

# Compatibilité Electromagnétique de tous les jours

# L'onde électromagnétique

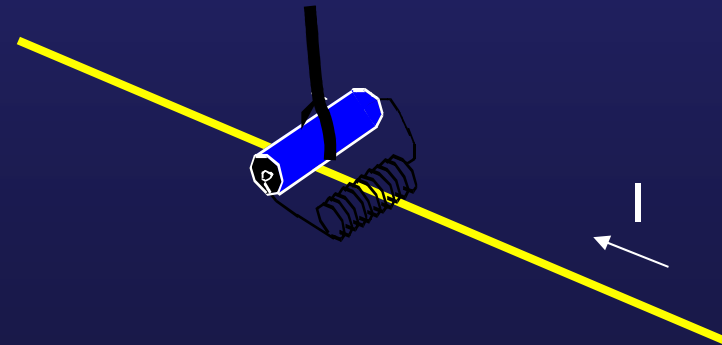
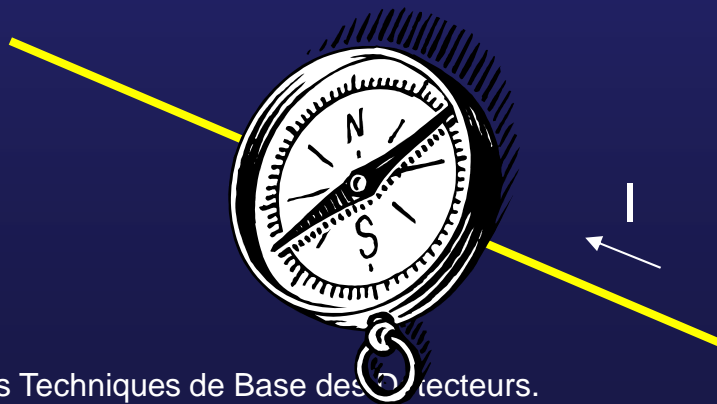
- **Courant et champ magnétique**

Au dessus d'un fil parcouru par un courant  $I$ , plaçons une boussole.

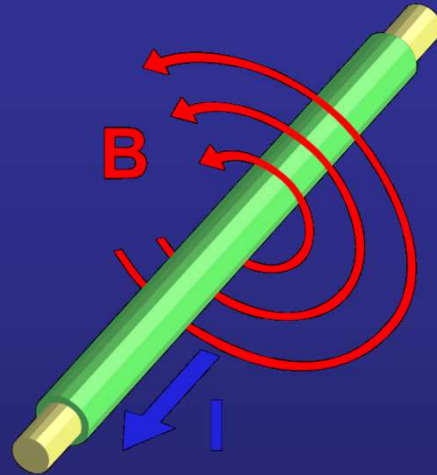
- L'aiguille de la boussole se tourne perpendiculairement au fil. De même, une bobine parcourue par un courant est équivalente à un aimant et s'oriente perpendiculairement au fil.

Un courant  $I$  parcourant un conducteur engendre un champ magnétique  $H$  exprimé en  $A/m$

Hans Christian Orsted (1777-1851)



# L'onde électromagnétique



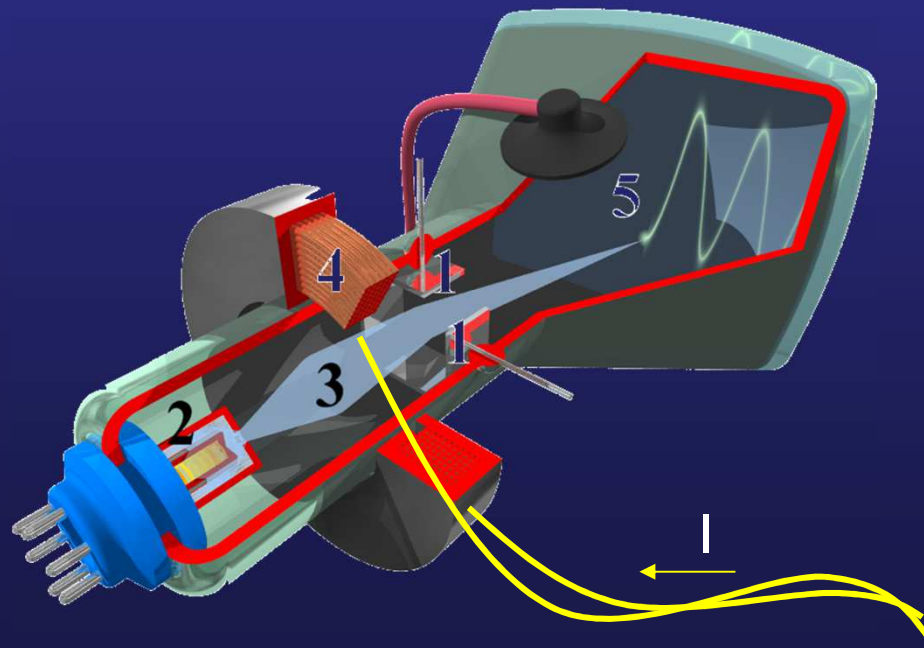
- Si l'on plaçait des petites aiguilles aimantées tout autour du fil, on aurait un ensemble de cercles représentant le champ magnétique.



# L'onde électromagnétique

- De même, considérons un fil électrique parcouru par un courant  $I$  et placé parallèlement à un tube cathodique. Ceci est équivalent à placer un aimant perpendiculairement au tube cathodique.

Un champ magnétique dévie un faisceau d'électrons.



# L'onde électromagnétique



## Tension et champ électrique

- Deux charges de signe contraire s'attirent (voir l'expérience électrostatique du bâton de verre). Il existe donc une force capable d'attirer une charge élémentaire.

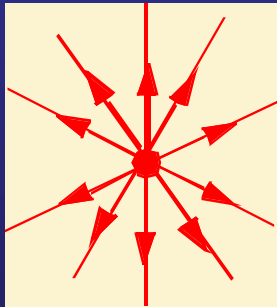
On appelle champs de forces électriques ou champs électriques les régions de l'espace où une charge électrique se trouve soumise à une force électrique

- Le long d'une ligne de champ, l'intensité du champ augmente dans les zones où les lignes se resserrent et diminue lorsque les lignes s'écartent.

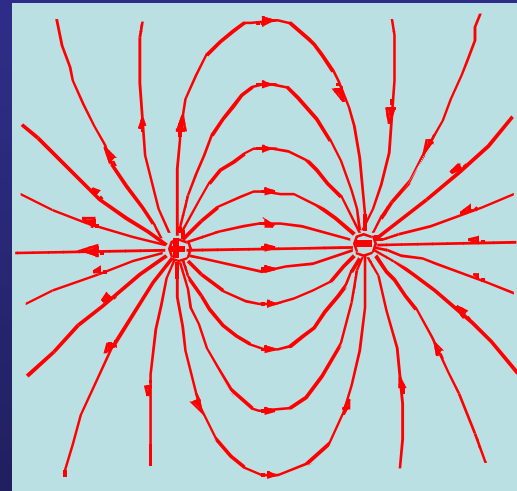
L'intensité du champ électrique varie avec la distance. Elle est exprimé en  $V/m$

# L'onde électromagnétique

- Une tension sur un conducteur engendre un champ électrique



Lignes de champs créées par une charge ponctuelle

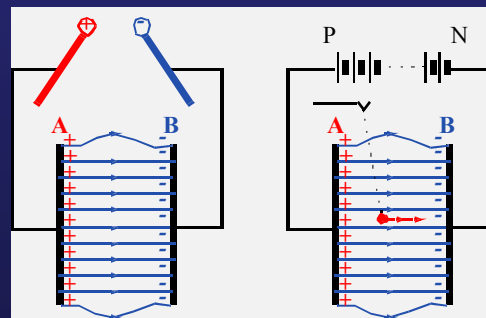


Lignes de champs créées par deux charges ponctuelles

# L'onde électromagnétique

On appelle champs de forces électriques ou champs électriques les régions de l'espace où une charge électrique se trouve soumise à une force électrique

Le long d'une ligne de champ, l'intensité du champ augmente dans les zones où les lignes se resserrent et diminue lorsque les lignes s'écartent.



Champ électrique entre 2 plaques

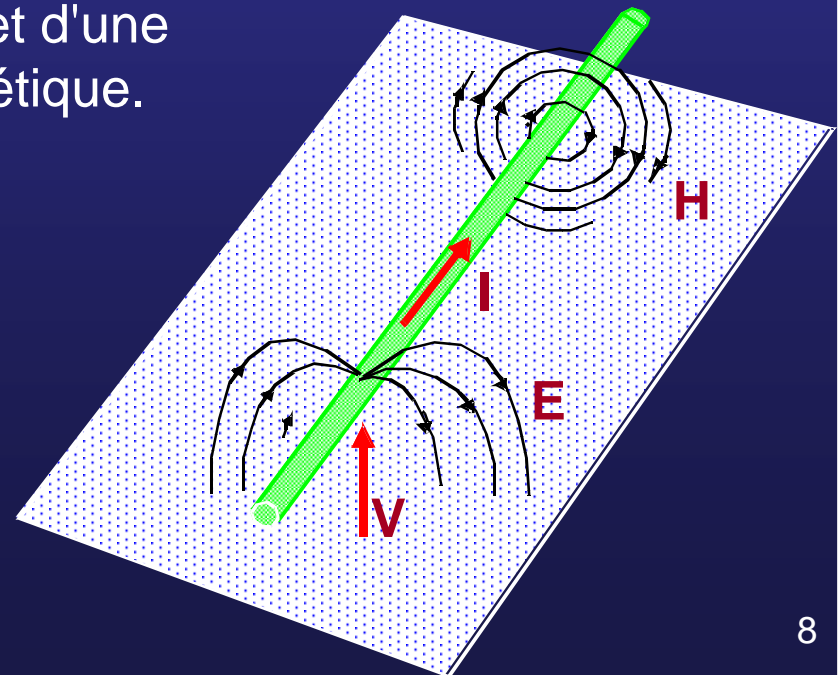
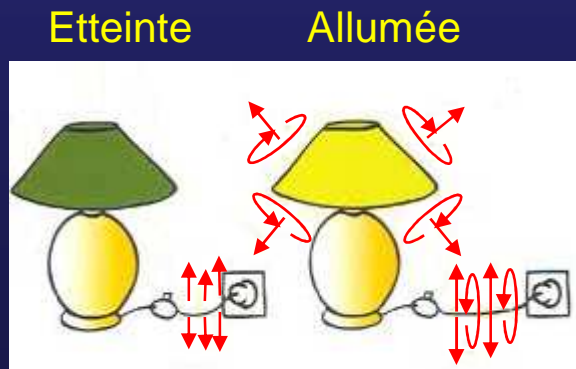
# L'onde électromagnétique

Nous avons vu qu'un conducteur :

- Parcouru par un courant  $I$  engendre un champ magnétique.
- Porté à un potentiel  $V$  engendre un champ électrique.

**Ces deux effets conjugués forment le champ électromagnétique.**

D'une manière générale, à un signal électrique, qui est l'évolution au cours du temps d'un courant et d'une tension, est associé une onde électromagnétique.

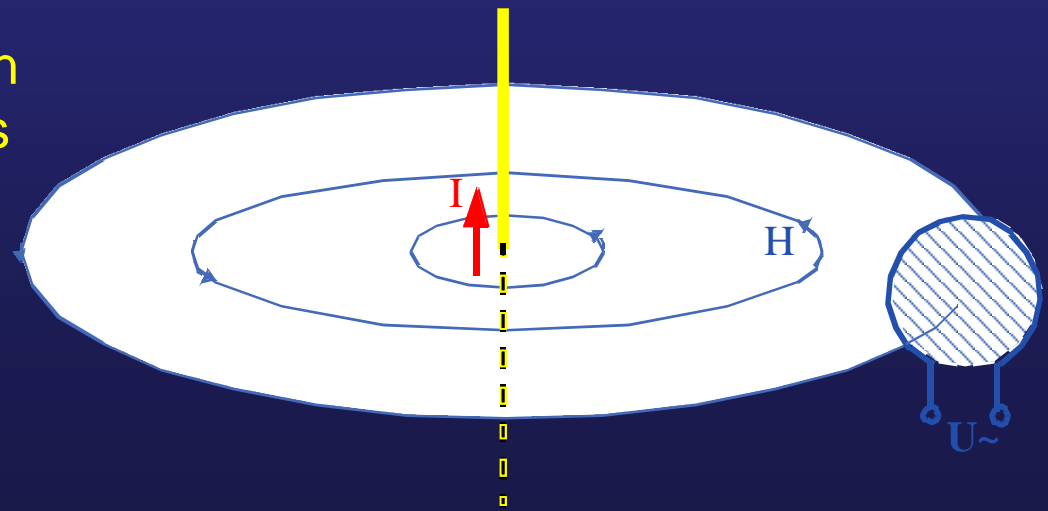




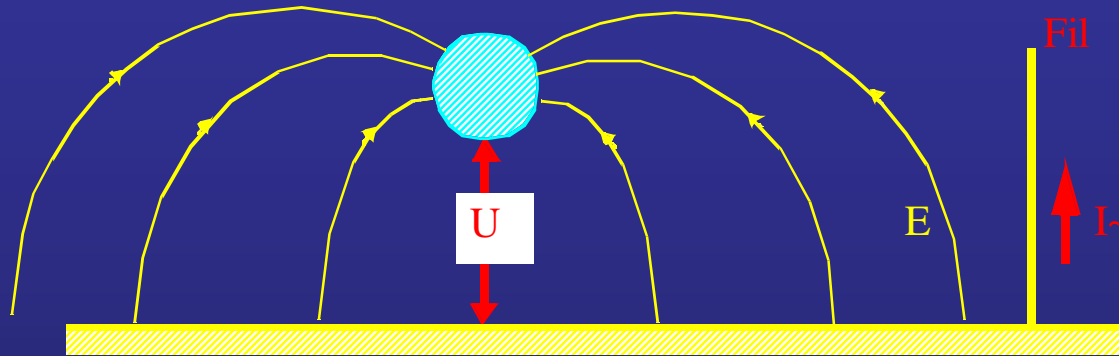
# Les effets du champ électromagnétique

- Le champ électromagnétique est composé d'un champ magnétique et d'un champ électrique. Ces deux champs sont toujours présents simultanément sauf dans des cas particuliers (aimant, condensateur chargé, etc.).
- Selon les cas, la source pourra être à prédominance électrique ou magnétique.

L'effet du champ magnétique (variable) est d'induire une tension dans les boucles perpendiculaires aux lignes de champ. La tension induite est proportionnelle à la surface de la boucle



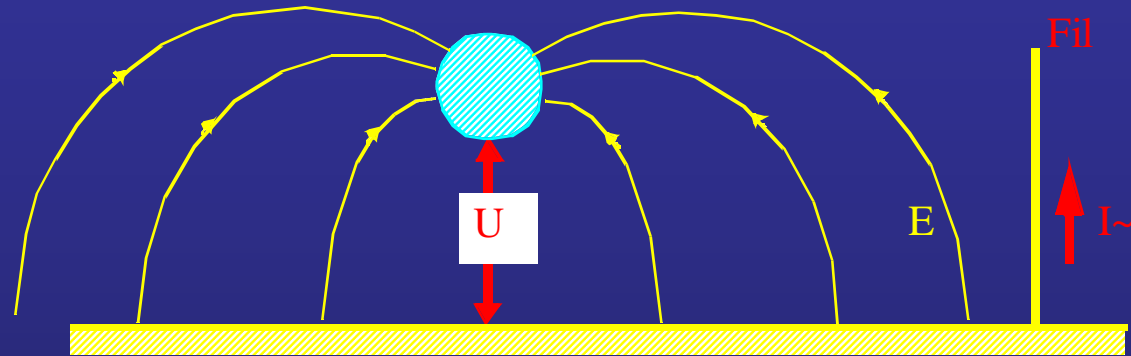
# Les effets du champ électromagnétique



L'effet du champ électrique (variable) est d'induire un courant sur les fils parallèles aux lignes de champ

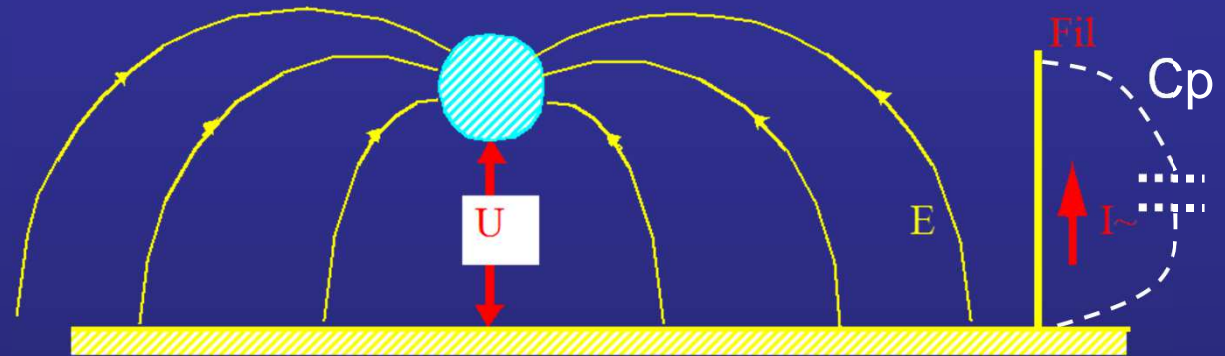
Ces 2 effets sont fondamentaux en CEM, leur connaissance permet de mieux s'en protéger.

# Les effets du champ électromagnétique



Mais où va donc le courant  $I$  ?

# Les effets du champ électromagnétique



Le courant se referme dans la capacité parasite entre le fil et la masse !

# Le champ magnétique : Quelques chiffres

Champ magnétique terrestre :  $47\mu\text{T}$  (centre de la France)

Rasoir électrique :  $15 - 1000\mu\text{T}$

Sèche cheveux :  $6 - 2000\mu\text{T}$  (3cm)

Aspirateur :  $200 - 800\mu\text{T}$

Mixeur :  $60 - 700\mu\text{T}$

Ordinateur :  $0,7 - 10\mu\text{T}$

**Seuil à ne pas dépasser :  $0,2\mu\text{T}$  !**

# Pour aller un peu plus loin avec le champ électromagnétique

Le champ électromagnétique est constitué d'une composante électrique et d'une composante magnétique.

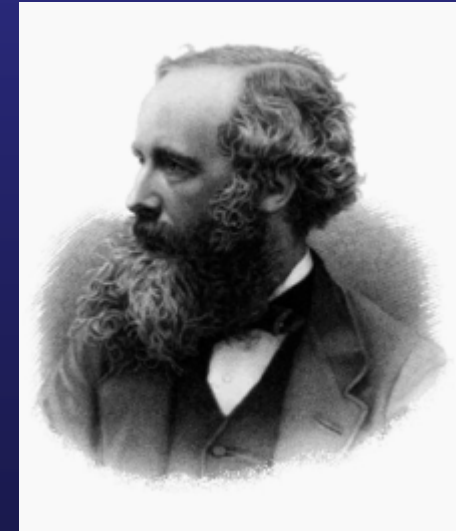
En CEM, il est nécessaire de pouvoir considérer ces deux composantes indépendamment l'une de l'autre. Une protection contre le champ magnétique sera différente d'une protection contre le champ électrique.

Le champ électromagnétique est régi par les équations de MAXWELL ...

La théorie

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{D} &= \rho && \text{Equation de Maxwell-Gauss} \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 && \text{Equation de conservation du flux} \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial}{\partial t}(\vec{B}) && \text{Equation de Maxwell-Faraday} \\ \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial}{\partial t}(\vec{D}) && \text{Equation de Maxwell-Ampère} \end{aligned}$$

Mais...



James Clerk Maxwell (1831-1879)

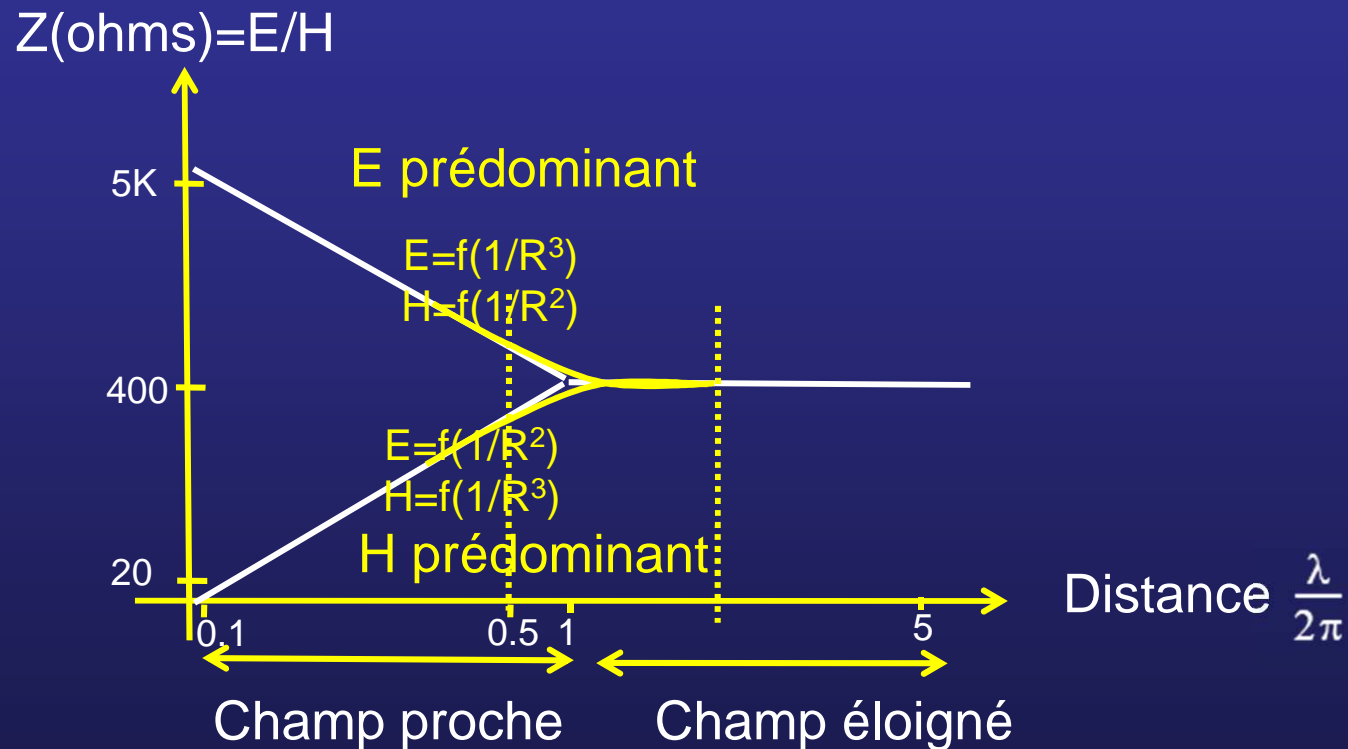
# Pour aller un peu plus loin avec le champ électromagnétique

Le champ électromagnétique est constitué d'une composante électrique et d'une composante magnétique.

En CEM, il est nécessaire de pouvoir considérer ces deux composantes indépendamment l'une de l'autre. Une protection contre le champ magnétique sera différente d'une protection contre le champ électrique

- Rappel :  
E en V/m  
H en A/m
- Le produit  $E \times H$  est homogène à une puissance par m<sup>2</sup>  $W/m^2$ . c'est le vecteur de Poynting (John Henry Poynting (1852-1914)).
- Le rapport  $E/H$  est homogène à une impédance et s'exprime en ohms. C'est l'impédance de l'onde en espace libre (377 ohms dans le vide).

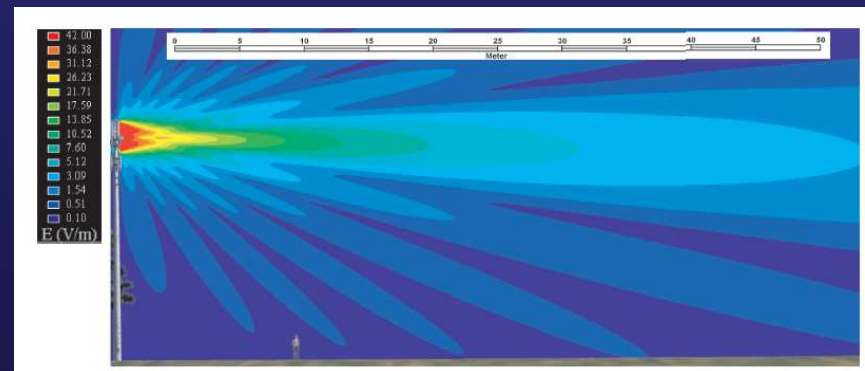
# Impédance de l'onde électromagnétique





# Les ondes électromagnétiques sont-elles dangereuses ?

- Unité utilisée : SAR (Specific Absorption Rate) W/Kg (ne présage pas des dégâts !)
- Exemple des téléphones portables
  - Combinés
    - RF de faible énergie (de 0,2 à 0,6W)
    - Antenne fouet essentiellement champ E (champ proche)
  - Antennes relais : environ 30 W
    - Onde plane anisotrope (très peu d'énergie vers le bas)



# Les risques

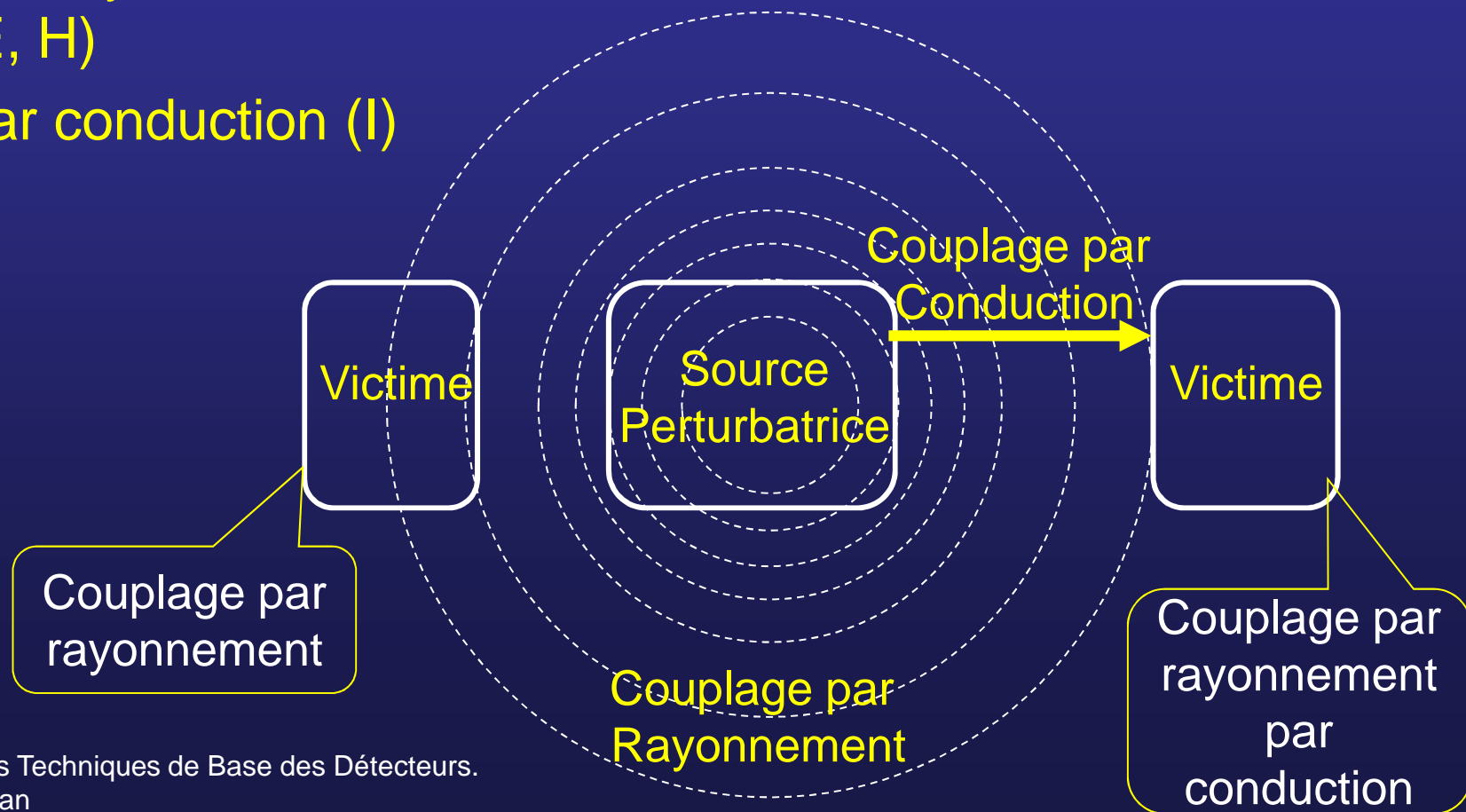
- Effets possibles
  - Micro-ondes (si 0,25W f entre 900 et 1800MHz)  $dT < 0,1^{\circ}\text{C}$
  - Champ électrique
  - Champ magnétique
  - Psychologique



À 30 cm...	SAR[W/Kg]	E[V/m]	H[A/m]
Champs 50Hz		5000	80
Emetteur OM		72	0,5
Emetteur FM	0,08	28	0,073
GSM(900MHz)	0,08	41	0,11
DCS(1800MHz)	0,08	58	0,16
UTMS (2000MHz)	0,08	61	0,17

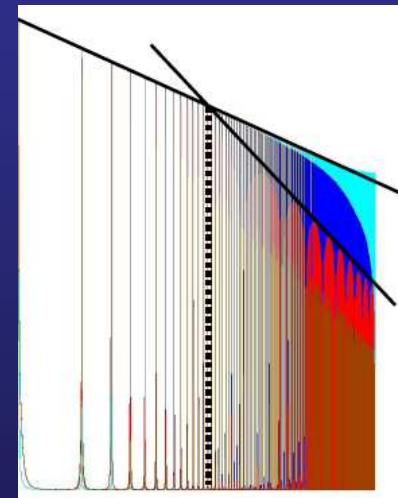
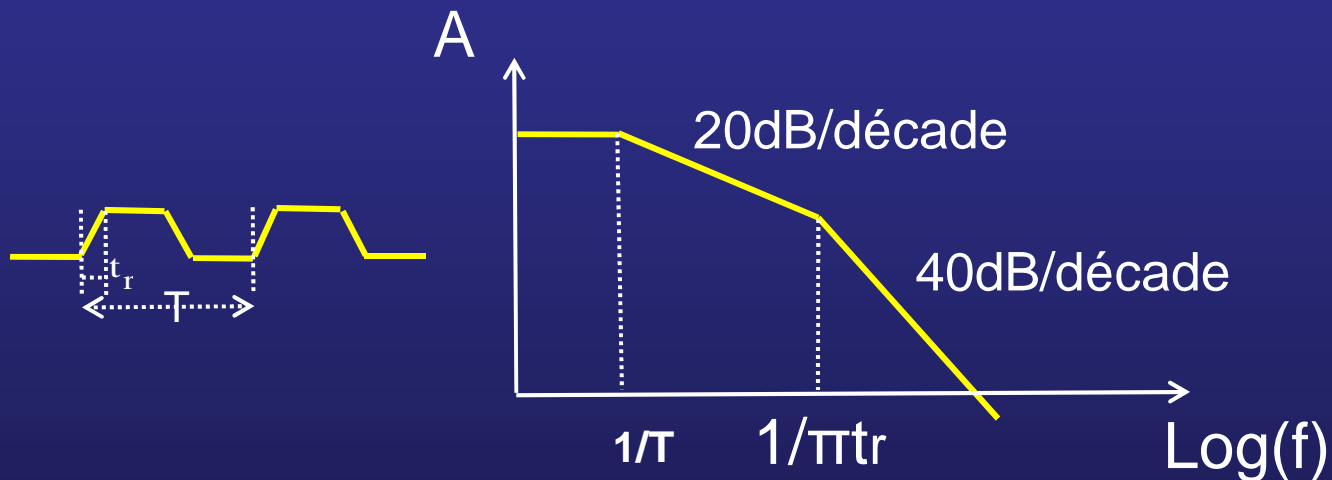
# Modes de transmission des perturbations

- Par rayonnement (E, H)
- Par conduction (I)



# Spectre d'un train trapézoïdal

La décomposition de Fourier permet de retrouver toutes les fréquences d'un signal complexe (les harmoniques)



- Les transitions rapides sont plus importantes que la fréquence !
- Les harmoniques ont des effets plus dévastateurs que le fondamental

# Du continu aux signaux haute-fréquence

Considérons une résistance R...

En continu  $Z=R$



En régime fréquentiel  $Z=R+jL\omega$



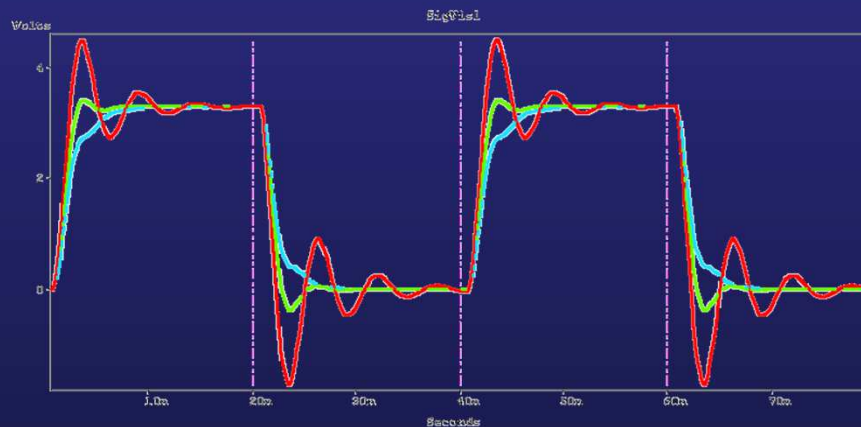
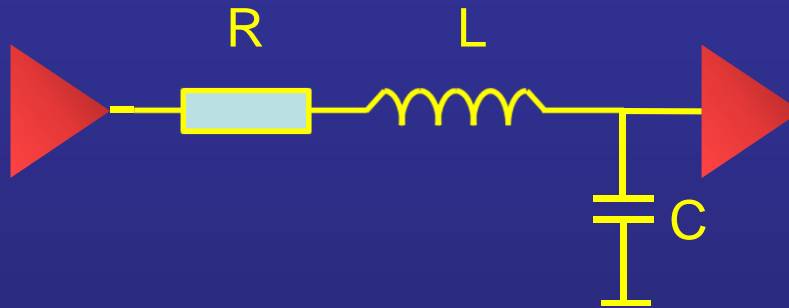
Avec  $L \sim 1 \mu\text{H/m}$

Pour 1MHz,  $L\omega = 6,28 \Omega/\text{m}/\text{MHz}$

Par exemple à 100MHz 1cm de fil à une impédance de :

$$L\omega = 6,28 \times 10^{-2} \times 100 = 6,28 \Omega$$

# Conséquences de l'inductance et de la capacité parasites dans les circuits



Node	Node	Value	Units
load 2	resistor-1: R	1.0000	ohms
load 2	resistor-1: R	22.778	ohms
load 2	resistor-1: R	64.555	ohms

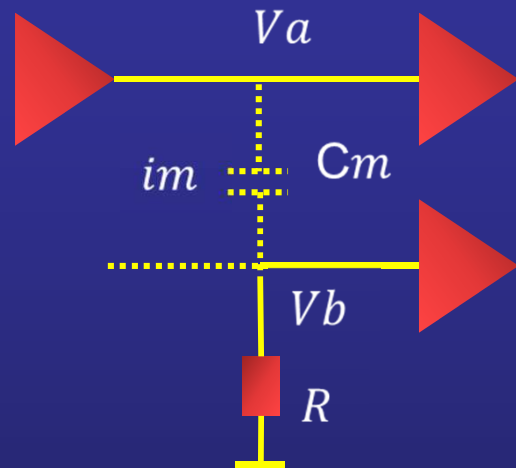
Edge	Comment
---	Transmission Time

Il faut diminuer « l'overshoot » !

- Rayonnement excessif
- Destruction de circuits
- Dysfonctionnement

**R permet d'amortir le circuit**

# Diaphonie capacitive



$$i_m = C_m \cdot \frac{dV_a}{dt} = C_m \cdot \frac{dV_a}{T_r}$$

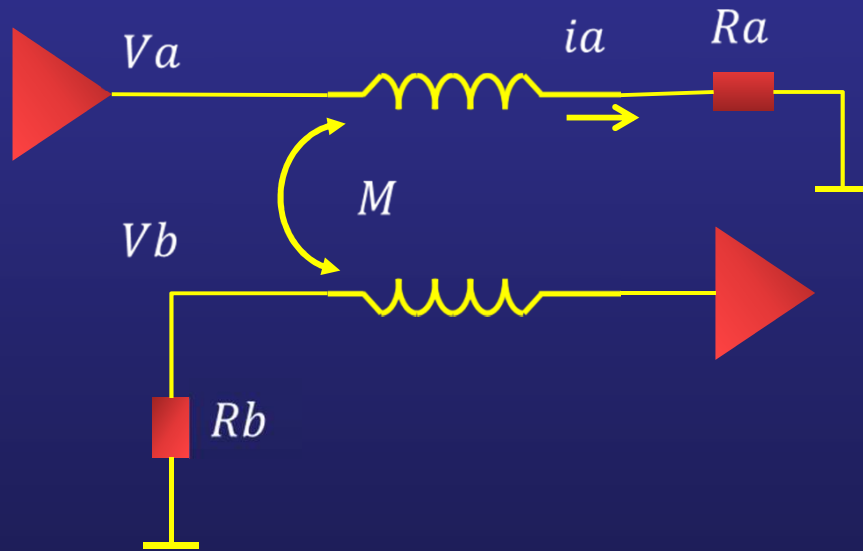
$$V_b = R \cdot i_m$$

$$V_b = R \cdot C_m \cdot \frac{dV_a}{T_r}$$



- La diaphonie dépend de  $C_m$  et de  $T_r$

# Diaphonie inductive



$$V_a \sim R_a \cdot i_a$$

$$\frac{dV_a}{dt} = \frac{R_a \cdot di_a}{dt}$$

$$V_b = M \frac{di_a}{dt}$$

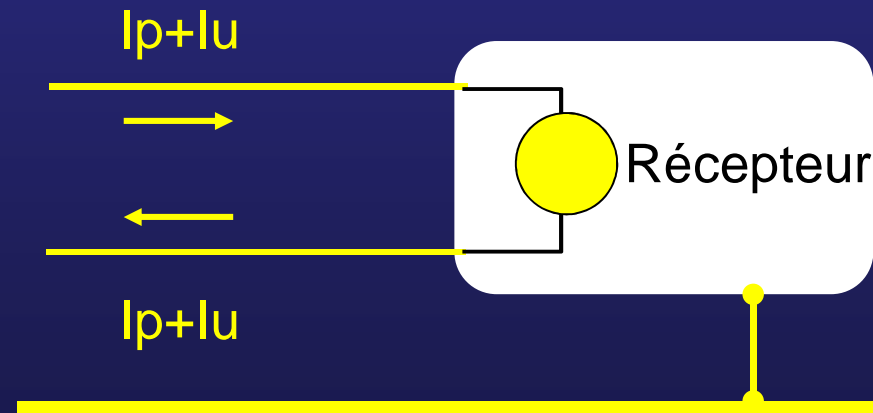
$$V_b = M \frac{dV_a}{R_a \cdot Tr}$$

- Eloigner les pistes et/ou fils sensibles



# Le mode différentiel

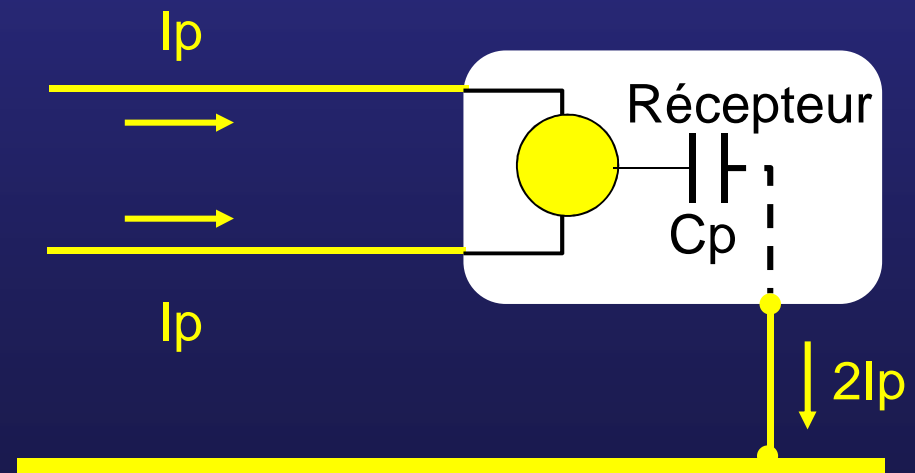
- Dans ce mode la perturbation  $I_p$  est transmise à un seul des 2 conducteurs. Le courant de mode différentiel se propage sur l'un des conducteurs, passe à travers le récepteur et revient par un autre conducteur.
- Les signaux utiles  $I_u$  sont également transmis dans ce mode !
- 10% des perturbations



# Le mode commun

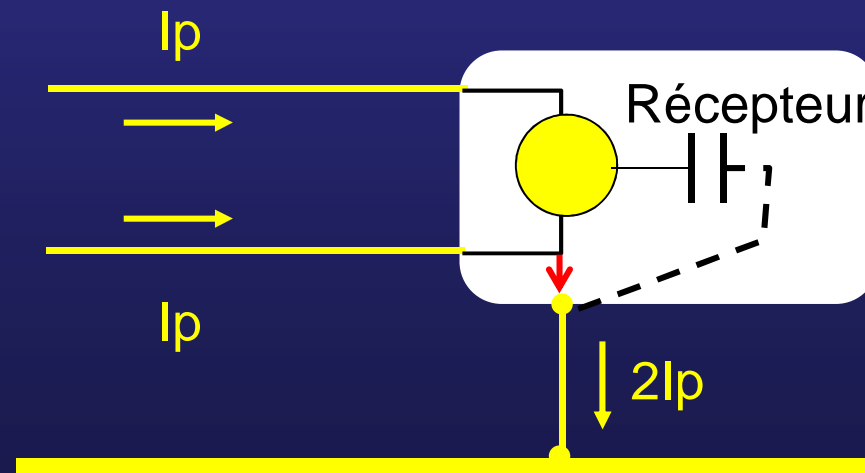
- Dans ce mode la perturbation  $I_p$  est transmise, dans le même sens, à l'ensemble des conducteurs et revient à la masse par les capacités parasites.
- 90% des perturbations

Attention les perturbations de mode commun sont des courants et ne peuvent pas être vues directement par un oscilloscope !



# Le mode commun

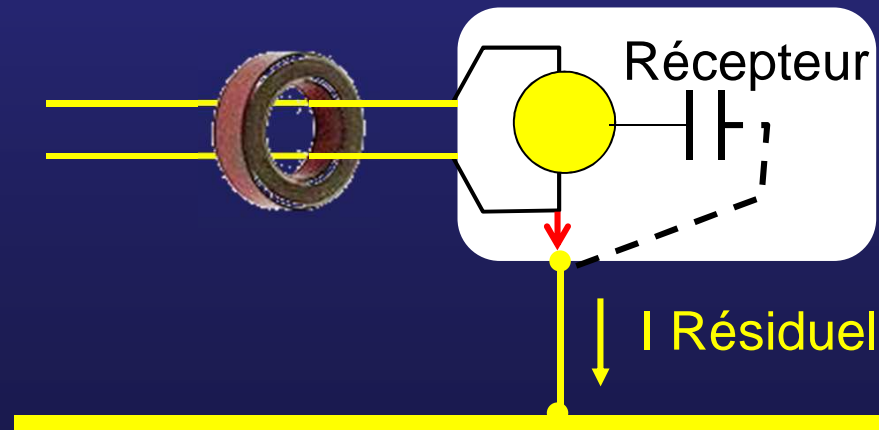
- Pour limiter les perturbations de mode commun, il faut que le récepteur soit correctement relié à la masse !



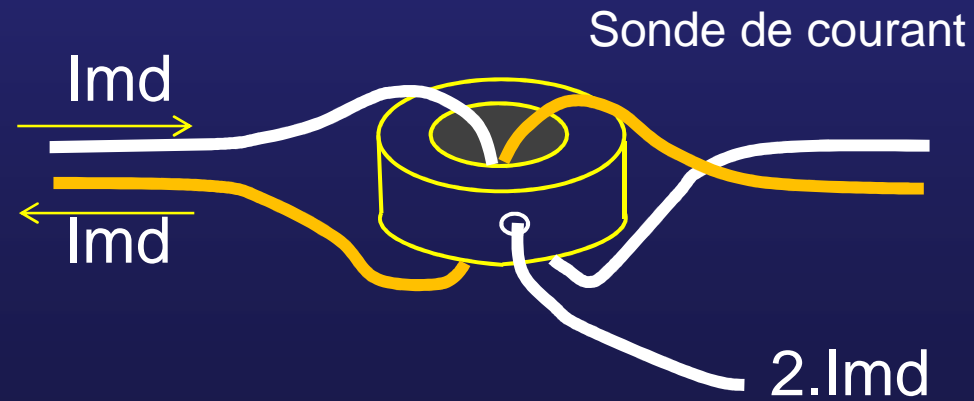
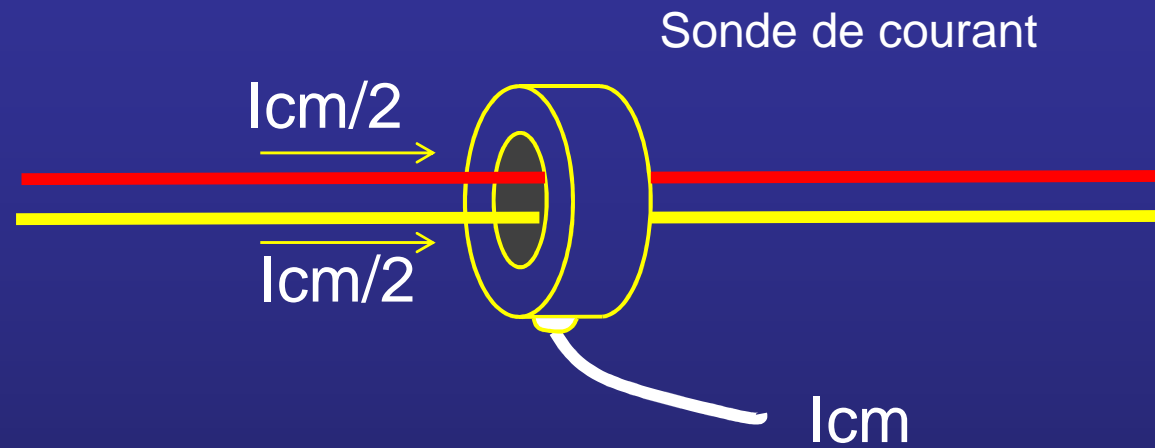
# Le mode commun

- Pour limiter les perturbations de mode commun, il faut que le récepteur soit correctement relié à la masse et **l'on peut rajouter une ferrite !**

Grâce au couplage important, les signaux dans le même sens sont atténués

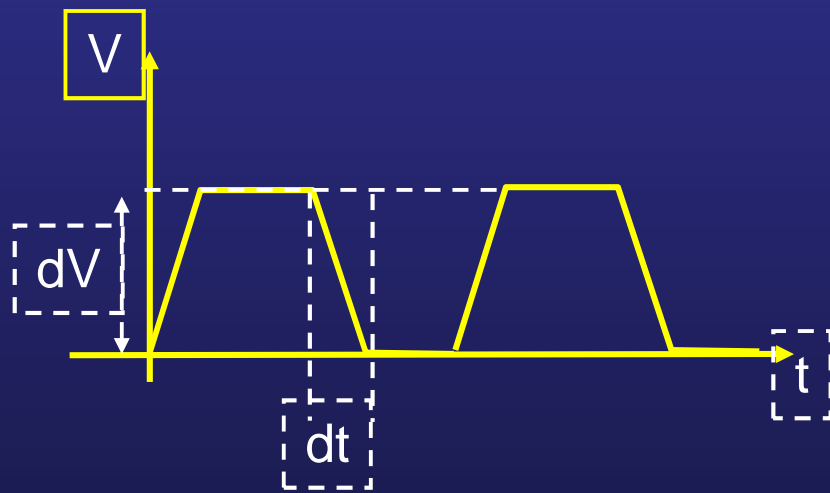


# Mesurer les courants de MC et MD

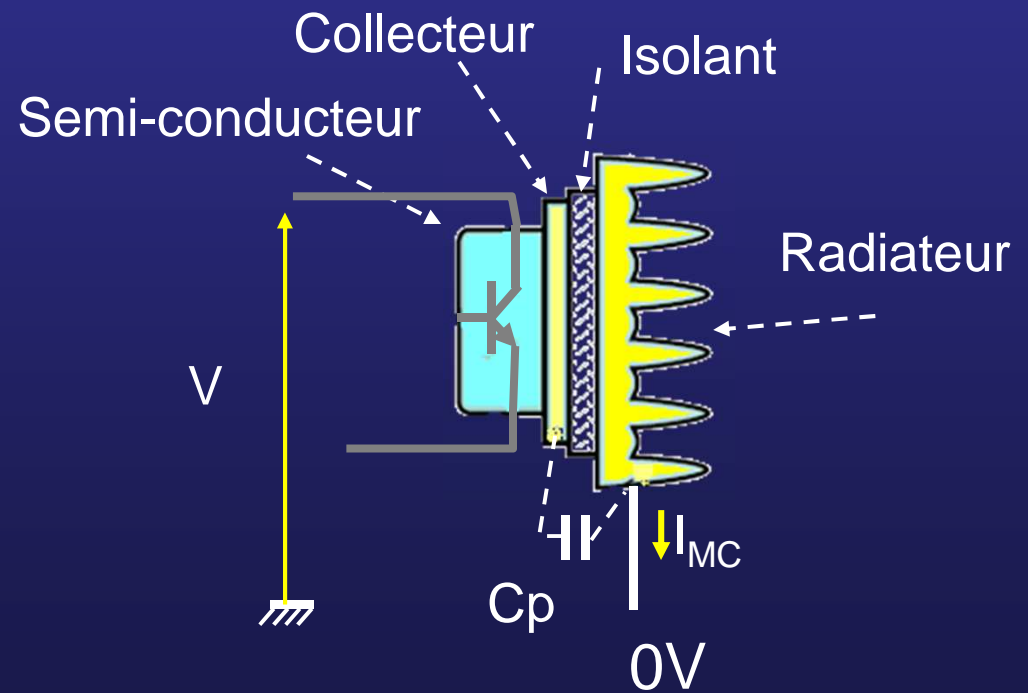


# Exemple de source de perturbations conduites en électronique de puissance

Exemple d'une alimentation à découpage



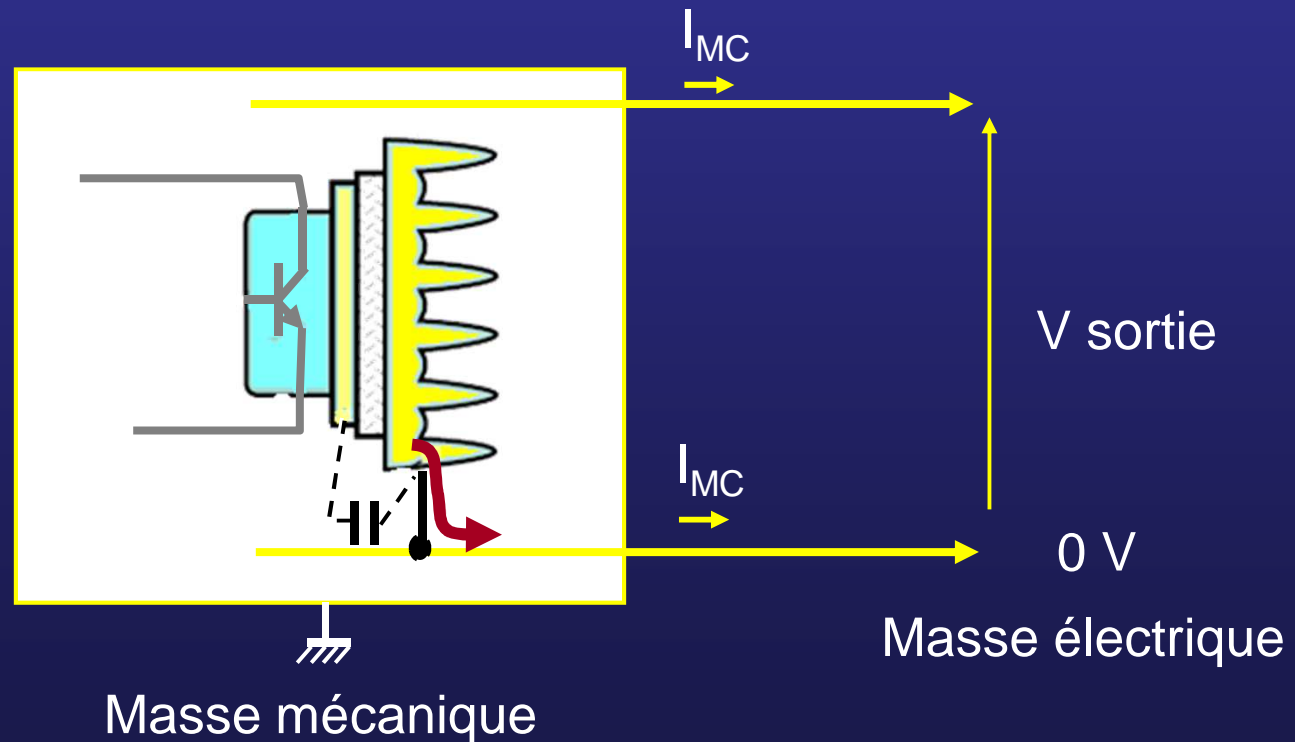
$$I_{MC} = C_p \frac{dV}{dt}$$



# Exemple de source de perturbations conduites en électronique de puissance

Cas d'une alimentation flottante, le 0V électrique n'est pas relié à la masse mécanique

Le courant de mode commun  $I_{MC}$  va se propager avec le risque de polluer !



# Exemple de source de perturbations conduites en électronique de puissance

Cas d'une alimentation non flottante, le 0V électrique est relié à la masse mécanique, le courant  $I_{MC}$  est dirigé vers la masse

