

Compatibilité Electromagnétique de tous les jours

Qu'est-ce 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 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.

Règle d'Or numéro 1 :



- Conceptuellement les électrons CEM se distinguent des autres (électrons) par le fait qu'ils sont rigoureusement identiques !

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 !

Quelques notions d'électricité

- **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

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

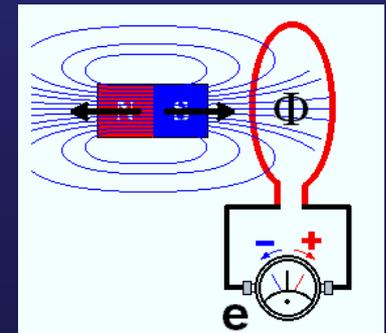
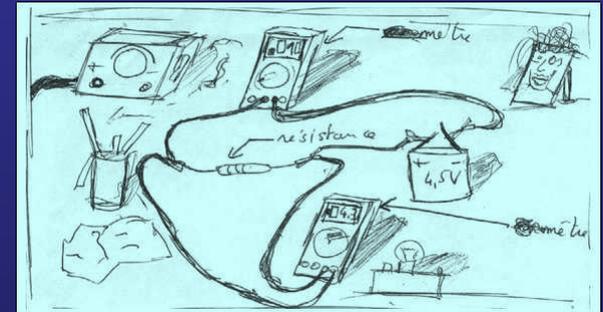


Quelques notions d'électricité

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

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

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



La notion de terre

- 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

- 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.

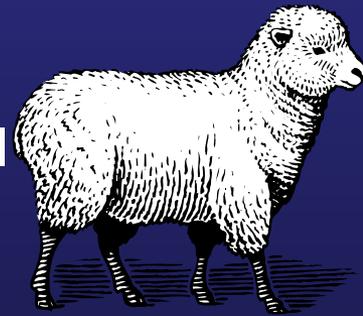
- On peut se poser les questions suivantes :

- - **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

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



Quelques exemples

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



Quelques exemples

- 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

- 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

- 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

- 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.

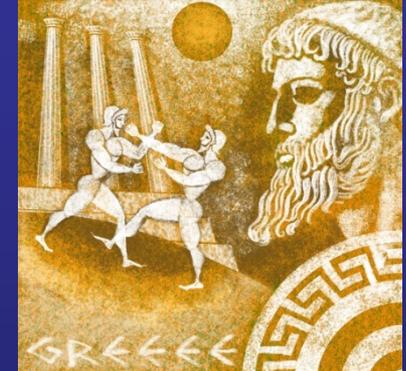


Moralité

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

Le phénomène électrostatique

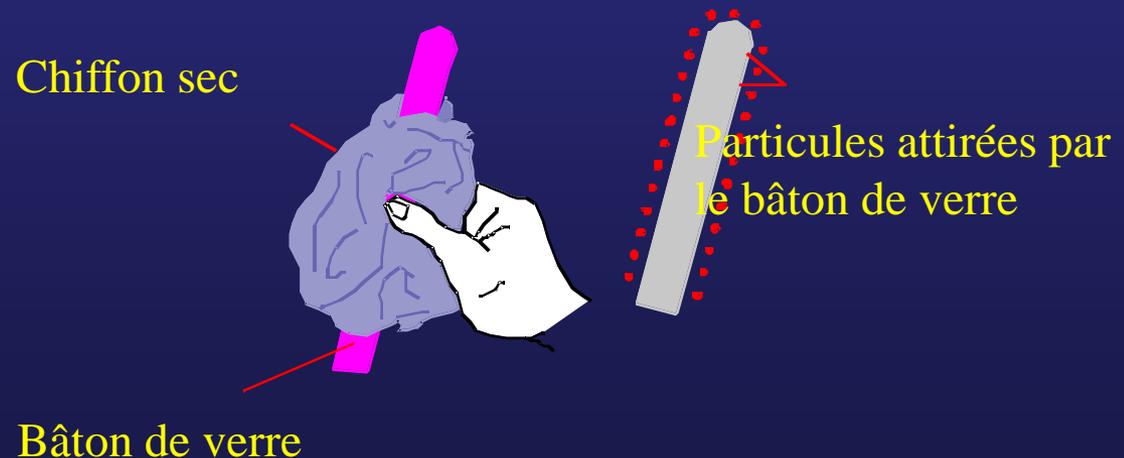
- Connu depuis 2500 ans.
- Le mot électron vient du grec (**ambre**).
- Statique vient du latin (**immobile**).



- 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.

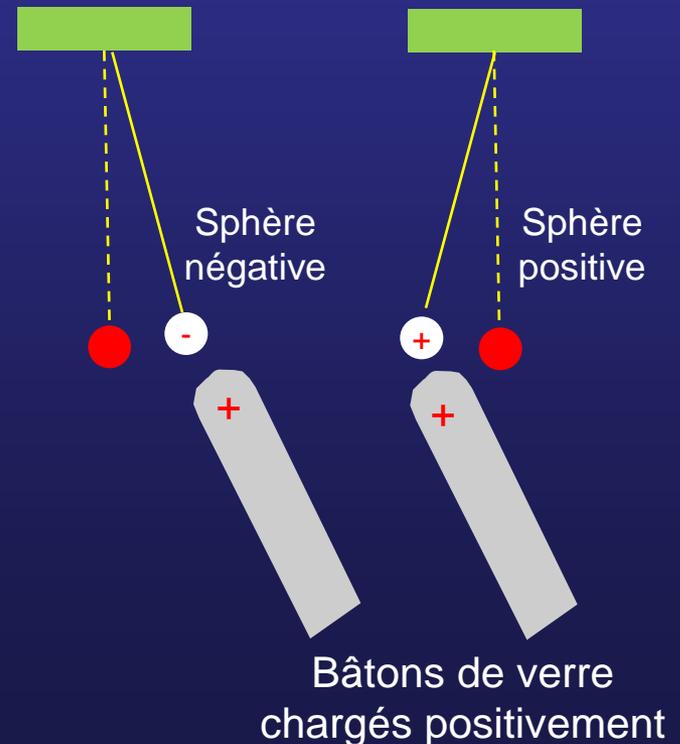
Le phénomène électrostatique

- 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.



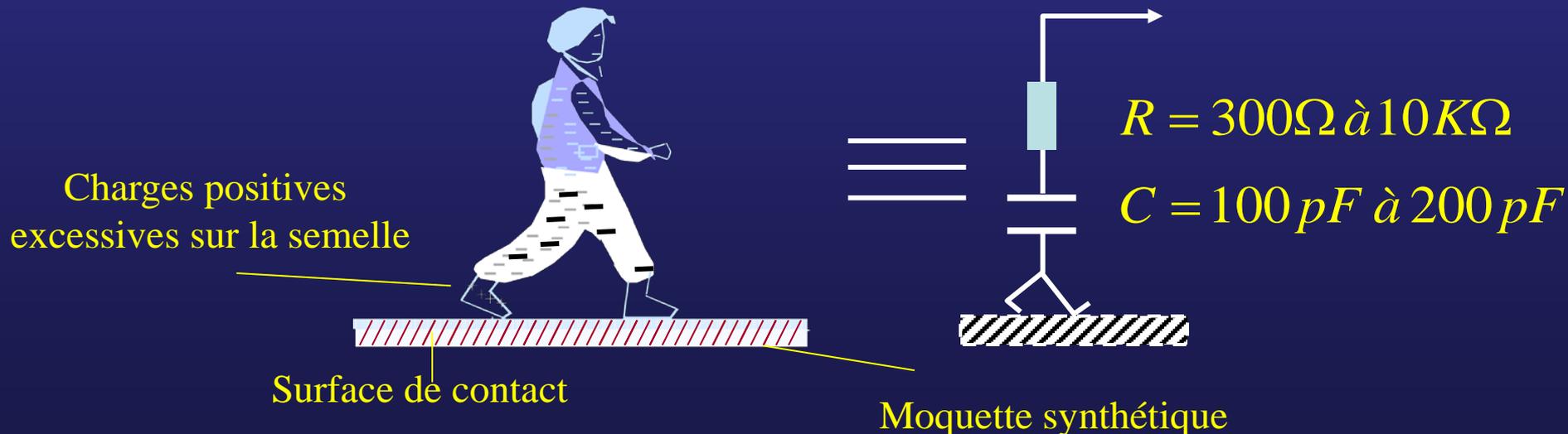
Force entre 2 corps chargés

- 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



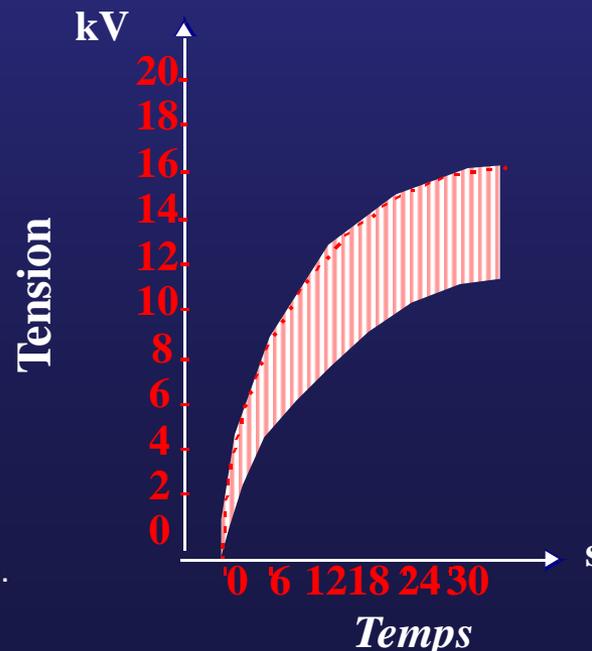
Exemple : La charge d'une personne

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.



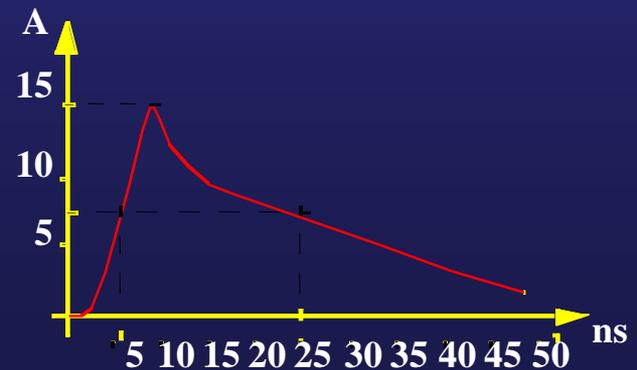
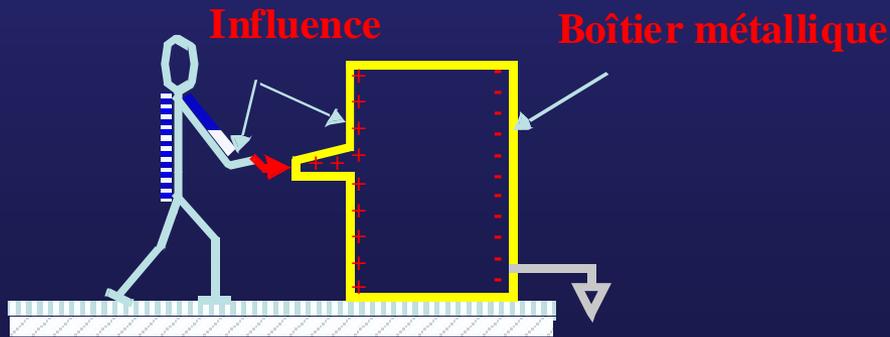
Exemple : La charge d'une personne

- 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

- 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...



Exemple : L'avion



- 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



- 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.

Exemple : La voiture

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



Exemple : La voiture

- 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.

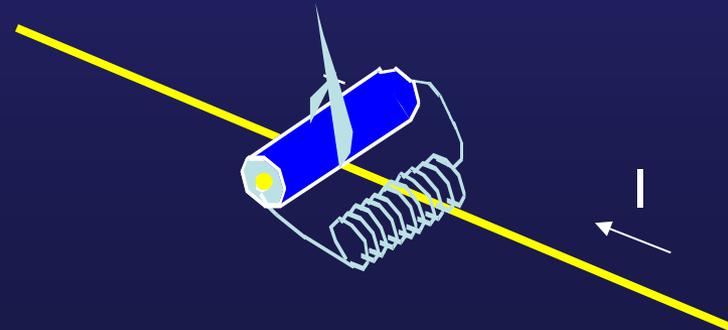
L'onde électromagnétique

- **Courant et champ magnétique**

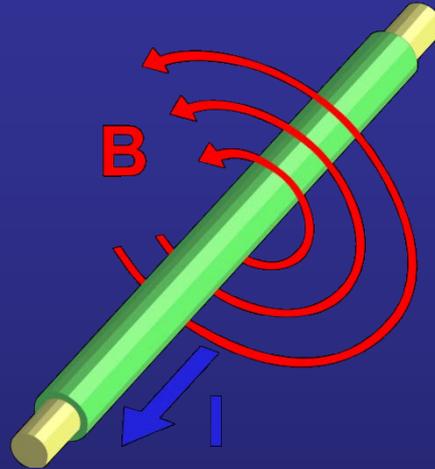
Au dessus d'un fil parcouru par un courant I , plaçons une boussole.

- 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



L'onde électromagnétique



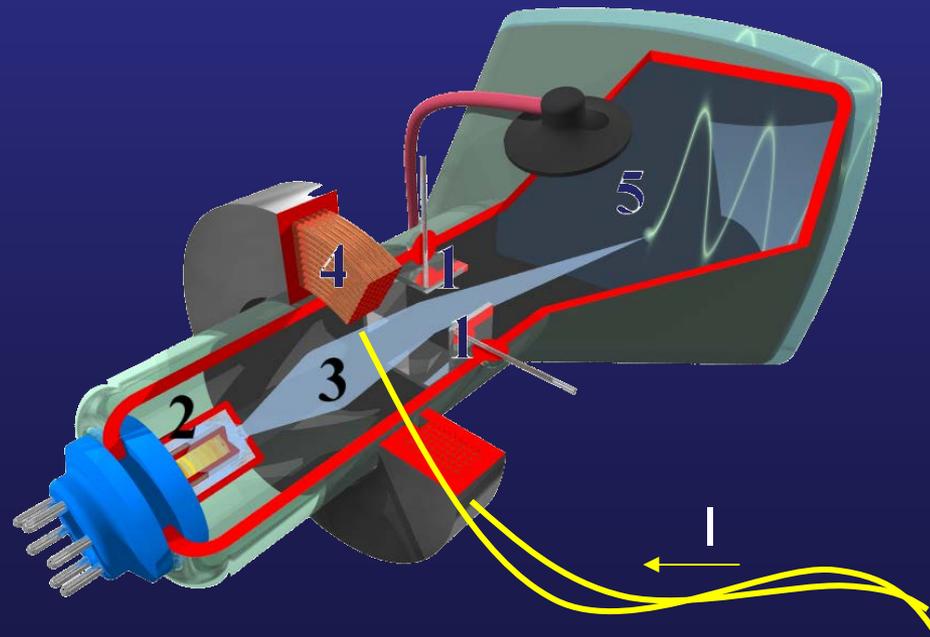
- Si l'on plaçait des petites aiguilles aimantées tout autour du fil, on aurait un ensemble de cercles représentant le champ magnétique.



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.

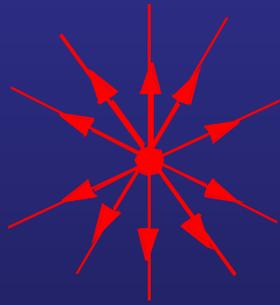
On appelle champs de forces électriques ou champs électriques les régions de l'espace où une charge électrique se trouve soumise à une force électrique

- 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.

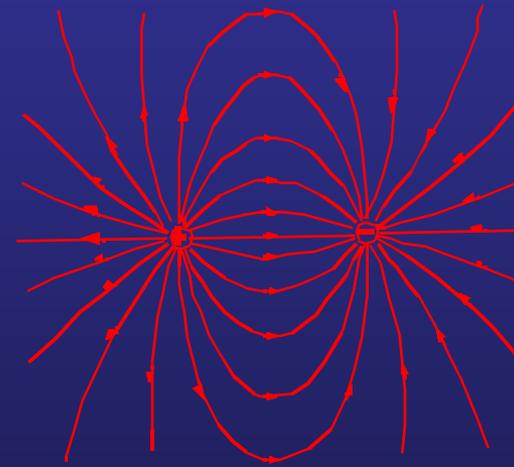
L'intensité du champ électrique varie avec la distance. Elle est exprimé en V/m

L'onde électromagnétique

- Une tension sur un conducteur engendre un champ électrique



Lignes de champs créées par une charge ponctuelle

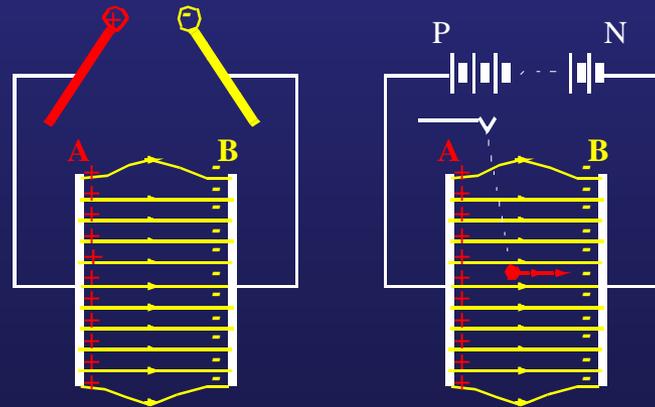


Lignes de champs créées par deux charges ponctuelles

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

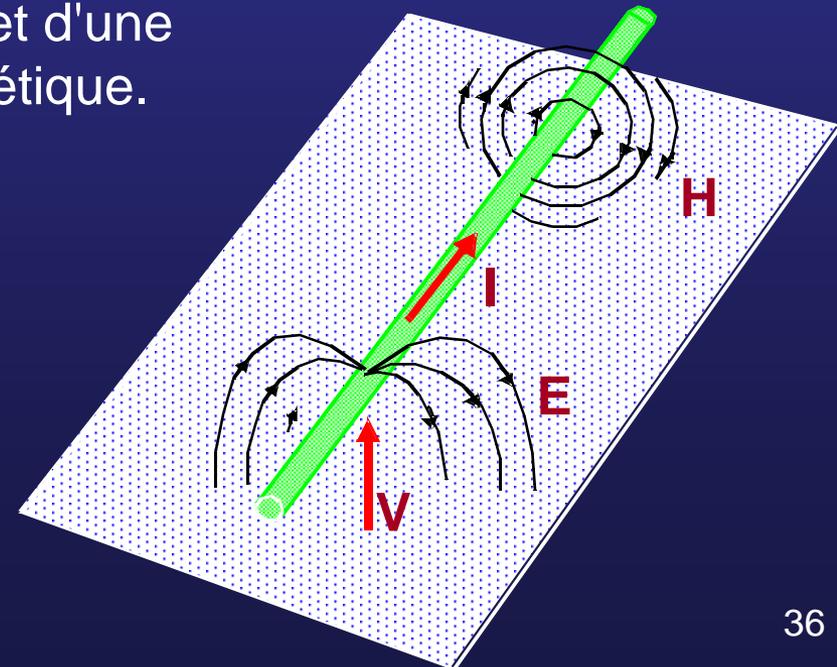
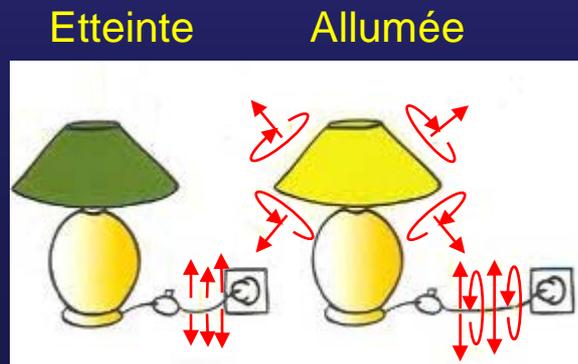
L'onde électromagnétique

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.

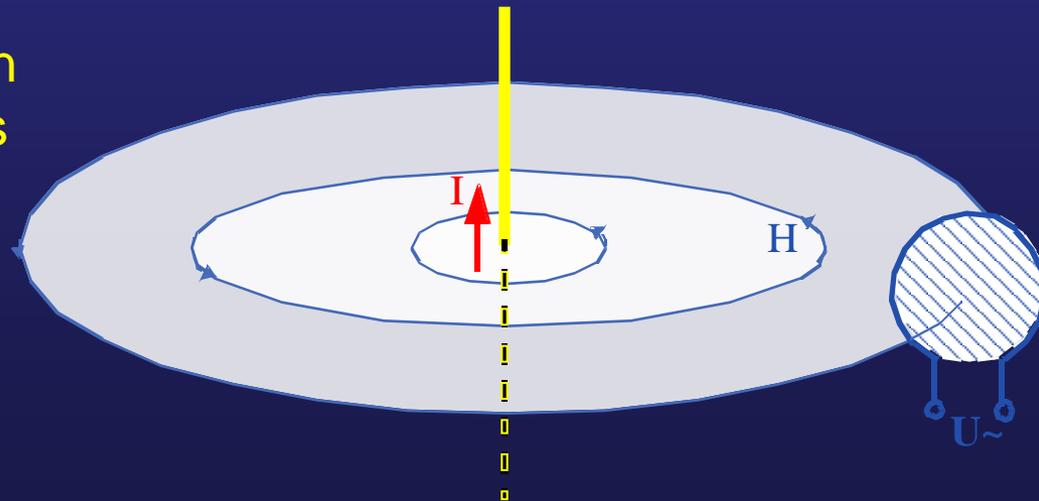
D'une manière générale, à un signal électrique, qui est l'évolution au cours du temps d'un courant et d'une tension, est associée une onde électromagnétique.



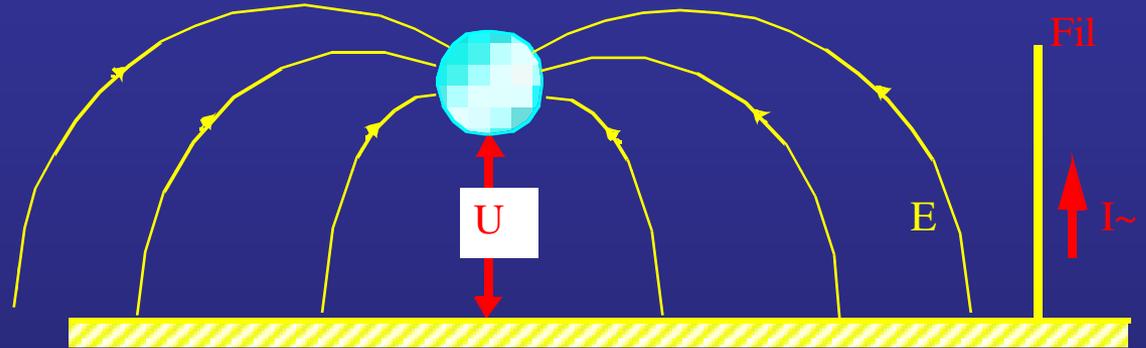
Les effets du champ électromagnétique

- 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



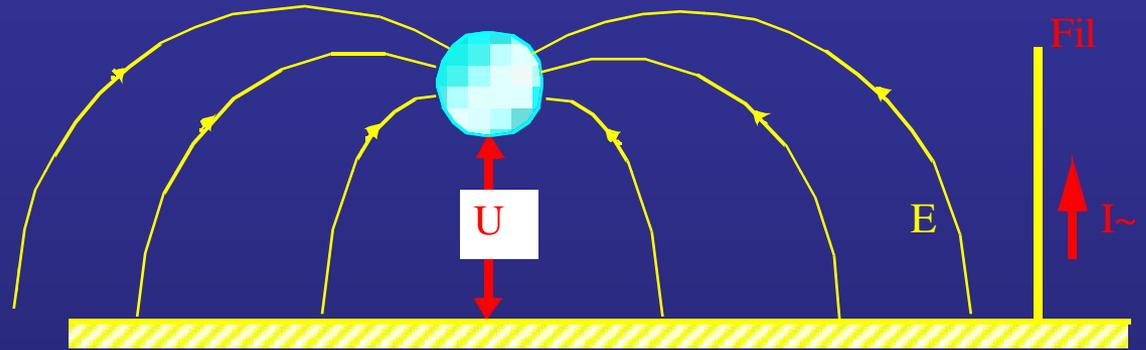
Les effets du champ électromagnétique



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

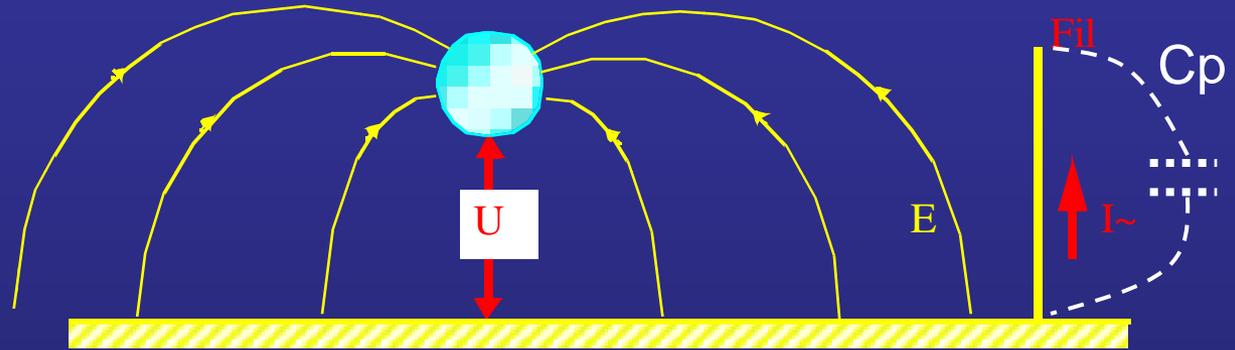
Ces 2 effets sont fondamentaux en CEM, leur connaissance permet de mieux s'en protéger.

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 à $1000\mu\text{T}$

Sèche cheveux : $2000\mu\text{T}$ à 3cm

Aspirateur : 200 à $800\mu\text{T}$

TGV : $50\mu\text{T}$

Ordinateur : 0,7 à $10\mu\text{T}$

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.

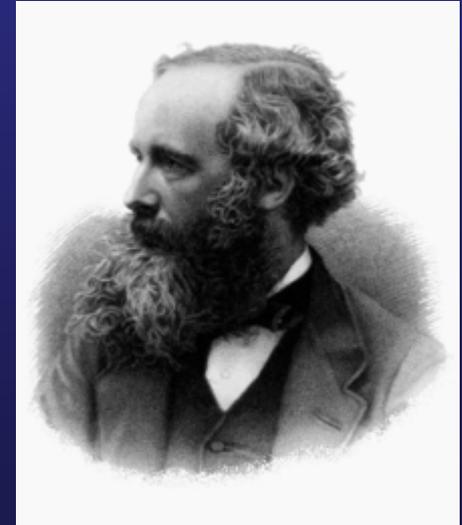
En CEM, il est nécessaire de pouvoir considérer ces deux composantes indépendamment l'une de l'autre. Une protection contre le champ magnétique sera différente d'une protection contre le champ électrique.

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...



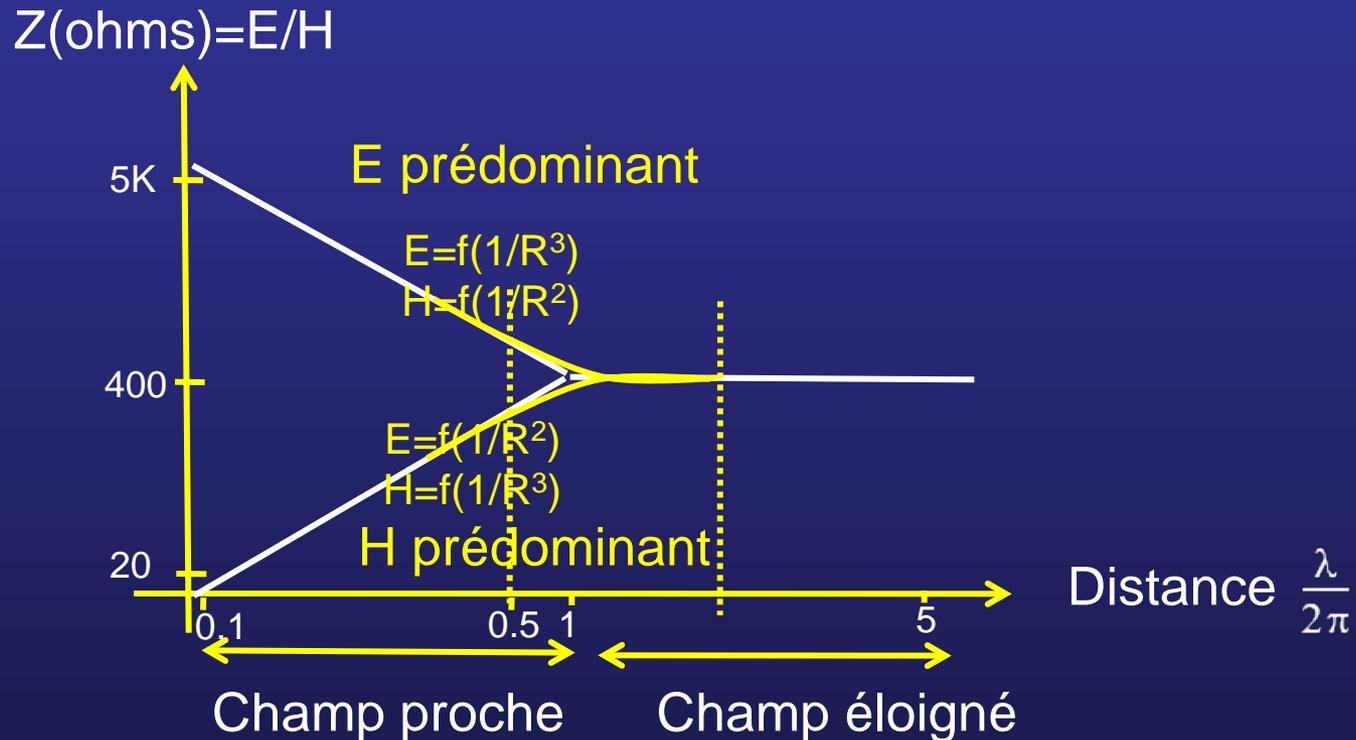
Pour aller un peu plus loin avec le champ électromagnétique

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

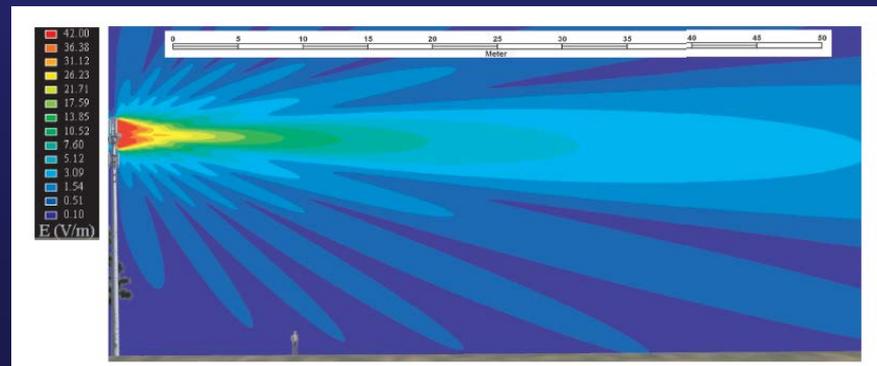
- Rappel :
E en V/m
H en A/m
- Le produit $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ est homogène à une puissance par m^2 W/m^2 . c'est le vecteur de **Pointing**.
- Le rapport \mathbf{E}/\mathbf{H} est homogène à une impédance et s'exprime en **ohms**. C'est l'impédance de l'onde en espace libre (377 ohms dans le vide).

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

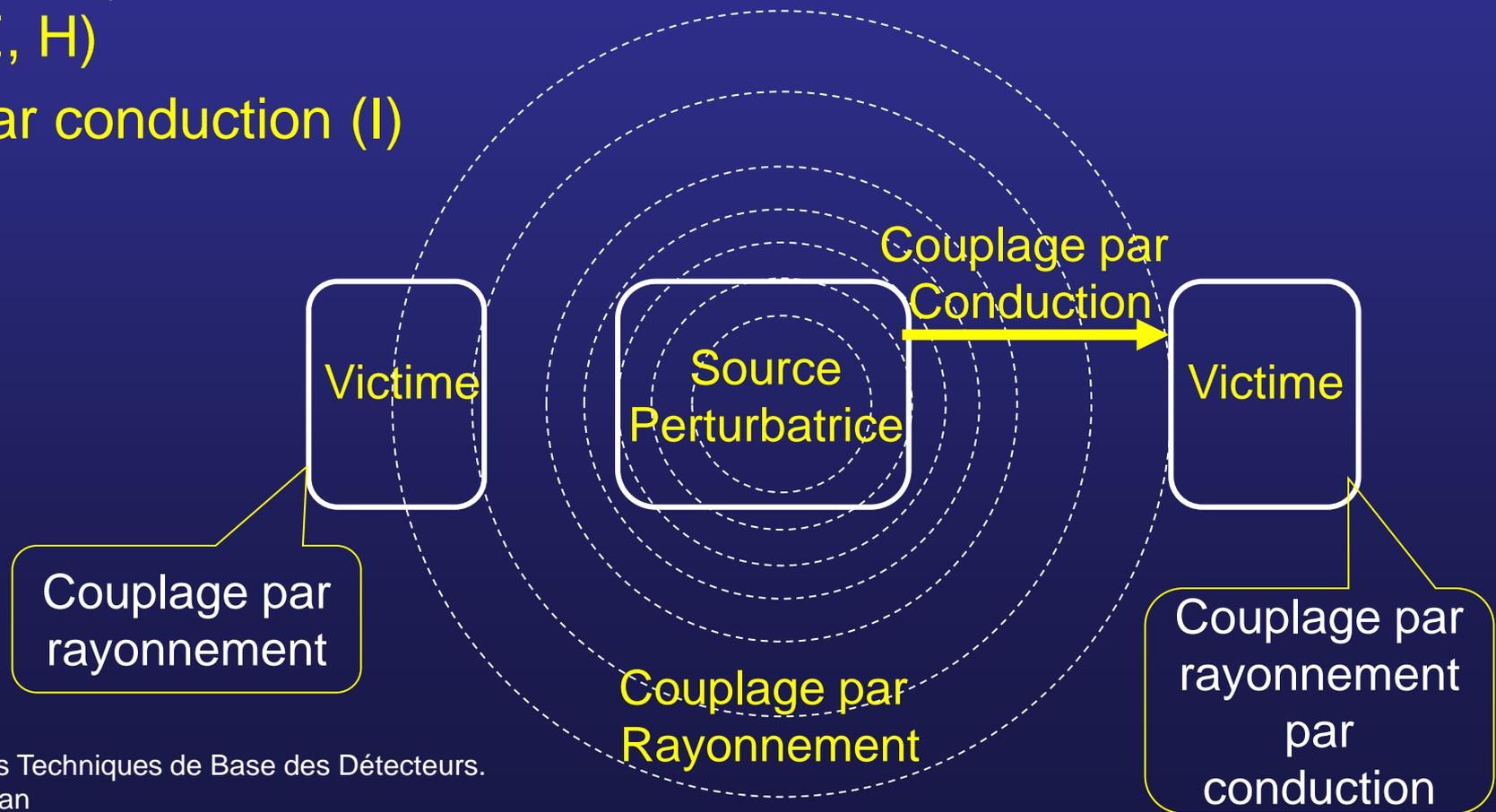
- Effets possibles
 - Micro-ondes (si 0,25W f entre 900 et 1800MHz) $dT < 0,1^{\circ}\text{C}$
 - Champ électrique
 - Champ magnétique
 - Psychologique



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

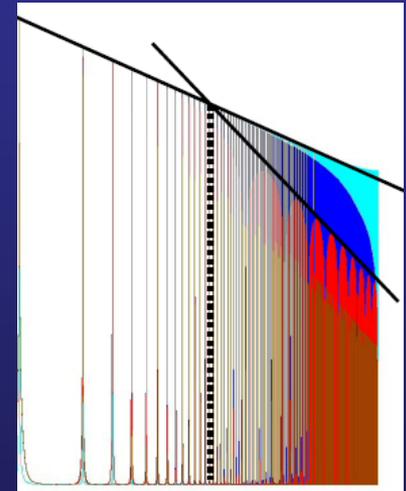
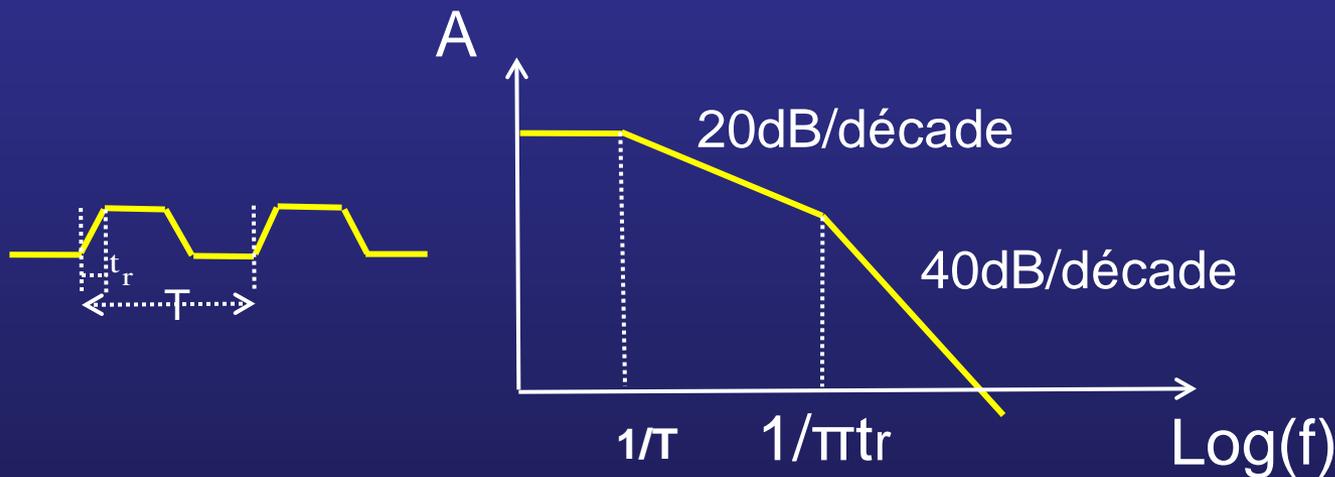
Modes de transmission des perturbations

- 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 $Z=R$

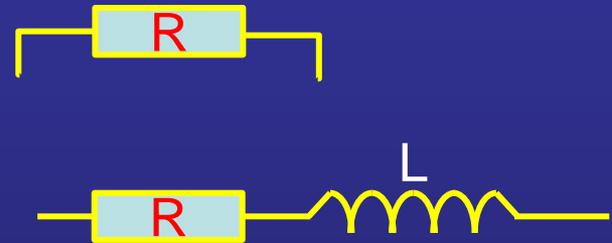
En régime fréquentiel $Z=R+jL\omega$

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

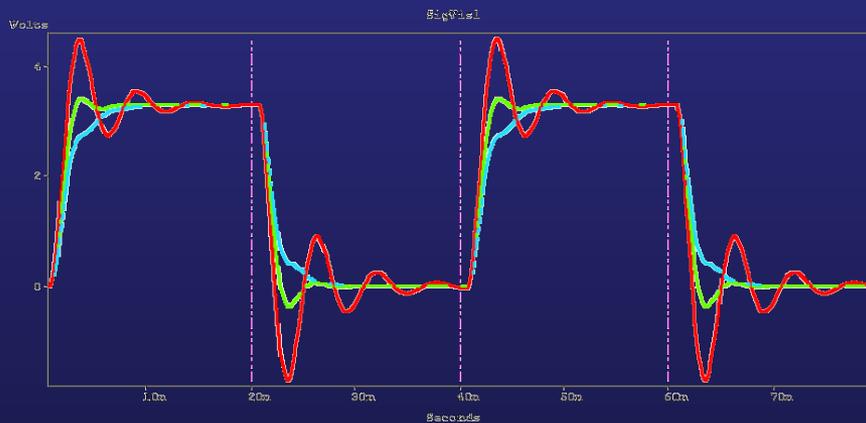
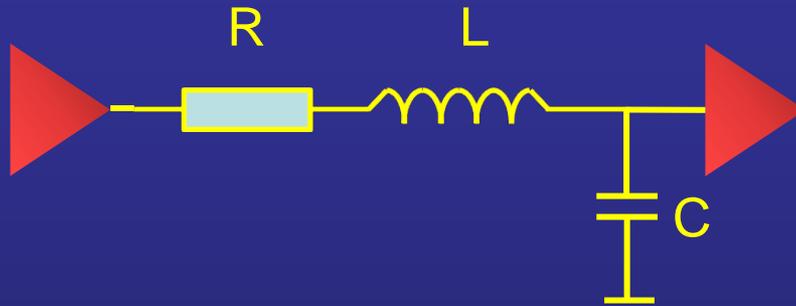
Pour 1MHz, $L\omega=6,28\ \Omega/\text{m}/\text{MHz}$

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



Time	Node	Value
load2	res1sc2-1: R	1.0000 ohms
load2	res1sc2-1: R	22.778 ohms
load2	res1sc2-1: R	64.555 ohms

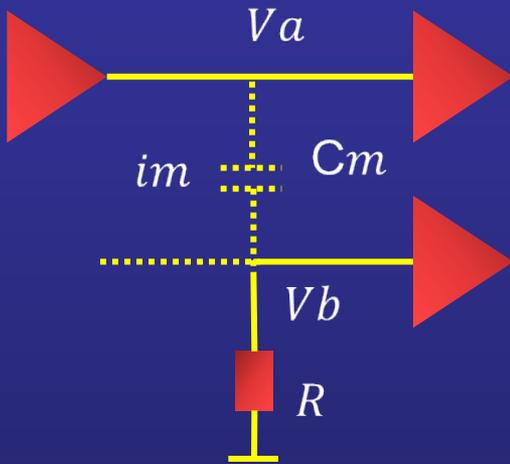
Time	Marker
---	Transition Time

Il faut diminuer « l'overshoot » !

- Rayonnement excessif
- Destruction de circuits
- Dysfonctionnement

R permet d'amortir le circuit

Diaphonie capacitive



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

$$V_b = R \cdot i_m$$

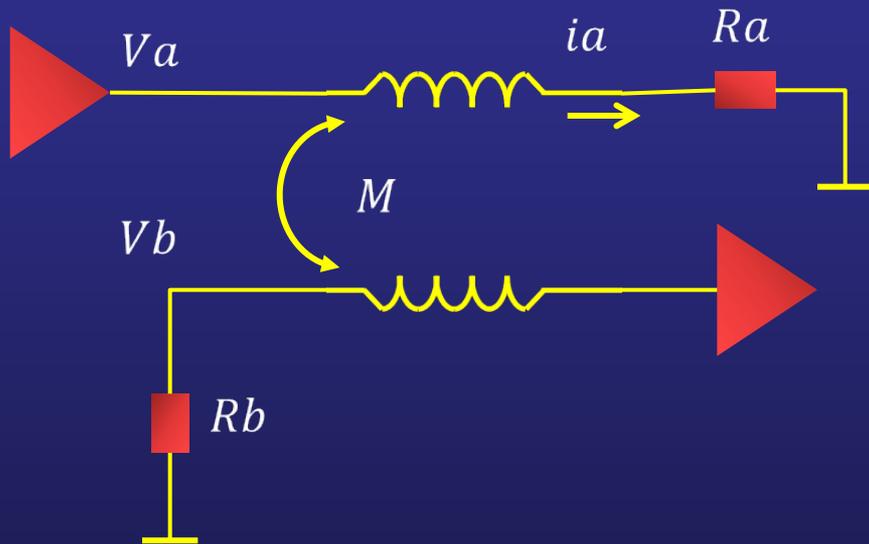
$$V_b = R \cdot C_m \cdot \frac{dV_a}{T_r}$$

$V_{a,b}$



- La diaphonie dépend de C_m et de T_r

Diaphonie inductive



$$V_a \sim R_a \cdot i_a$$

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

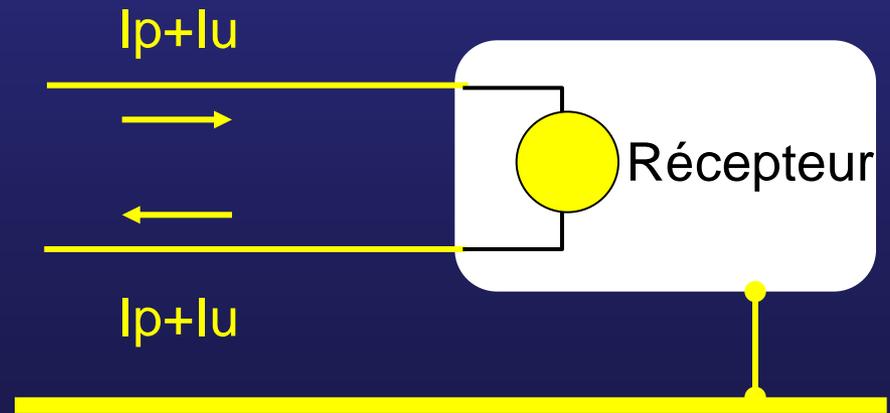
$$V_b = M \frac{di_a}{dt}$$

$$V_b = M \frac{dV_a}{R_a \tau}$$

- Eloigner les pistes et/ou fils sensibles

Le mode différentiel

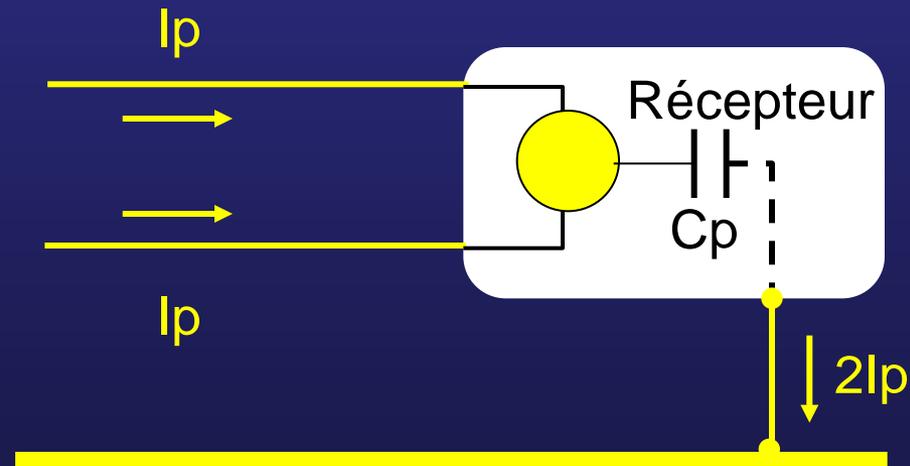
- Dans ce mode la perturbation I_p est transmise à un seul des 2 conducteurs. Le courant de mode différentiel se propage sur l'un des conducteurs, passe à travers le récepteur et revient par un autre conducteur.
- Les signaux utiles I_u sont également transmis dans ce mode !
- 10% des perturbations



Le mode commun

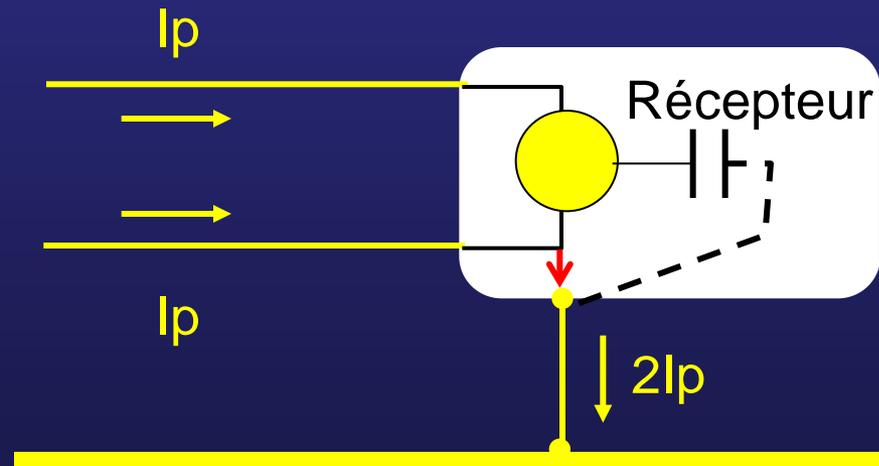
- Dans ce mode la perturbation I_p est transmise, dans le même sens, à l'ensemble des conducteurs et revient à la masse par les capacités parasites.
- 90% des perturbations

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



Le mode commun

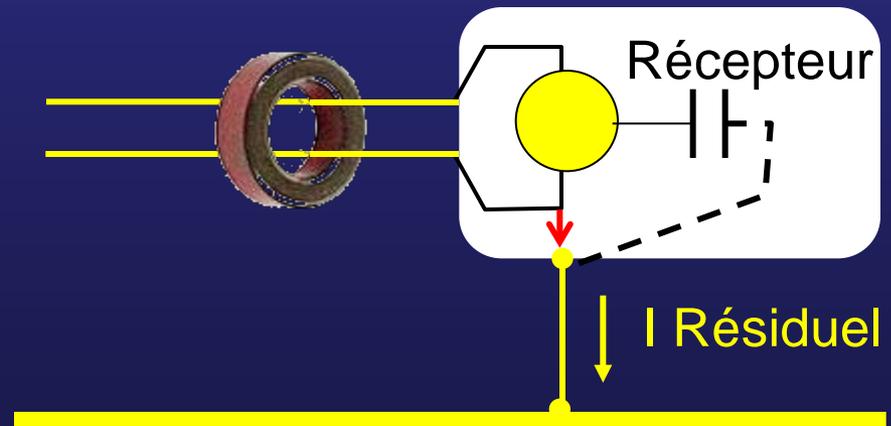
- Pour limiter les perturbations de mode commun, il faut que le récepteur soit correctement relié à la masse !



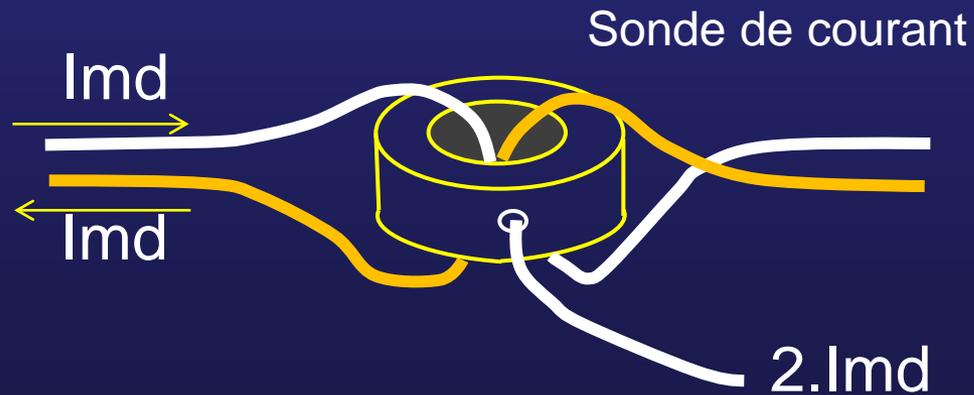
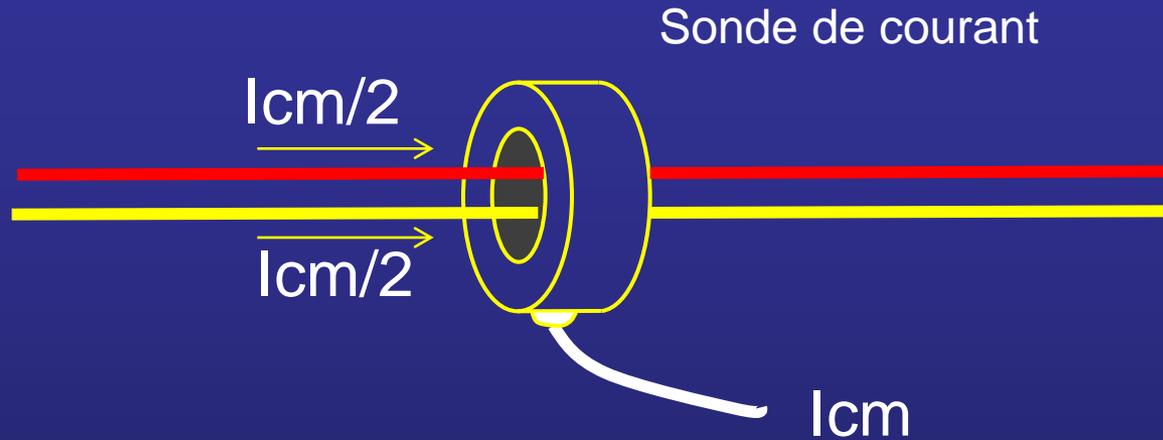
Le mode commun

- 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

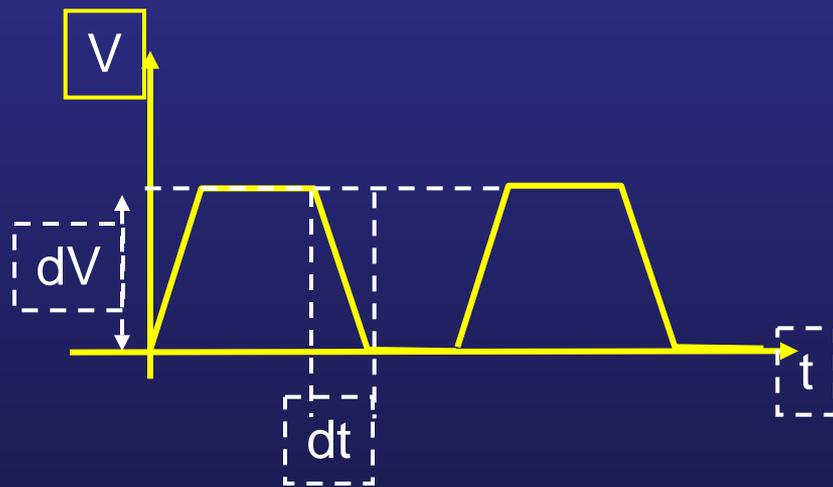


Mesurer les courants de MC et MD

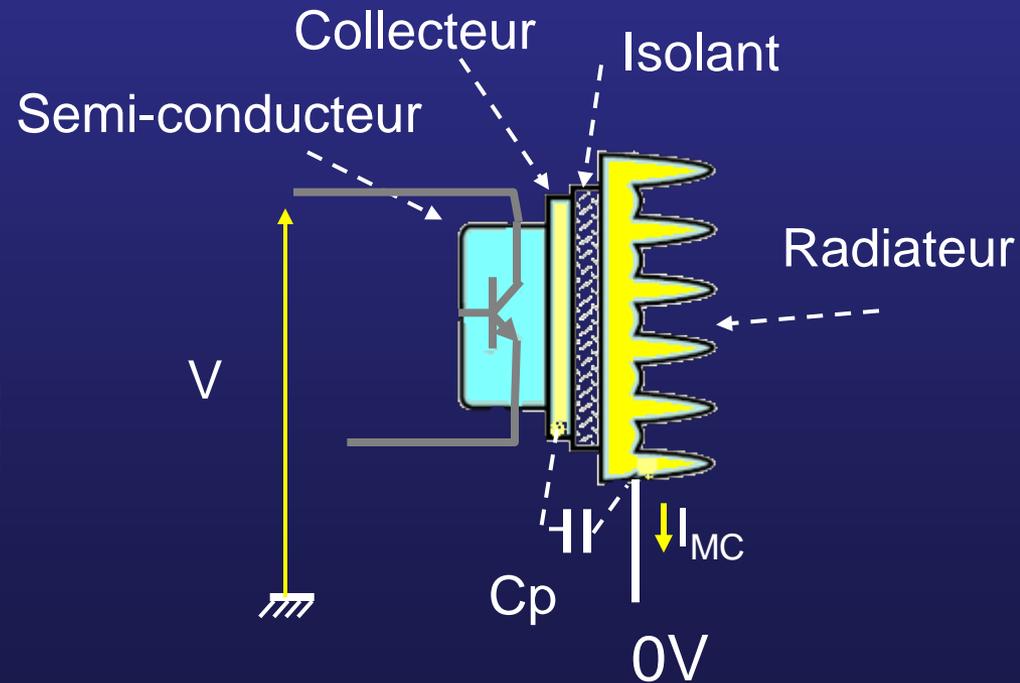


Exemple de source de perturbations conduites en électronique de puissance

Exemple d'une alimentation à découpage



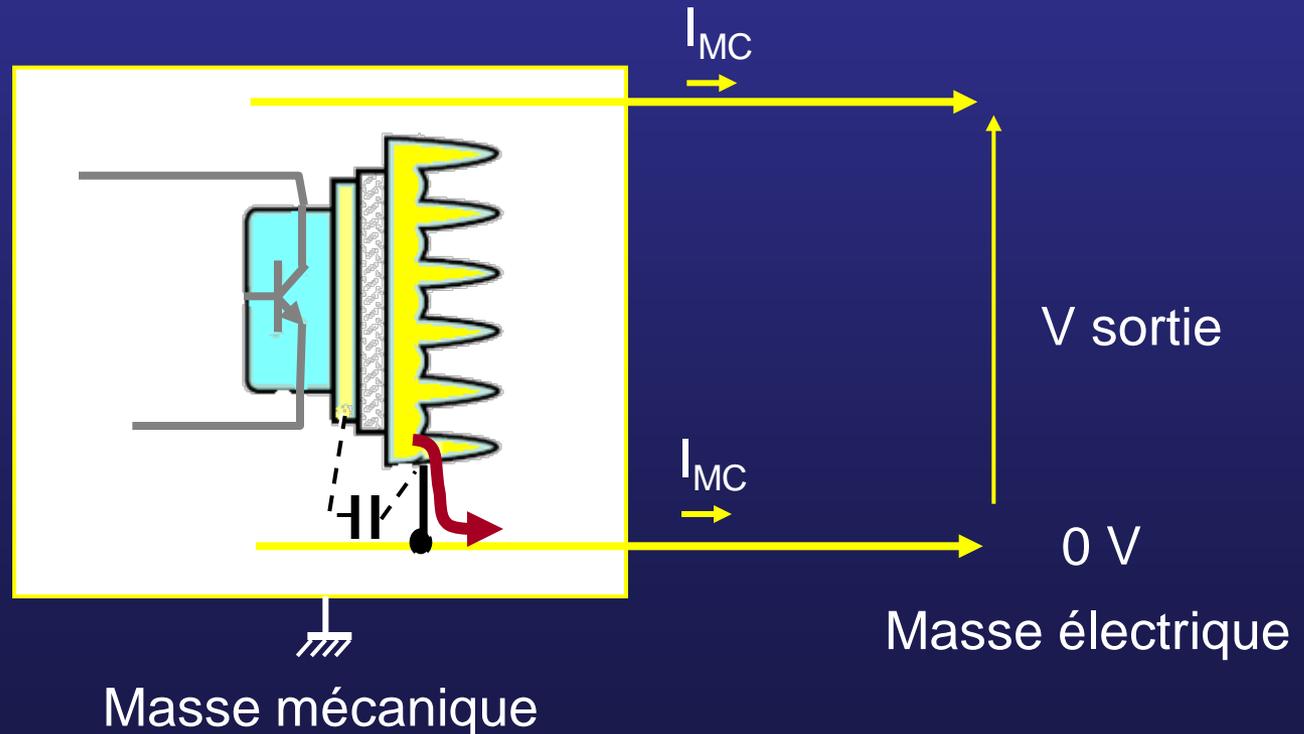
$$I_{MC} = C_p \frac{dV}{dt}$$



Exemple de source de perturbations conduites en électronique de puissance

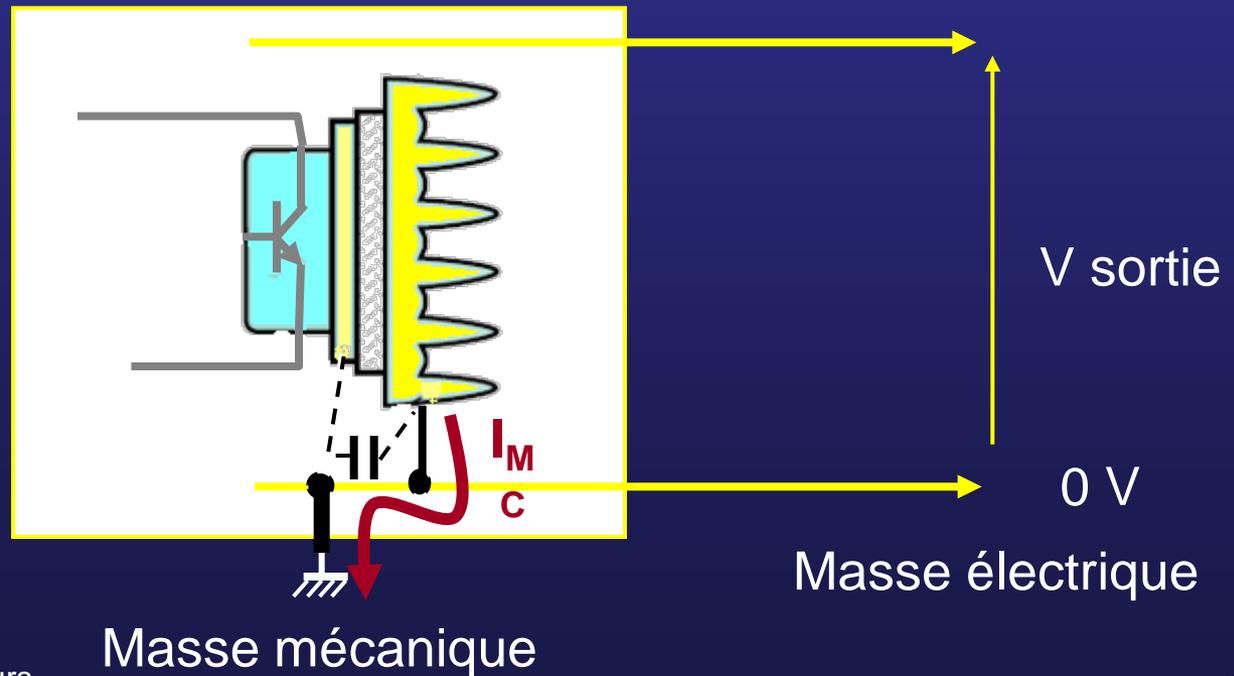
Cas d'une alimentation flottante, le 0V électrique n'est pas relié à la masse mécanique

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



Résumé des perturbations conduites



Cas 1

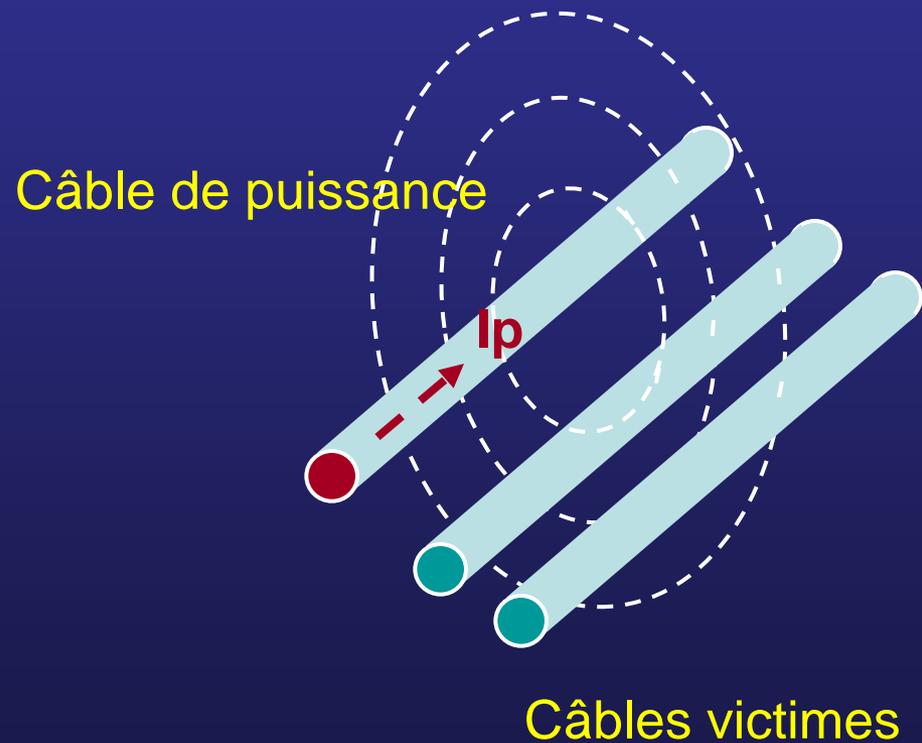


Cas 2

Couplage par rayonnement

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

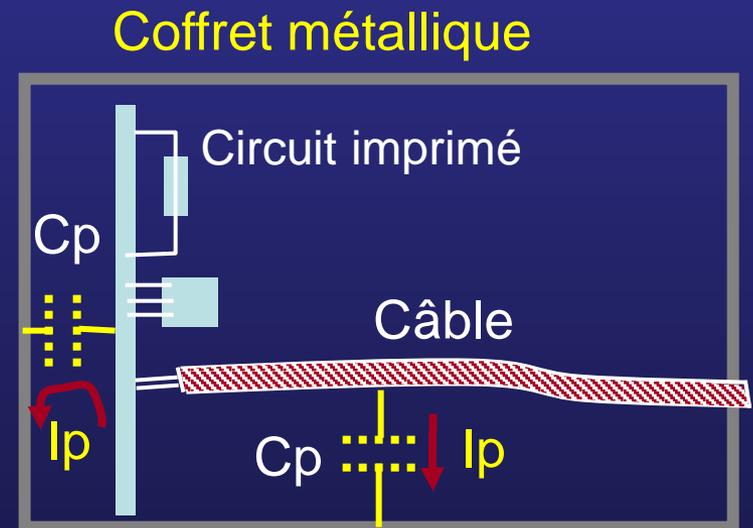
Une tension induite peut être gênante si le courant perturbateur est élevé ou de variation rapide.



Couplage par rayonnement

- 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

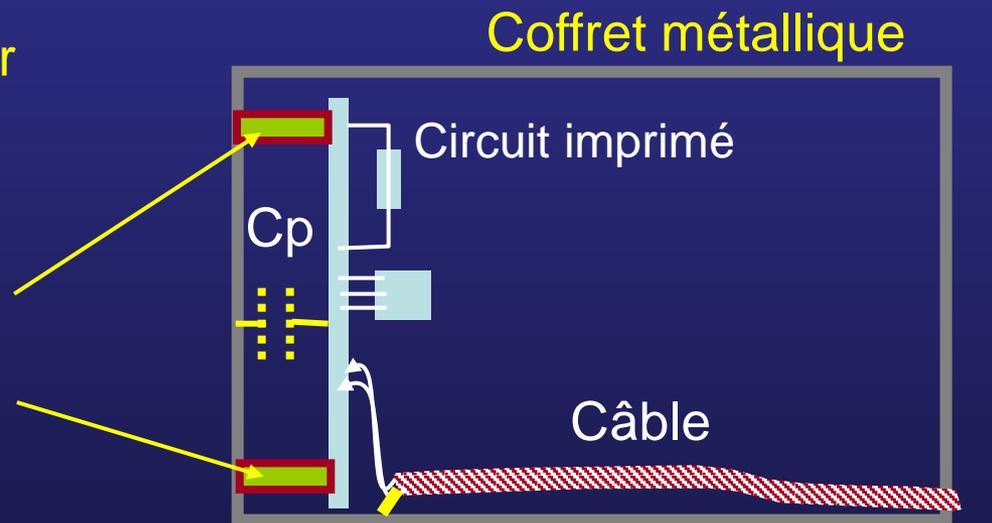
Toute différence de potentielle entre ces éléments engendrera un courant parasite par couplage capacitif.



Couplage par rayonnement

- 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.



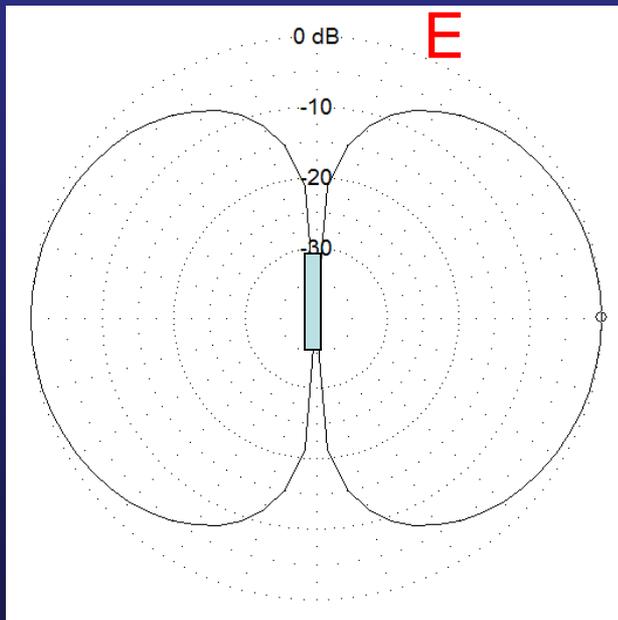
Plaquer le câble ou mieux le blinder

Fente dans un plan de masse

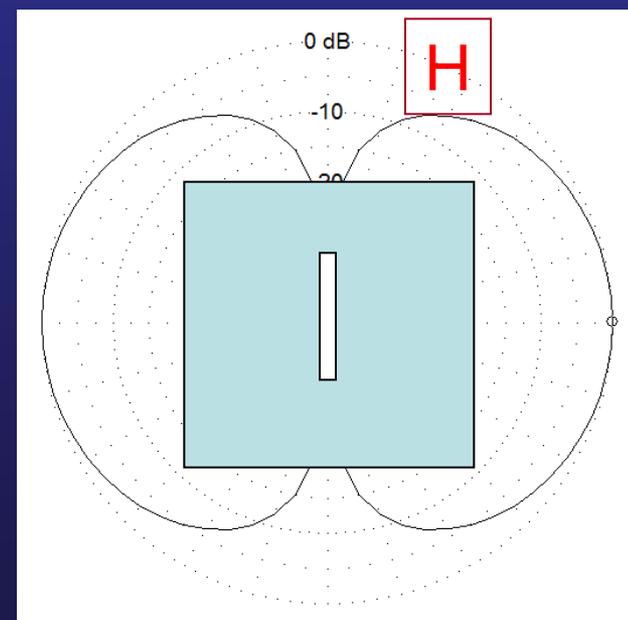
Un plan de masse a une impédance faible s'il ne présente pas de fente.
Une fente dans un plan de masse rayonne comme une antenne métallique complémentaire (avec les champs E et H inversés).

Il faut donc éviter de fendre un plan de masse !

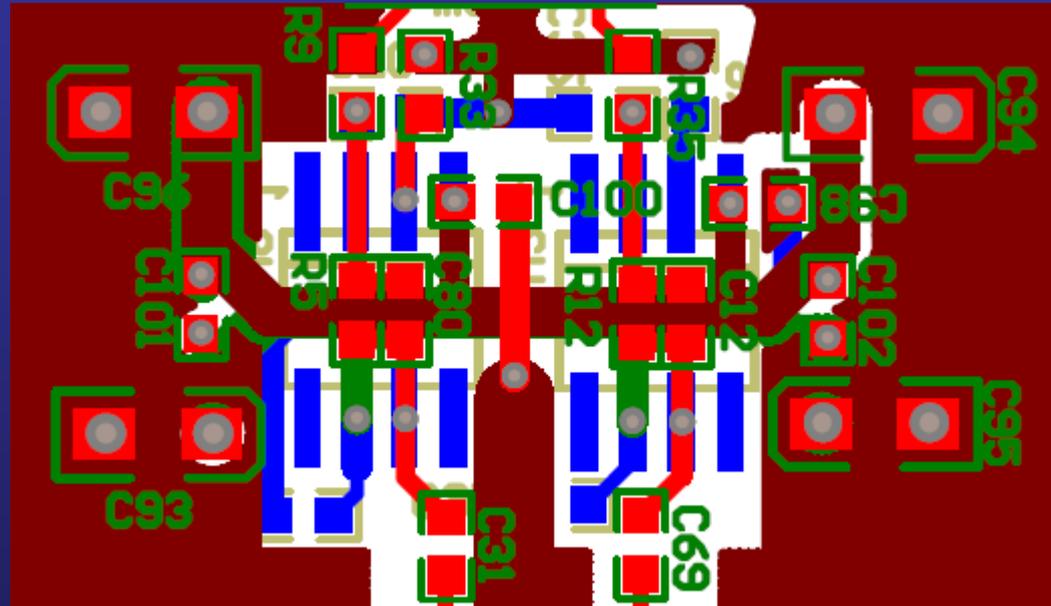
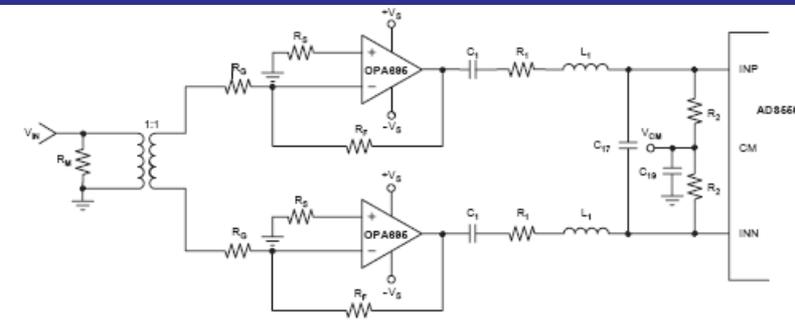
Champ électrique



Champ magnétique

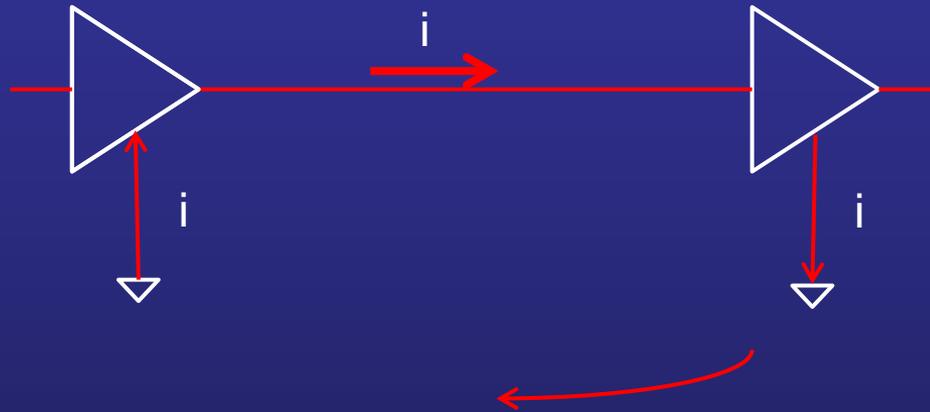


Fente dans un plan de masse



Exemple de routage préconisé (doc Texas Instrument sbaa113.pdf),
d'amplification large bande.... **Très mauvais routage !**
Le plan de masse est 2 fois coupé : équivalent à 2 antennes quart d'onde

Par où revient le signal ?



Le courant doit revenir !

- Aussi près que possible du chemin aller

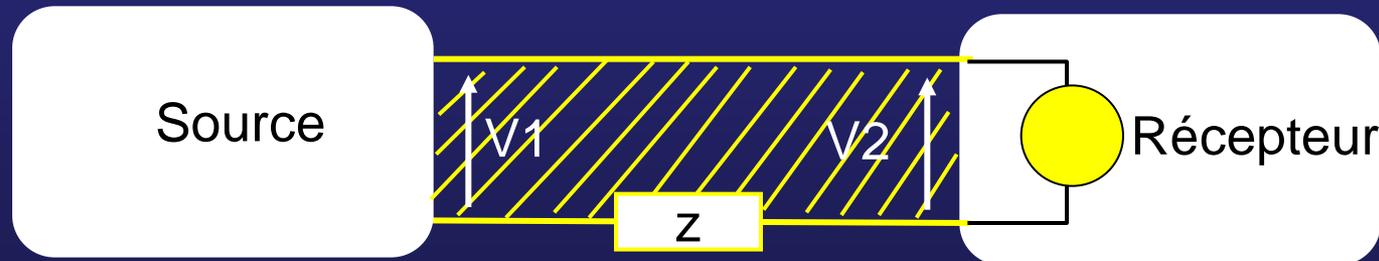
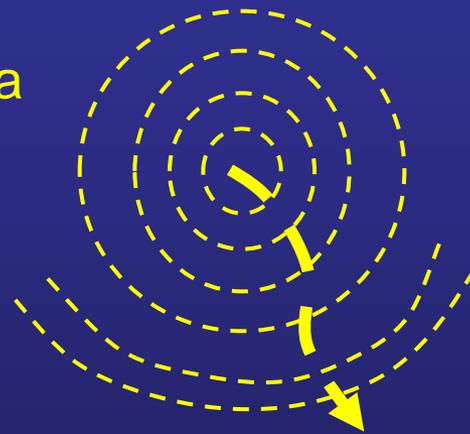
Les connexions entre éléments

- 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

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



L'impédance commune Z est telle que $V_1 \neq V_2$

Les connexions entre éléments

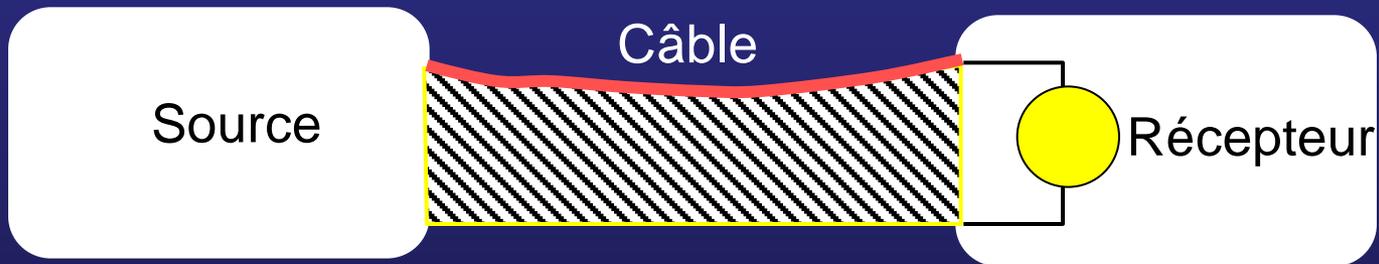
- Les fameuses boucles de masse
- Peut-on les éviter ?

Les connexions entre éléments

- Les fameuses boucles de masse

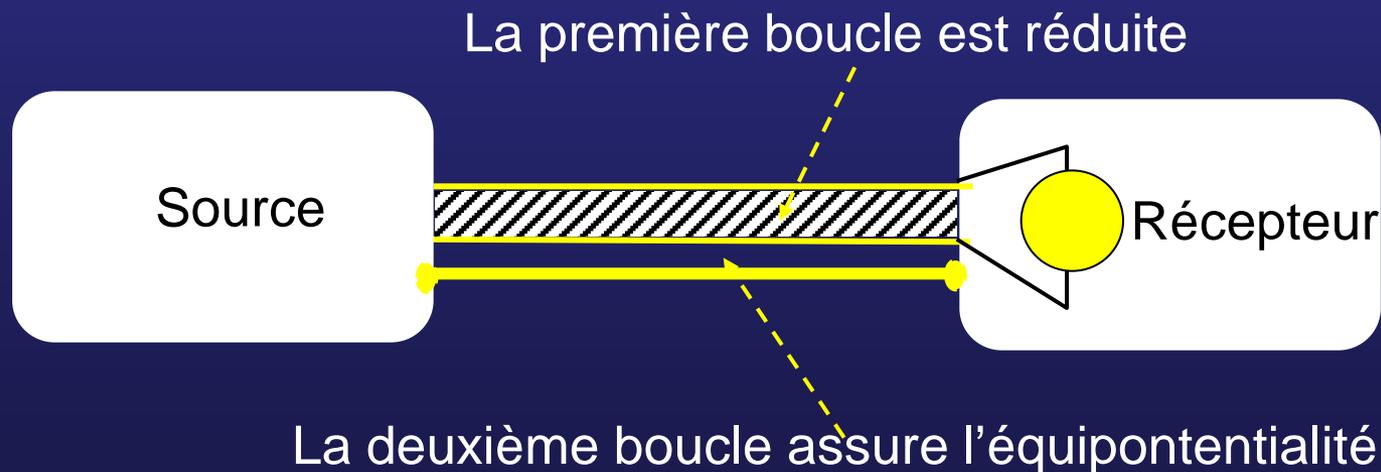
Dés que l'on connecte 2 éléments on crée une boucle !

Les connexions entre éléments



Les connexions entre éléments

- 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.



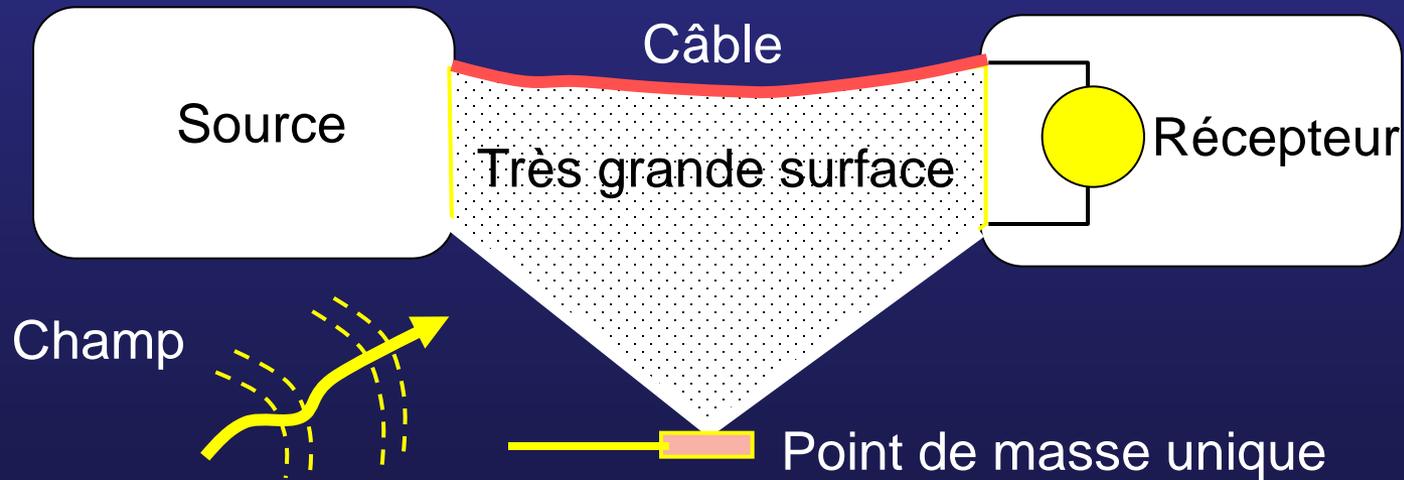
Les connexions entre éléments

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



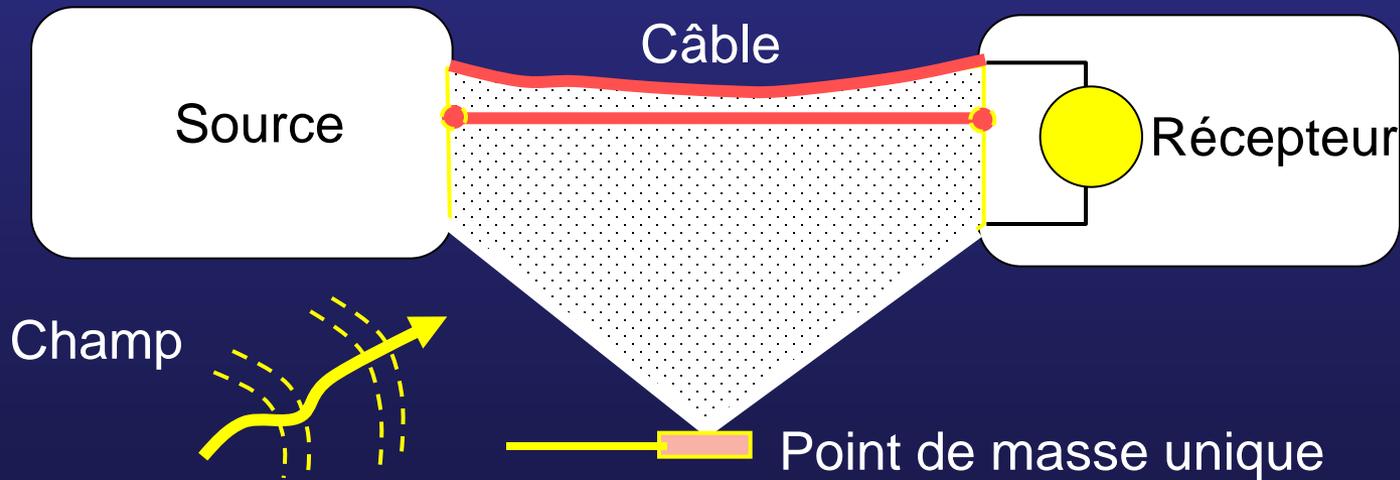
Les connexions entre éléments

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



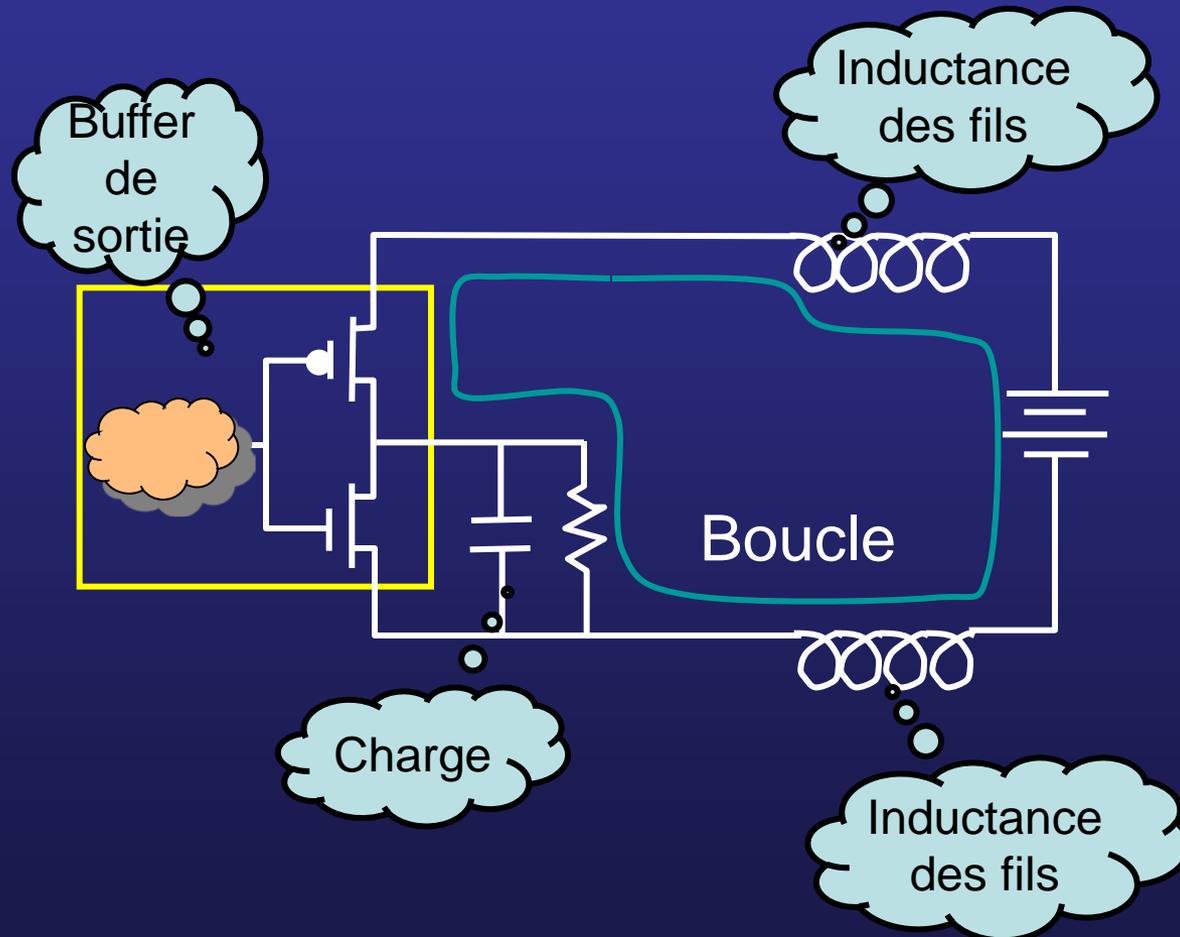
Les connexions entre éléments

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



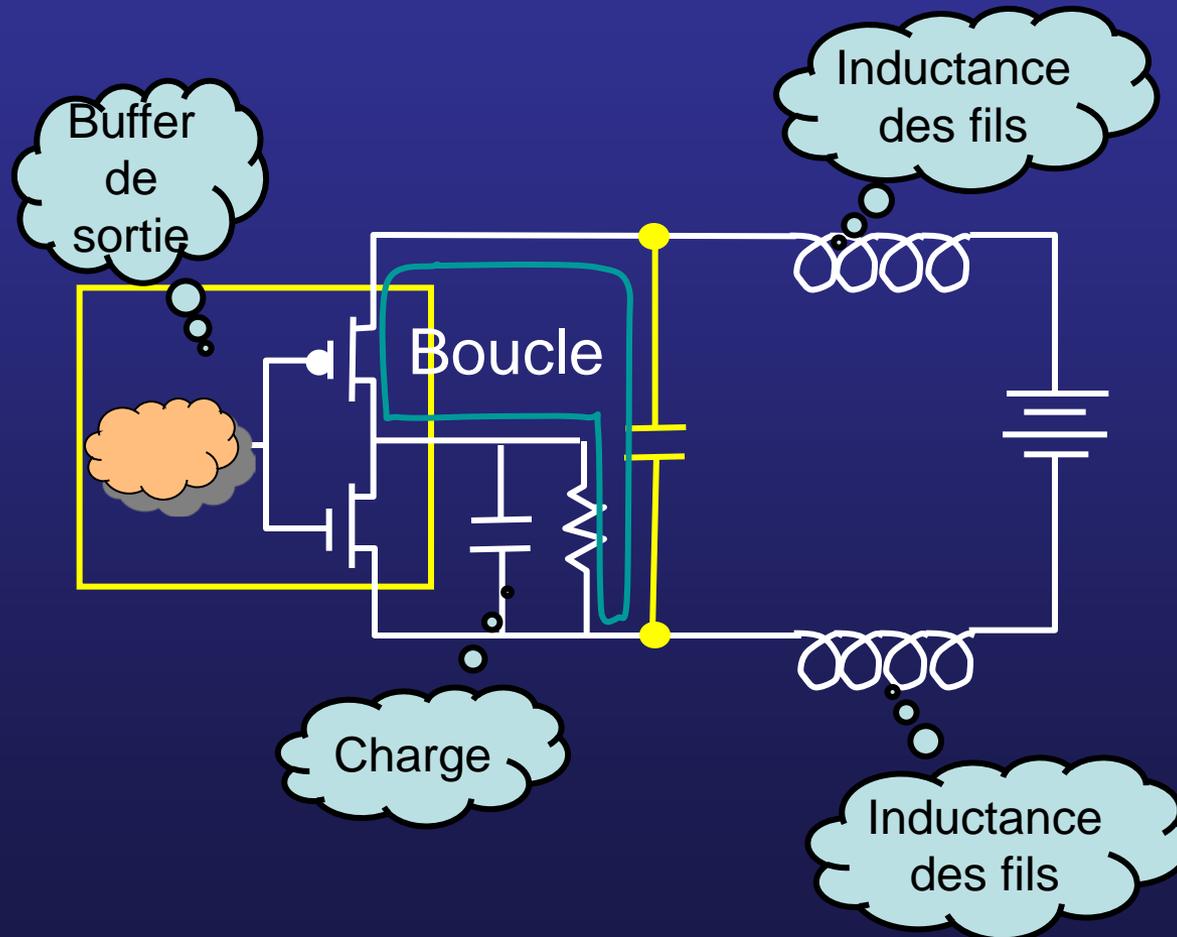
Les connexions entre éléments

Sans condensateurs de découplage, la boucle peut être importante

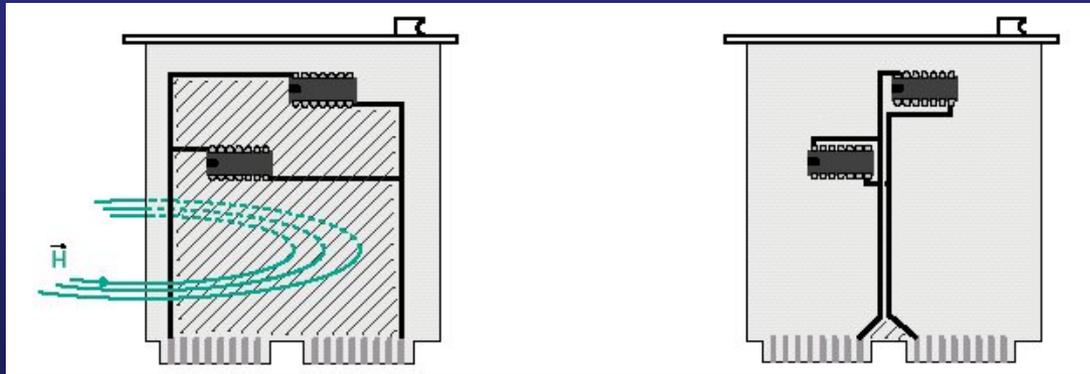
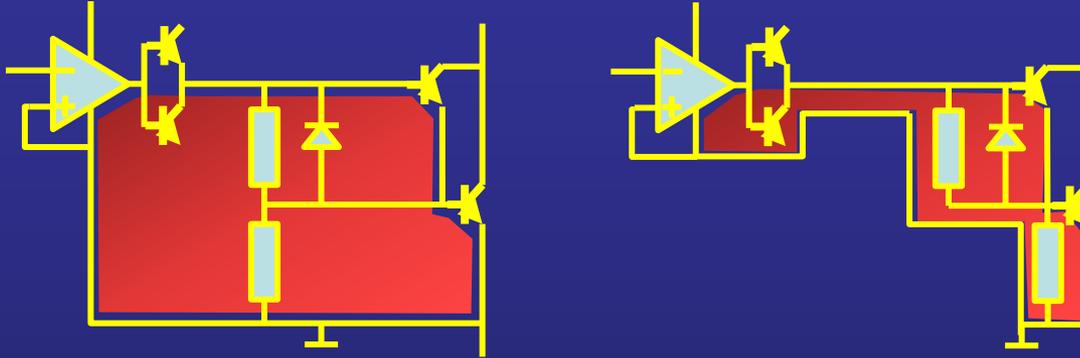


Les connexions entre éléments

Avec un condensateur de découplage, la boucle est réduite !



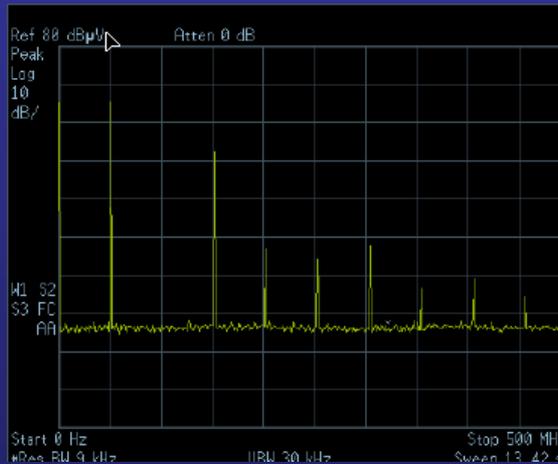
Le routage des circuits imprimés



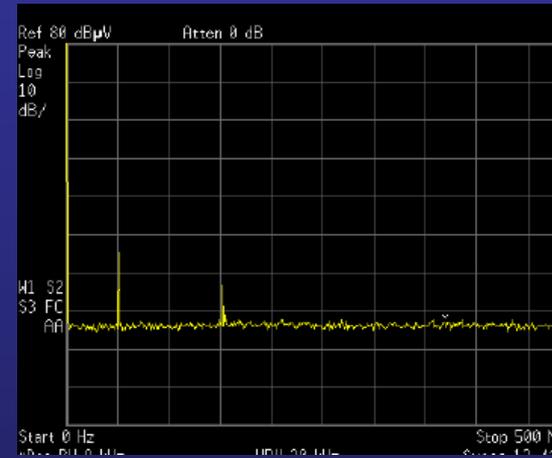
- Limitation des surfaces réceptrices
- Un plan de masse est idéal pour limiter les surfaces

Exemple du rayonnement d'une horloge à 50MHz (tr/tf 4ns, Vp=3V)

Cas d'un circuit imprimé avec une piste de 10 cm



Sans plan de masse



Avec plan de masse

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

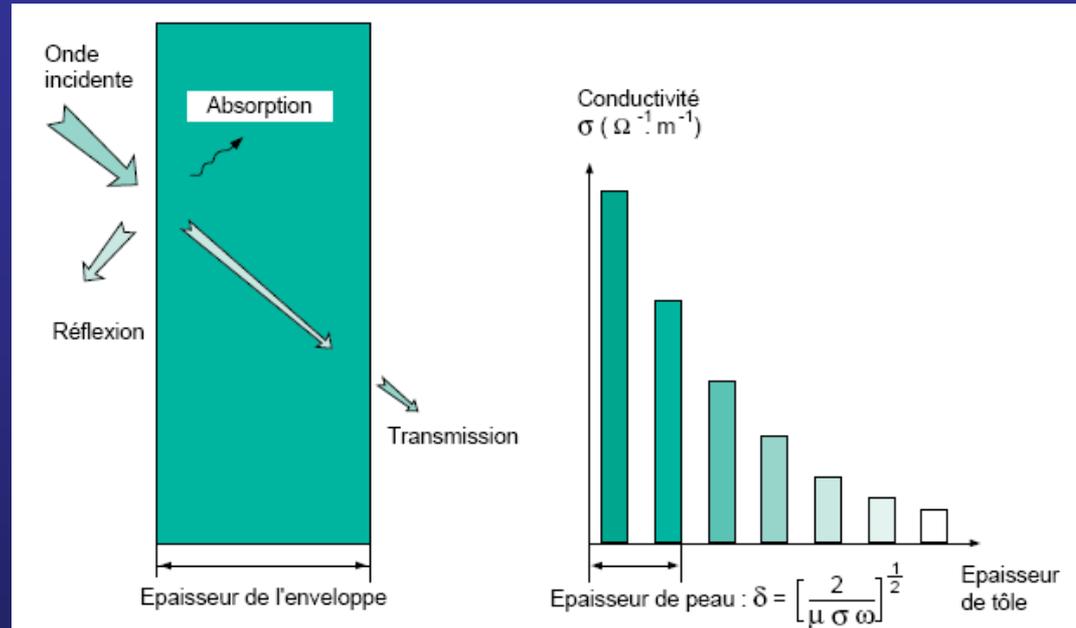
Empilement des couches

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)

Les blindages de protection



Effet de peau

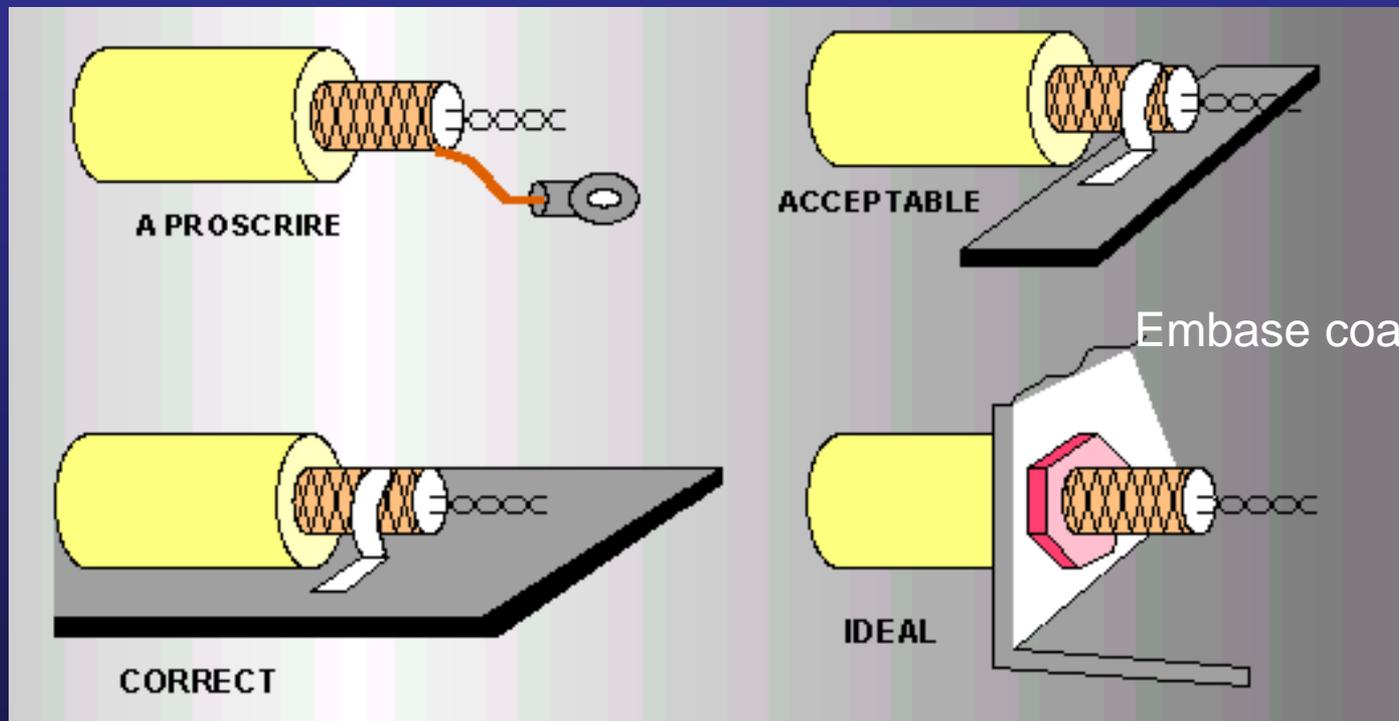
Le blindage doit être conducteur

Le champ magnétique est absorbé => **beaucoup de matière nécessaire**

Le champ électrique est réfléchi => **simple tôle suffi**

Une fente dans un blindage rayonne !

Raccordement des câbles blindés



La foudre

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



La foudre



- **Principaux risques :**
 - Destruction des matériels (20000 compteurs/an)
 - La réparation des lignes téléphoniques : 10M€/an

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

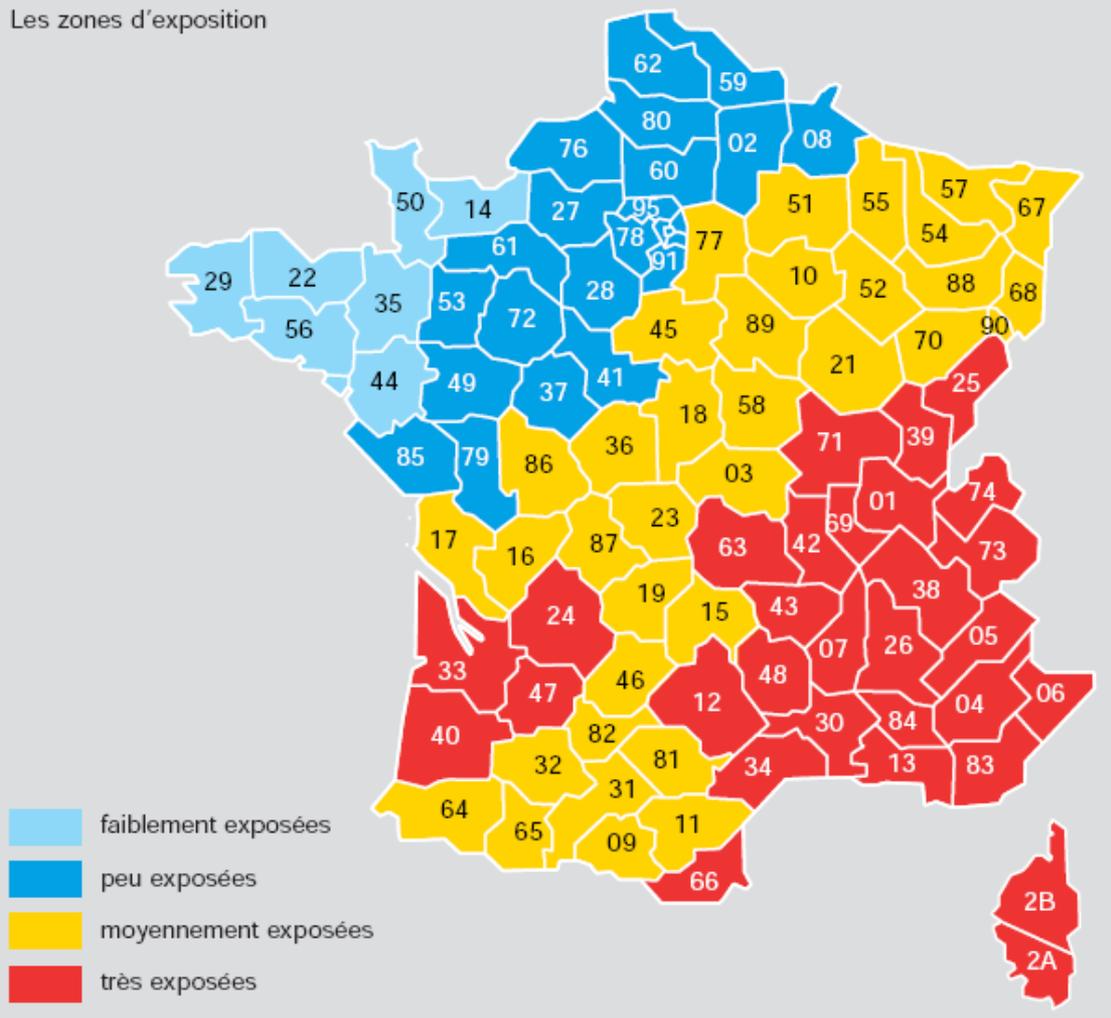
- 40 personnes/an foudroyées (15 morts)
- Risque important lié au rayonnement

La foudre



Obligation de se protéger
dans les zones à risque

Les zones d'exposition



La foudre

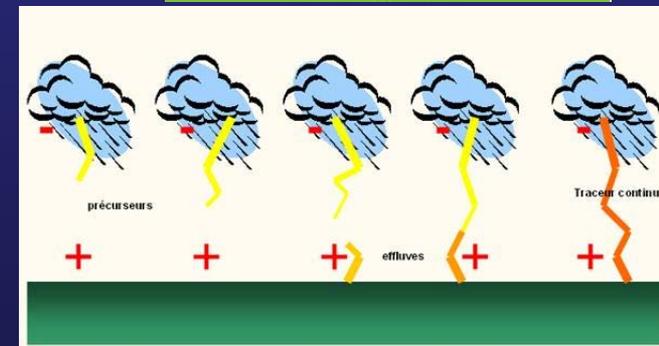
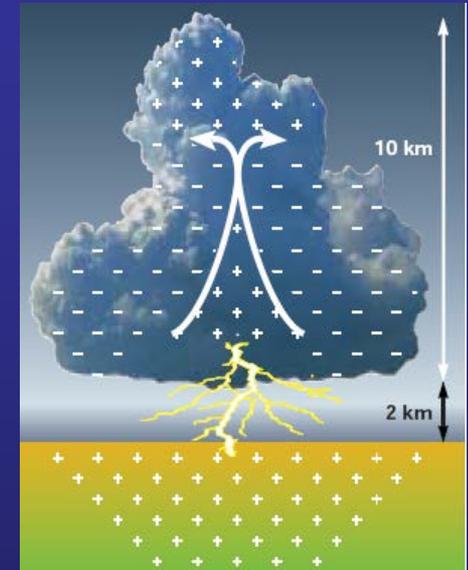
L'humidité du sol et la chaleur provoque un gros nuage : le cumulo-nimbus.

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.

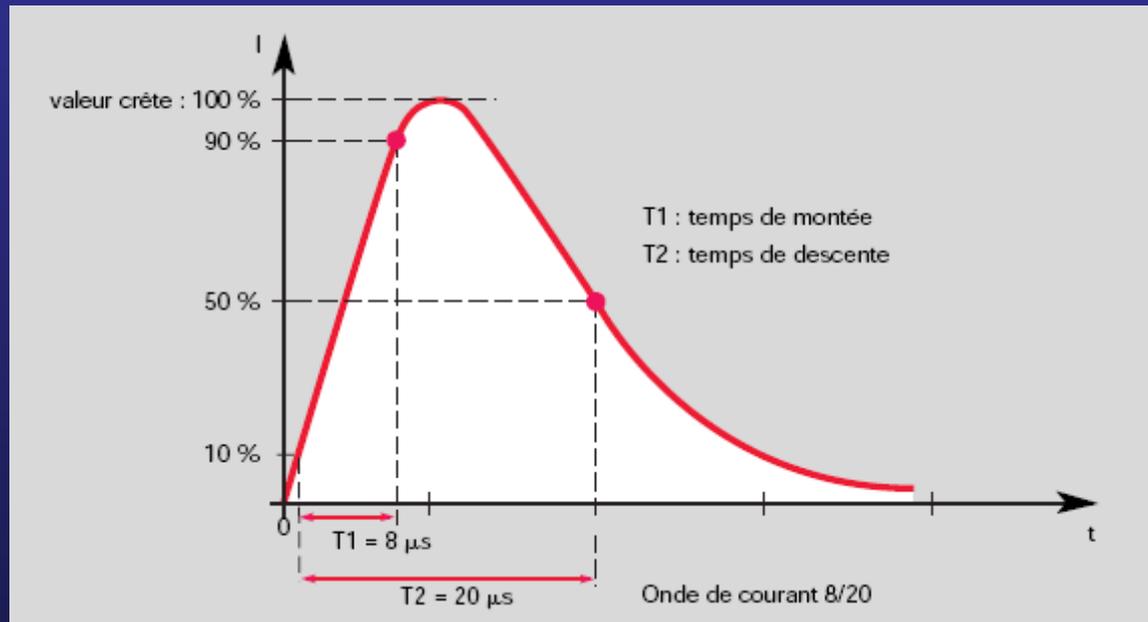
A quelques dizaines de mètres du sol un arc en retour monte du sol vers le nuage. Quand les 2 arcs se rejoignent c'est la décharge vers le sol. Le tonnerre est l'onde sonore qui accompagne la décharge.



La foudre



Un courant très fort pendant un temps très court



La foudre **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 Les effets indirects

Par conduction

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



Par rayonnement

Le champ rayonné va
créer des surtensions
dans toutes les boucles



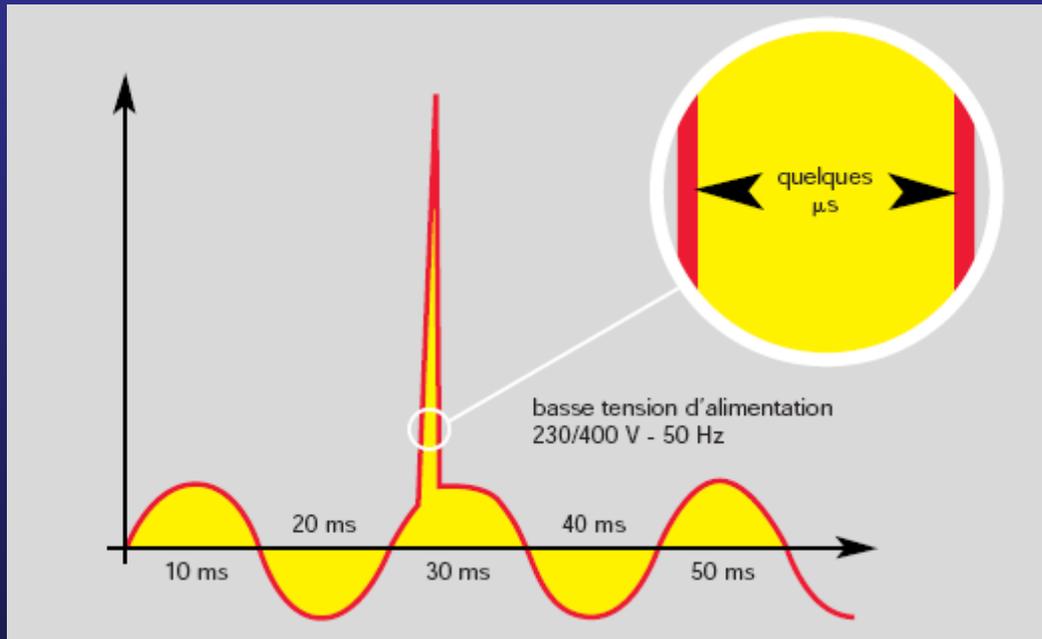
Par montée du potentiel de terre

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



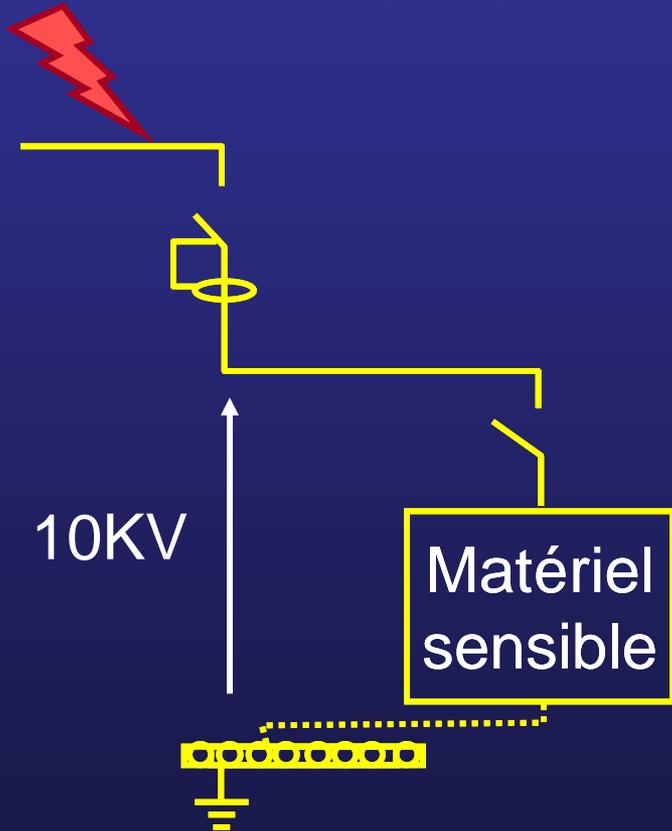
La foudre

Les surtensions transitoires...

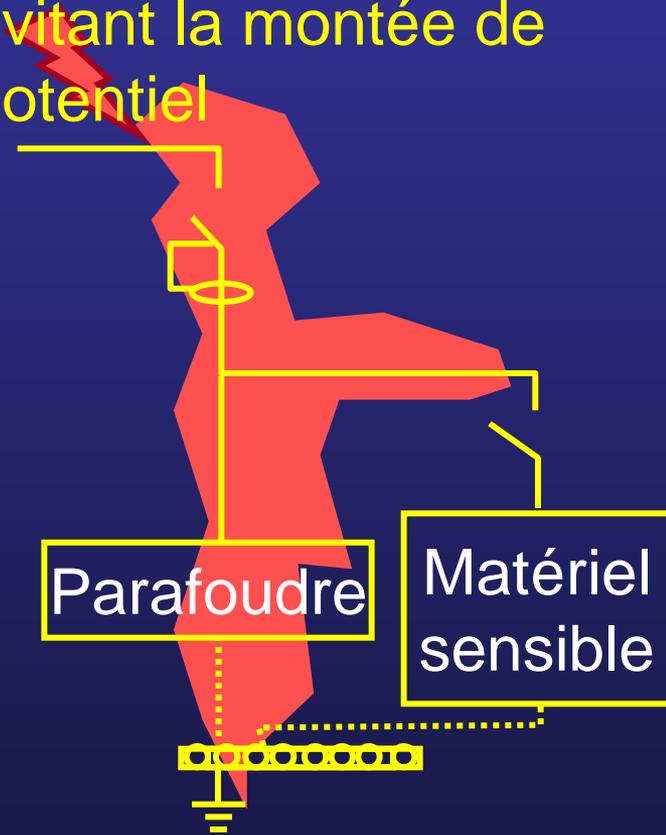


La foudre

Sans parafoudre le matériel sera détruit



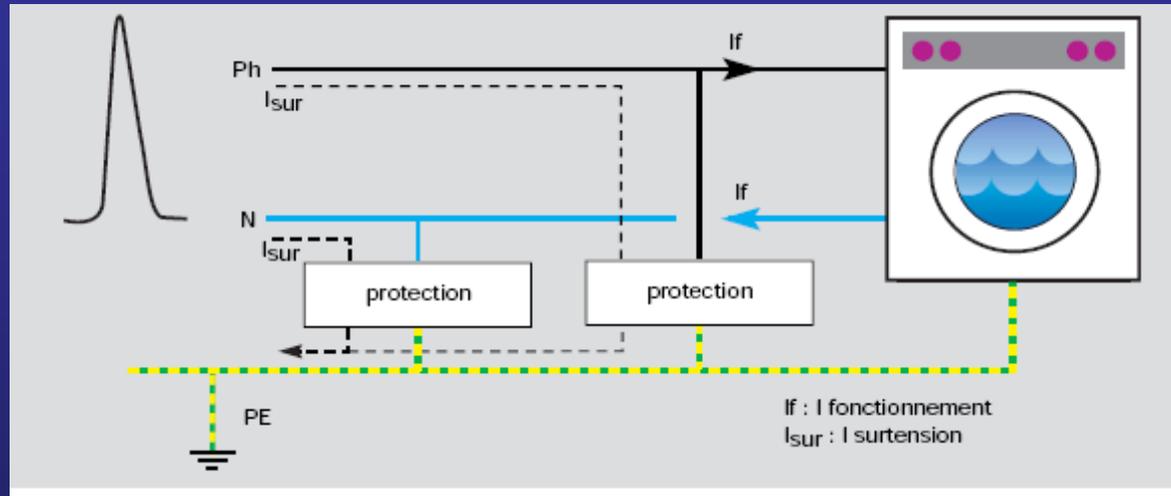
Le parafoudre protège le matériel sensible en évitant la montée de potentiel



La foudre

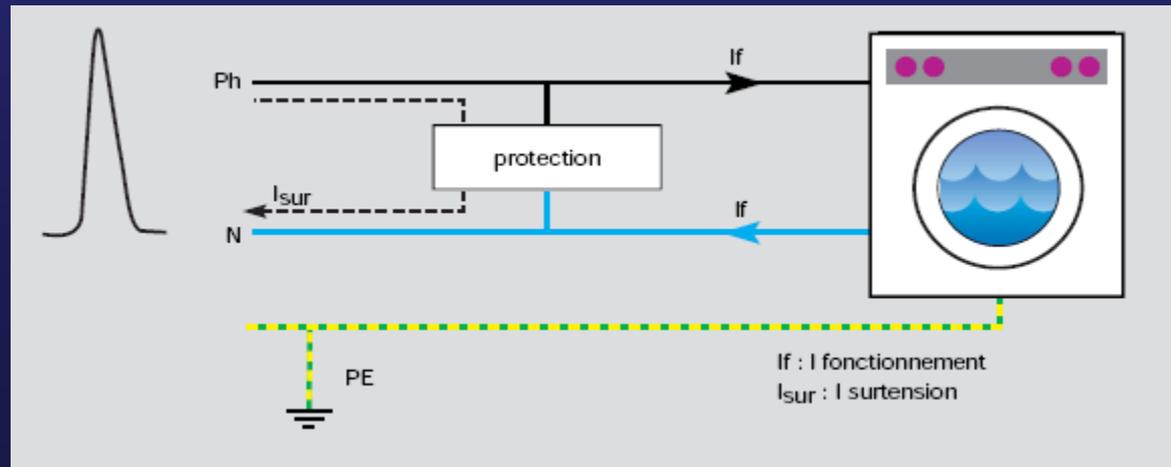
Protection en mode commun

Entre phases et terre
Entre neutre et terre

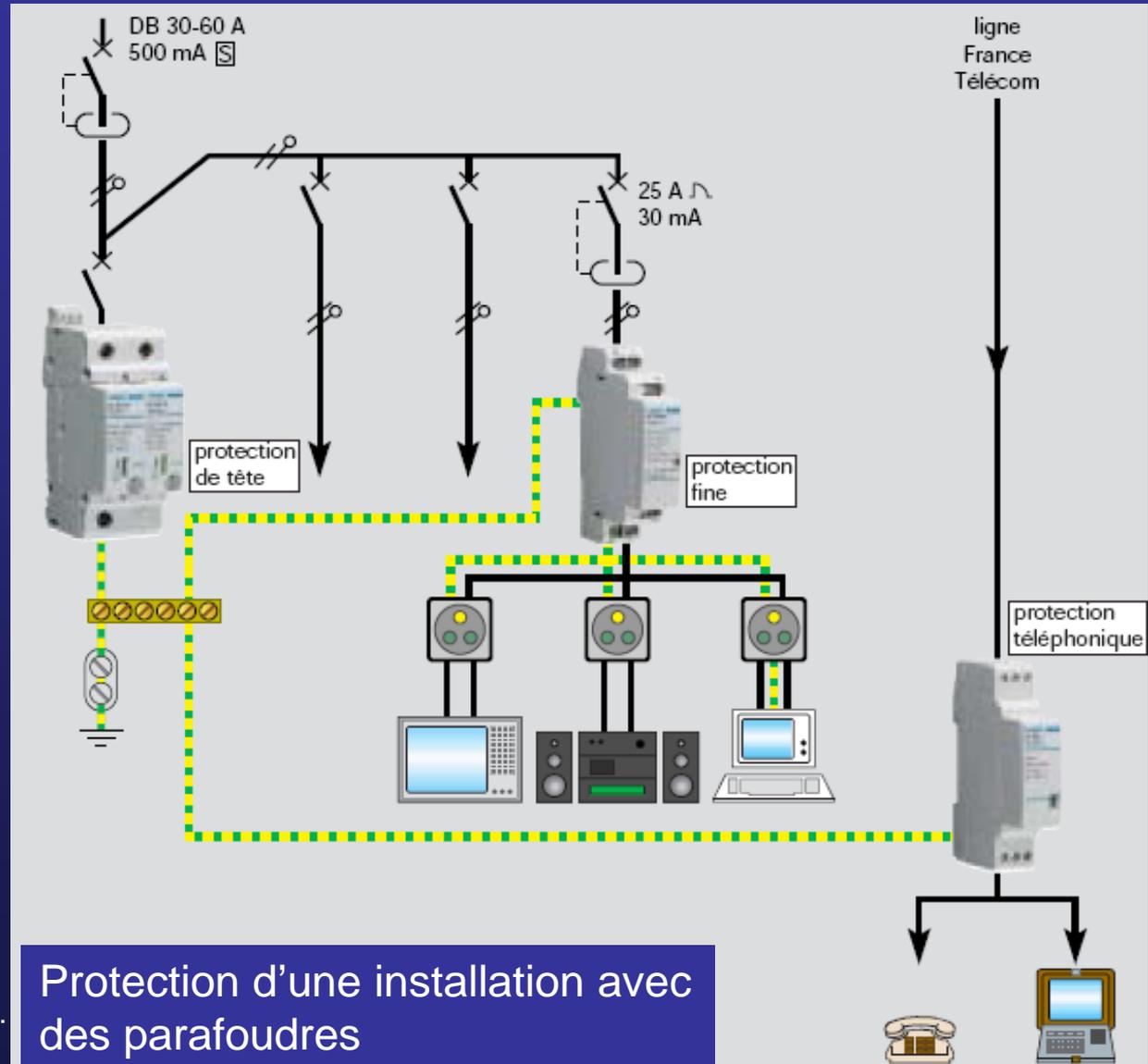


Protection en mode différentiel

Entre phases et neutre



La foudre



Protection d'une installation avec des parafoudres

Quelques petits problèmes

- **Énergie d'un choc de foudre**

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

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

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

- La tension de pas

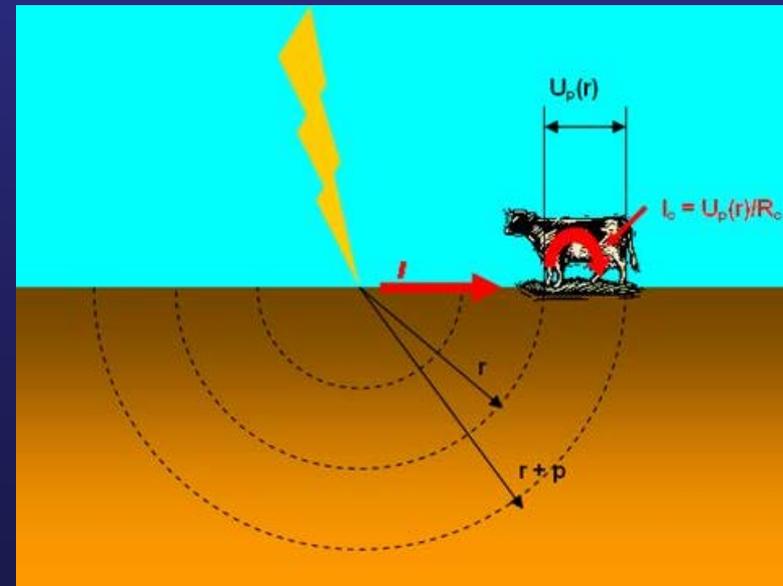
Quelle est la DDP entre les pattes d'une vache qui broute à 100 m du point d'impact d'un choc de foudre de 25KA ? (la résistivité du sol est ~ de 1000 ohms.m).

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

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

$$U_{101} \approx \frac{0.2 \times 25 \times 10^3 \times 10^3}{100} = 49500 \text{ Volts}$$

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



Fin

Merci !