

Compatibilité Electromagnétique de tous les jours

Partie 1

Partie 1

- Définition de la CEM
- La démarche
- Quelques notions d'électricité
- Notion de terre et d'équipotentialité
 - Quelques exemples
- Electrostatique
 - Quelques exemples

Qu'est-ce que la CEM ?

- « La CEM, Compatibilité Electromagnétique, recouvre tous les aspects de la pollution électromagnétique dans son environnement, la sécurité des personnes et des biens »

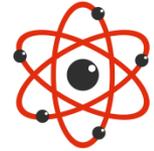
Qu'est-ce que la CEM ?

- *Toutes les perturbations d'ordre électrique qui peuvent être dommageables.*
- Depuis le 1 Janvier 1996 la directive 89/336/CEE s'applique à tout matériel électrique/électronique commercialisé. Tout matériel conforme affiche le marquage « CE ».
- *C'est donc une obligation de ne pas polluer et de ne pas être pollué.*

Démarche

- Bien comprendre ce qui se passe dans la vie de tous les jours est facilement transposable dans les installations électriques, électroniques et microélectroniques !
- Il est indispensable de bien connaître **les lois de base de l'électricité**.
- 2 règles d'Or.

Règle d'Or numéro 1



- Conceptuellement les électrons *CEM* se distinguent des autres (électrons) par le fait qu'ils sont rigoureusement identiques !
 - Dans le cas contraire, on ne peut plus rien expliquer !

Règle d'Or numéro 2



- La *CEM* est explicable par des règles de physique simple (les phénomènes ne sont pas mystérieux), ce n'est pas de la magie noire !

Une salle d'expérience



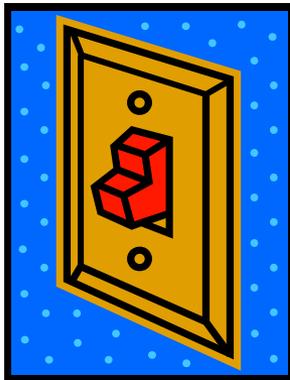
Quelques notions d'électricité (1)

- **Un courant ou une tension ?**
- C'est avant tout un problème de vocabulaire :
Les prises de *courant* de votre résidence délivrent évidemment une tension (220 Volts). Quand on dit :
« branchons la prise de courant et fermons l'interrupteur pour établir la tension » en fait ...



Quelques notions d'électricité (2)

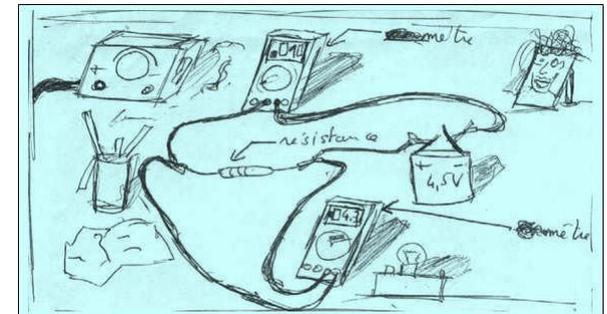
- en fait, nous faisons exactement le contraire :
On branche la tension et on ferme
l'interrupteur pour que le courant puisse
circuler !



Quelques notions d'électricité (3)

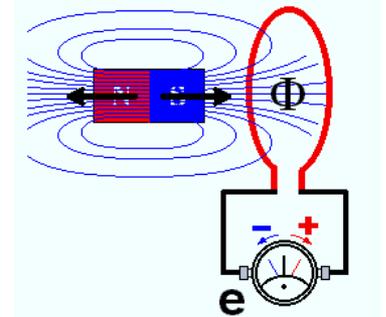
- Le **Volt** et l'**Ampère** sont les unités de mesure de la tension et du courant.

$$U = RI \text{ ou } U = ZI \text{ (loi d'ohm)}$$



- Pour le magnétisme :

$$e = -d\phi/dt \text{ (loi de Lenz-Faraday)}$$



La notion de terre (1)

- Dans chaque installation électrique qui se respecte il y a une terre.
- C'est le troisième fil de la prise de courant de couleur vert et jaune (normalisé).
- Tous les fils de terre sont reliés à un pieu enfoui physiquement dans le sol.
- On peut se poser les questions suivantes :
 - - **A quoi sert la terre ?**
 - - **Pourquoi certains appareils ont une prise de terre (appareils de classe I) ou n'ont pas de prise de terre (appareils de classe II) ?**
- Réponse : ?? ?????????? ??? ????????????



La notion de terre (2)

- Dans chaque installation électrique qui se respecte il y a une terre.
- C'est le troisième fil de la prise de courant de couleur vert et jaune (normalisé).
- Tous les fils de terre sont reliés à un pieu enfoui physiquement dans le sol.
- On peut se poser les questions suivantes :
 - - **A quoi sert la terre ?**
 - - **Pourquoi certains appareils ont une prise de terre (appareils de classe I) ou n'ont pas de prise de terre (appareils de classe II) ?**
 - Réponse : La sécurité des personnes !



L'équipotentialité de la terre

- La notion de terre est relativement ambiguë.
- Elle laisse supposer que tous les points de la terre sont équipotentiels (c'est à dire qu'ils sont à la même référence 0 volt).
- En fait, il n'en est rien : la composition du sol n'est pas homogène, « **c'est un complexe électrochimique mal connu, mal défini** ».
- Par exemple, lors d'un choc de foudre dans un champ, un mouton peut être tué même s'il se trouve à plusieurs centaines de mètres de l'impact. La différence de potentiel entre ses pattes de devant et celles de derrière peut être suffisante pour l'électrocuter !
- **2 points de terre séparés ne sont pas équipotentiels**
- **La terre est un symbole électrique théorique**



Quelques exemples (1)

- *Question :*
Pourquoi les tondeuses électriques ne sont pas reliées à la terre ?



Quelques exemples (2)

- *Question :*
Pourquoi les tondeuses électriques ne sont pas reliées à la terre ?
- *Réponse :*
Pour éviter des accidents par électrocution.
Le potentiel de terre ramené par un très long fil secteur peut être très différent de celui où se trouve la tondeuse !



Quelques exemples (3)

- *Question :*
Pourquoi dans votre salle de bain les appareils sont généralement de classe II (double isolation sans prise de terre, par exemple les appareils de chauffage, sèche cheveux, etc.) ?



Quelques exemples (4)

- *Question :*
Pourquoi dans votre salle de bain les appareils sont généralement de classe II (double isolation sans prise de terre, par exemple les appareils de chauffage, sèche cheveux, etc.) ?
- *Réponse :*
Dans ce type de locaux, il est souvent possible de toucher à la fois l'appareil et la canalisation d'eau. Dans ce cas, le potentiel de terre ramené par la canalisation peut être différent de celui de la terre secteur !



Quelques exemples (5)

- *Question :*
Dans ma salle de bain j'ai une machine à laver qui est reliée avec une prise de terre. Dois-je supprimer cette terre ?



Quelques exemples (6)

- *Question :*
Dans ma salle de bain j'ai une machine à laver qui est reliée avec une prise de terre. Dois-je supprimer cette terre ?
- *Réponse :*
Non, votre machine n'est pas de classe II double isolation. Par contre, il est conseillé de relier la carcasse métallique (en enlevant la peinture isolante) à la tuyauterie d'eau. Une tresse métallique fera très bien l'affaire. Vous pourrez alors toucher simultanément votre machine et la tuyauterie sans aucun risque.

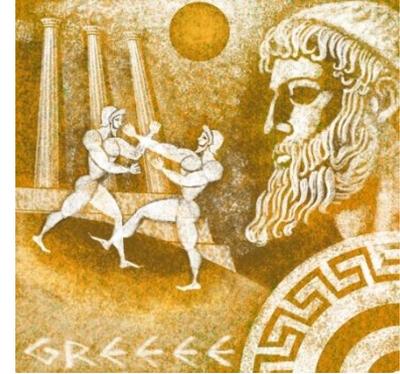


Moralité

- ➡ Dans un souci de sécurité, il faut toujours rechercher l'équipotentialité.
- ➡ En reliant électriquement tout ce qui peut l'être.

Le phénomène électrostatique (1)

- Connu depuis 2500 ans.
- Le mot électron vient du grec (**ambre**).
- Statique vient du latin (**immobile**).

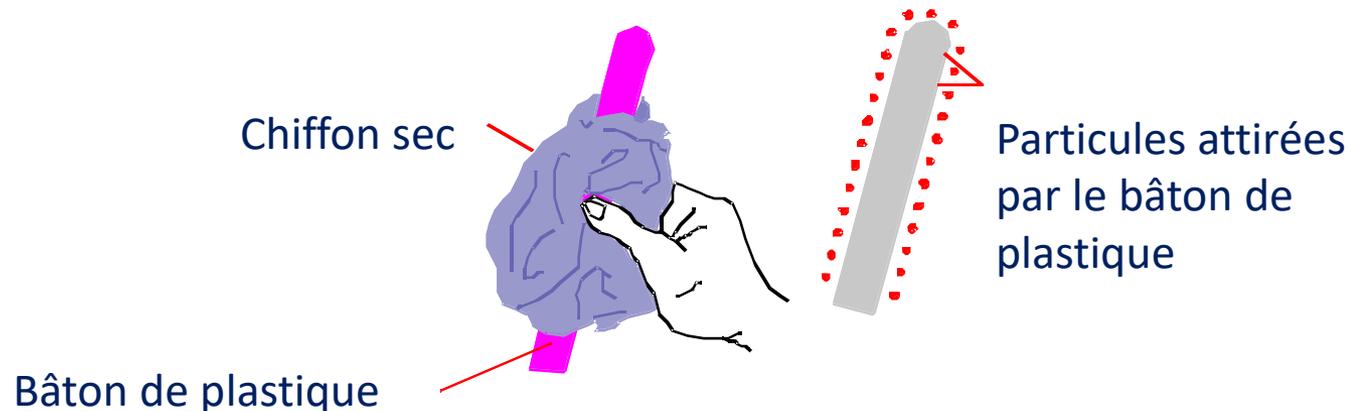


Thalès de Millet
625 av. J.-C – 548 av. J.-C.
Philosophe Grec

- **Thalès** (un fameux grec) observa qu'un morceau d'ambre attirait de fines particules s'il était frotté avec une étoffe. L'expérience peut facilement être réalisé en frottant une règle en plastique avec une chiffon sec.

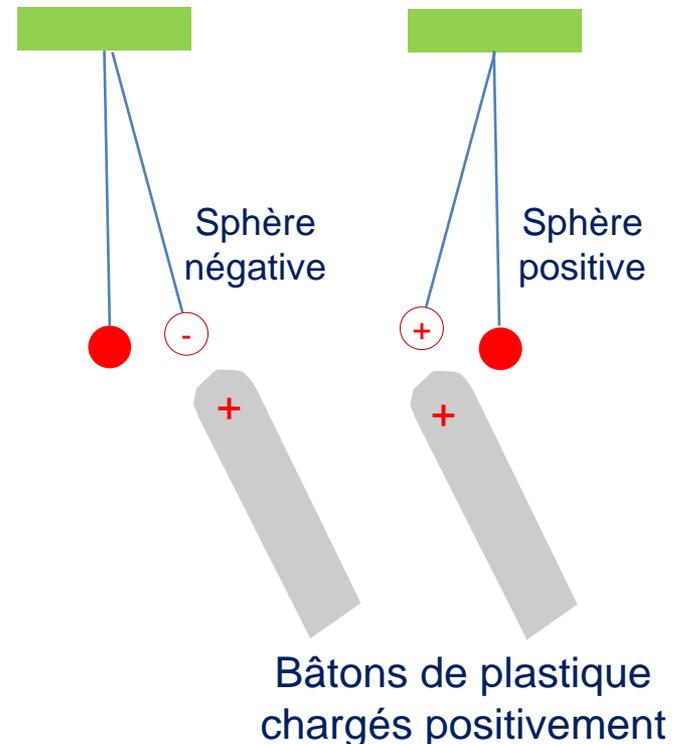
Le phénomène électrostatique (2)

- Un matériau neutre (électriquement) possède la même quantité d'électricité positive et négative.
- Lorsque le chiffon frotte la règle, les charges négatives (électrons) de cette dernière passent sur le chiffon. La règle possède donc un excès de charges positives.



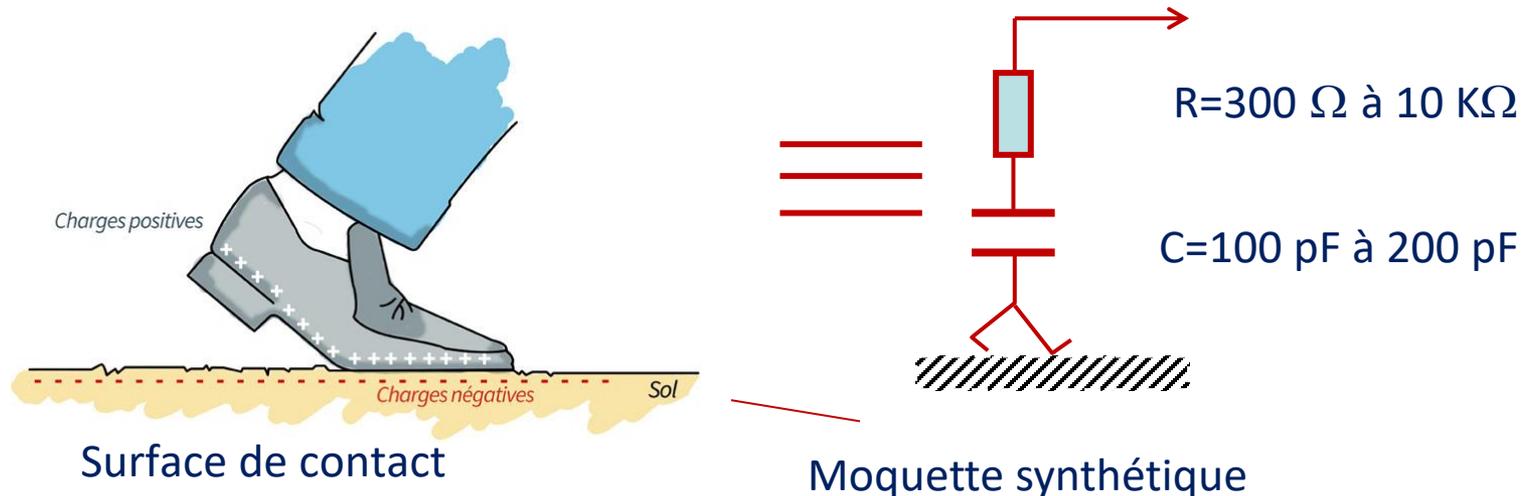
Force entre 2 corps chargés

- Il est possible de trouver des corps chargés positivement (moins d'électrons que de charges positives) et des corps chargés négativement (plus d'électrons que de charges positives).
- Deux charges de signe opposé s'attirent.
- Deux charges de même signe se repoussent.



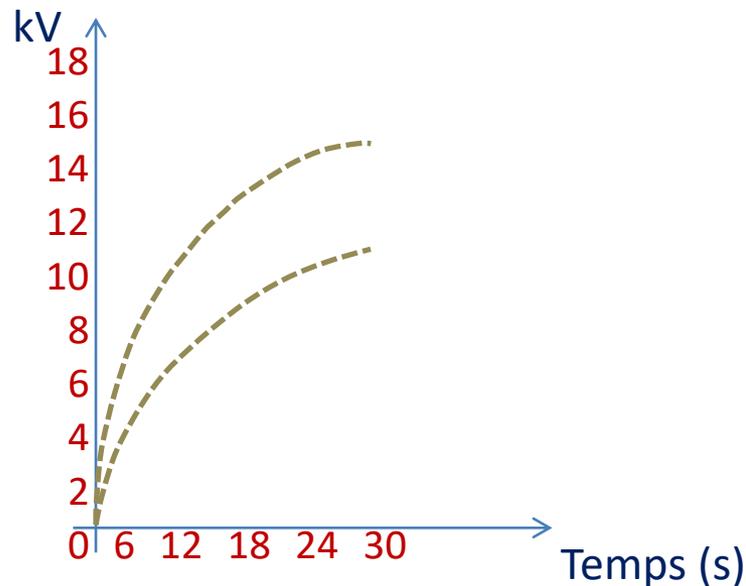
Exemple : La charge d'une personne (1)

Quand nous marchons sur un sol isolant (une moquette par exemple) avec des chaussures, il se produit généralement un certain désagrément lorsque l'on touche un objet métallique relié au sol.



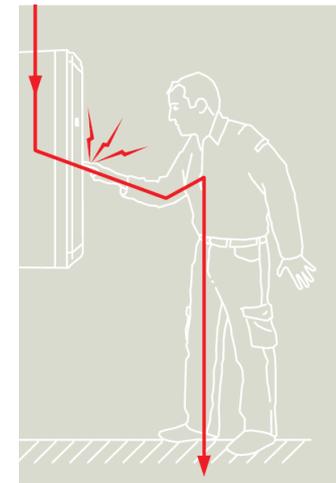
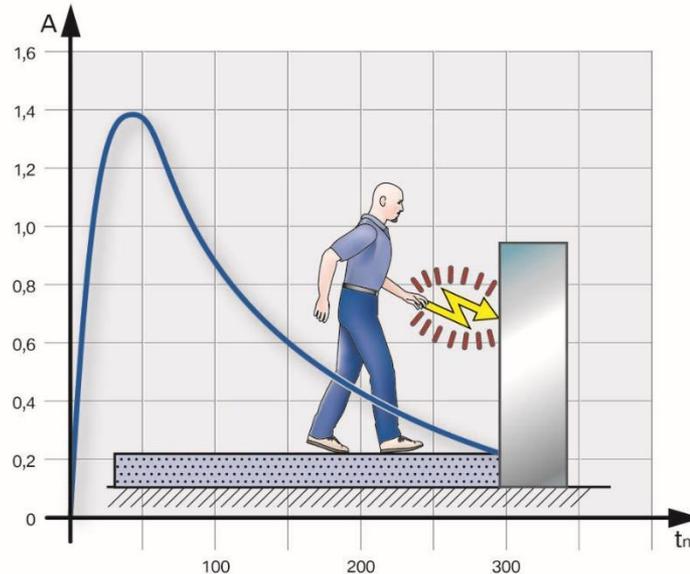
Exemple : La charge d'une personne (2)

- En marchant, nos semelles arrachent du sol des électrons et se chargent négativement.
- A chaque pas, la tension de notre corps par rapport au sol augmente...
- Entre les pas, il se produit une décharge et au bout de quelques dizaines de secondes, la décharge équilibre la charge (heureusement).

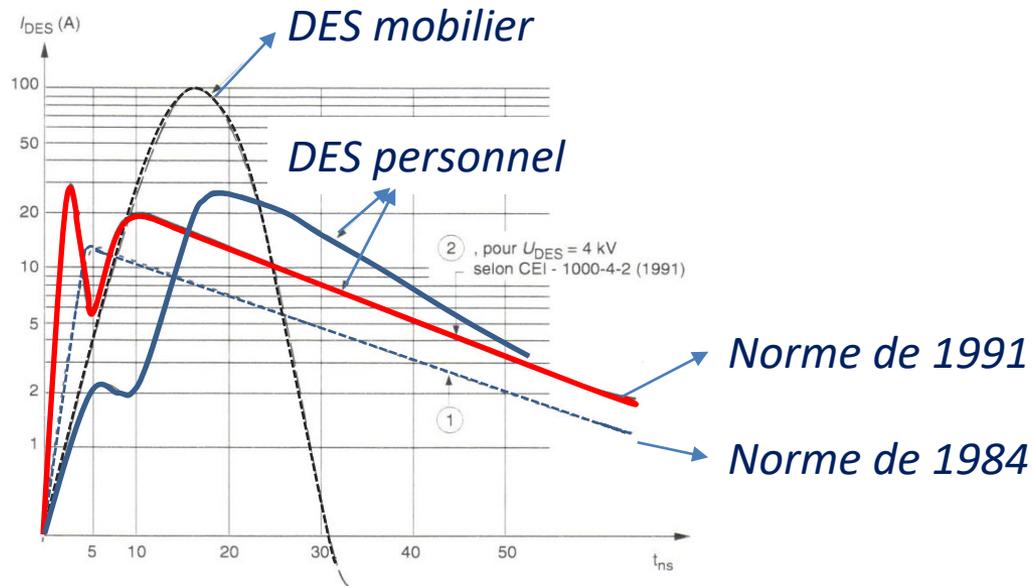


Exemple : La charge d'une personne (3)

- Si l'on touche un corps conducteur relié à la terre, il se produit une décharge brutale du corps au travers la terre avec les désagréments que l'on connaît...

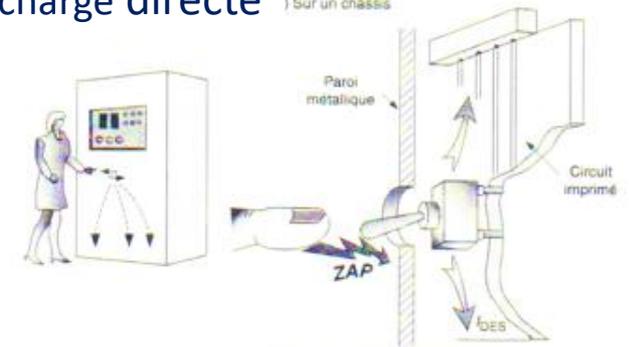


Formes d'ondes et scénarios



D'après Référentiels DUNOD
Maitrise de la CEM

Décharge directe



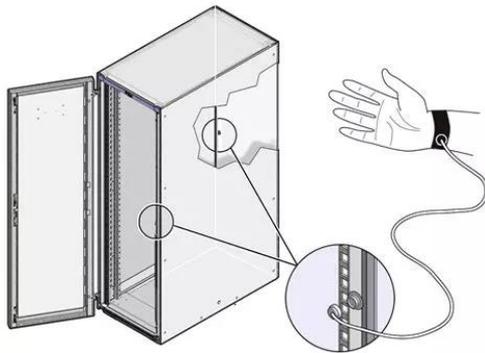
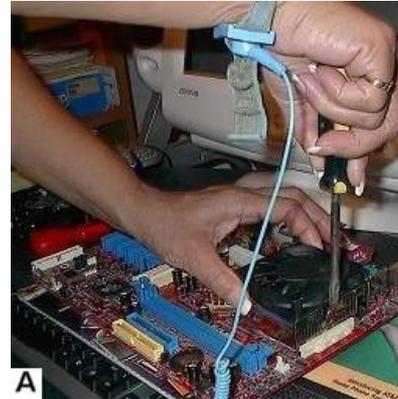
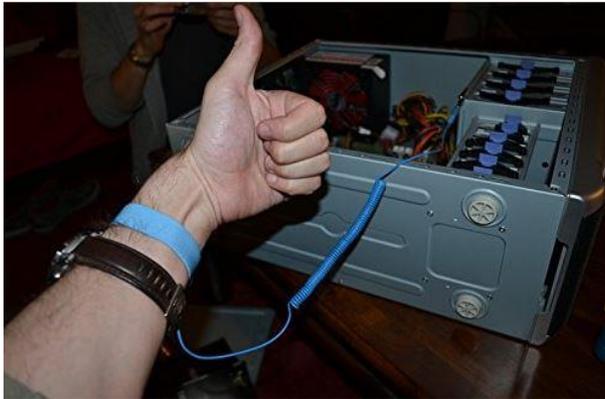
B) Sur des composants accessibles :
(interrupteurs, voyants, broches de connecteur, etc...)

Décharge indirecte



Protéger le matériel sensible

- Lorsque l'on manipule du matériel sensible, il vaut mieux utiliser un bracelet anti-électricité statique...



Il faut éviter les différences de potentiel entre la personne et le matériel

Exemple : L'avion (1)

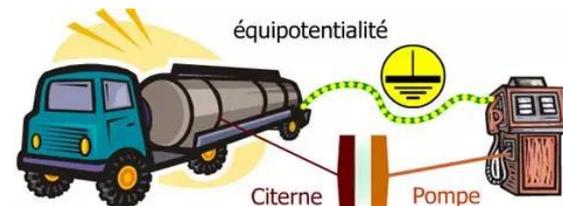


- Un avion en vol se charge considérablement.
- Dès que l'avion est à l'arrêt, on fait le plein de kérosène.
- Si aucune précaution n'était prise, il y aurait une décharge électrostatique entre l'avion et le kérosène du camion citerne avec une explosion à la clé !
- **Comment faire ?**

Exemple : L'avion (2)

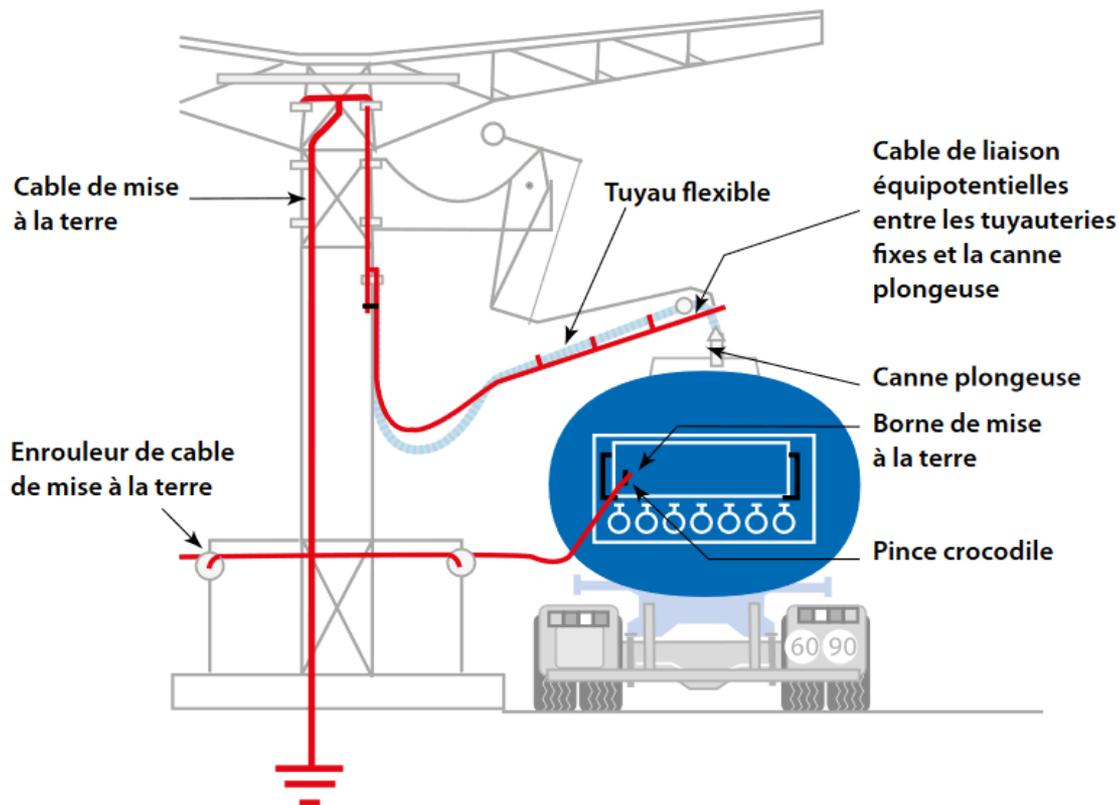


- Un avion en vol se charge considérablement.
- Dès que l'avion est à l'arrêt, on fait le plein de kérosène.
- Si aucune précaution n'était prise, il y aurait une décharge électrostatique entre l'avion et le kérosène du camion citerne avec une explosion à la clé !
- **Comment faire ?**
- **Pour éviter ce type de problème, on assure en premier lieu l'équipotentialité de l'avion et du camion par un câble courant le long du tuyau de kérosène.**



Exemple : Le camion citerne

- L'écoulement du liquide dans le tuyau charge ce dernier.



Mise à la terre d'une citerne

Source : INRS

Exemple : La voiture (1)

- Par temps sec, il est fréquent que l'on prenne une décharge électrique en descendant de voiture.
- Pourquoi ?



Exemple : La voiture (2)

- Par temps sec, il est fréquent que l'on prenne une décharge électrique en descendant de voiture.

- Pourquoi ?



- La charge électrostatique est obtenue par le frottement de nos vêtements sur les sièges en synthétique. On peut limiter l'effet désagréable en procédant de la manière suivante : ouvrir la portière, tenir le haut de la portière avec une main, puis mettre ensuite les pieds à terre.

Explications



1- Le conducteur est chargé, la voiture est flottante.



2- Quand le conducteur touche la portière : la voiture et le conducteur ont la même charge.



3- Quand le conducteur met le pied au sol : la voiture et le conducteur se déchargent dans le sol.

Compatibilité Electromagnétique de tous les jours

Partie 2

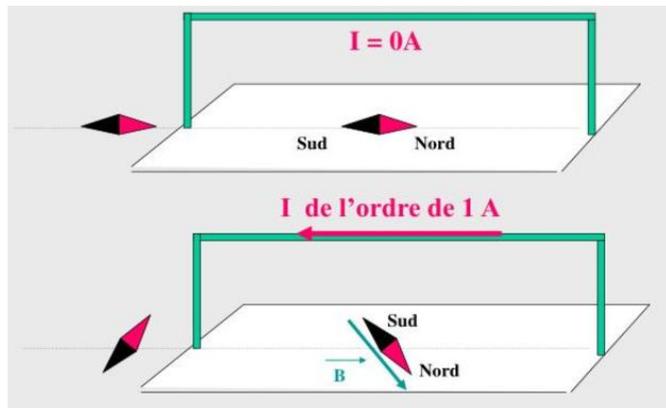
Partie 2

- Courant et champ magnétique
- Le champ magnétique/électrique
- L'onde électromagnétique
- Caractéristiques d'une onde
- Les effets du champ magnétique
- Le champ magnétique terrestre
- Le champ magnétique : quelques chiffres
- Les effets du champ électrique
- Le champ électrique : quelques chiffres
- Impédance de l'onde électromagnétique
- Rayonnements naturels
- Danger des ondes électromagnétiques
- Mode de transmission des perturbations/mode différentiel/mode commun
- Exemple

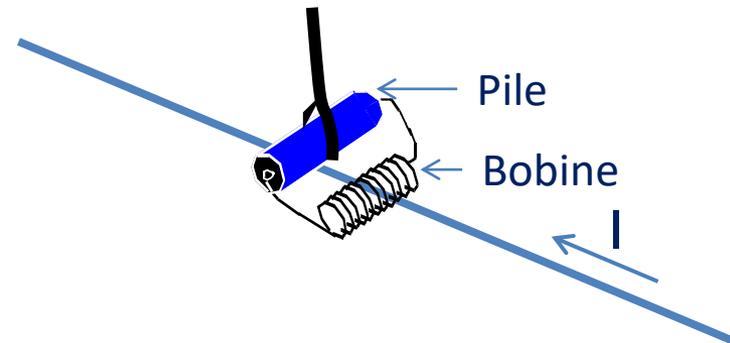
Courant et champ magnétique

Au dessus d'une aiguille aimantée, plaçons un fil parcouru par un courant I ,

- 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.

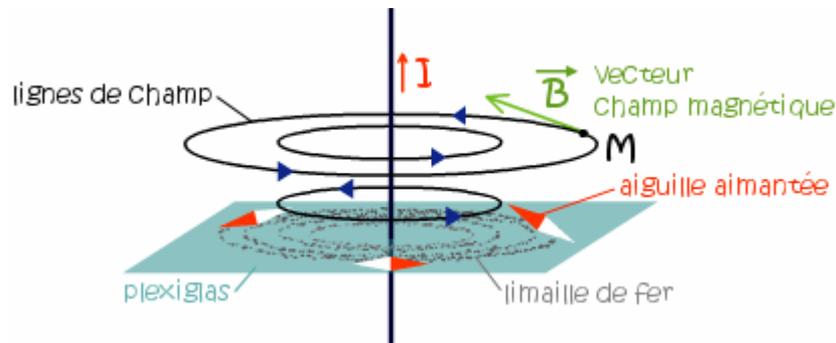
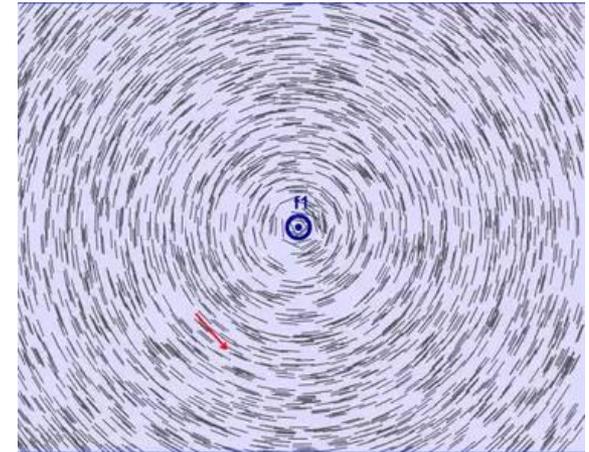
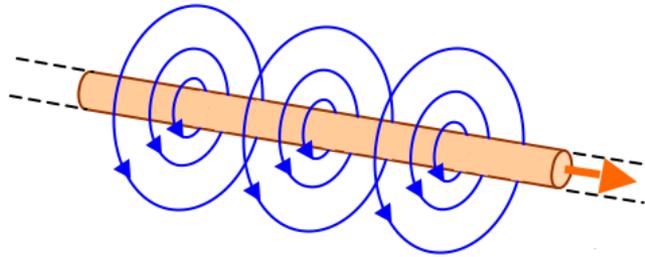


Hans Christian Orsted (1777-1851)



Un courant I parcourant un conducteur engendre un champ magnétique H exprimé en A.m^{-1} ou en Tesla ($1\text{A.m}^{-1} \sim 1,25\mu\text{T}$).

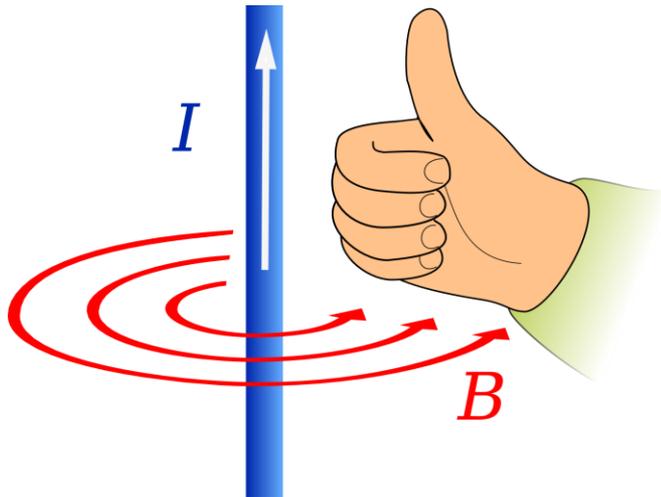
Le champ magnétique (1)



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

Le champ magnétique (2)

- La règle de la main droite.

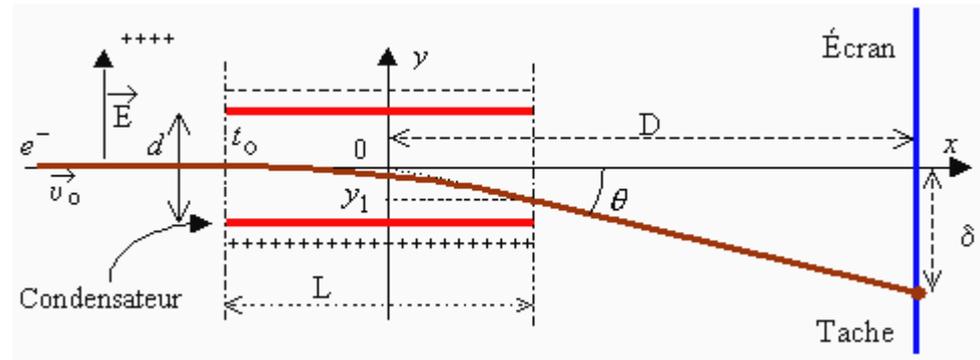
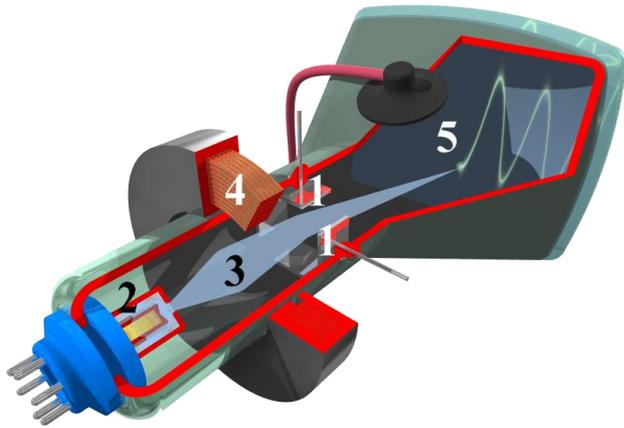


Le champ magnétique est un vecteur.
Il faut trouver sa direction. On utilise la
règle de la main droite.

Le champ magnétique (3)

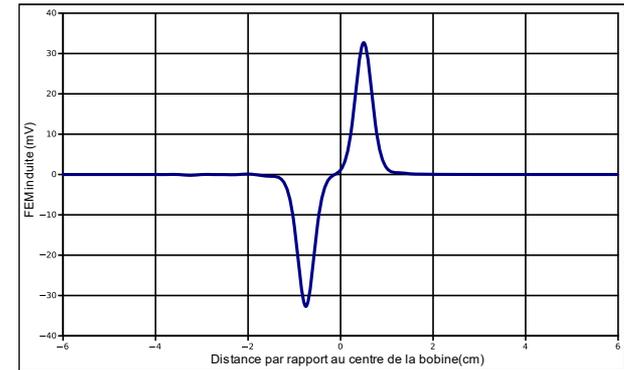
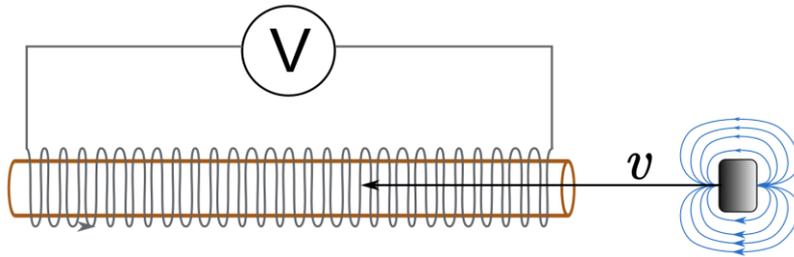
- De même, considérons un fil électrique parcouru par un courant I et bobiné parallèlement à un tube cathodique. Ceci est équivalent à placer un aimant perpendiculairement au tube cathodique.

Un champ magnétique dévie un faisceau d'électrons.



L'expérience de Faraday

- Un aimant traversant une bobine.

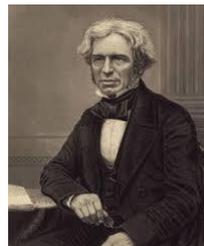


- Si l'aimant est immobile : aucune tension.
- Si l'aimant se déplace vers la bobine : une tension V est mesurée.
- La tension augmente jusqu'au centre de la bobine puis change de signe.

Michael Faraday

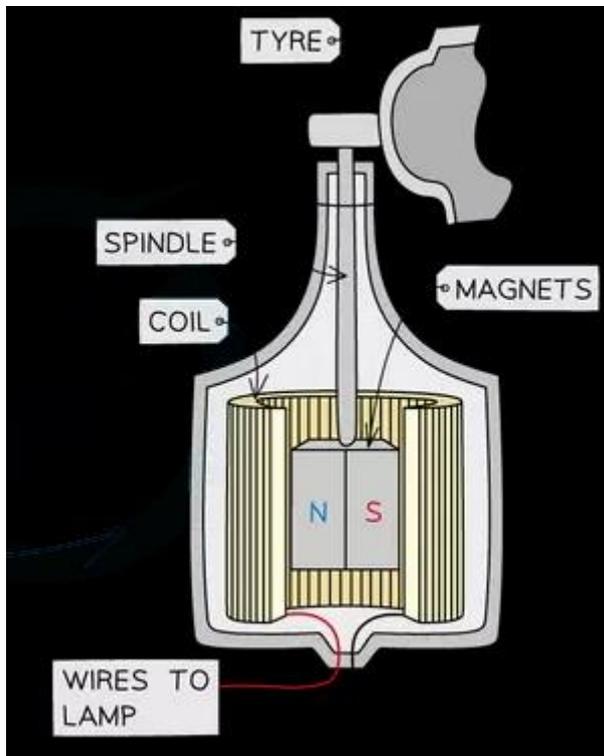
1791-1867

Physicien et chimiste anglais



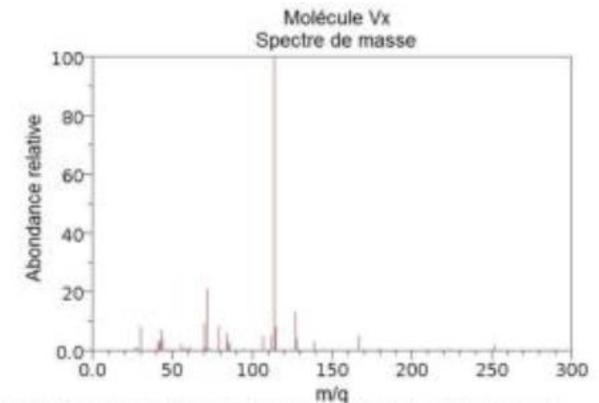
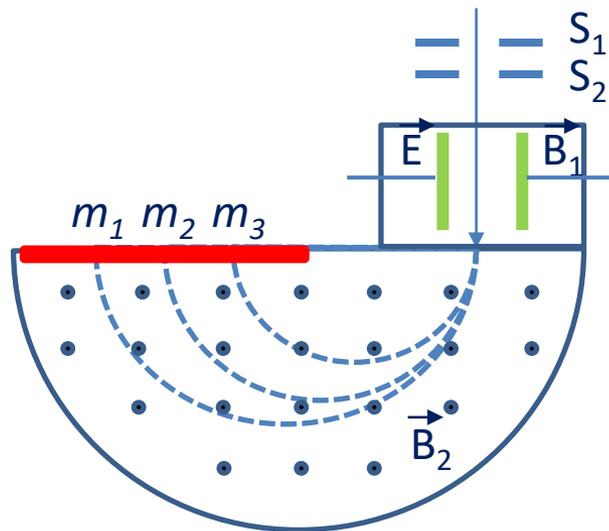
La dynamo du vélo

- Un aimant tourne dans une bobine.



Application : le spectromètre de masse

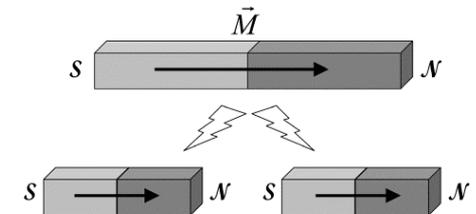
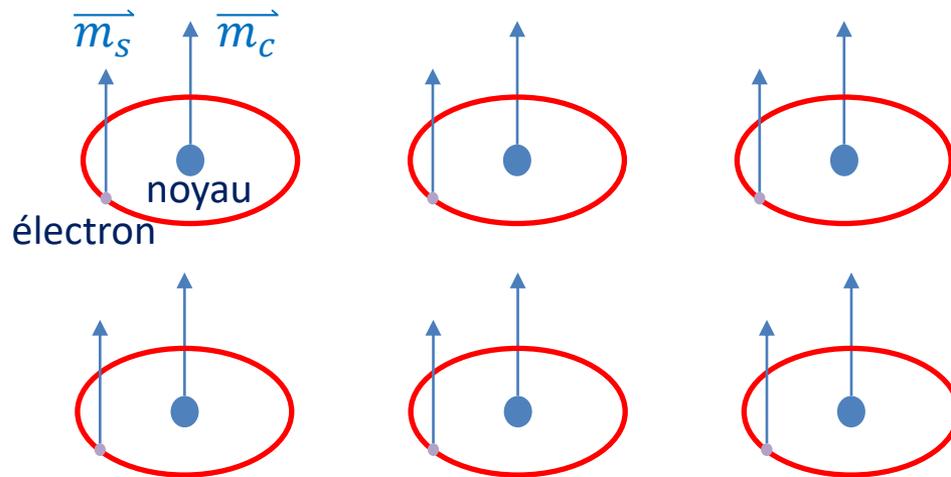
- On sépare des ions par un champ magnétique.
- Conçu par **J. J. Thomson en 1912**.



Joseph John Thomson
(1856-1940)
Physicien britannique
Prix Nobel de physique (1906)

Pourquoi un aimant est magnétique ?

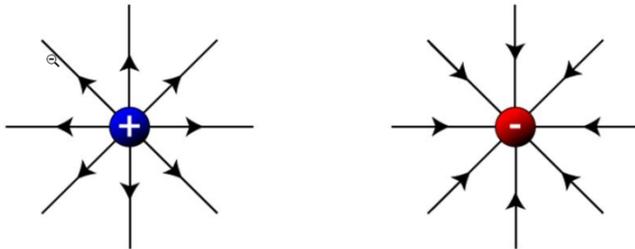
- Le **moment magnétique** permet de caractériser l'intensité d'une source magnétique, s'exprime en $A.m^2$.
- Dans un aimant, à l'échelle microscopique, les moments magnétiques des atomes ou des molécules s'alignent.



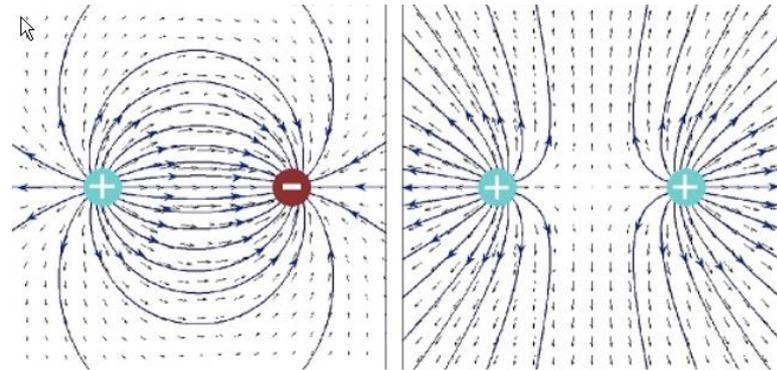
Fer, cobalt, nickel...

Le champ électrique (1)

- Une tension sur un conducteur engendre un champ électrique.



Lignes de champs créées par une charge ponctuelle



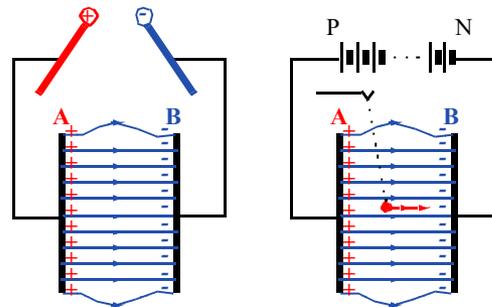
Lignes de champs créées par deux charges ponctuelles

Le champ électrique (2)

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.

Le champ électrique s'exprime en V/m ($V.m^{-1}$).



Champ électrique entre deux plaques

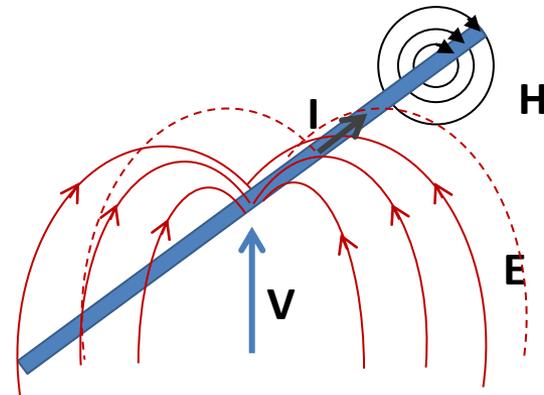
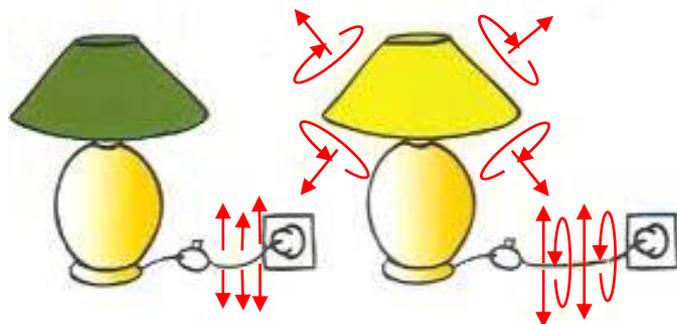
L'onde électromagnétique

Nous avons vu qu'un conducteur :

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

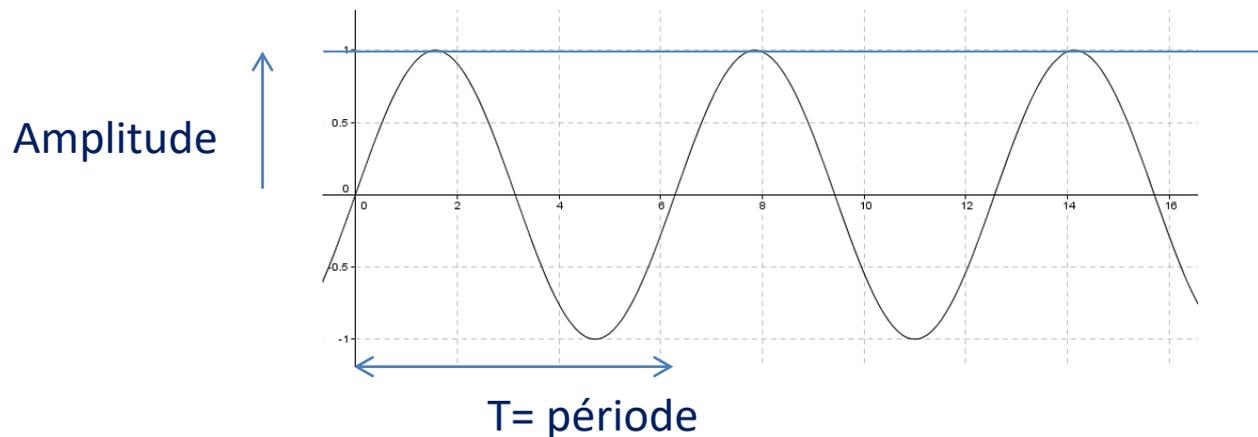
Ces deux effets conjugués forment le champ électromagnétique.

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.



Caractéristiques d'une onde

- Quelques paramètres :



- La fréquence = le nombre de périodes par seconde, s'exprime en Hertz.

Longueur d'onde

- La longueur d'onde (en mètre) est la distance parcourue par la lumière pendant un temps égal à une période ! $\lambda = \frac{c}{f}$



Fréquences	Longueur d'onde
3 - 30 Hz	100000 km-10000 km
30 kHz - 30 kHz	Kilométrique ou ondes longues, 10 km à 1 km
300 kHz -3 MHz	Hectométrique ou ondes moyennes, 1 km à 100 m
3 MHz – 30 MHz	Décamétrique ou ondes courtes, 100 m à 10 m
30 MHz – 300 MHz	Métrique, 10 m à 1 m
300 MHz – 3 GHz	Décimétrique, 1 m à 10 cm
3 GHz – 30 GHz	Centimétrique, 10 cm à 1 cm
30 GHz – 300 GHz	Millimétrique, 1 cm à 1 mm

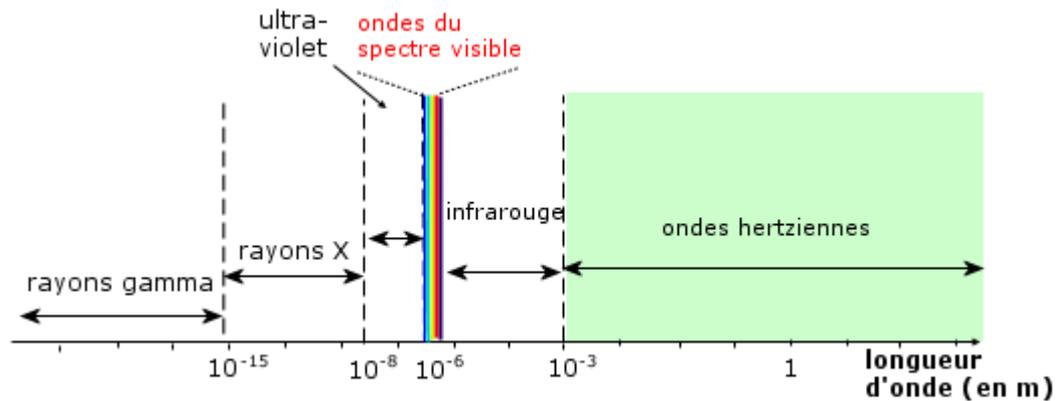
Taille de l'antenne
Puissance
Portée



+++

La gamme des ondes électromagnétiques

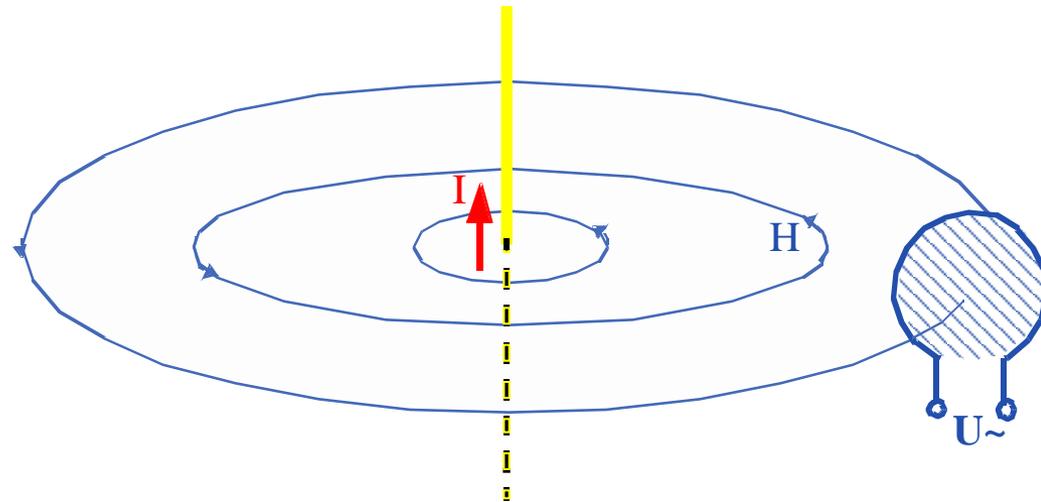
- Spectre électromagnétique.



Les effets du champ magnétique

- 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.



L'effet de peau

- Quand la fréquence du signal dans un conducteur augmente :
 - celui-ci a tendance à circuler sur la périphérie du conducteur.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\sigma_r \mu_r \pi f}}$$

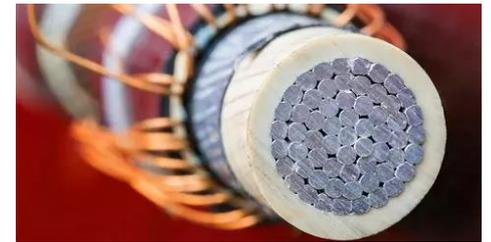
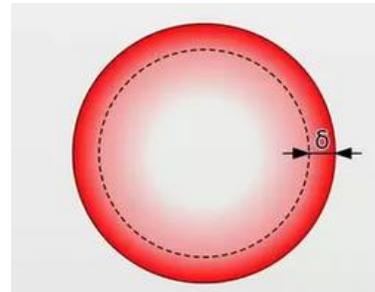
à 50 Hz : 9,4 mm
à 10 kHz : 0,66 mm
à 100 kHz : 0,21 mm
à 1 MHz : 66 μm
à 1 GHz : 2,1 μm

δ Épaisseur de peau (m)

σ_r Conductivité du matériau ($\Omega \cdot \text{m}$)

μ_r Perméabilité magnétique ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)

f Fréquence en Hz



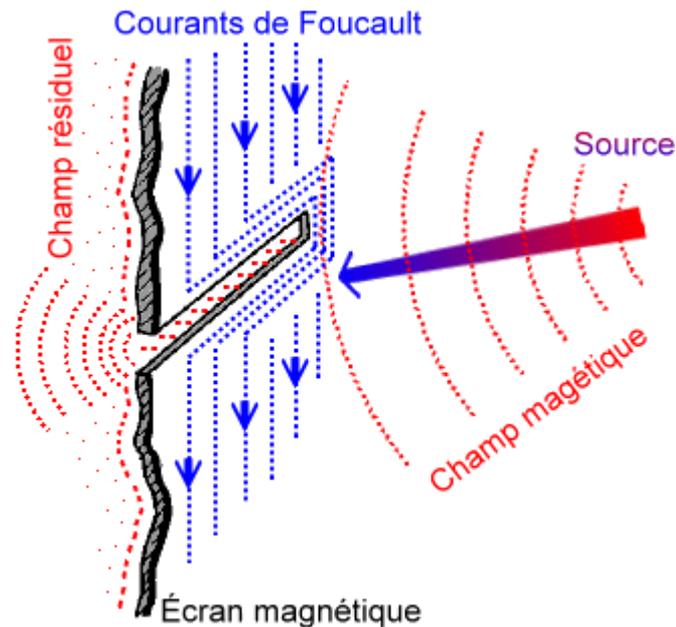
Le champ magnétique et la matière

Un champ magnétique variable est absorbé par la matière et crée des courants (de Foucault).

$$A_{dB} = \frac{8,7 \cdot d}{\delta}$$

$$\delta = \frac{66}{\sqrt{\sigma_r \cdot \mu_r \cdot f_{MHz}}}$$

- d Epaisseur du blindage
- δ Epaisseur de peau
- σ_r Conductivité du matériau
- μ_r Perméabilité magnétique



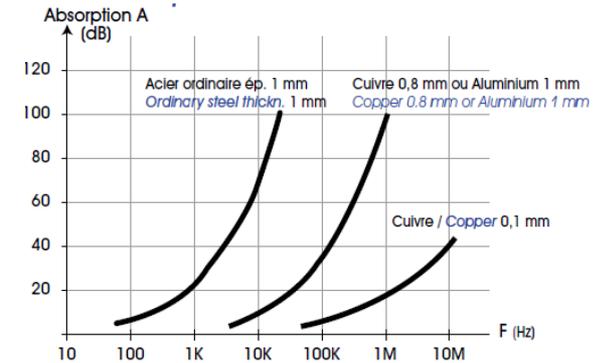
Léon Foucault
1819-1868
Physicien et
astronome français

Atténuation du champ magnétique

$$A_{dB} = \frac{8,7 \cdot d}{\delta}$$

$$\delta = \frac{66}{\sqrt{\sigma_r \cdot \mu_r \cdot f_{MHz}}}$$

$$A_{dB} = 0.13 \cdot d \cdot \sqrt{f_{MHz} \cdot \sigma_r \cdot \mu_r}$$



Matériau	Conductivité relative	Perméabilité relative
Cuivre	1	1
Aluminium	0,6	1
Acier ordinaire	0,17	300-700
Monel (Ni+Cu)	0,07	1
Etain	0,15	1
Mumétal	0,03	30 000
Nickel	0,2	600

Réduire le champ magnétique

- Pour réduire un champ magnétique,
 - il faut l'absorber !
 - il faut, si possible, s'éloigner.
- Utilisation de matériau à forte perméabilité,
 - Fer, acier doux, mu-métal (nickel, fer, molybdène).



Le champ magnétique terrestre

- Le noyau de la terre est composé de fer (création d'un champ magnétique), ce qui nous protège du rayonnement cosmique (bouclier) !
 - Plus faible aux pôles : **aurores boréales et australes** (Interaction des particules du vent solaire avec la haute atmosphère.).
- Le champ magnétique terrestre varie de $30\mu\text{T}$ à $60\mu\text{T}$. Au centre de la France $\sim 47\mu\text{T}$.
- Le champ magnétique sous une ligne THT de 400.000 Volts : max $100\mu\text{T}$, ne nous dérange pas vraiment !
 - **Ce sont plutôt les variations rapides du champ qui semblent poser des problèmes.**



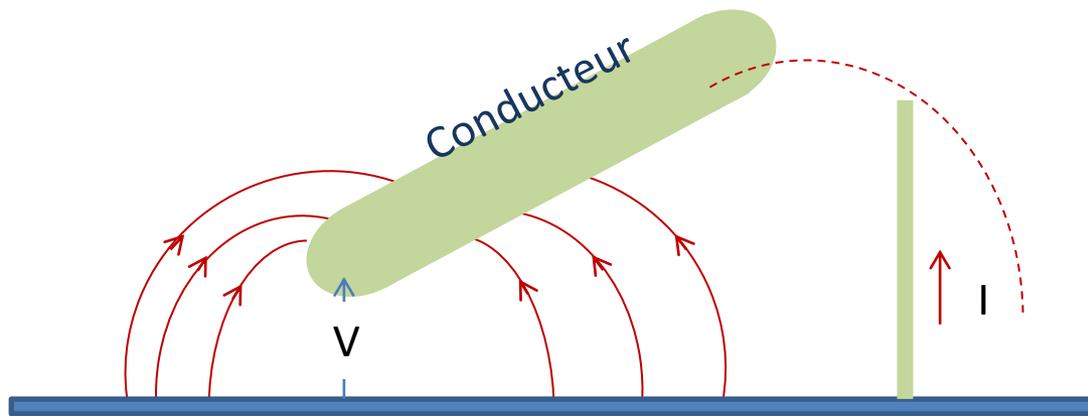
Le champ magnétique : Quelques chiffres

Appareil	À 3 cm (μT)	À 30 cm (μT)	À 1 m (μT)
Sèche cheveux	6-2000	0,01-7	0,01-0,03
Rasoir électrique	15-1500	0,08-9	0,01-0,03
Aspirateur	200-800	2-20	0,13-2
Tube fluorescent	40-400	0,5-2	0,02-0,25
Four micro-ondes	73-23	4-8	0,25-0,6
Radio portable	16-56	1	<0,01
Four électrique	1-50	0,15-3	0,01-0,04
Lave linge	0,8-50	0,15-3	0,01-0,15
Fer à repasser	8-30	0,12-0,3	0,01-0,03
Lave vaisselle	3,5-20	0,6-3	0,07-0,3
Ordinateur	0,5-30	<0,01	
Réfrigérateur	0,5-1,7	0,01-0,25	<0,01
TV couleur	2,5-50	0,04-2	0,01-0,15

Valeur max recommandée à 50 Hz : 100 μT

Les effets du champ électrique (1)

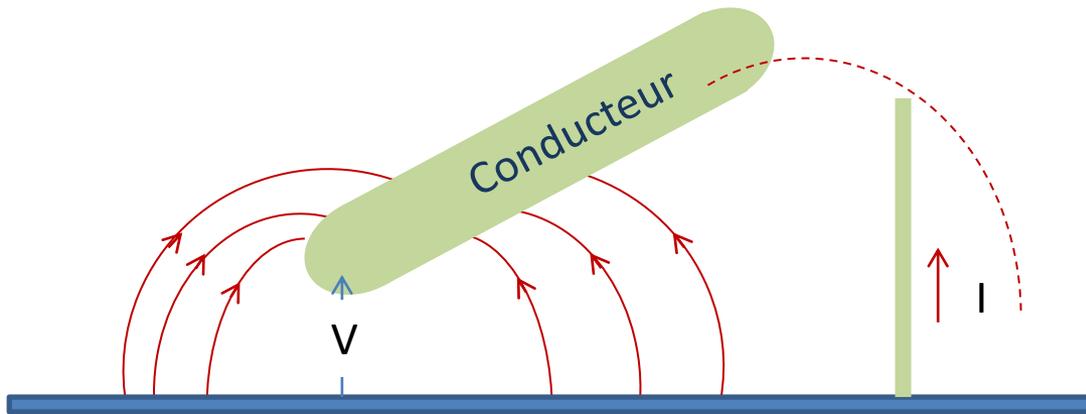
- L'effet du champ électrique (variable) est d'induire un courant sur les fils parallèles aux lignes de champ.



C'est le principe de fonctionnement d'une antenne en réception.

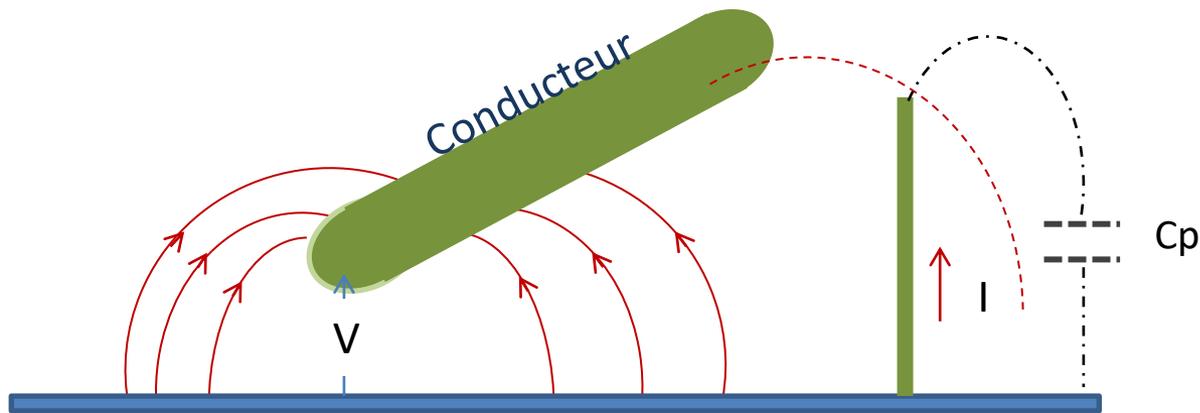
Les effets du champ électrique (2)

- Mais où va le courant I ?



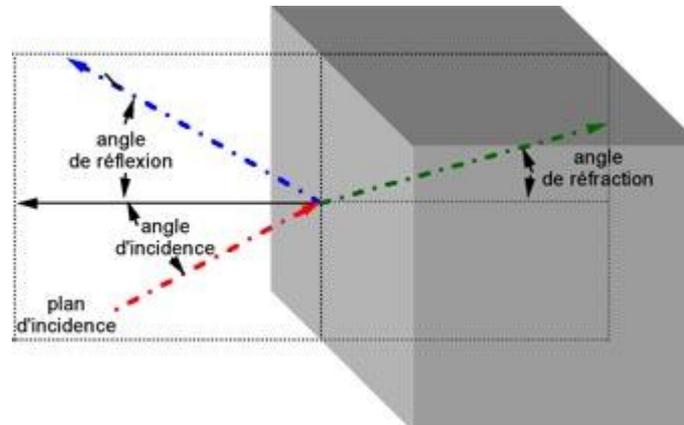
Les effets du champ électrique (3)

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



Le champ électrique et la matière

- Le champ électrique est réfléchi comme la lumière sur un miroir.
- Une simple feuille d'aluminium permet de le réfléchir.



La cage de Faraday

- Inventé par le physicien anglais **Michael Faraday** en **1836**,
 - un champ électrique externe provoque la répartition des charges dans le matériau conducteur,
 - annule l'effet du champ électrique à l'intérieur de la cage,
 - tout ce qui se trouve dans l'enceinte est protégé.



Un grillage conducteur fait office de cage de Faraday

Le champ électrique : Quelques chiffres

Appareil	Champ à 30 cm en Volt/m
Récepteur stéréo	180
Fer à repasser	120
Réfrigérateur	120
Mixeur	80
Grille pain	80
Sèche cheveux	80
TV couleur	60
Machine à café	60
Aspirateur	50
Four électrique	8
Ampoule électrique	5

Valeur max recommandée à 50 Hz : 5000 Volts/m

Pour aller un peu plus loin avec le champ électromagnétique (1)

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 du physicien écossais **James Clerk MAXWELL (1865)**...

La théorie :



Maxwell-Gauss

conservation du flux

Maxwell Ampère

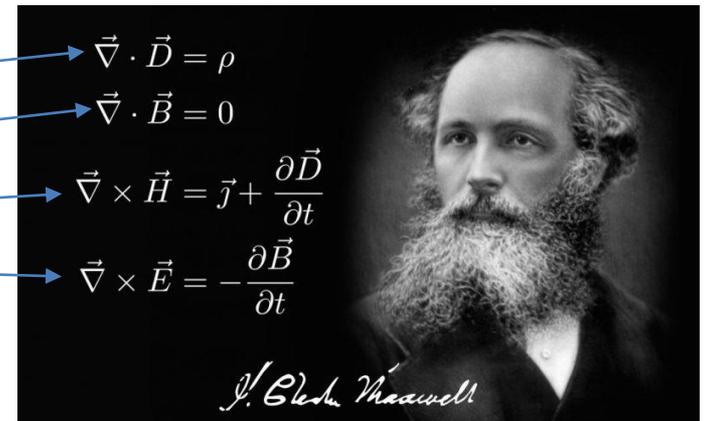
Maxwell-Faraday

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$



Au pied de la statue de Maxwell à Edinburgh

James Clerk Maxwell (1831-1879)

Pour aller un peu plus loin avec le champ électromagnétique (2)

- Le champ électromagnétique est constitué d'une **composante électrique** et d'une **composante magnétique**.
- Les 2 composantes sont liées ! Mais ...
- **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.

Pour aller un peu plus loin avec le champ électromagnétique (3)

- Rappel :

E en $V.m^{-1}$

H en $A.m^{-1}$

- Considérons le produit $E \times H$

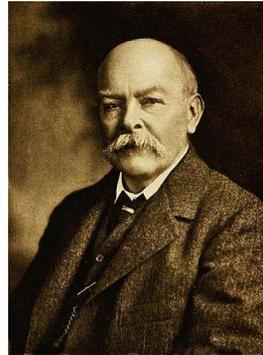
$E \times H = ?$

- Considérons le rapport

$E/H = ?$

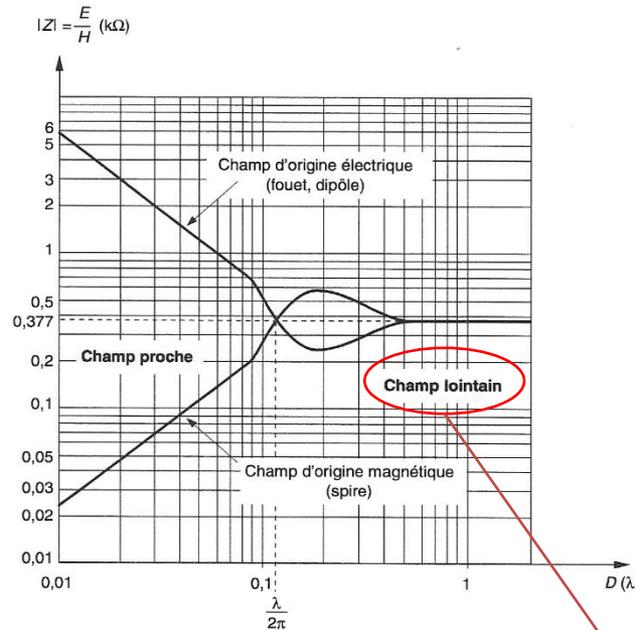
Pour aller un peu plus loin avec le champ électromagnétique (4)

- Le produit $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ est homogène à une puissance par m^2 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$. C'est le vecteur de Poynting (John Henry Poynting (1852-1914)), c'est la puissance rayonnée par l'onde.
- Le rapport \mathbf{E}/\mathbf{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).



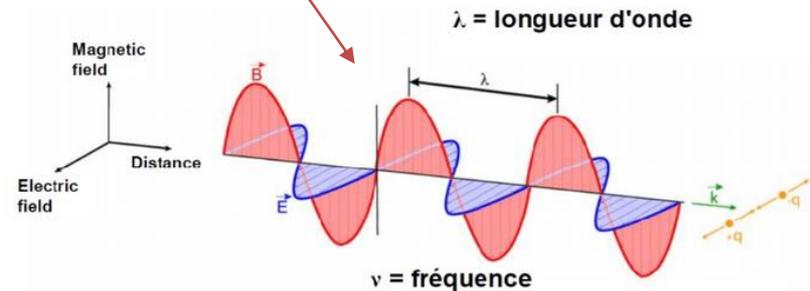
John Henry Poynting (1852-1914)
Physicien anglais

Impédance de l'onde électromagnétique



En champ lointain,
 $E/H = 120\pi = 377 \Omega$

La puissance de l'onde
 décroît comme le carré
 de la distance.

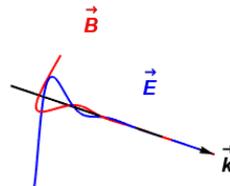


L'énergie d'une onde électromagnétique

- La relation de **Planck-Einstein** donne l'énergie d'une onde électromagnétique.

$$E = h.f$$

- Avec $h = 6,629.10^{-34}$ J.s, c'est la constante de **Planck**. f est la fréquence.
- L'énergie de l'onde dépend de la fréquence, plus la fréquence est élevée et plus l'énergie sera grande.



Source : [Wikimedia Commons](#)

Les unités sont importantes

- L'impédance de l'onde dans le vide (onde plane) $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \frac{E}{H}$
- Quelles sont les unités de μ_0 et de ϵ_0 ?
- La perméabilité du vide $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 12 \cdot 10^{-7} \simeq 10 \cdot 10^{-7} \simeq 10^{-6}$
- $\mu_0 = \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$, inductance d'un fil de 1 m dans le vide = $1 \mu\text{H}$ soit 10nH/cm .

La formule exacte :

ne donne pas un meilleur résultat.

$$L_{\text{HH}} = 0,2 \times L \times \left[\text{Ln} \left(\frac{2 \times L}{w} \right) + 0,5 + 0,22 \times \left(\frac{w}{L} \right) \right]$$

L : Longueur de la piste en mm

w : Largeur de la piste en mm

- $\epsilon_0 = \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$, capacité d'un fil de 1 m dans le vide.

Une expérience amusante

- **Mesure de la vitesse de la lumière avec un micro-ondes et du chocolat !**
 - Retirez le plateau du micro-ondes,
 - Placez une tablette de chocolat sur une assiette dans le micro-ondes,
 - Faites chauffer légèrement le chocolat !



Micro-ondes
Fréquence = 2,45 GHz



- La distance entre 2 points fondus correspond à une demi-longueur d'onde !

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad c = 2 \cdot \lambda \cdot f \quad c \sim 2 \times 6 \times 2,45 \cdot 10^{10} \sim 294\,000 \text{ km/s}$$

Source : [blog.sparkoh.be /kids/le-chocolat-un-delicieux-instrument-de-mesure/](http://blog.sparkoh.be/kids/le-chocolat-un-delicieux-instrument-de-mesure/)

Compatibilité Electromagnétique de tous les jours

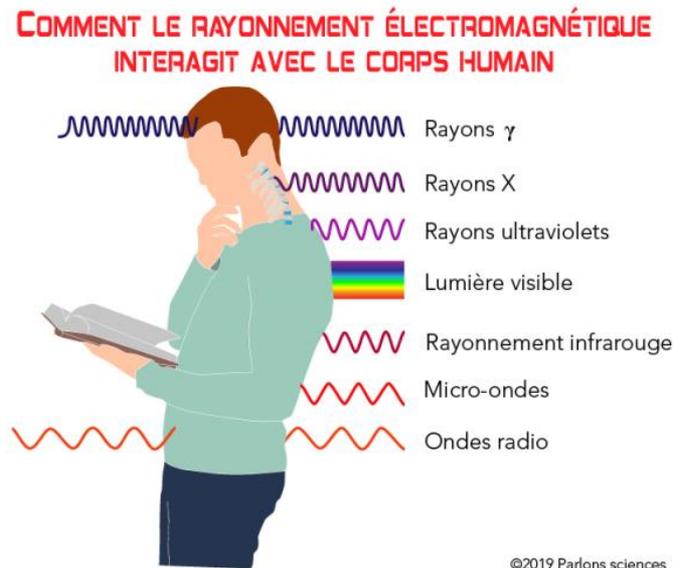
Partie 3

Partie 3

- Rayonnement naturel
- Les ondes électromagnétiques sont-elles dangereuses ?
- L'électrosensibilité
- Compteur Linky
- Téléphone portable, antennes relais, WiFi
- Les perturbations

Rayonnement

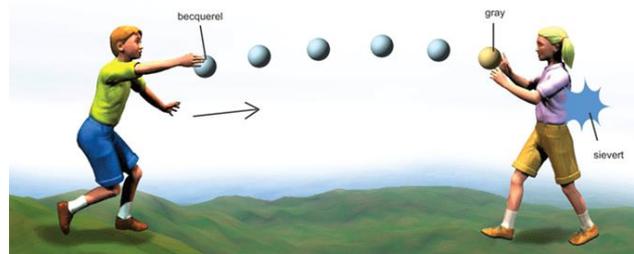
- Différents types de rayonnement,
 - rayonnements naturels et corpusculaires,
 - rayonnement électromagnétique.



Rayonnement naturel

Quantifier l'irradiation

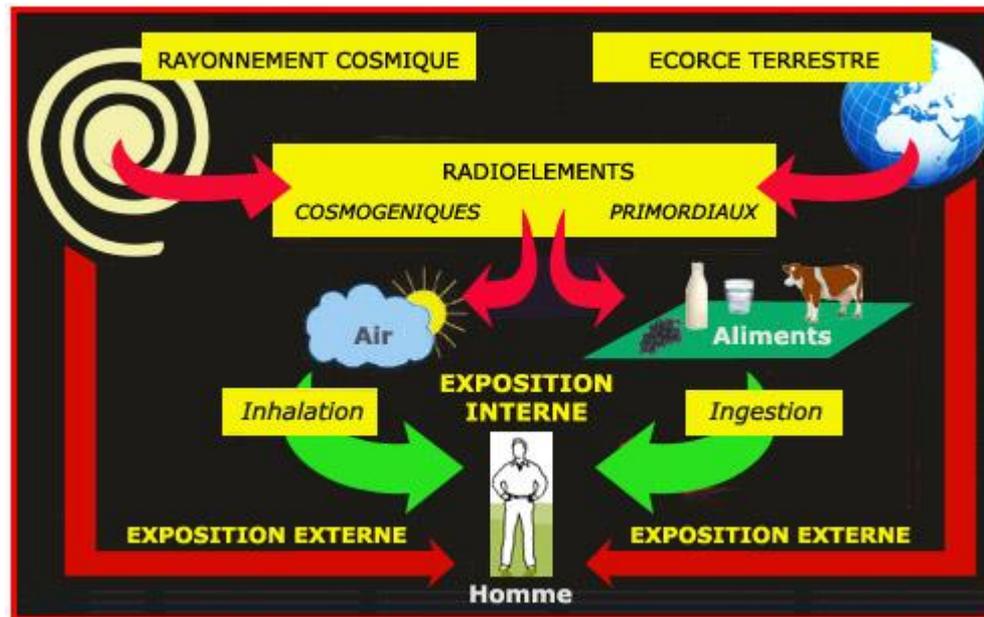
- **Le becquerel (Bq)**
 - Nombre de désintégrations de noyaux radioactifs par seconde,
 - 1 désintégration/seconde.
- **Le gray (Gr)**
 - Unité de mesure de la dose absorbée, c'est une énergie par unité de masse,
 - 1 joule/kilo.
- **Le sievert (Sv)**
 - Certains tissus et organes sont plus sensibles au rayonnement que d'autres.



Source : www.cea.fr/comprendre/...

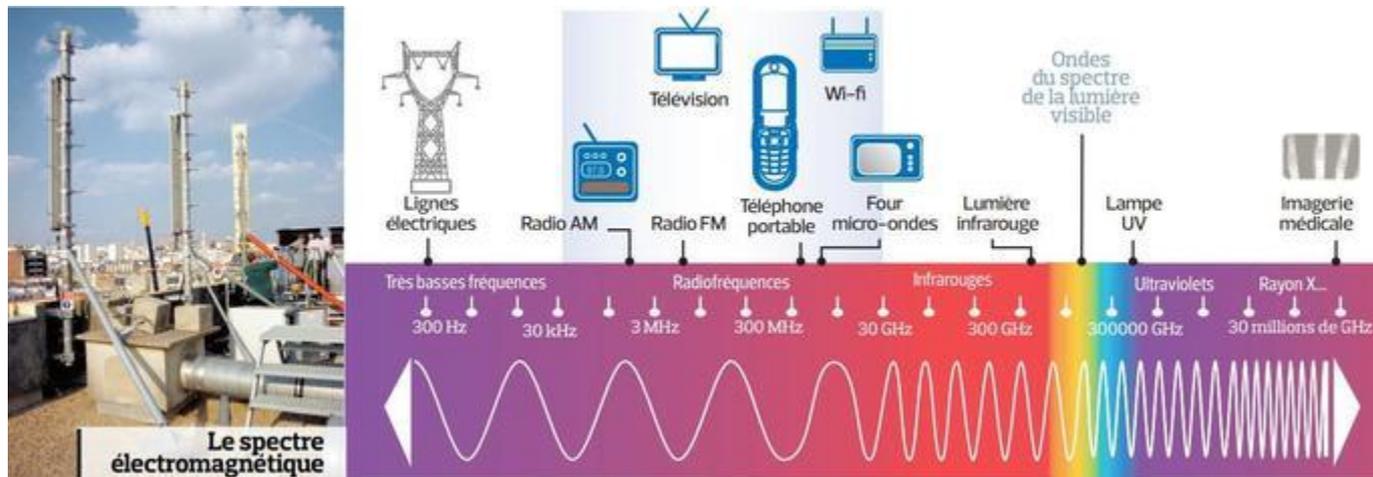
Rayonnements naturels

- Radioactivité naturelle présente (2,4 milli Sieverts), un examen médical ~ 1 mSv.
- Dans les roches de l'écorce terrestre.
- Bombardement cosmique.
- Contribue à la vie sur terre (températures plus clémentes).



Les ondes électromagnétiques sont-elles dangereuses ?

Le spectre électromagnétique



Le risque augmente avec la fréquence.

3 grandes catégories :

- Basses fréquences,
- Radiofréquences,
- Radiations ionisantes ($f > 300$ GHz).

Qu'est-ce que l'électro-sensibilité ?

- L'électrosensibilité ou sensibilité électromagnétique est une intolérance aux champs électromagnétiques.
- L'électrosensibilité n'est pas reconnue comme une maladie en France,
 - les personnes touchées sont bien malades mais on ne sait pas pourquoi.



Source : RTBF

L'électro-sensibilité



Un four à micro ondes est une enceinte fermée protectrice, la porte possède un écran type nid d'abeilles pour retenir les ondes. Mais...



- Pour se faire une idée, par soi même.
- Une expérience facile à réaliser :
1. Placer votre téléphone portable dans votre four à micro ondes !
 2. Fermer la porte.
 3. Appeler votre téléphone....

Le compteur « linky »



- Compteur intelligent.
- Les informations transitent par Courant Porteur en Ligne (*CPL*), 1 fois par jour pour une période de quelques secondes (75 KHz), (ce principe est utilisé depuis longtemps pour passer du tarif heures pleines/heures creuses).
- Champ électrique émis compris entre 0,2 et 3,9 Volts/m (**limite réglementaire de 87 V/m**).
- Champ magnétique rayonné de 0,26 μT (**limite réglementaire de 6,25 μT**).

Le téléphone portable

- Il faut considérer indépendamment 4 risques (proportionnel au nombre d'étoiles) :
 - Le champ électrique, *****
(entre 20 et 50 V/m),
 - le champ magnétique, *
 - l'effet thermique (micro-ondes), $dT < 0,1^{\circ}\text{C}$, *
 - psychologique. *****

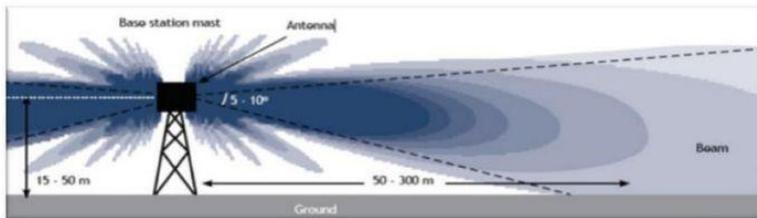
- RF de faible énergie (de 0,2 à 0,6 W),
- le **DAS** (Débit d'Absorption Spécifique)W/kg est utilisé
(ne présage pas des dégâts, limite réglementaire : 2 W/kg !).



Les antennes relais



- Puissance relativement faible (environ 30 W), c'est pourquoi il y a beaucoup d'antennes.
- Onde plane anisotrope (très peu d'énergie vers le bas).



Le champ rayonné décroît avec la distance !
A une distance de 10 m le champ est divisé par 10.

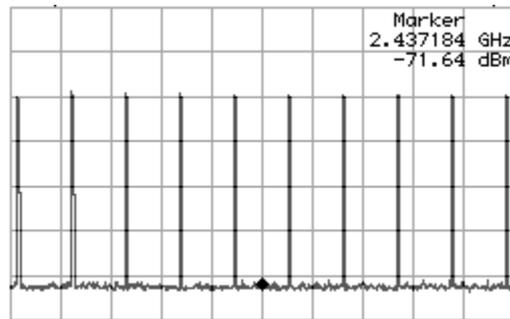
Le téléphone sans fil DECT

- DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunications*)
Téléphone sans fil numérique amélioré,
 - champ de 5,4 V/m à 30 cm (1880 à 1900 MHz pulsé à 100 Hz),
 - 1,7 mV/m en veille.
- ECO-DECT (faible puissance d'émission),
 - n'émet pas au repos.



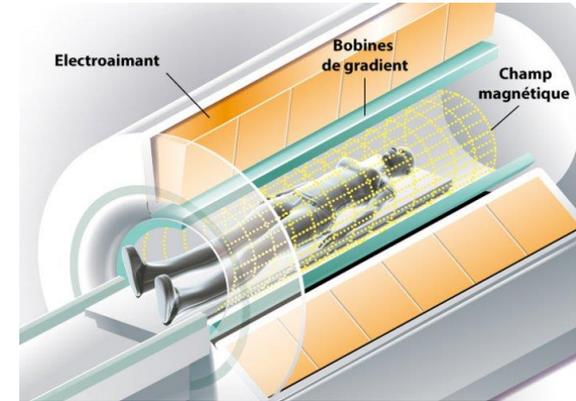
WiFi (*Wireless Fidelity*)

- Wifi (Normes 802.11a/b/g/n) puissance rayonnée : 100 à 200 mW.
- Balise à 10 Hz de 1,7 V/m à 1 m.
- Fréquences entre 2,4 GHz et 5 GHz.
- Eco-Wifi (réduction des ondes émises).



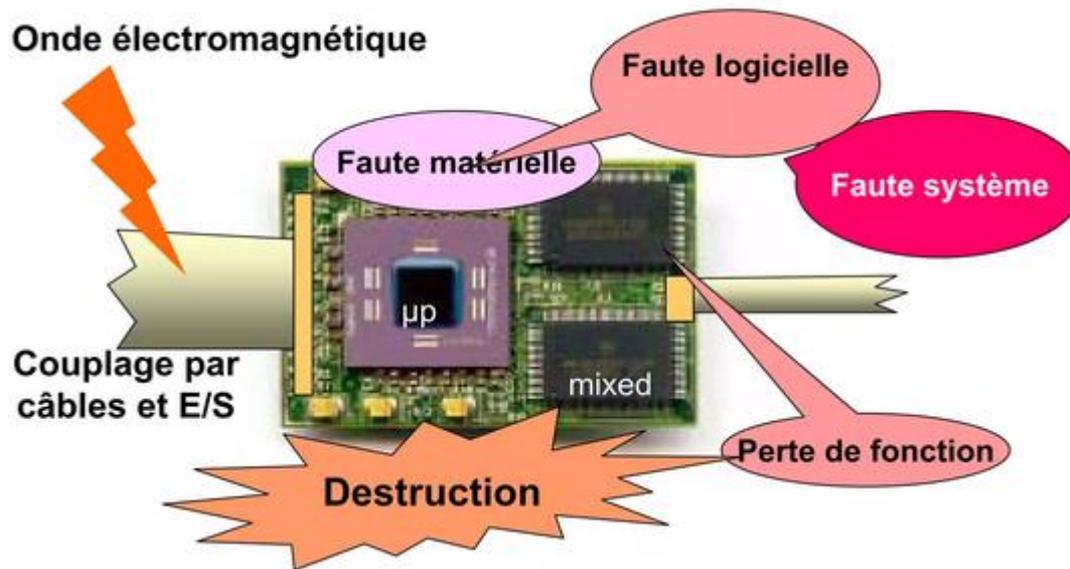
Les générateurs de champ magnétique

- L'*IRM* (Imagerie à Résonance Magnétique),
 - Très fort champ magnétique (de 0,1 à plus de 7 teslas).
- La plaque à induction,
 - le champ magnétique (à 23 KHz) préfère circuler dans le métal plutôt que dans l'air. (pour une puissance max de 6000 watts : $H \sim 1 \text{ A/m}$),
 - ne pas rester « collé » devant pendant une longue période,
 - bourdonnement possible dans les appareils auditifs,
 - attention aux porteurs de stimulateur cardiaque.
 - Le champ électrique rayonné est relativement faible (36 V/m).



Les perturbations dans les circuits

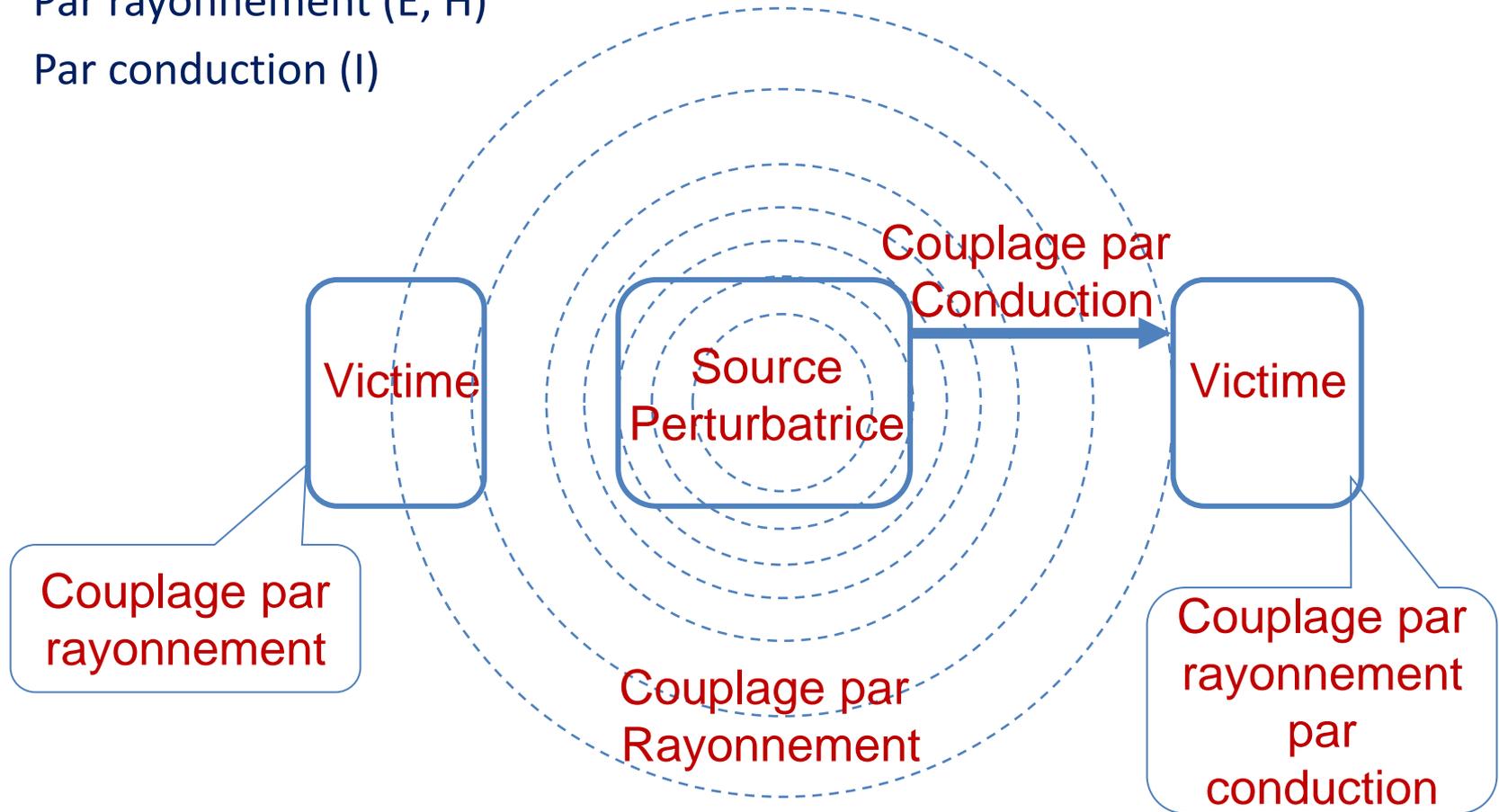
- Une perturbation peut être liée :
 - au champ électromagnétique,
 - par couplage.



Source : LAAS - CNRS

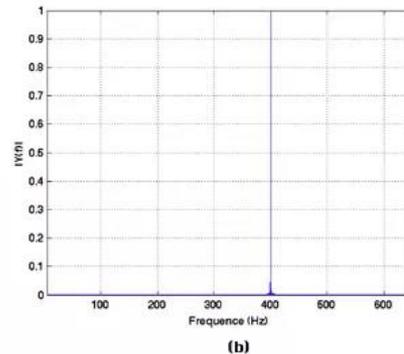
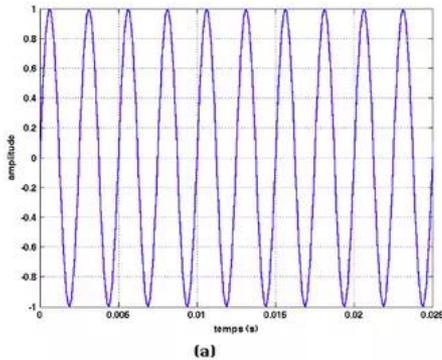
Modes de transmission des perturbations

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

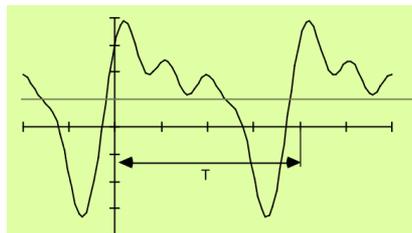


Intérêt de la représentation spectrale

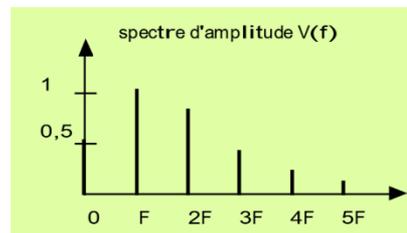
- La représentation spectrale consiste à extraire les différentes fréquences d'un signal et à les représenter.



Fréquence unique



Oscilloscope



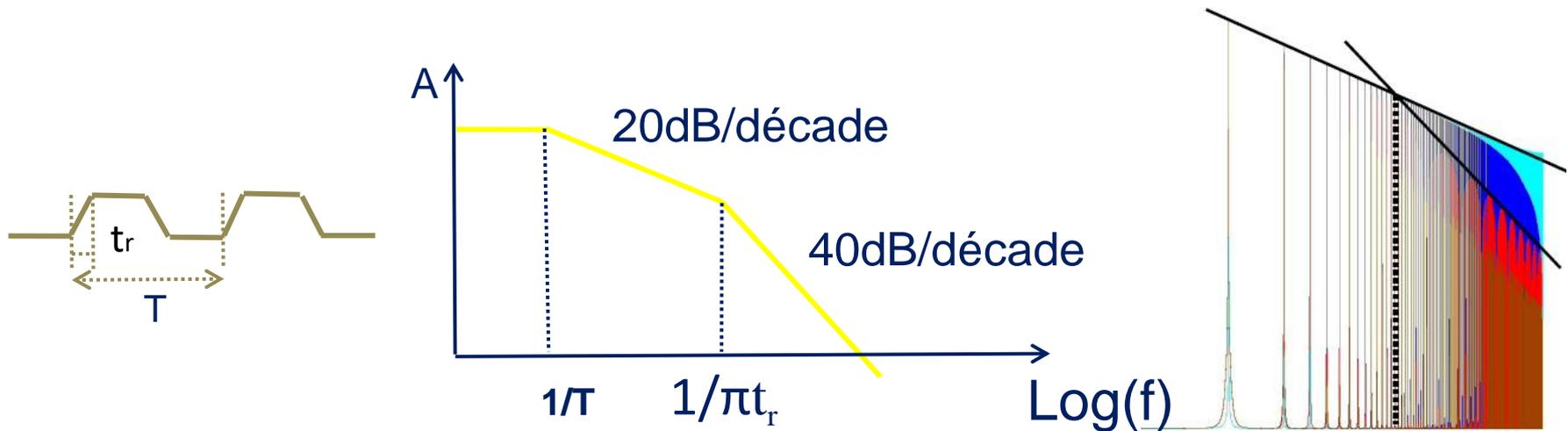
Fréquences multiples

Fondamentale (F) et harmoniques (2F, 3F,...)

Analyseur de spectre

Spectre d'un train trapézoïdal

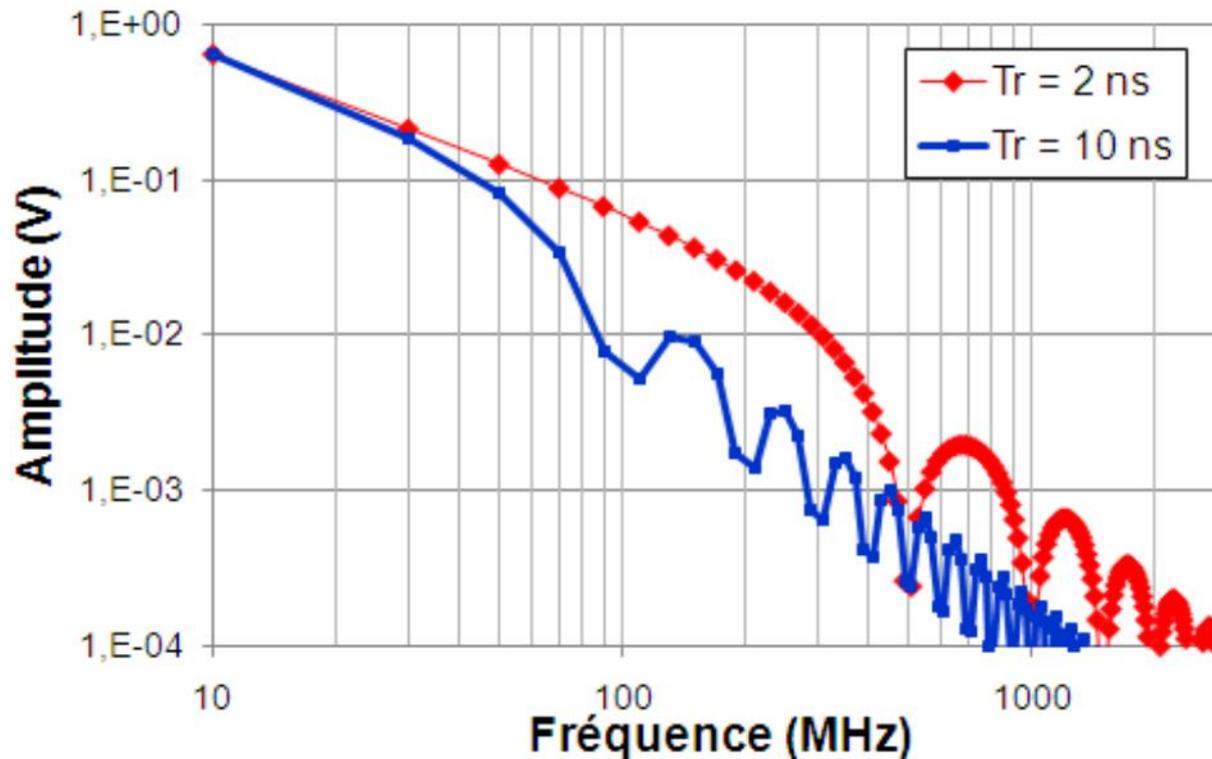
La décomposition de **Fourier** permet de retrouver toutes les fréquences d'un signal complexe (les harmoniques)



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

Comparaison de deux signaux

- Comparaison de 2 signaux trapézoïdaux avec des temps de montée/descente de 2 ns et de 10 ns.



Du continu aux signaux haute-fréquence

Considérons une résistance R...

En continu $Z=R$

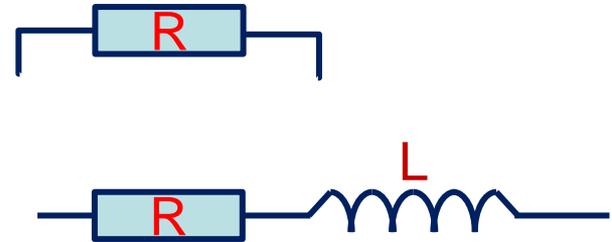
En régime fréquentiel $Z=R+jL\omega$

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

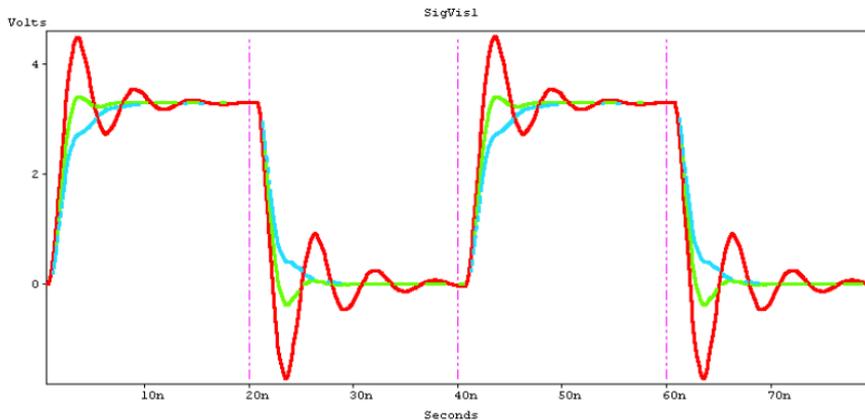
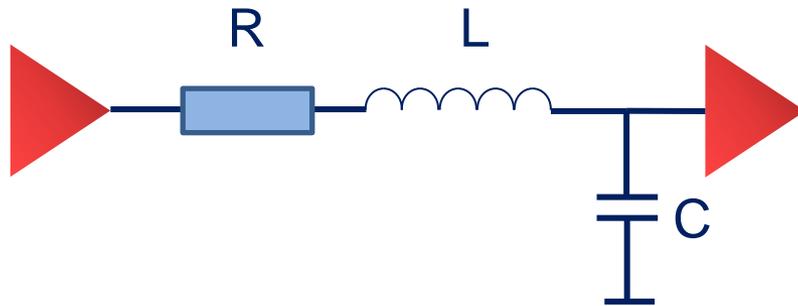
Pour 1MHz, $L\omega=6,28 \Omega/\text{m}/\text{MHz}$

Par exemple à 100 MHz 1 cm 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



Line	Node	Vary Value
load2	resist2-1: R =	1.0000 ohms
load2	resist2-1: R =	22.778 ohms
load2	resist2-1: R =	44.556 ohms

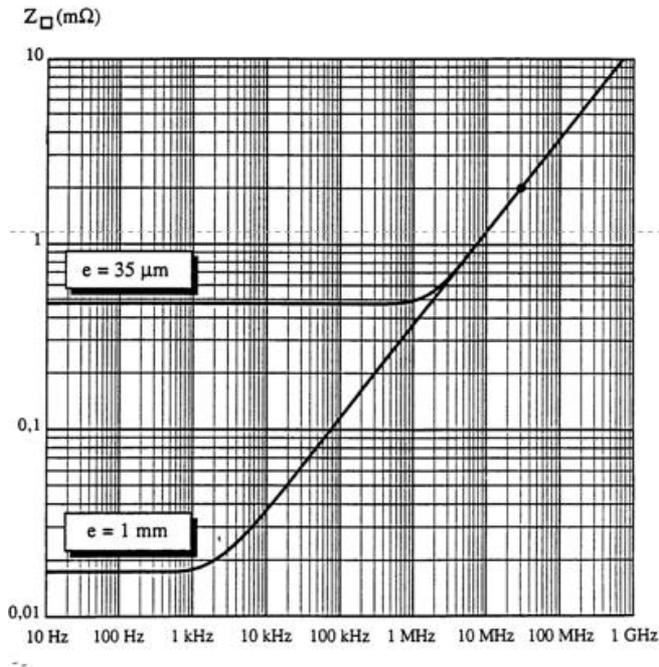
Line	Marker
---	Transition Time

R permet d'amortir le circuit

- Il faut diminuer « l'overshoot » !
- rayonnement excessif
- destruction de circuits
- Dysfonctionnement.

Impédance d'un plan de cuivre

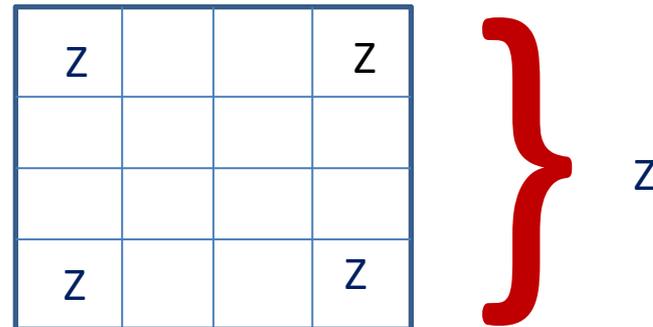
- Dépend de la fréquence et de l'épaisseur.
- On considère l'impédance d'un carré \forall la surface !



En basse fréquence : $Z(\mu\Omega) = \frac{17,2}{e(mm)}$

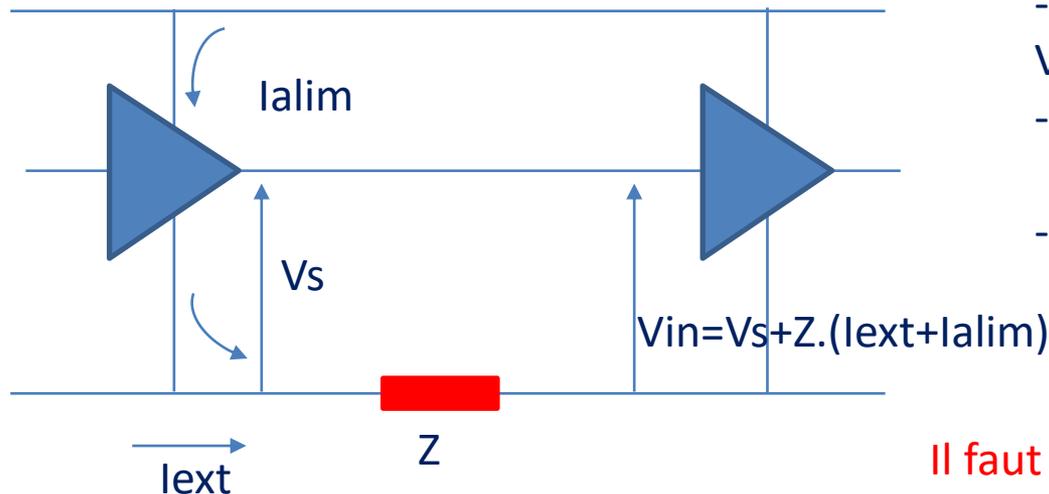
En haute fréquence : $Z(\mu\Omega) = 370 \cdot \sqrt{f(MHz)}$

Au dessus de 2 MHz, l'épaisseur n'intervient plus.



Couplage par impédance commune

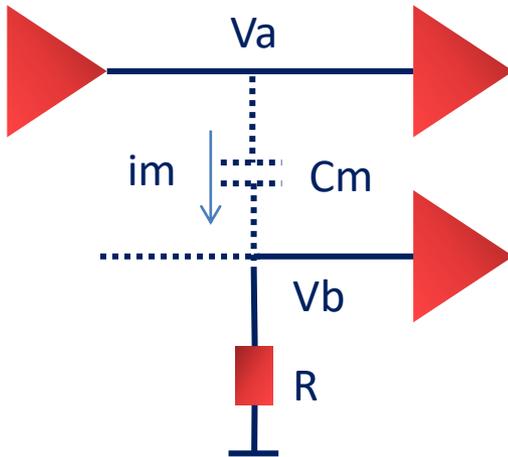
- À chaque fois que des circuits partagent des conducteurs communs,
 - masse,
 - alimentations.



- On aimerait que :
 $V_s = V_{in}$
- Avec Z , V_{in} va fluctuer selon I_{ext}
- Z va augmenter avec la fréquence !

Il faut diminuer Z ,
- Plan de masse par exemple

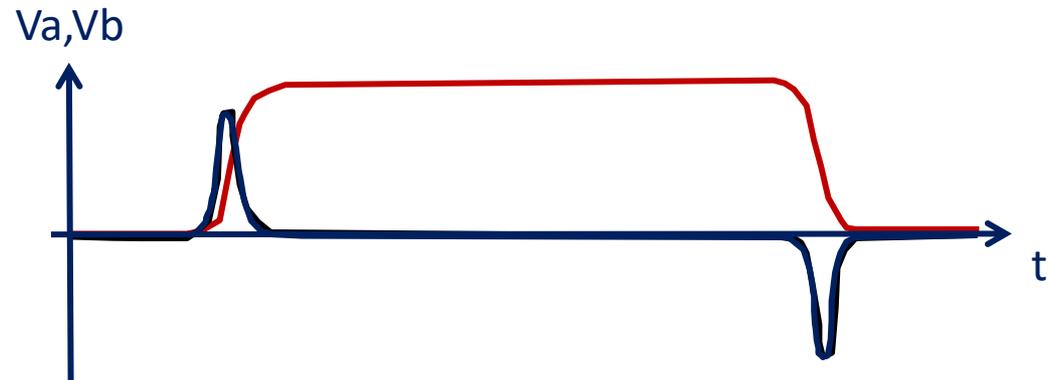
Diaphonie capacitive



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

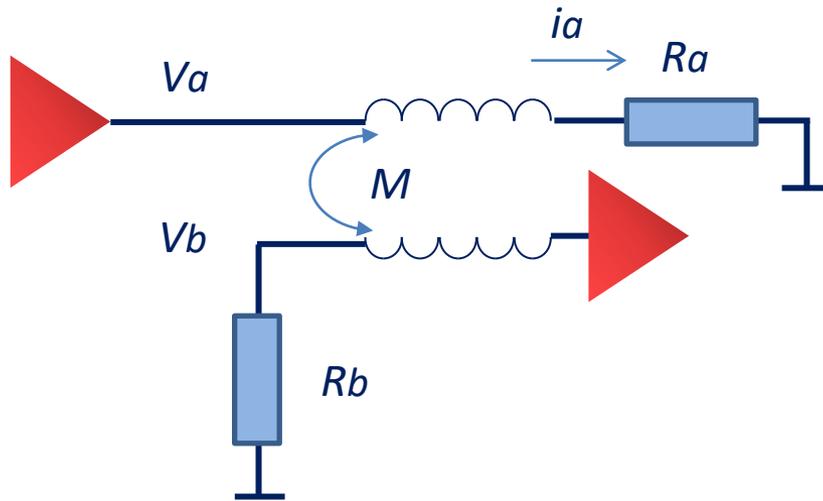
$$V_b = R \cdot i_m$$

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



La diaphonie capacitive dépend de C_m et T_r .

Diaphonie inductive



$$V_a \sim R_a \cdot i_a$$

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

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

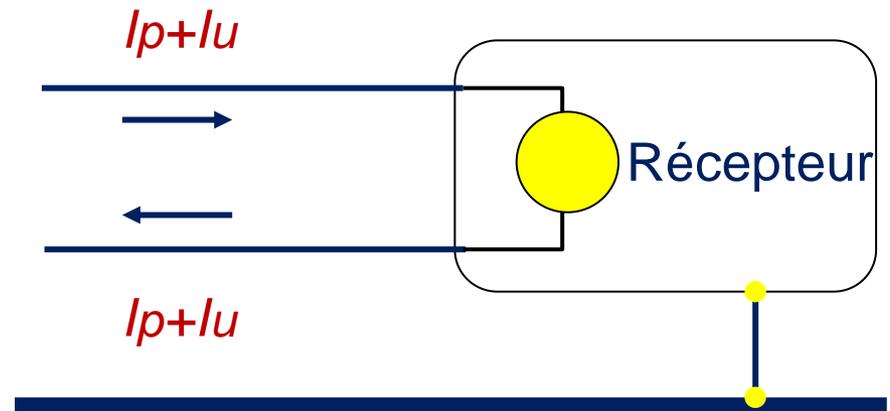
$$V_b = M \cdot \frac{dV_a}{R_a \cdot T_r}$$

Il faut que $M \searrow$ et/ou $T_r \nearrow$

- Eloigner les pistes et/ou fils sensibles

Le mode différentiel

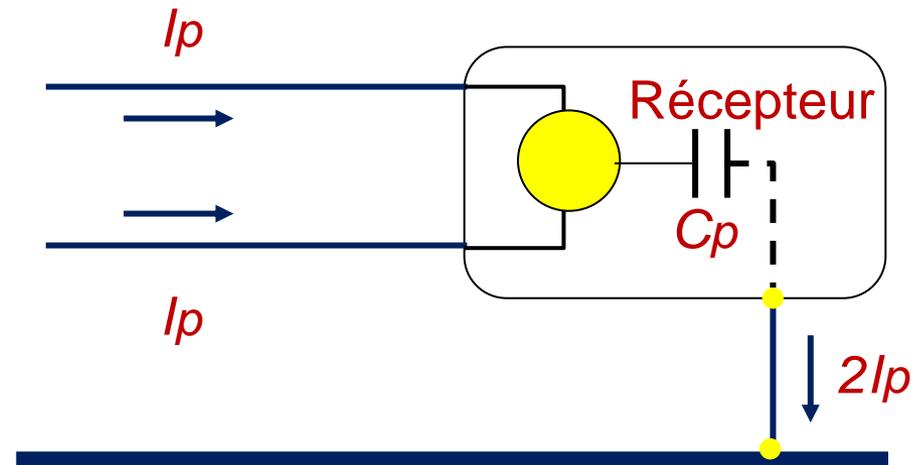
- Dans ce mode la perturbation I_p est transmise à un seul des 2 conducteurs. Le courant de mode différentiel se propage sur l'un des conducteurs, passe à travers le récepteur et revient par un autre conducteur.
- Les signaux utiles I_u sont également transmis dans ce mode !
- 10% des perturbations.



Le mode commun (1)

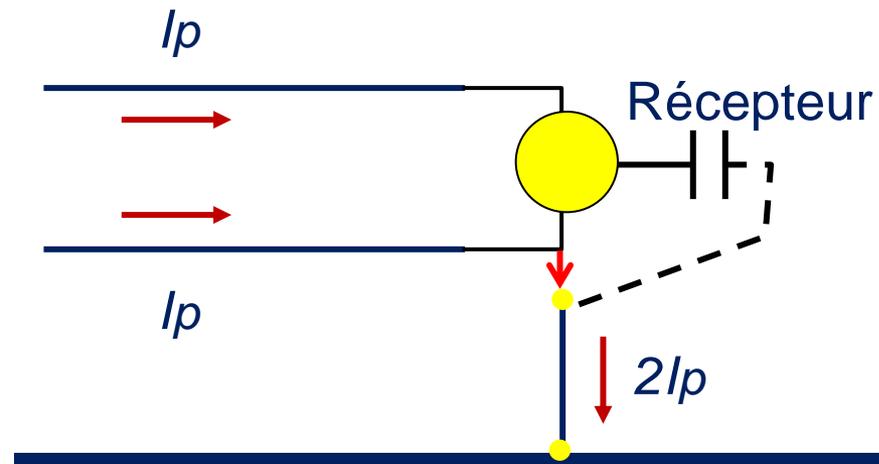
- Dans ce mode la perturbation I_p est transmise, dans le même sens, à l'ensemble des conducteurs et revient à la masse par les capacités parasites,
- 90% des perturbations.

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



Le mode commun (2)

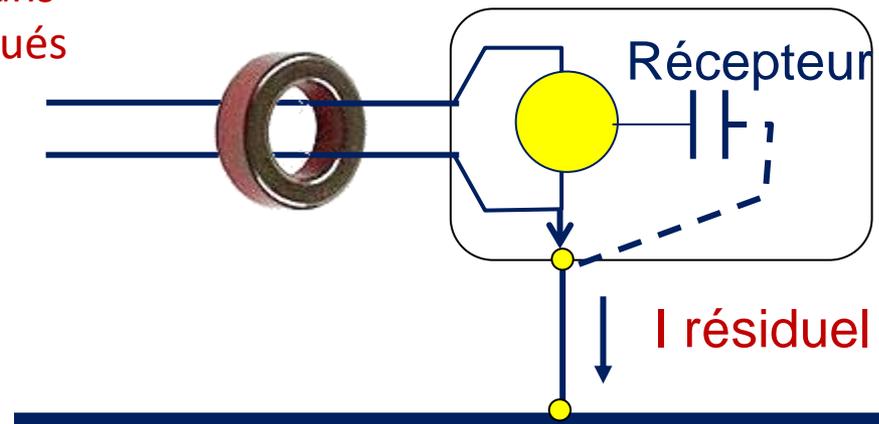
- Pour limiter les perturbations de mode commun, il faut que le récepteur soit correctement relié à la masse !



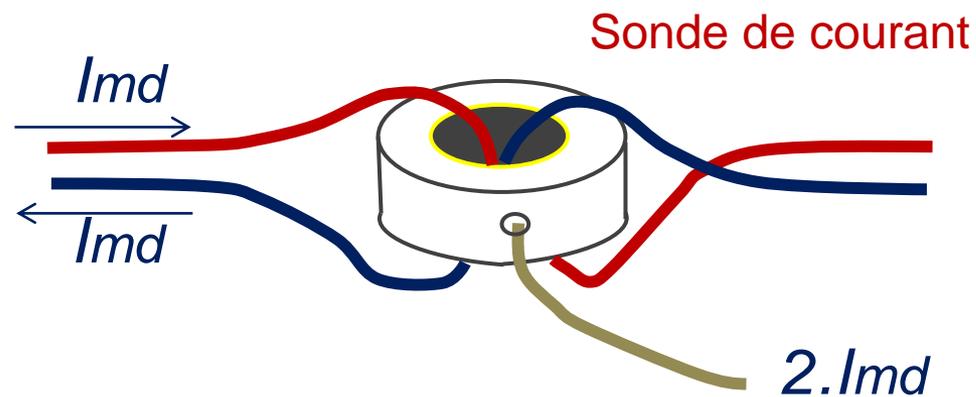
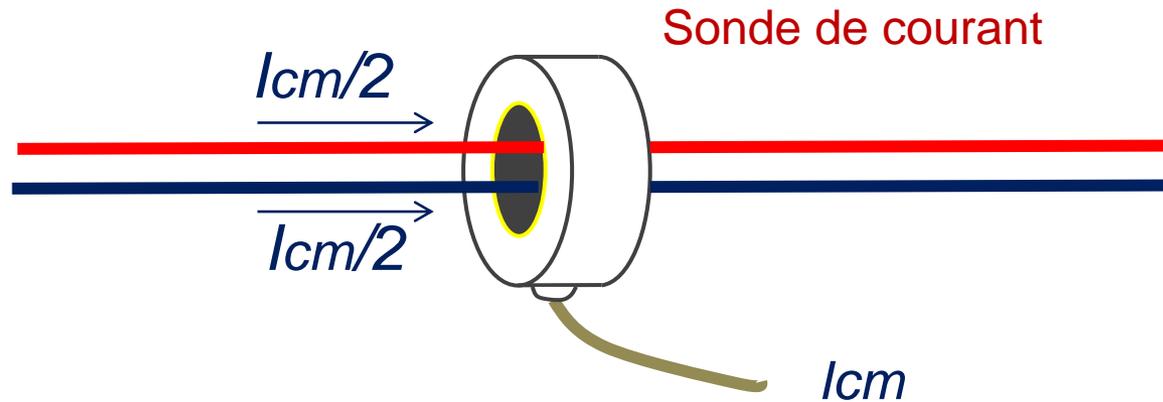
Le mode commun (3)

- 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

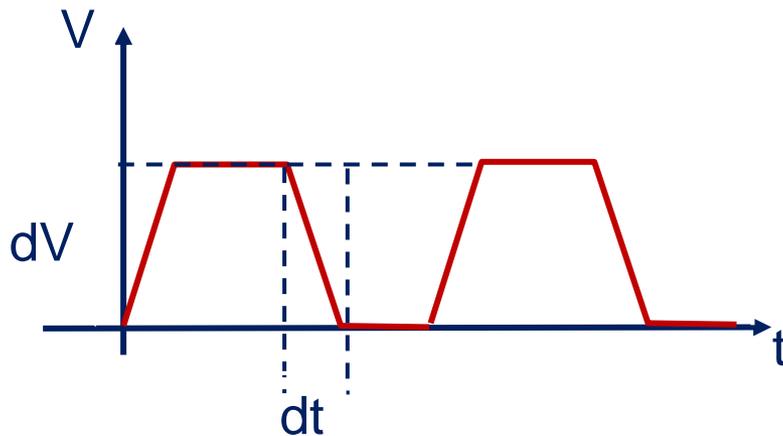


Mesurer les courants de MC et MD

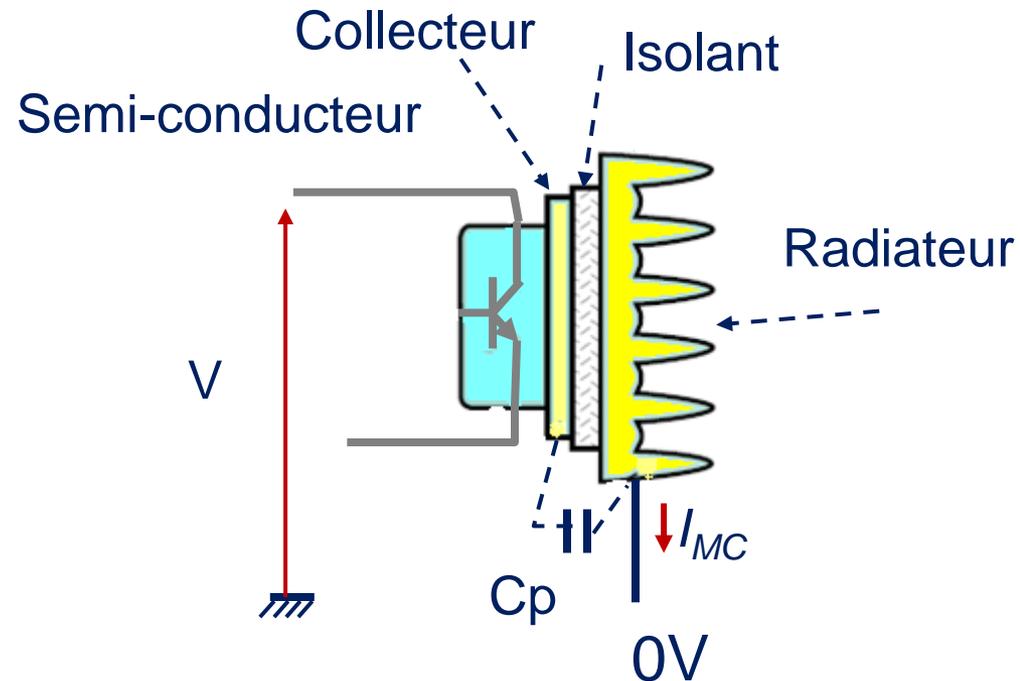


Exemple de source de perturbations conduites en électronique de puissance (1)

Exemple d'une alimentation à découpage



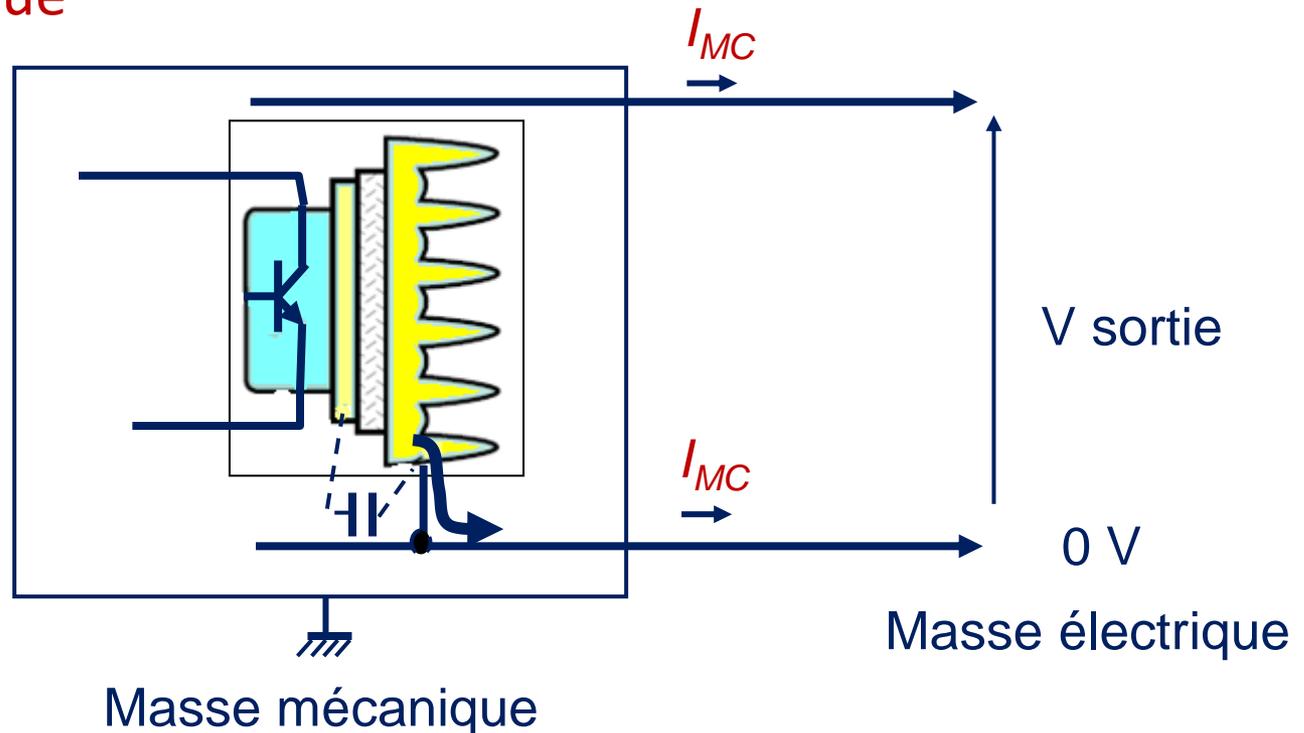
$$I_{MC} = C_p \frac{dV}{dt}$$



Exemple de source de perturbations conduites en électronique de puissance (2)

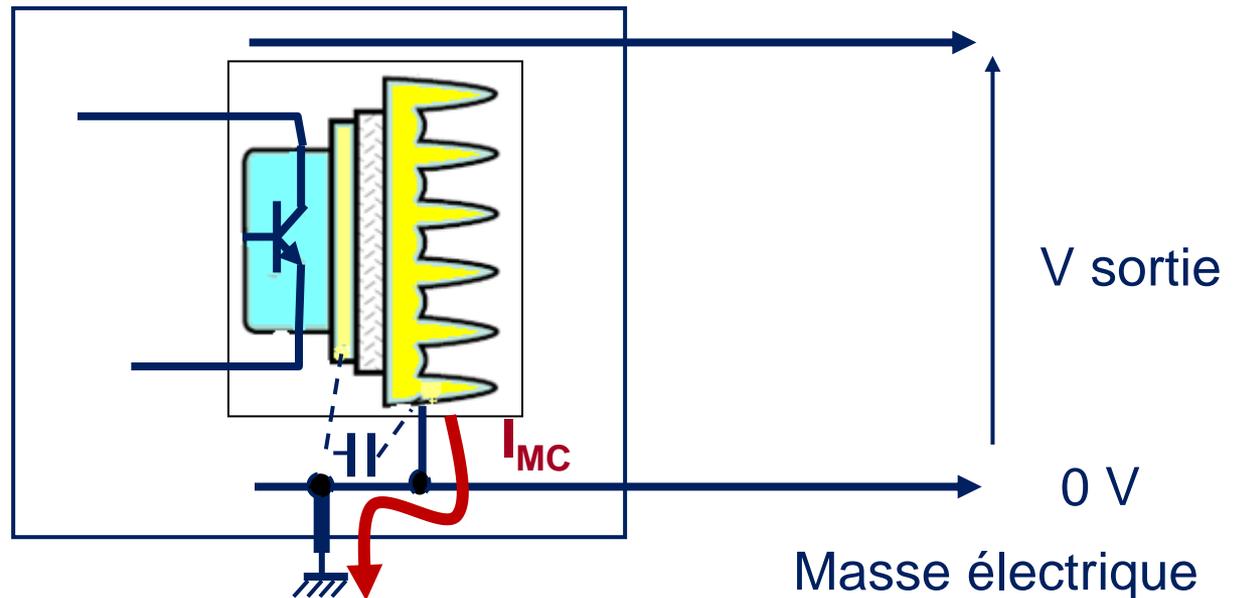
Cas d'une alimentation flottante, le 0V électrique n'est pas relié à la masse mécanique

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 (3)

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



Résumé des perturbations conduites



Cas 1



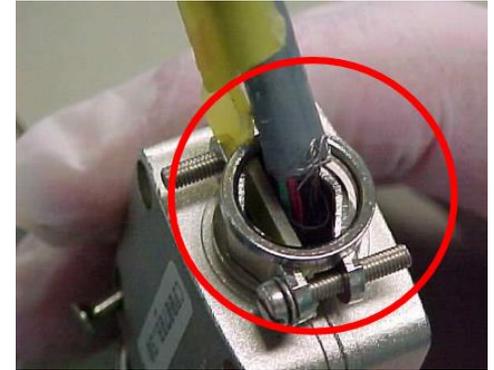
Cas 2

Exemple de connexions

Presse-étoupe
métal



Connecteur blindé



Embase isolée



Bon

Mauvais

Source : AEMC

Compatibilité Electromagnétique de tous les jours

Partie 4

Partie 4

- Résumé des perturbations conduites
- Couplage par rayonnement
- Fente dans un plan de masse
- Les connexions entre éléments
- Le routage des circuits imprimés
- Le retour du signal
- Empilement des couches
- Exemple du rayonnement d'une horloge
- Les blindages de protection
- Raccordement des câbles blindés
- La foudre
- Quelques petits problèmes

Résumé des perturbations conduites



Cas 1

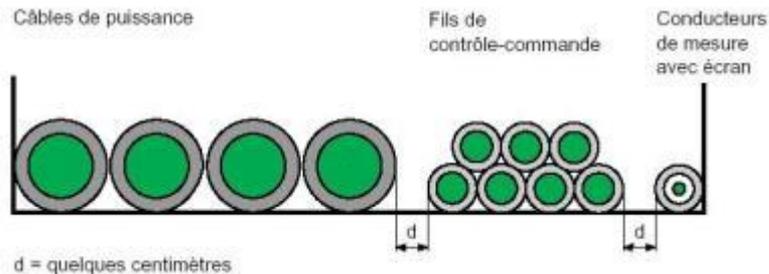


Cas 2

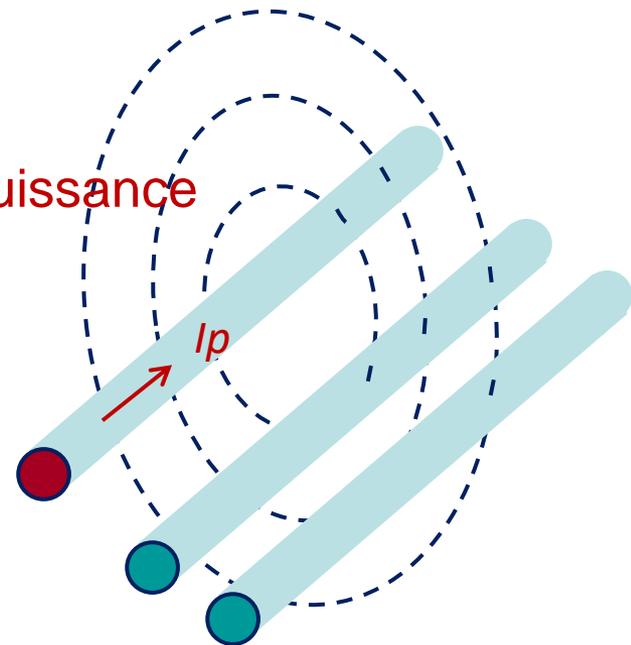
Couplage par rayonnement (1)

- Le courant I_p crée un champ magnétique qui rayonne sur les autres câbles par couplage inductif.

Une tension induite peut être gênante si le courant perturbateur est élevé ou de variation rapide.



Câble de puissance



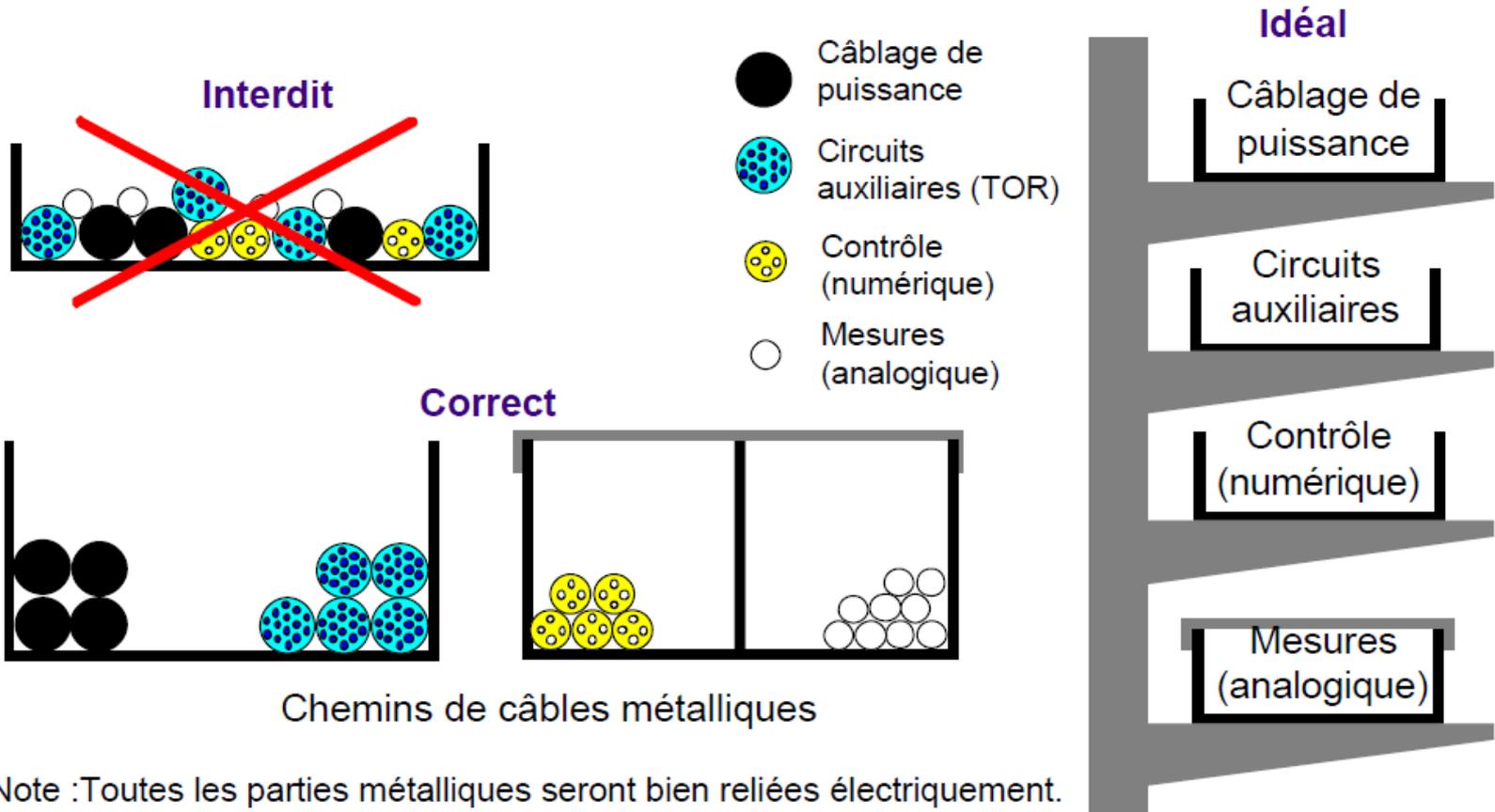
Câbles victimes

Une bonne utilisation des chemins de câbles



Source : AEMC

Ne pas mélanger les câbles

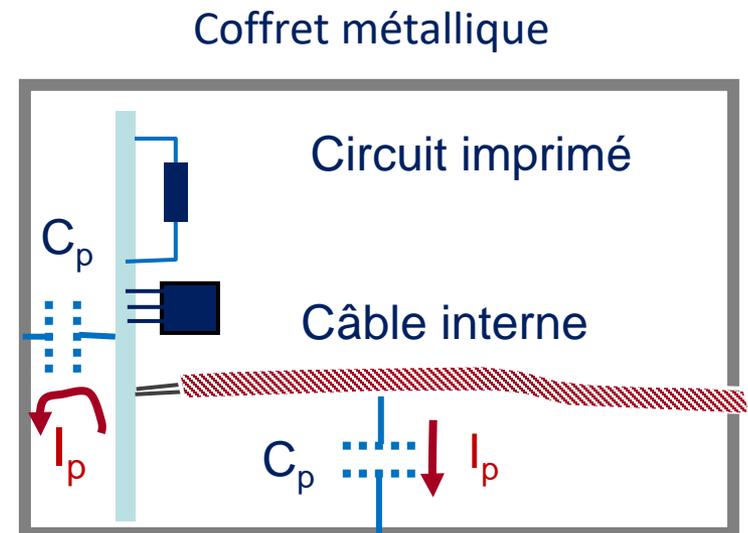


Source : Schneider Electric France

Couplage par rayonnement (2)

- Exemple d'une électronique dans un coffret métallique. Il existe une capacité parasite :
 - entre le circuit imprimé et le boîtier,
 - entre le câble et le boîtier.

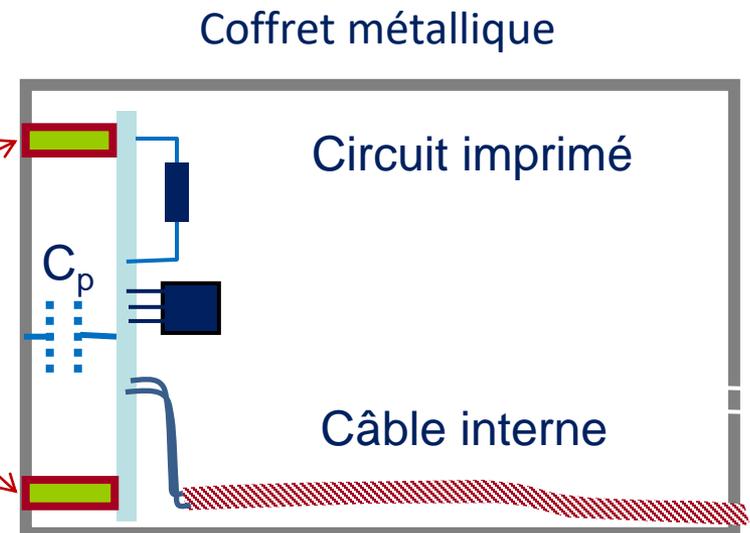
Toute différence de potentielle entre ces éléments engendrera un courant parasite par couplage capacitif.



Couplage par rayonnement (3)

- Pour améliorer ce montage...
Il faut limiter les capacités parasites :
 - entre le circuit imprimé et le boîtier,
 - entre le câble et le boîtier.

Colonnettes métalliques
Reliant la masse électrique
et la masse mécanique.

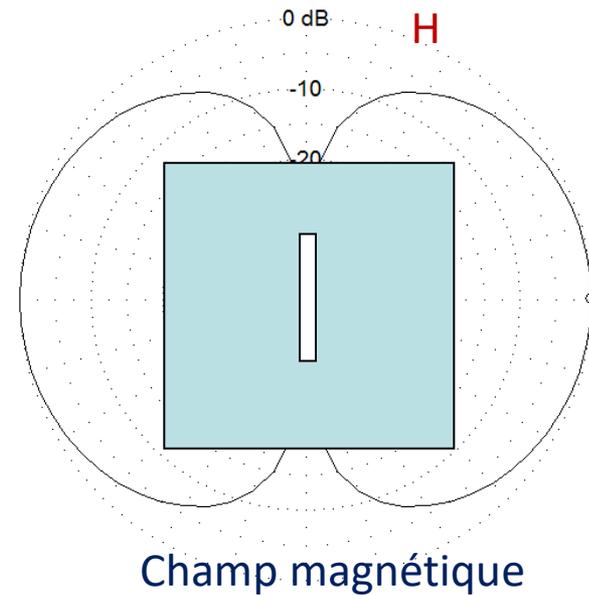
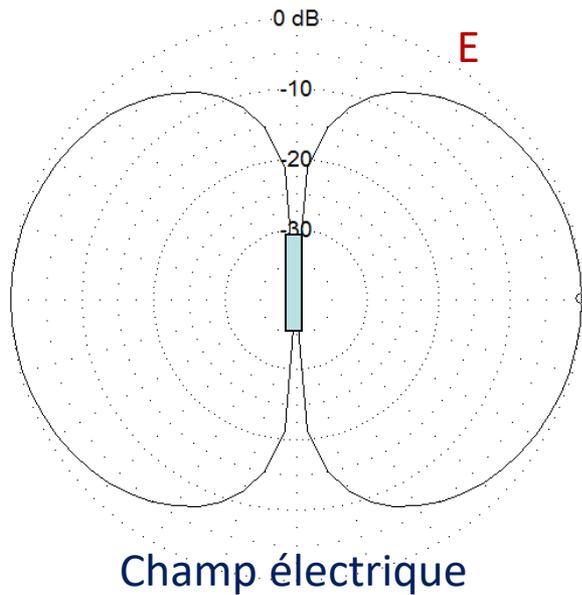


Plaquer le câble sur le boîtier ou mieux le blinder.

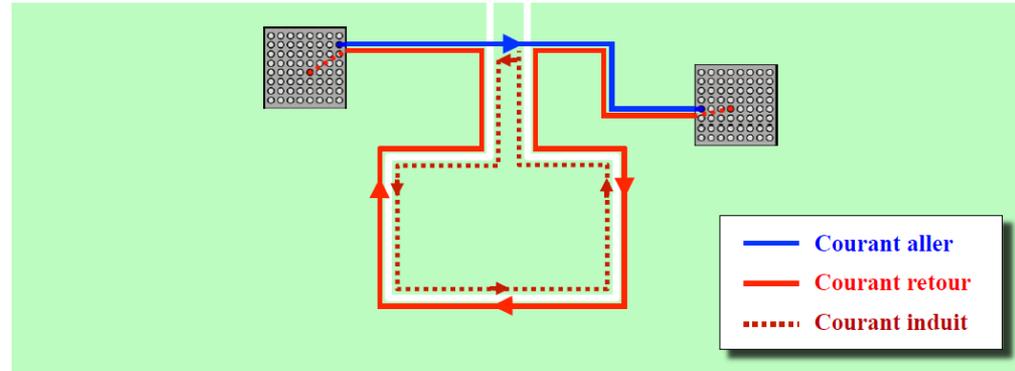
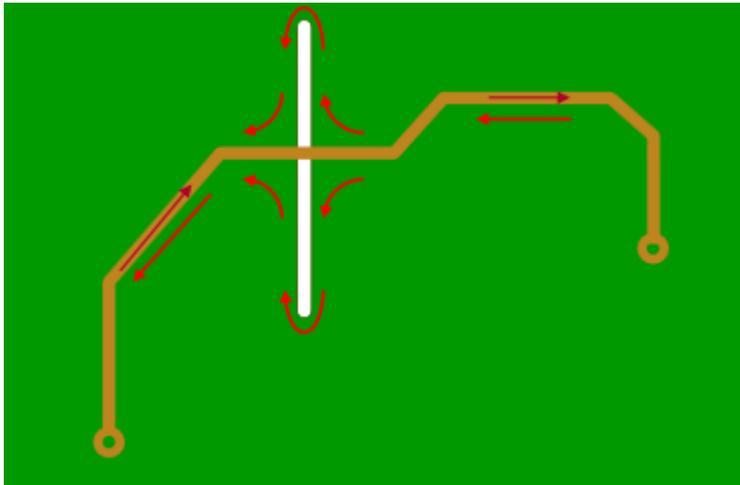
Fente dans un plan de masse (1)

Un plan de masse a une impédance faible s'il ne présente pas de fente.
Une fente dans un plan de masse rayonne comme une antenne métallique complémentaire (avec les champs E et H inversés).

Il faut donc éviter de fendre un plan de masse !



Fente dans un plan de masse (2)



- Equivalent à une antenne quart d'onde ($L=1 \text{ nH/cm}$),
 - Une fente rayonne !
- Aucune piste ne doit enjamber une fente.

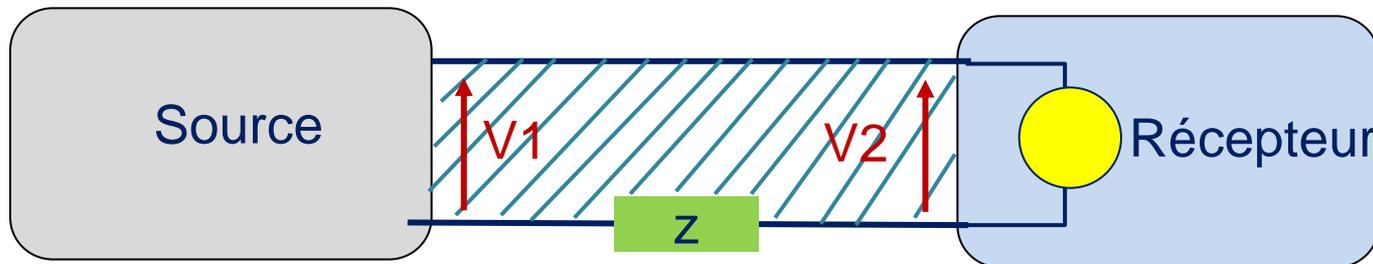
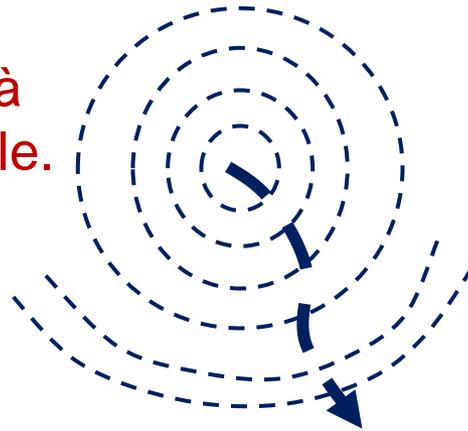
Les connexions entre éléments (1)

- 2 problèmes possibles :
 - Il existe une boucle entre la source et le récepteur.
 - Si la distance entre les deux composants est importante ou si les signaux sont de fréquence élevée alors les fils présentent une impédance Z .



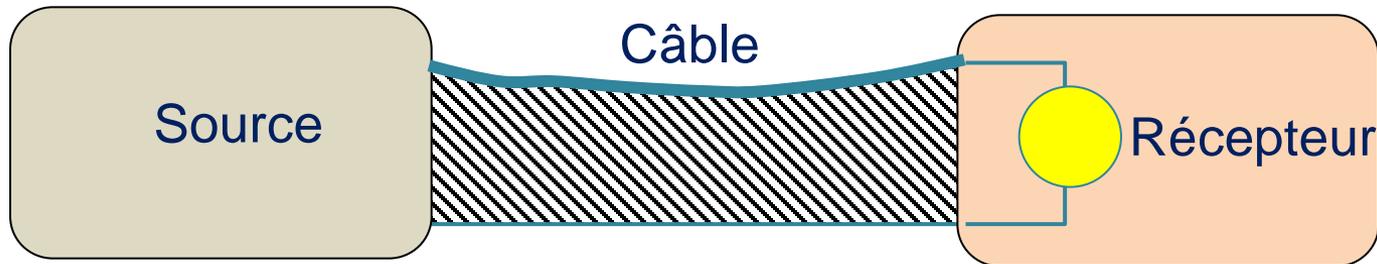
Les connexions entre éléments (2)

Un champ H va créer
une tension
proportionnellement à
la surface de la boucle.



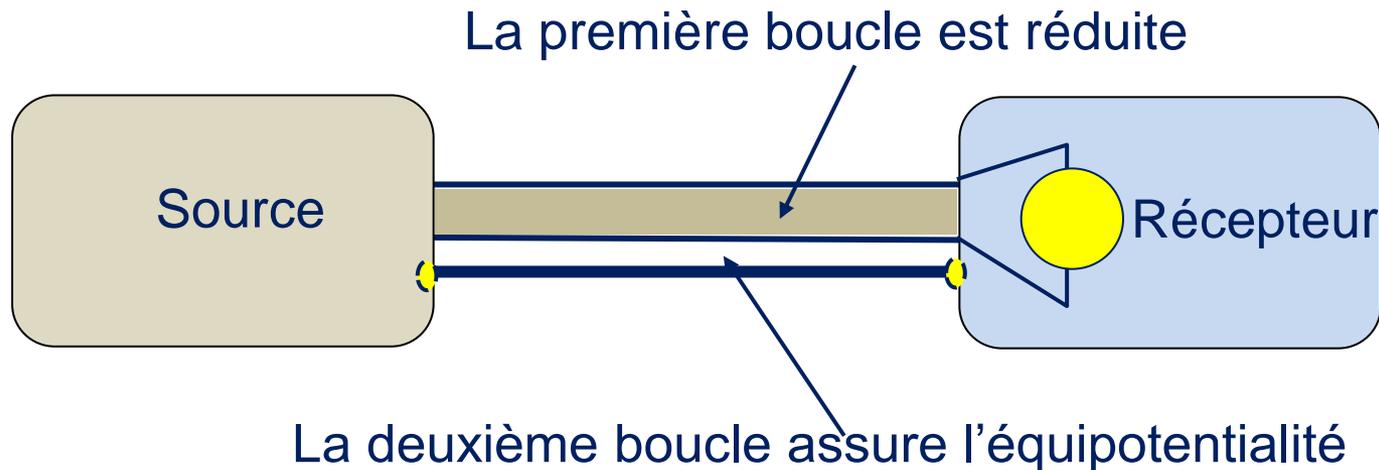
Les connexions entre éléments (3)

- Les fameuses boucles de masse : peut-on les éviter ?
 - dès que l'on connecte 2 éléments on crée une boucle !



Les connexions entre éléments (4)

- Il faut réduire les surfaces des boucles.
- Il faut rendre équipotentiel la source et le récepteur.
- Multiplier les boucles n'est pas gênant et permet d'augmenter l'équipotentialité.



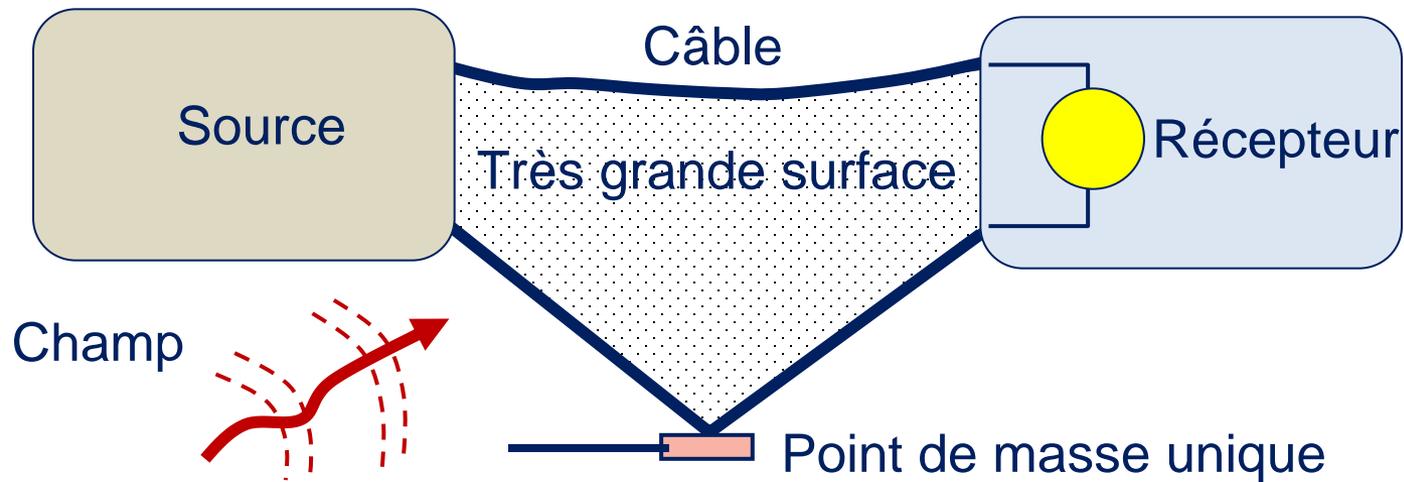
Les connexions entre éléments (5)

- Le câblage des masses en étoile est souvent préconisé...



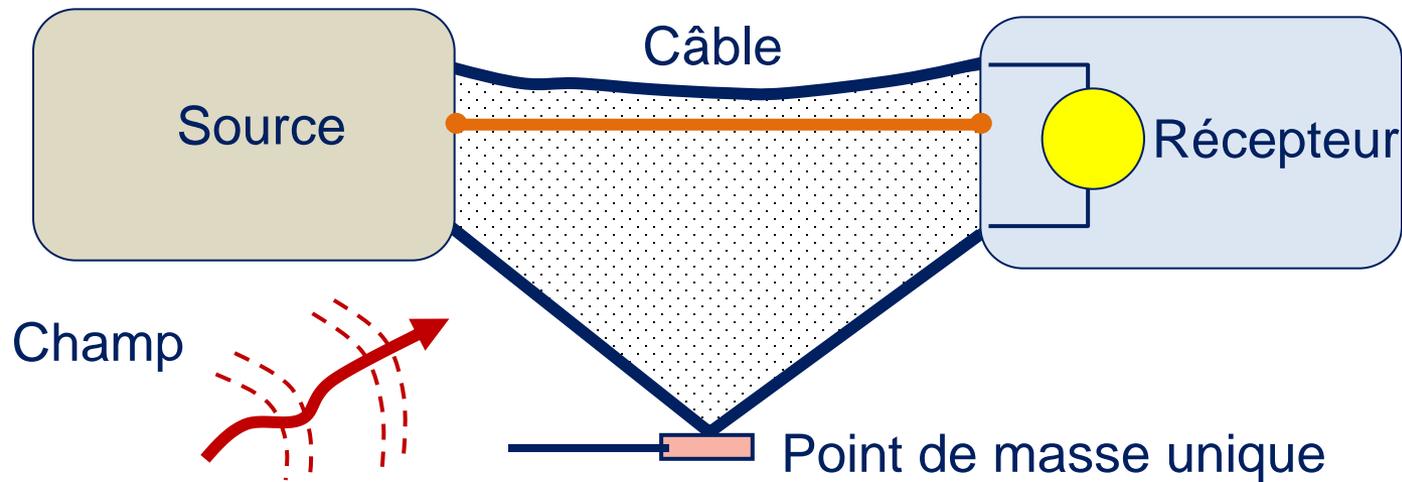
Les connexions entre éléments (6)

- Le câblage des masses en étoile ne doit plus être utilisé !

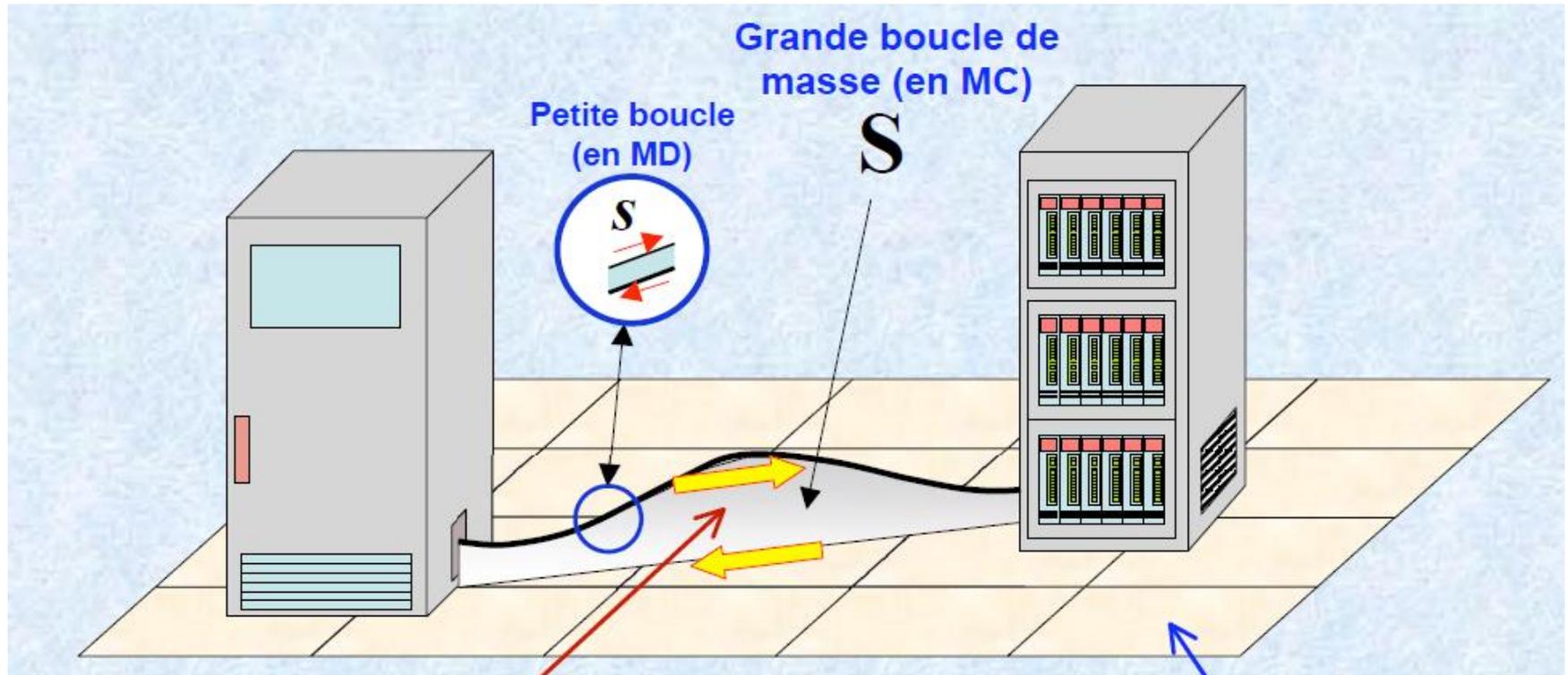


Les connexions entre éléments (7)

- Dans de telles installations il faut rajouter une connexion de masse pour limiter la surface de la boucle.

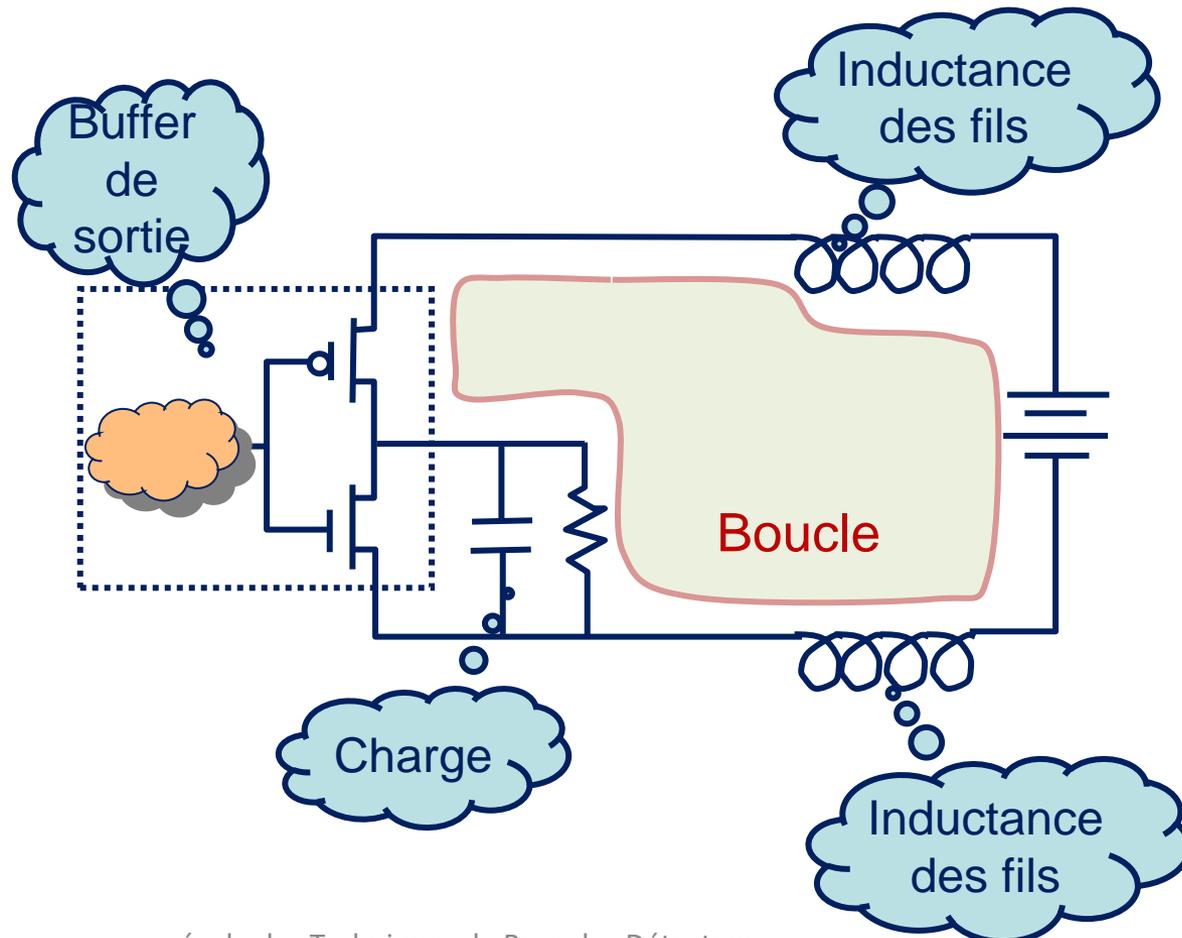


Les connexions entre éléments (8)



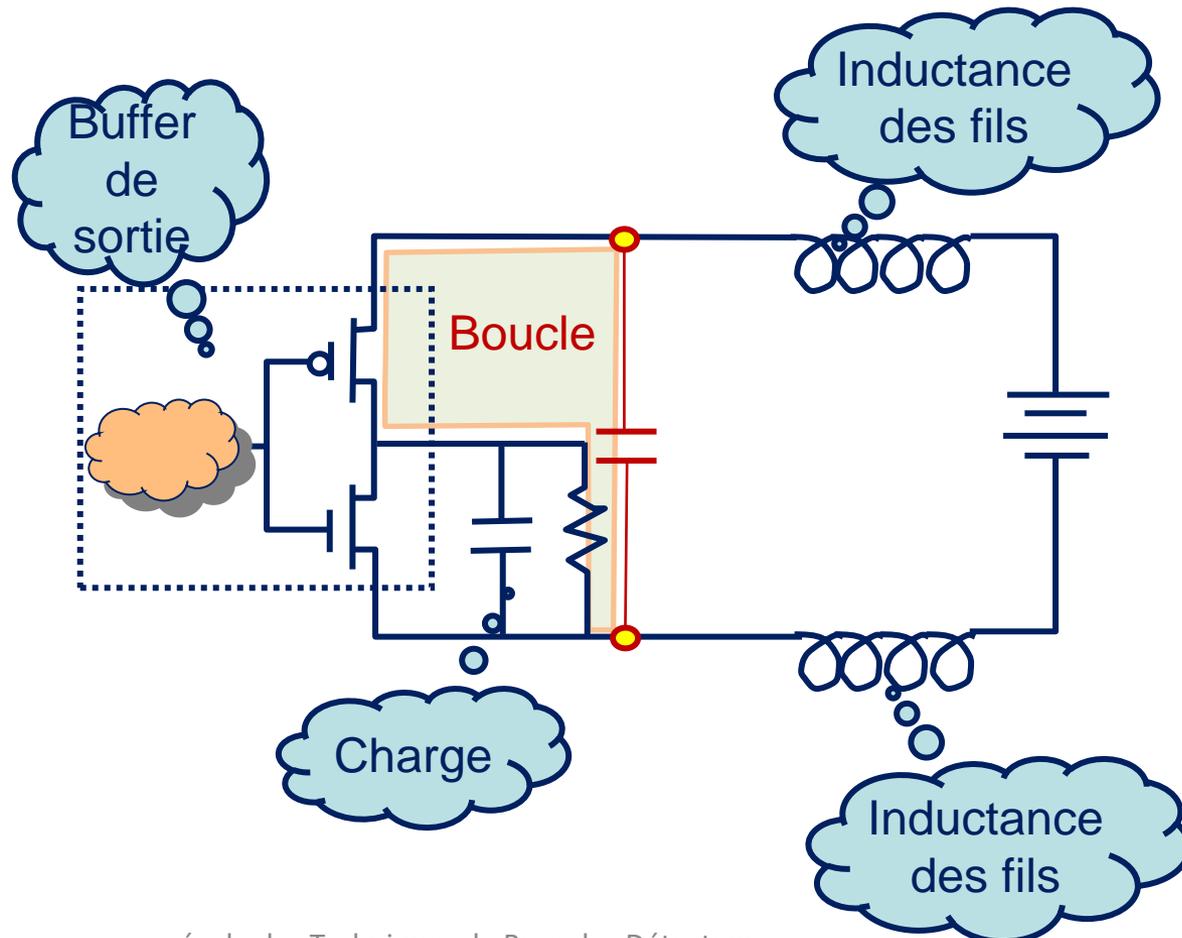
Les connexions entre éléments (9)

- Sans condensateur de découplage, la surface de la boucle peut être importante.

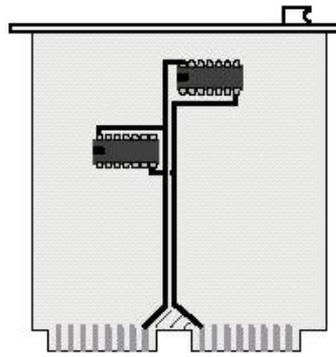
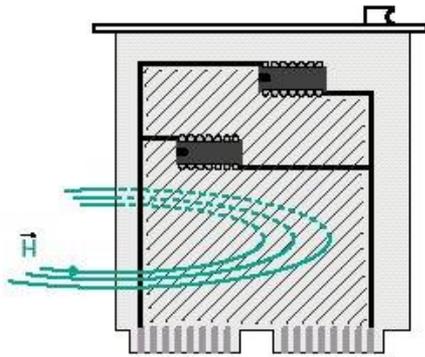
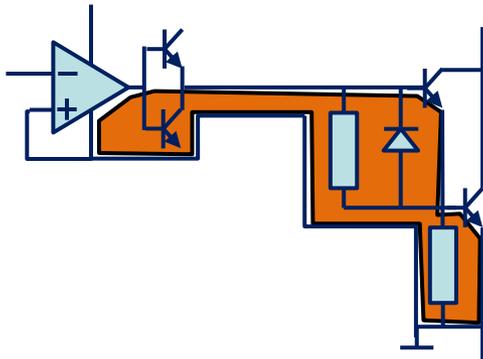
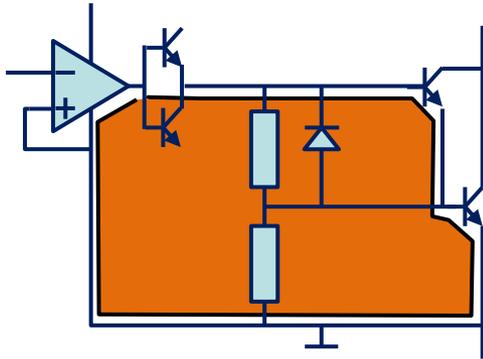


Les connexions entre éléments (10)

- Avec un condensateur de découplage, la surface de la boucle est réduite !

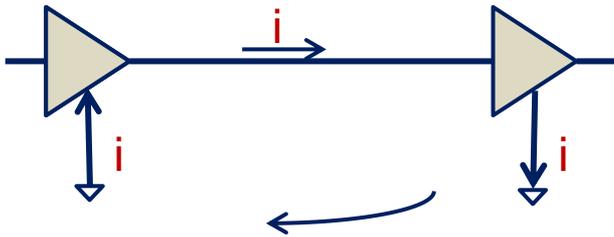


Le routage des circuits imprimés

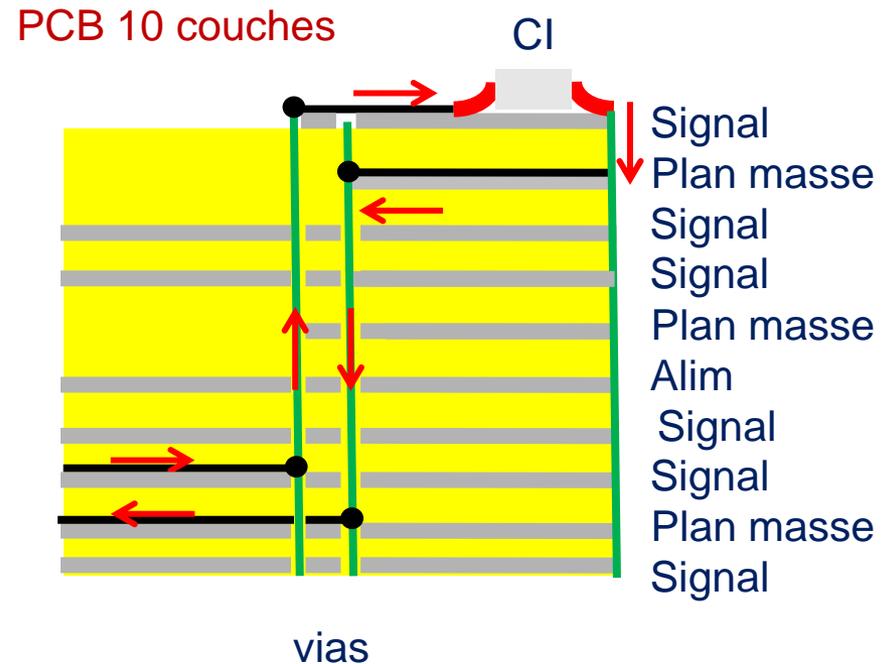


- Limitation des surfaces réceptrices,
- un plan de masse est idéal pour limiter les surfaces.

Le retour du signal



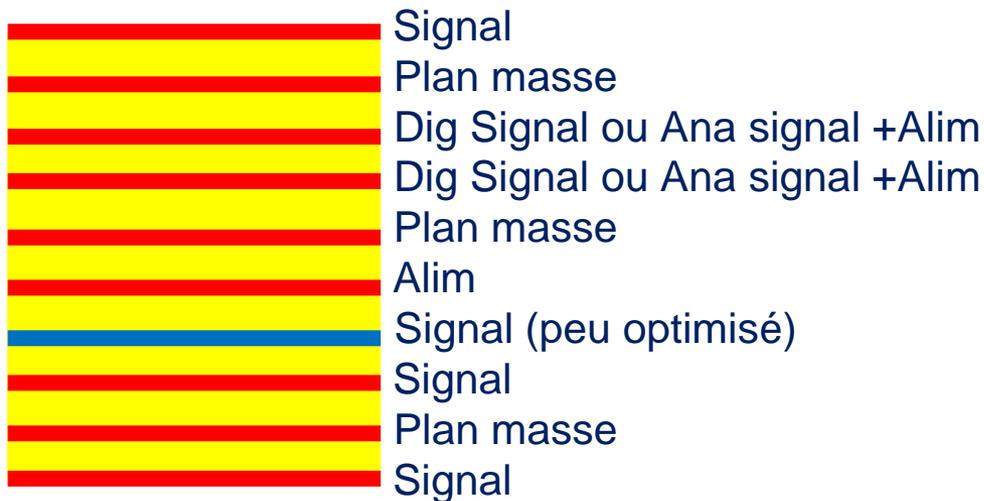
Le courant doit revenir, aussi près que possible du chemin aller.



Dans un circuit imprimé, quand le signal traverse il faut également prévoir le retour du signal au plus près.

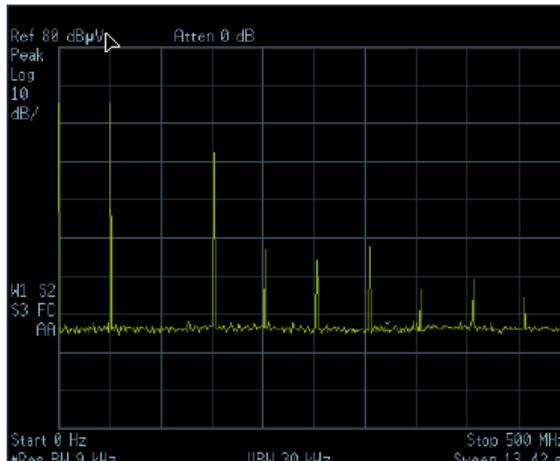
Empilement des couches

Exemple d'empilement de couches (10) d'un circuit imprimé

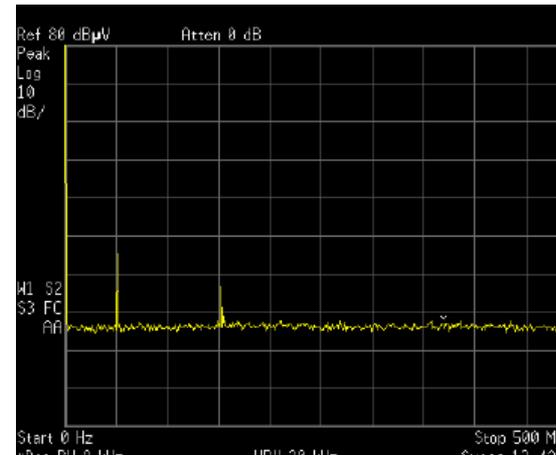


- Une couche signal proche d'un plan de masse est optimisée,
- les différents plans de masse sont interconnectés en de multiples points,
- un plan d'alim. doit être proche d'un plan de masse (augmentation de C).

Exemple du rayonnement d'une horloge à 50 MHz (t_r/t_f 4ns, $V_p=3V$)



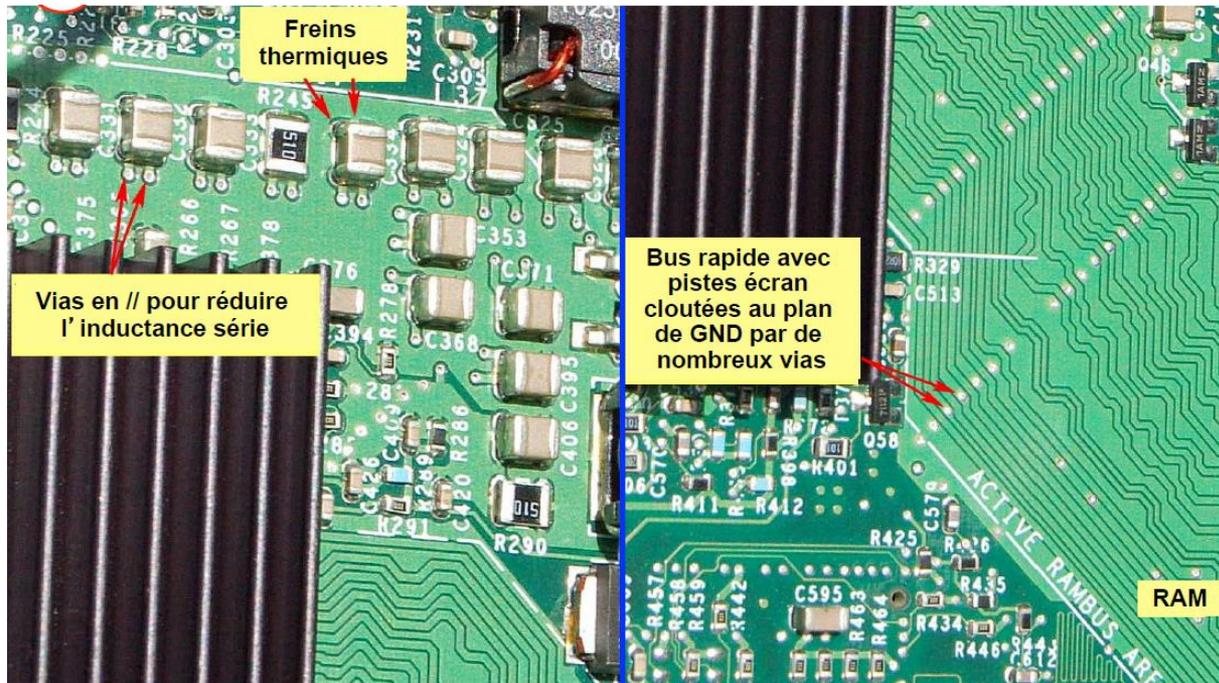
Sans plan de masse



Avec plan de masse

Le plan de masse réduit l'émission (fondamental) de 40 dB ! (100)

Multiplication des vias de masse

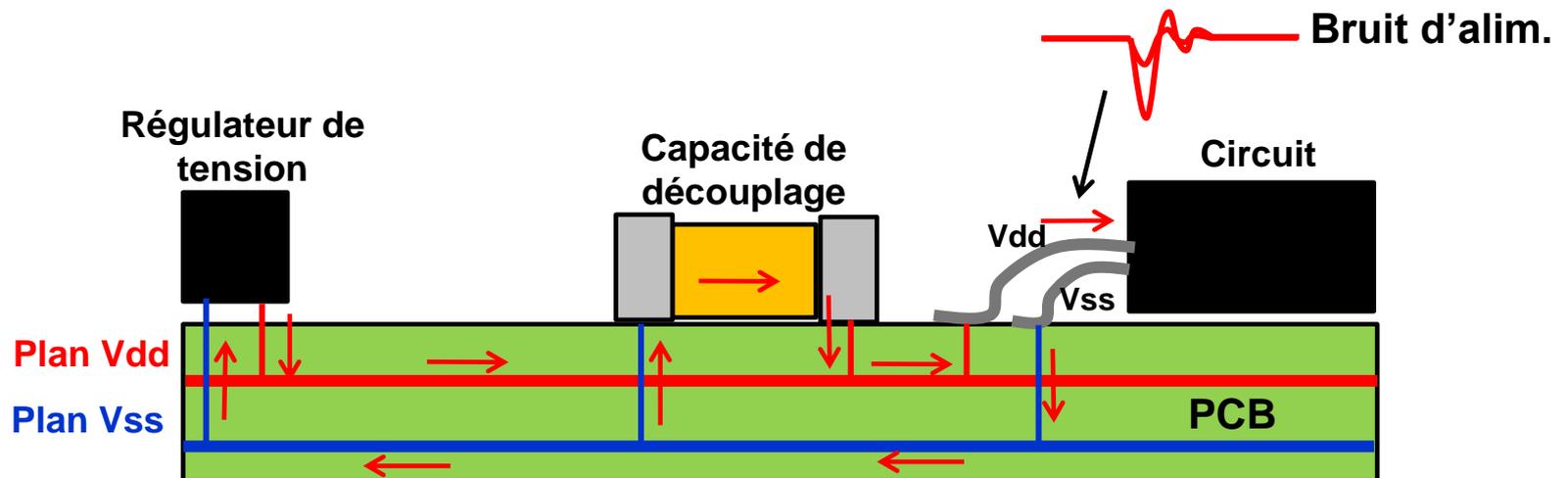


La carte doit être ceinturée par une piste de garde reliée à tous les plans internes de GND (un via /5 mm).

Source : A. Charoy AEMC

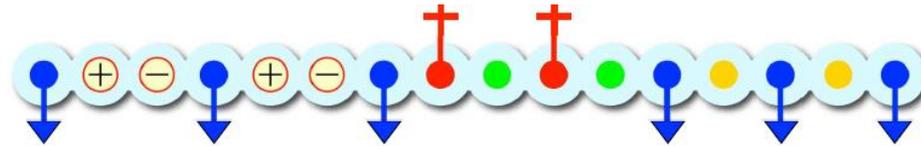
Bruit d'alimentation

- Afin de réduire le bruit de commutation on insère des capacités de découplage entre l'alimentation et la masse.

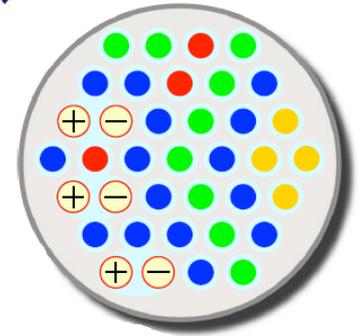
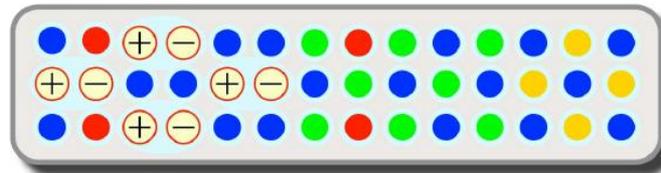


Brochage des connecteurs

- Câble en nappe



- Connecteurs



0 V



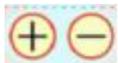
V_{DD}



Numérique

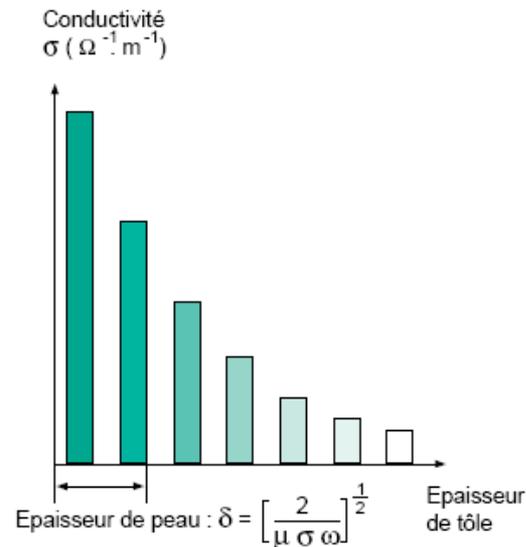
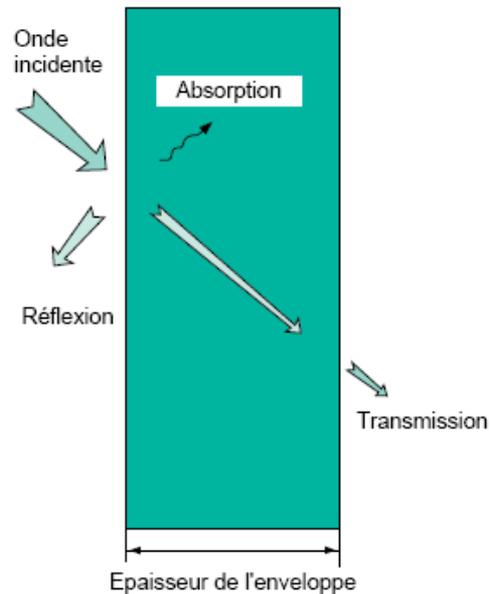


Analogique



Paire différentielle

Les blindages de protection

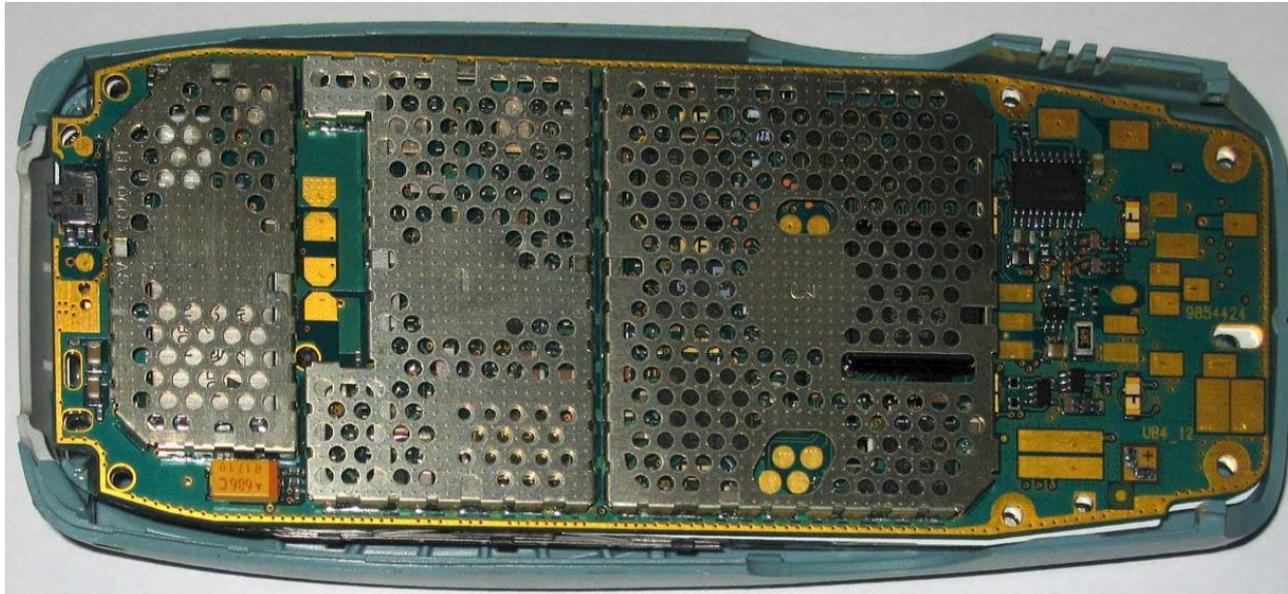


Le blindage doit être conducteur
Le champ magnétique est absorbé
Le champ électrique est réfléchi

=> beaucoup de matière nécessaire
=> une simple tôle suffit

Une fente dans un blindage rayonne !

Exemple de blindage



Tête HF

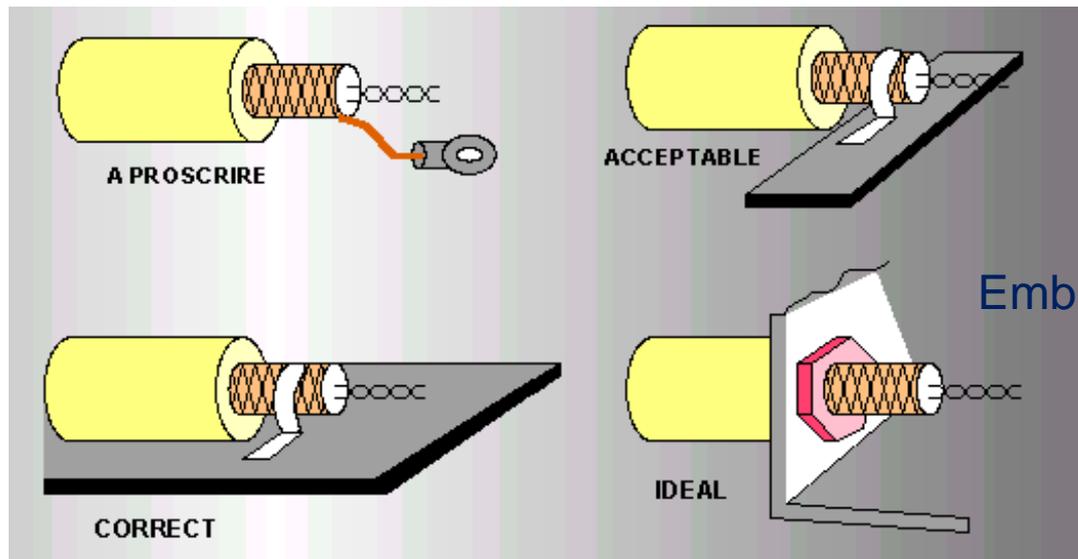
Oscillateur et PLL

Processeurs

Analogique

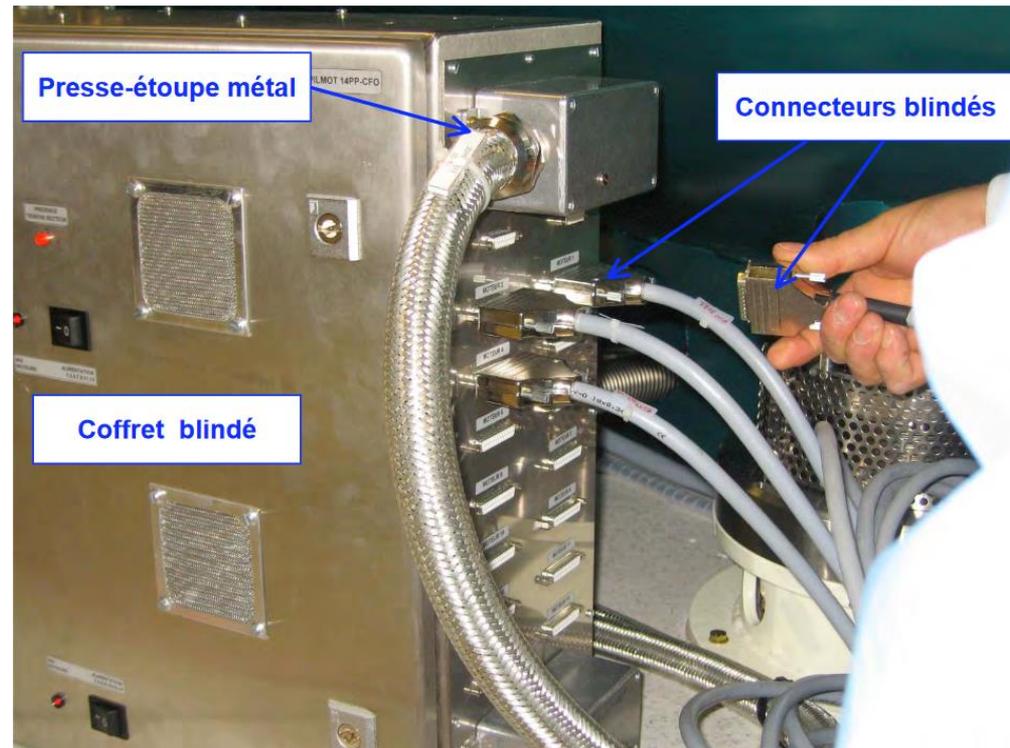
Source AEMC

Raccordement des câbles blindés



Embase coaxiale vissée

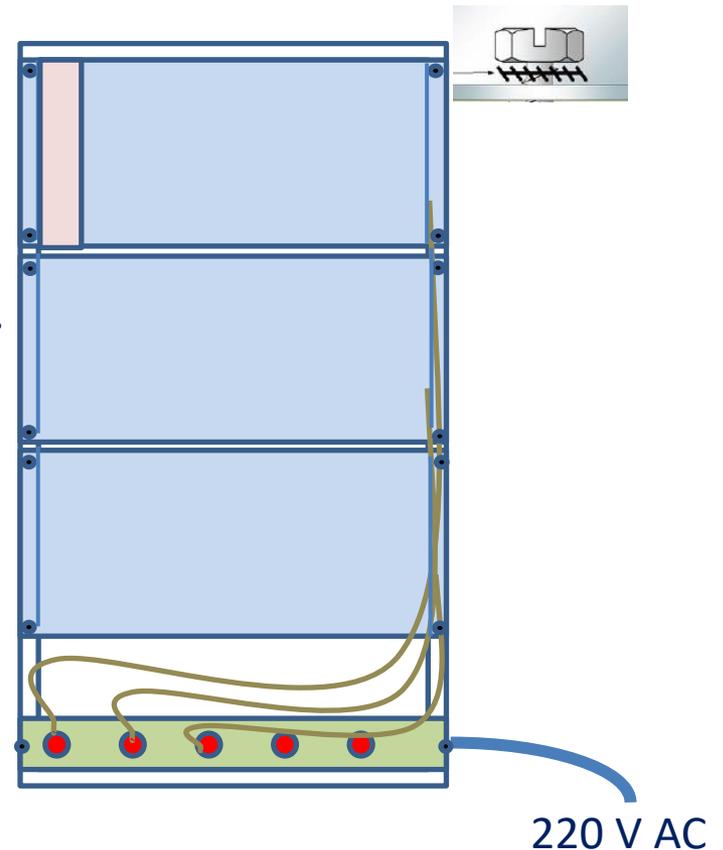
De bonnes connexions



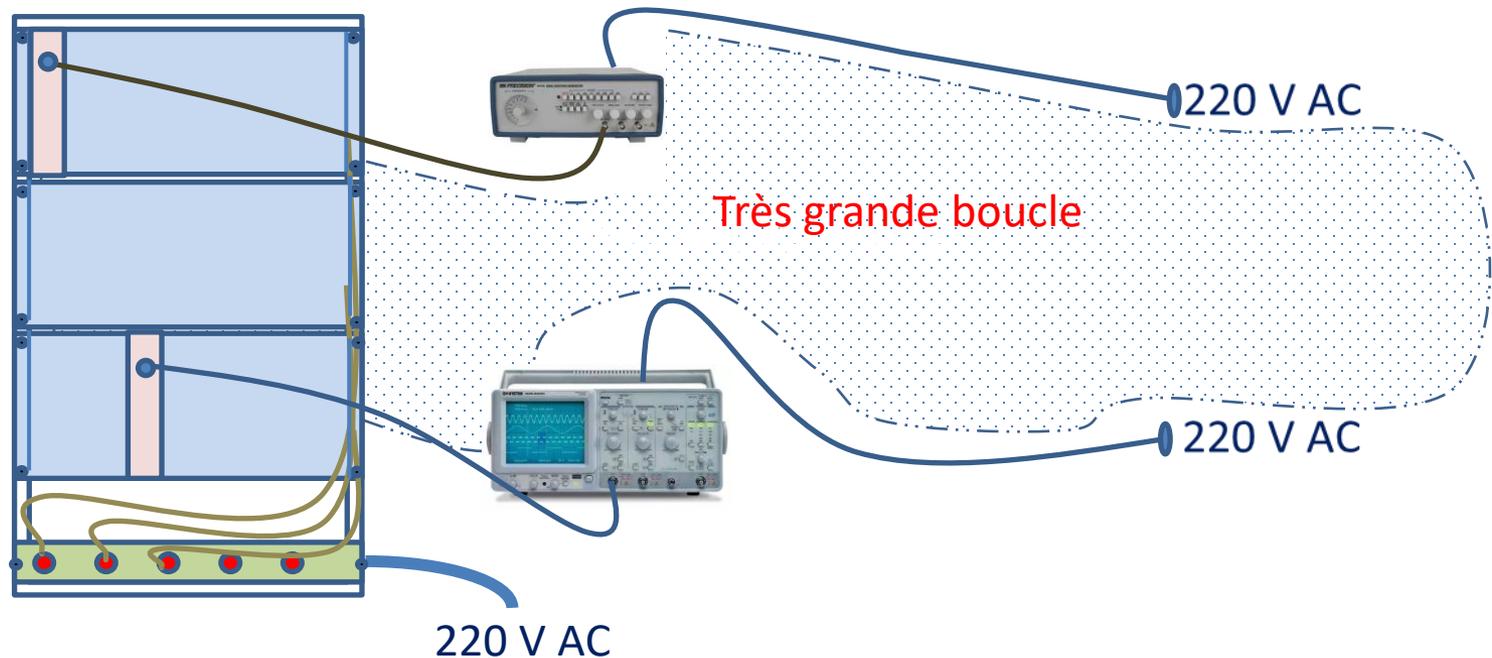
Source AEMC

Baies et châssis

- Les baies et les châssis
 - les châssis **sont vissés** dans la baie,
 - **une seule arrivée** électrique,
 - la multiprise métallique **est vissée**,
 - Les câbles **longent la baie**.
- Les faces avants des modules **sont vissées**,
 - **Enlever** la peinture et les rondelles isolantes.
- Les baies **sont reliées** par des barres de cuivre ou des tresses.



Bonnes et mauvaises pratiques !



- Les appareils doivent être alimentés par la baie afin de réduire la boucle.
- Il ne doit y avoir qu'une seule arrivée secteur.

La foudre (1)

En France : 1,1 millions de coups
de foudre par an



La foudre (2)

- Principaux risques :
 - Destruction des matériels (20 000 compteurs/an),
 - la réparation des lignes téléphoniques : 10 M€/an.

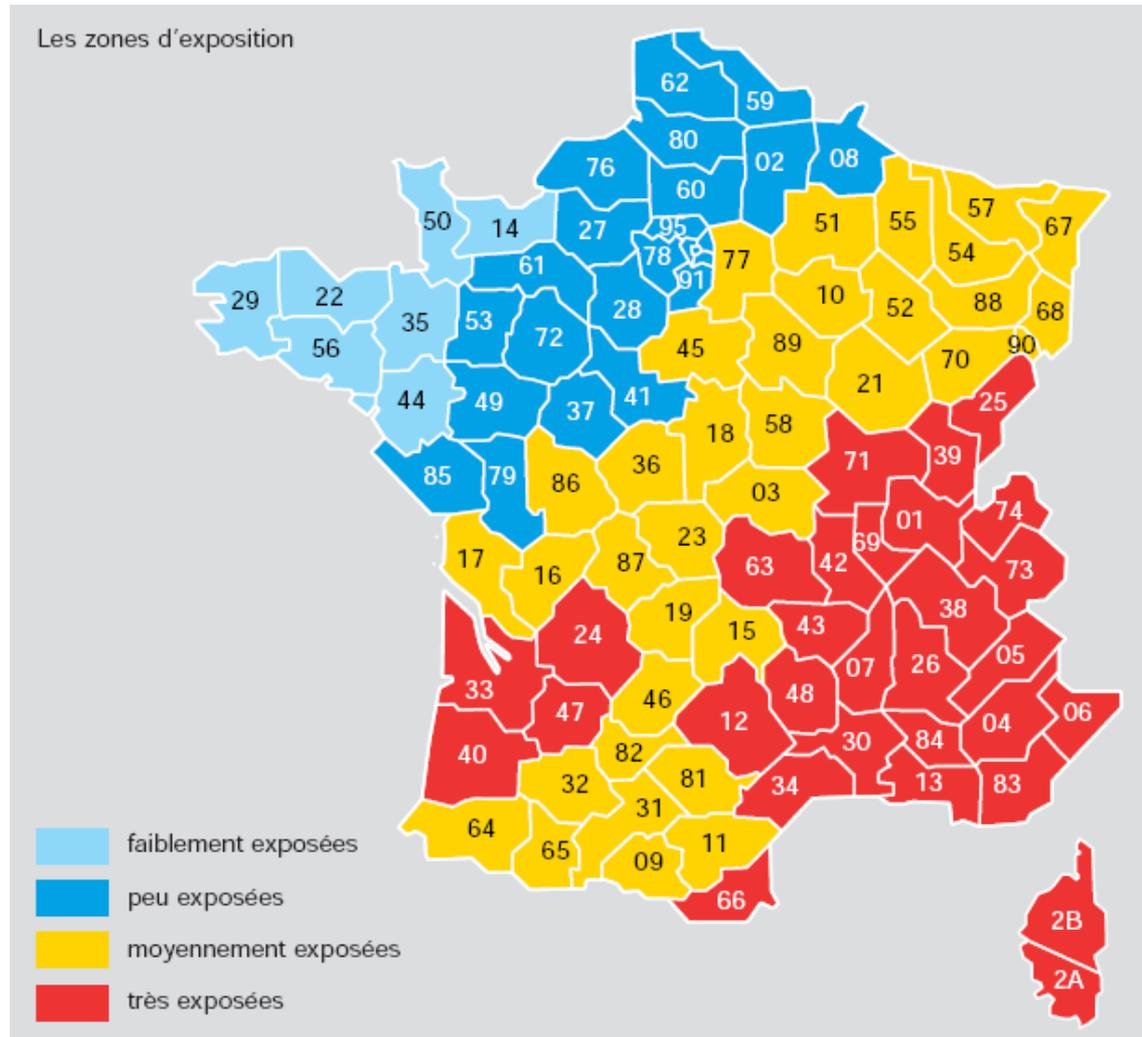
Mais il n'est pas rentable de protéger toutes les lignes.

- 40 personnes/an foudroyées (15 morts),
- risque important lié au rayonnement.



La foudre (3)

- Obligation de se protéger dans les zones à risque.



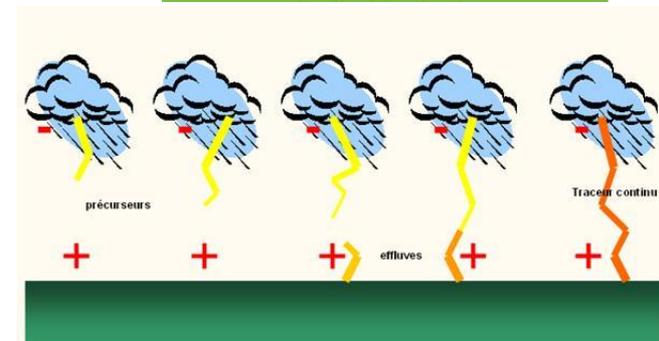
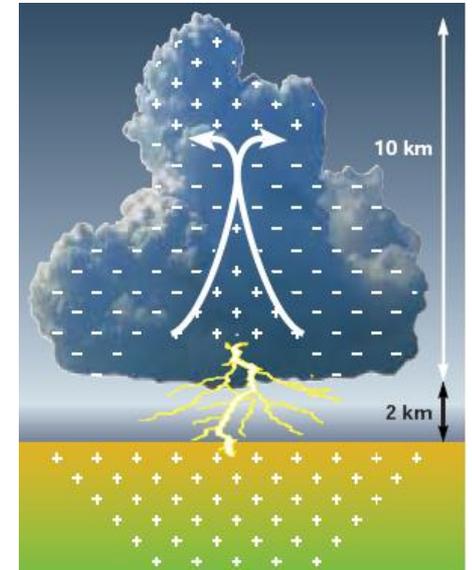
La foudre (4)

L'humidité du sol et la chaleur provoque un gros nuage : le cumulo-nimbus.

Des vents violents dans le nuage séparent les charges + et - comme dans une grosse machine électrostatique. Les charges positives migrent vers le sommet du nuage.

Au sol se concentrent des charges positives.

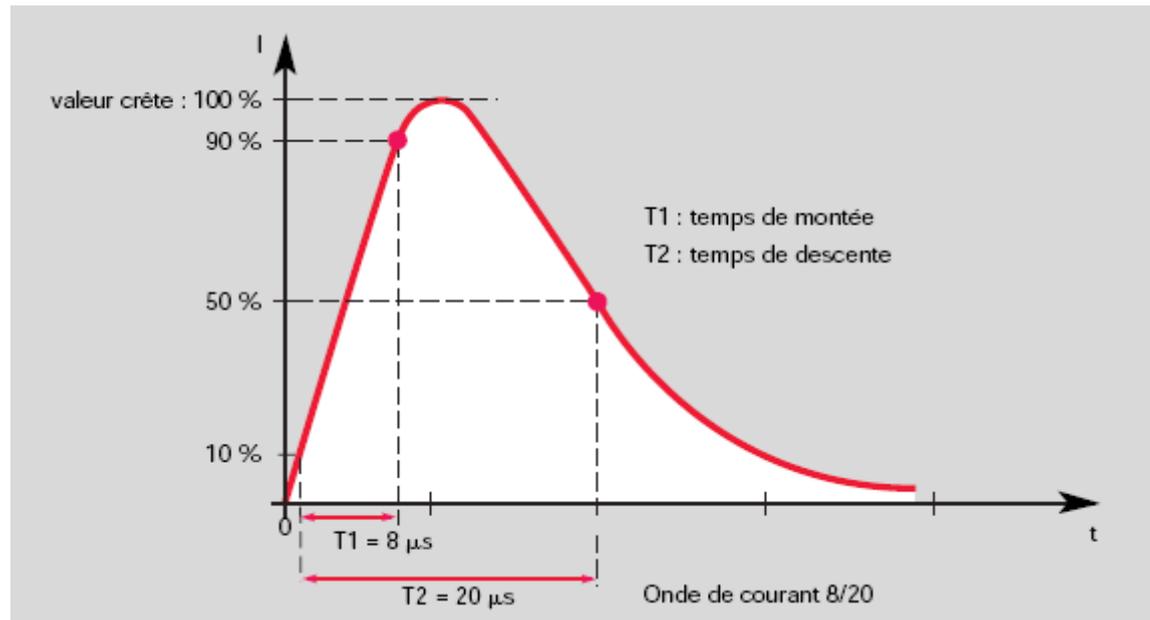
Quand le champ électrique est de l'ordre de 10 à 20 KV/m un précurseur descend du nuage vers le sol. A quelques dizaines de mètres du sol un arc en retour monte du sol vers le nuage. Quand les 2 arcs se rejoignent c'est la décharge vers le sol. Le tonnerre est l'onde sonore qui accompagne la décharge.



La foudre (5)



Un courant très fort pendant un temps très court.



La foudre (6)

Les effets directs.

- Au point d'impact,
 - dus à l'écoulement du courant dans les éléments plus ou moins conducteurs :

Électrocutions, incendies, destructions de matériel.



La foudre (7)

Les effets indirects.



Une surtension >10 KV peut créer un courant >1 KA !



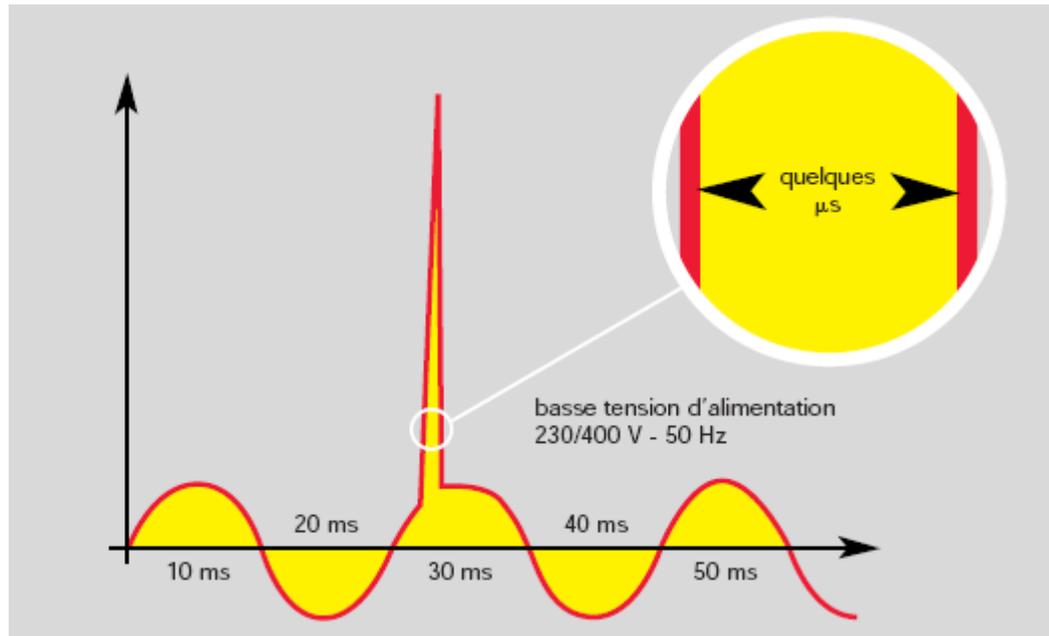
Le champ rayonné va créer des surtensions dans toutes les boucles.



Les fils de terre peuvent s'élever en potentiel : >1000 V.

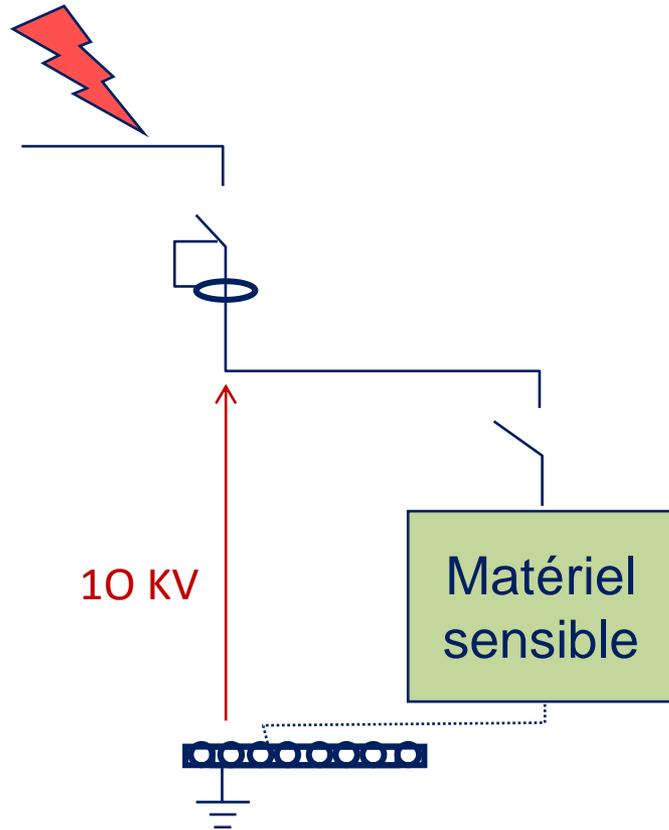
La foudre (8)

Les surtensions transitoires...

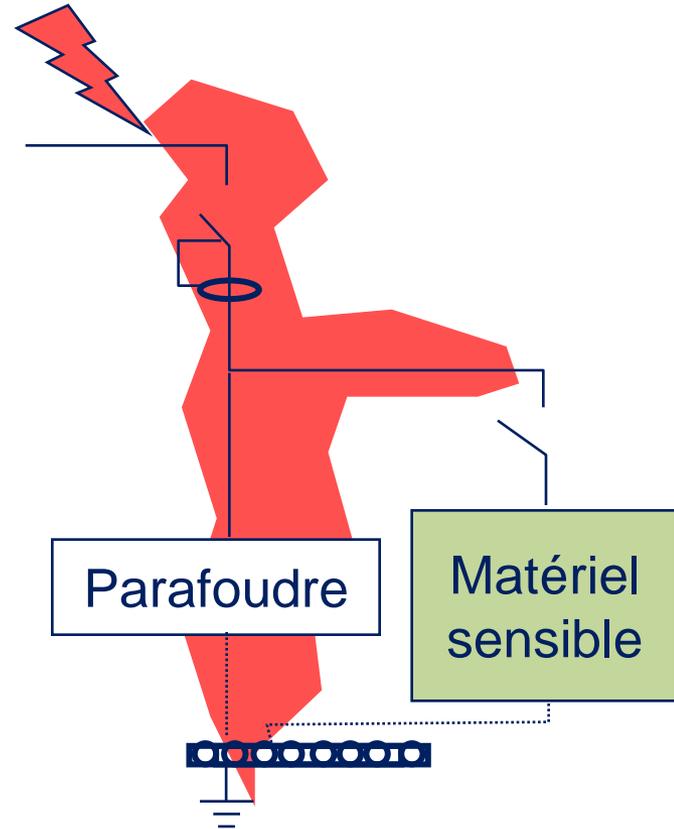


La foudre (9)

Sans parafoudre le matériel sera détruit



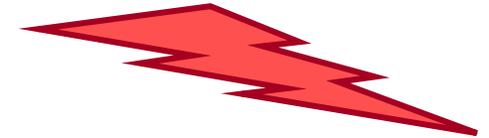
Le parafoudre protège le matériel sensible en évitant la montée de potentiel



Quelques petits problèmes (1)

- Énergie d'un choc de foudre

- Un choc de foudre se produit à $h \sim 5 \text{ km}$
- Le champ électrique statique moyen est de 10 kV/m
- La charge totale Q de l'éclair est de 50 Coulombs
- Il y a environ $1,5 \text{ millions de chocs de foudre par an}$ en France (soit un choc toutes les 20 secondes)



DDP entre nuage et sol : $U = E \cdot h = 10^4 \times 5 \times 10^3 = 50 \text{ MV}$

Capacité équivalente : $C = \frac{Q}{U} = \frac{50}{50 \times 10^6} = 1 \mu\text{F}$

Énergie stockée dans ce condensateur : $W = \frac{1}{2}CU^2 \approx 10^9 \text{ Joules}$

Puissance moyenne dissipée par la foudre : $P = \frac{W}{T} = \frac{10^9}{20} = 50 \text{ MW}$

Quelques petits problèmes (2)

- La tension de pas

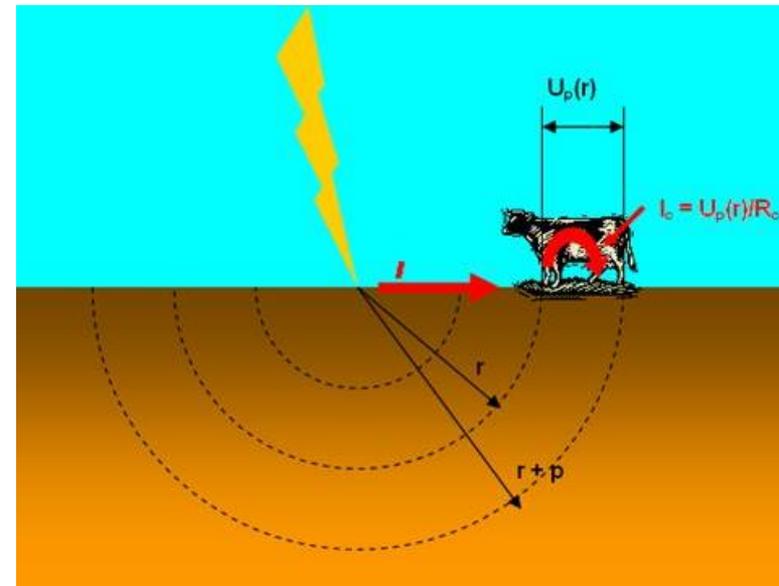
Quelle est la DDP entre les pattes d'une vache qui broute à 100 m du point d'impact d'un choc de foudre de 25KA ? (la résistivité du sol est \sim de 1000 ohms.m).

D'après le théorème d'Ampère : $U = \frac{0.2 \times I \times \rho}{r}$

$$U_{100} \approx \frac{0.2 \times 25 \times 10^3 \times 10^3}{100} = 50000 \text{Volts}$$

$$U_{101} \approx \frac{0.2 \times 25 \times 10^3 \times 10^3}{101} = 49500 \text{Volts}$$

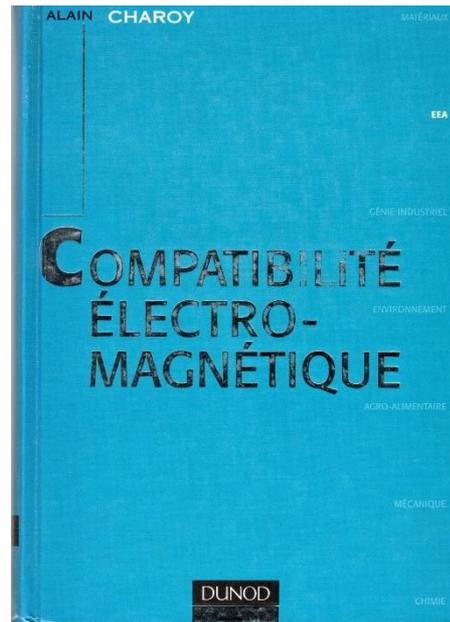
$$U = U_{100} - U_{101} = 500 \text{Volts}$$



Conclusion

- La *CEM* a une importance fondamentale dans le domaine de l'électronique et de l'ingénierie dans un environnement de plus en plus connecté.
- Réduction des perturbations conduites et électromagnétiques,
 - garantit un fonctionnement correct des dispositifs électroniques,
 - qualité des communications sans fil,
 - conformité réglementaire.

Pour en savoir plus



Fin

- **Merci de votre attention !**