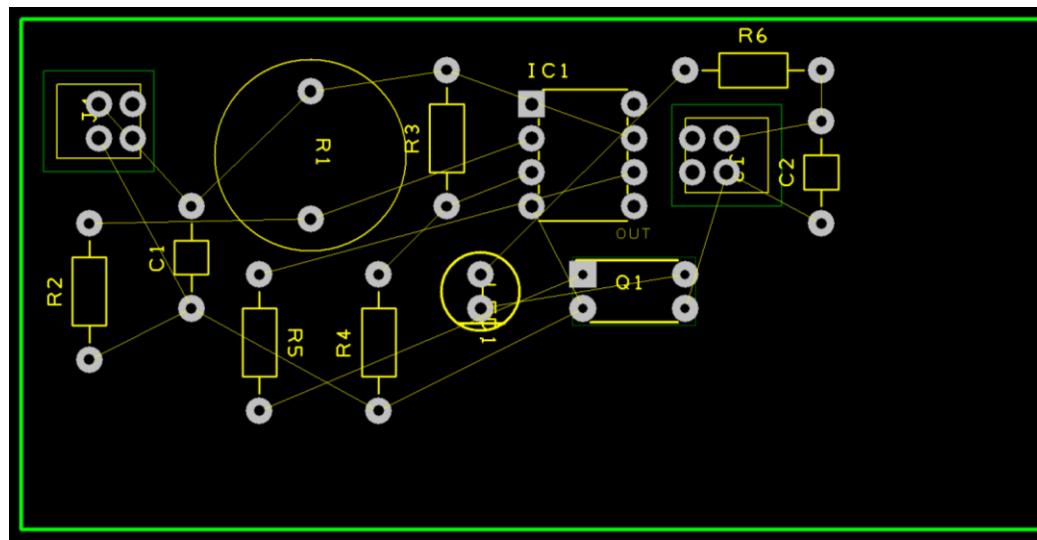
Le routage

■ **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 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

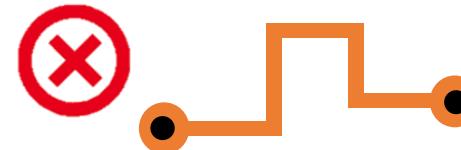
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

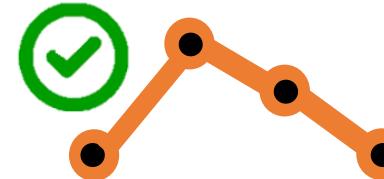
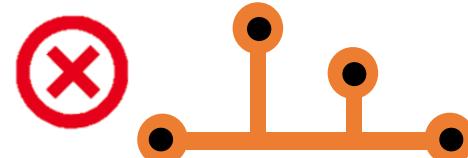
- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage**
- E. Fabrication

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

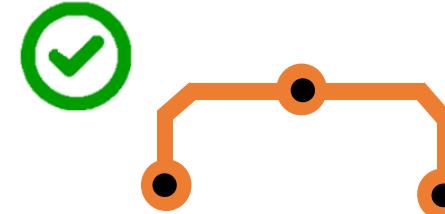
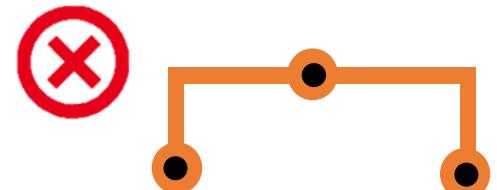
▶ tracer des pistes les plus courtes possibles en HF. Si besoin, rapprocher les composants ;



▶ 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 fluides : dans un angle droit, l'eau s'écoule moins bien)



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

Pins non connectées

- 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.



TEXAS
INSTRUMENTS

LM741

SNOSC25D – MAY 1998 – REVISED OCTOBER 2015

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.

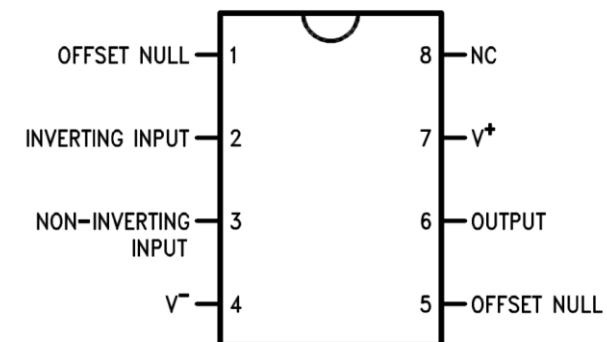
Device Information⁽¹⁾

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



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

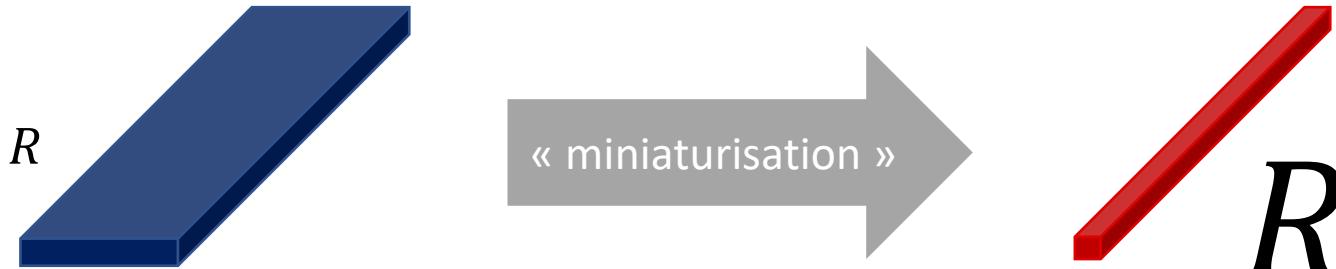
- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

Largeur des pistes

■ 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 :

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

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

I. Les composants électroniques de base

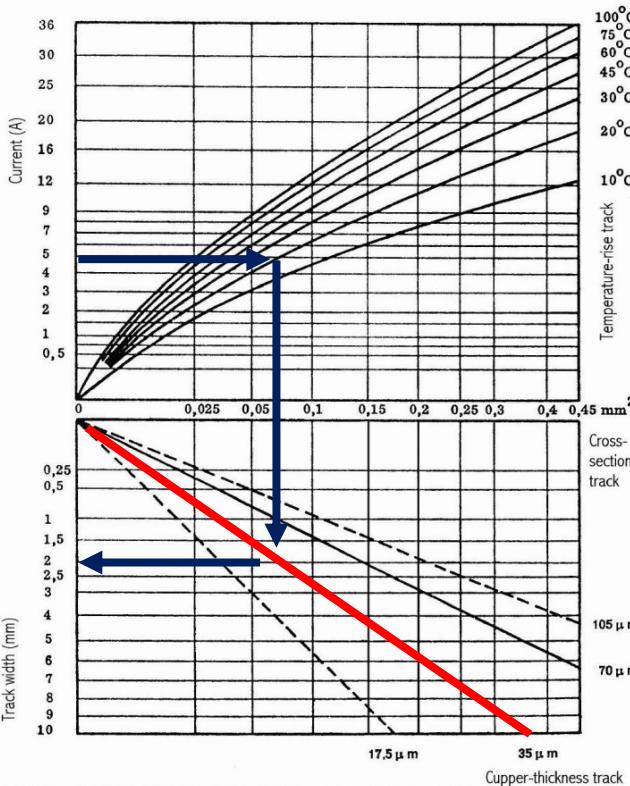
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

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

Largeur des pistes

- La documentation IPC-2221 propose des largeurs de pistes en fonction de la l'épaisseur de cuivre et du courant maximal nécessaire 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 plus larges que sur les couches externes.



Largeur standard
d'épaisseur de cuivre

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. La carte idéale est un plan de masse : le courant peut retourner au plus court chemin à la masse.

■ Un plan permet de :

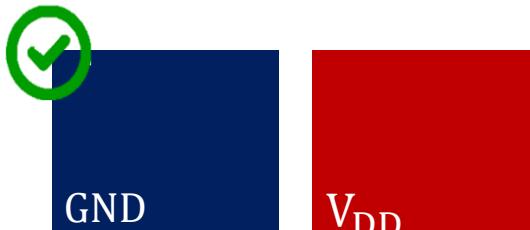
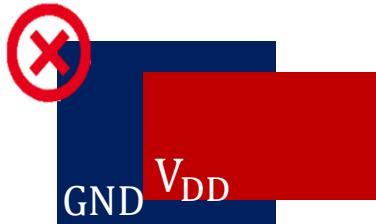
- ▶ d'avoir à proximité un chemin stable, de basse impédance pour tous les signaux de masse de la carte ;
- ▶ de limiter la diaphonie en remplissant l'espace entre des pistes qui y seraient sujettes ;
- ▶ faire en sorte que la carte ne chauffe moins (faible impédance).

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.

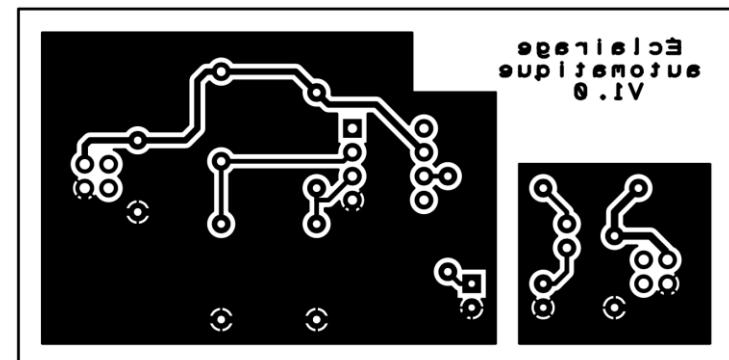
■ S'il n'est pas possible d'ajouter un plan de masse à un PCB :

- ▶ éviter absolument les boucles de masse pour ne pas bruiter 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)



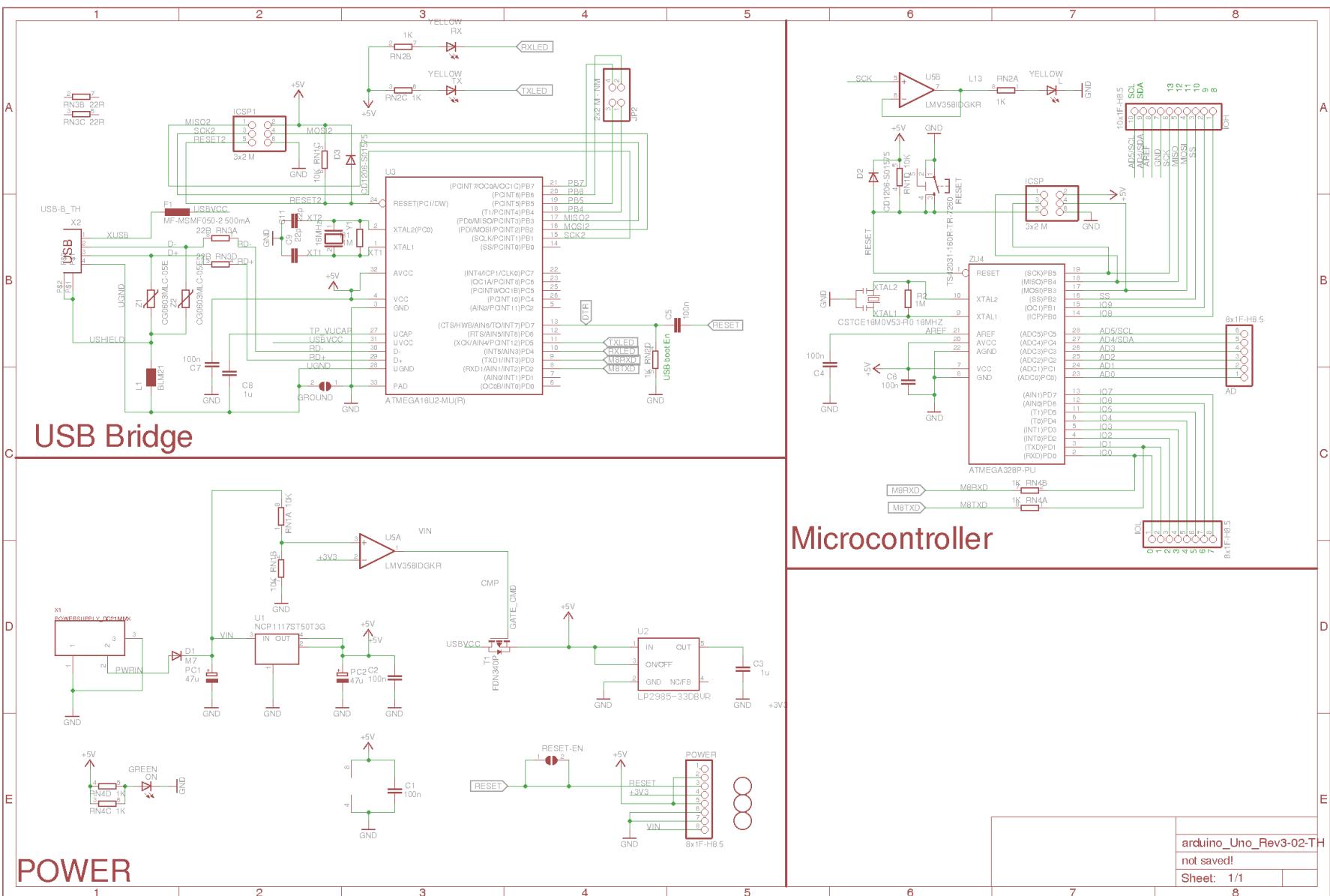
Arduino Uno (1 / 2)

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



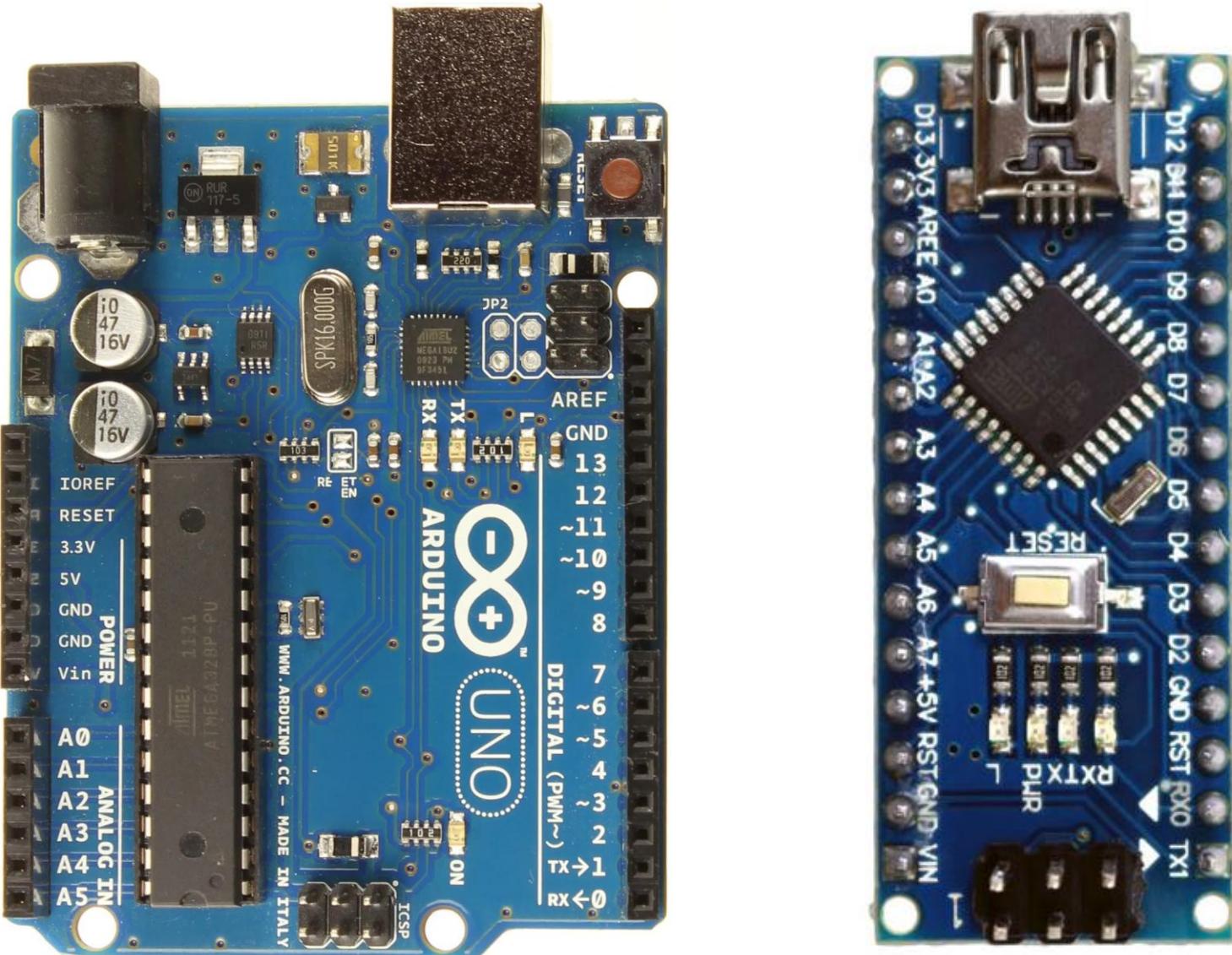
Arduino Uno (2 / 2)

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



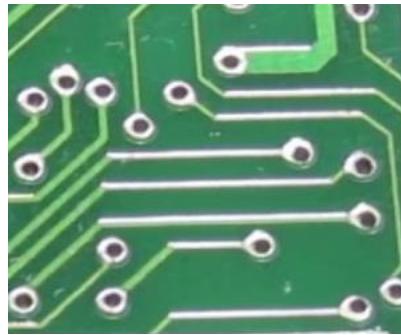
Vias, chip on board et package on package

I. Les composants électroniques de base

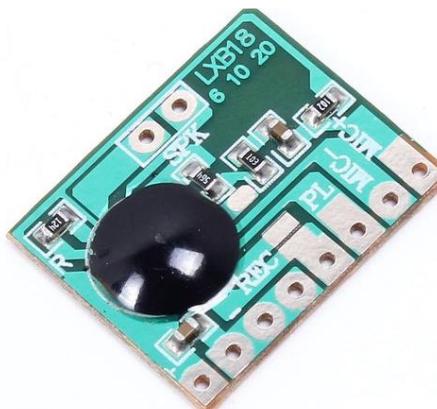
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

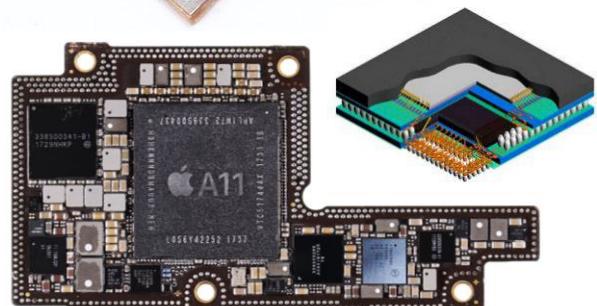
- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication



- 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

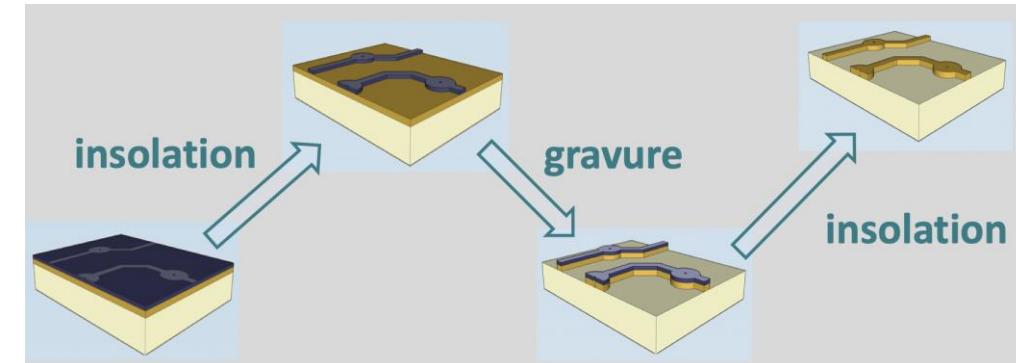
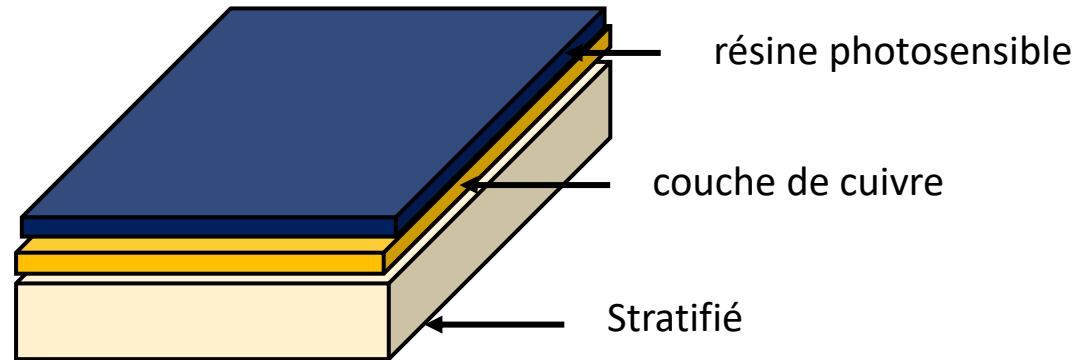
- A. Principe
- B. Schématique
- C. Compatibilité électromagnétique
- D. Routage
- E. Fabrication

■ 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

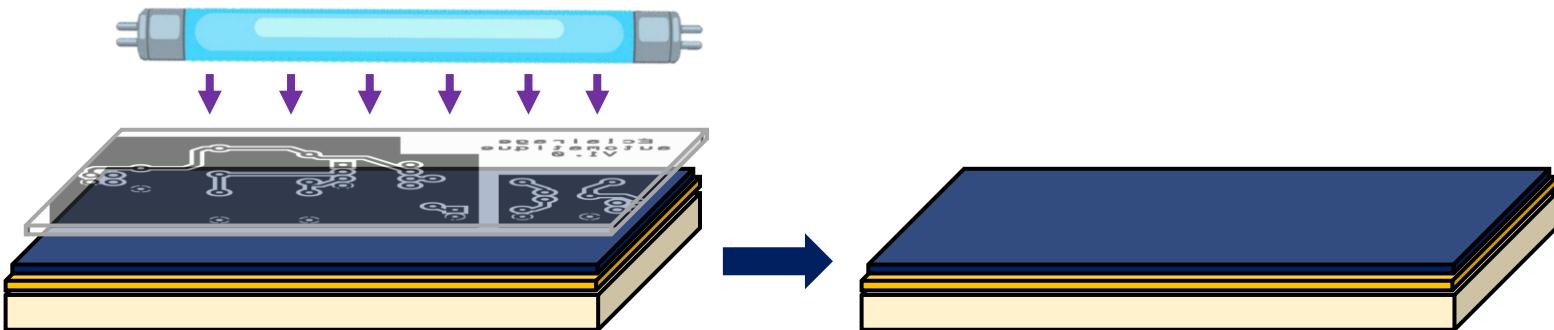
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

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

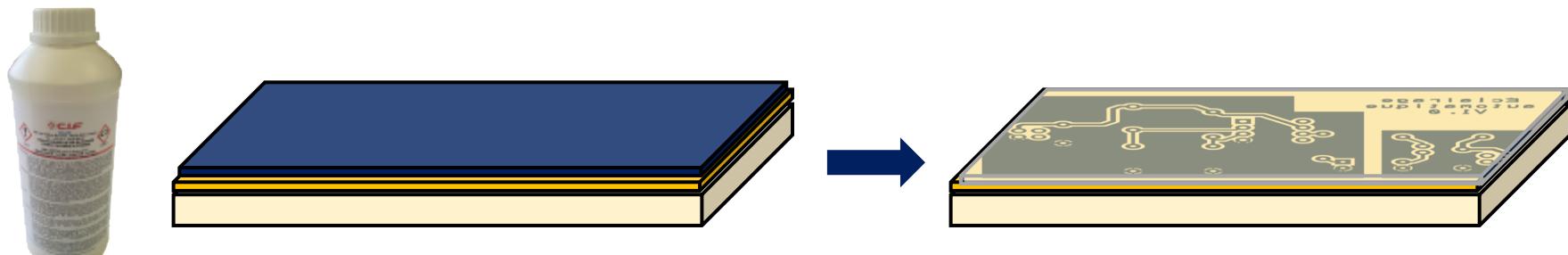
1 insolation

- ▶ 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

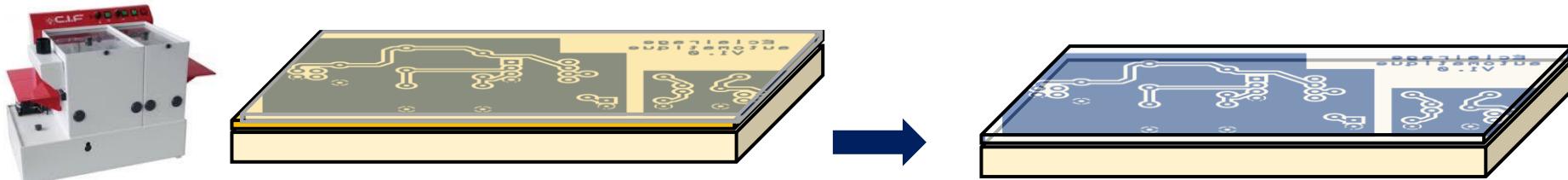
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

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

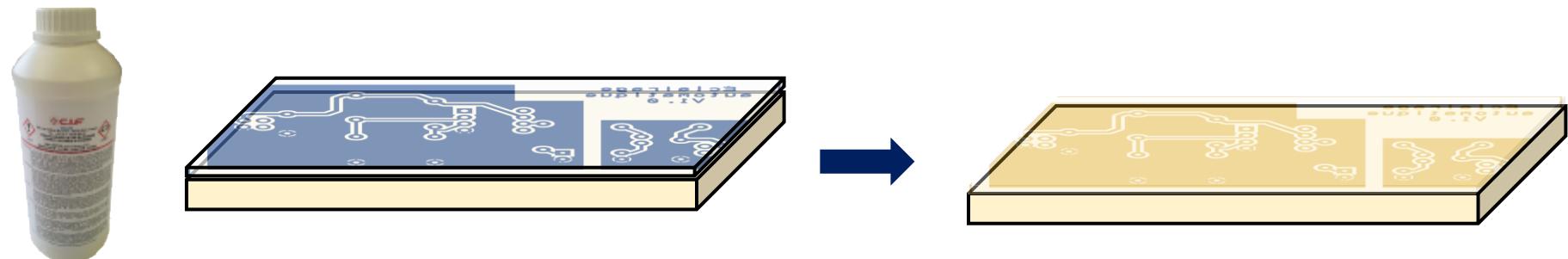
3 gravure chimique

- 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.



I. Les composants électroniques de base

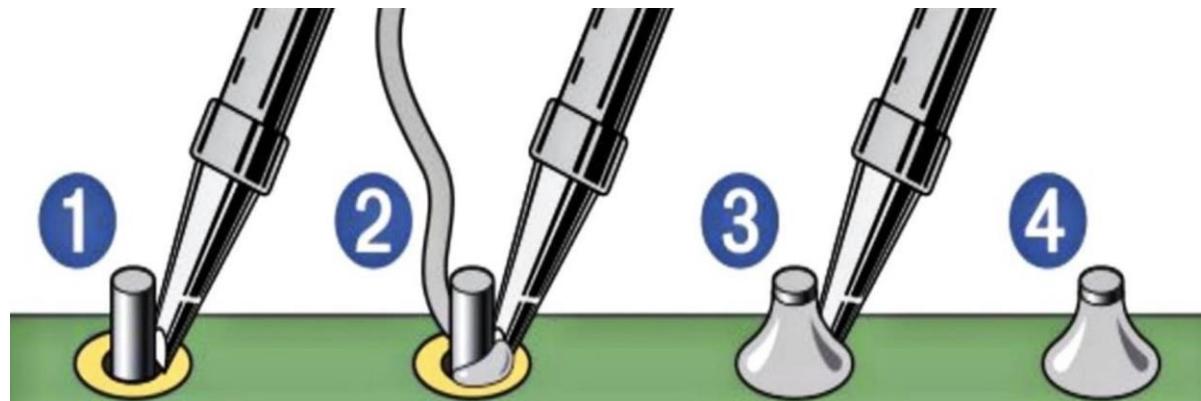
- A. La conduction électrique
- B. Les composants
- C. La résistance
- D. Le condensateur
- E. Les circuits intégrés

II. Le circuit imprimé

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

La soudure

- Une **soudure** assure le maintien du composant à la carte et la conduction électrique.
- L'idée à avoir en tête est de **chauffer le pad afin que l'étain se répande partout en fondant**.
- La température idéale du fer à souder est fonction de la panne (plus elle est fine et moins elle transfert bien la chaleur donc elle doit être plus chaude) et de l'étain (dépend aussi de sa composition mais plus il est gros et plus il faut le chauffer pour le faire fondre).



Chauffer le pad
pendant 2 – 3 sec

Appliquer
l'étain

Continuer à chauffer
Pendant 1 - 2 sec

Retirer le fer et
former un cône



Bonne
soudure

Trop
d'étain

Pas assez
d'étain

Pad pas
assez chaud

Fer
trop chaud

Court-circuit
Entre 2 soudures

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 conductif
 - ▶ 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.