

# 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)

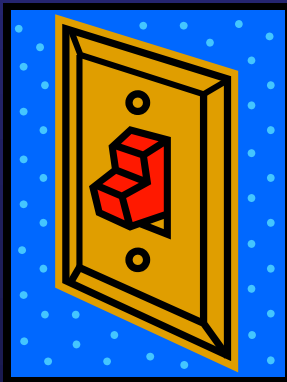
# Quelques notions d'électricité

- 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 !



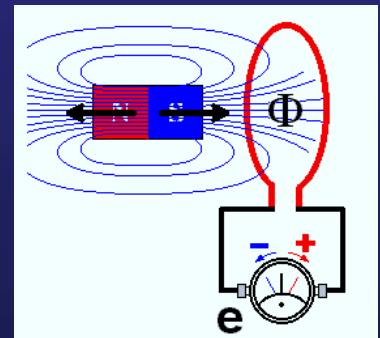
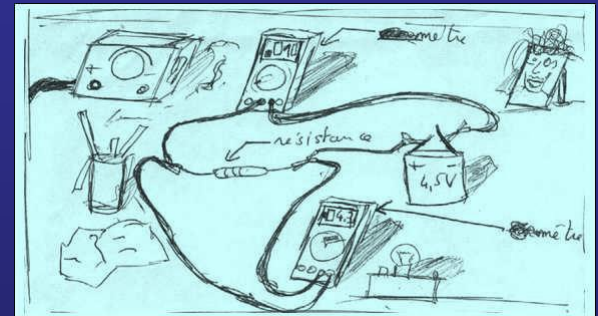


# Quelques notions d'électricité

- *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 : ?? ?????????? ??? ????????????**



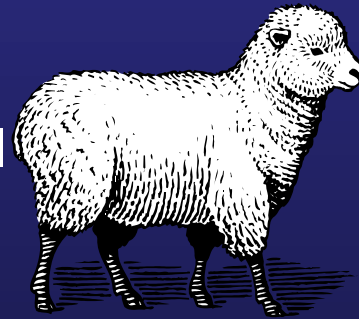
# La notion de terre

- 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.

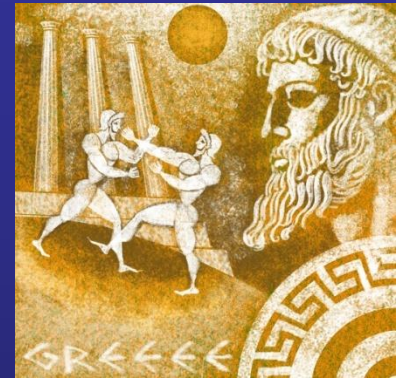


# Moralité

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

# Le phénomène électrostatique

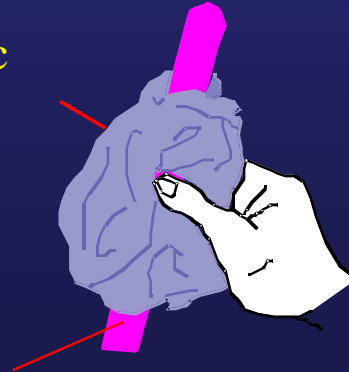
- Connus depuis 2500 ans.
  - Le mot électron vient du grec (**ambre**).
  - Statique vient du latin (**immobile**).
- 
- Thalès (un fameux grec) observa qu'un morceau d'ambre attirait de fines particules s'il était frotté avec une étoffe. L'expérience peut facilement être réalisée en frottant une règle en plastique avec un 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.

Chiffon sec



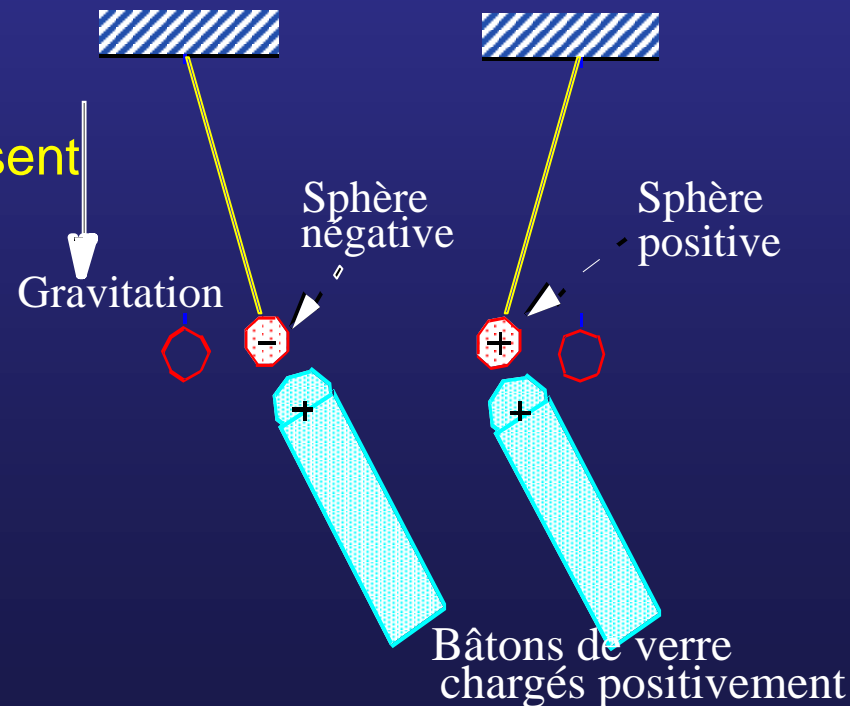
Particules attirées par le bâton de verre



Bâton de verre

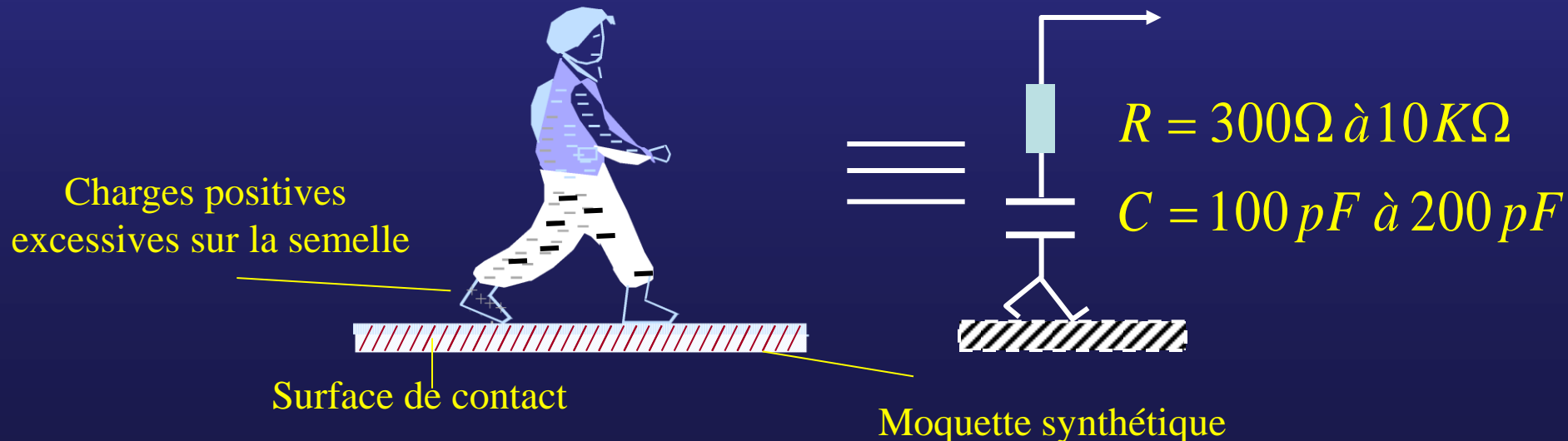
# Force entre 2 corps chargés

- 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

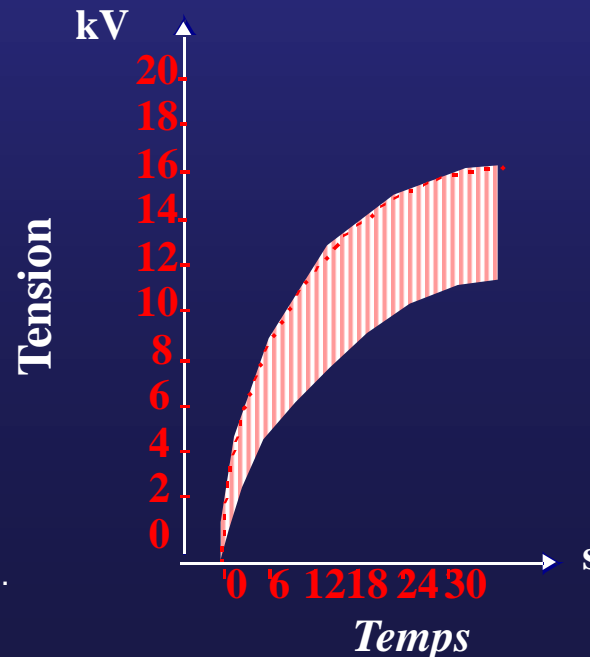
Quand nous marchons sur un sol isolant (une moquette par exemple) avec des chaussures, il se produit généralement un certain désagrément lorsque l'on touche un objet métallique relié au sol.





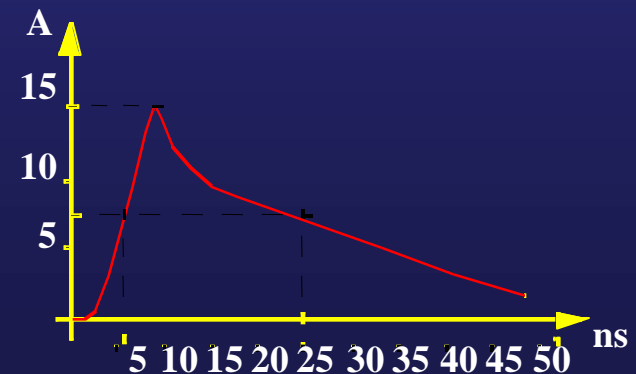
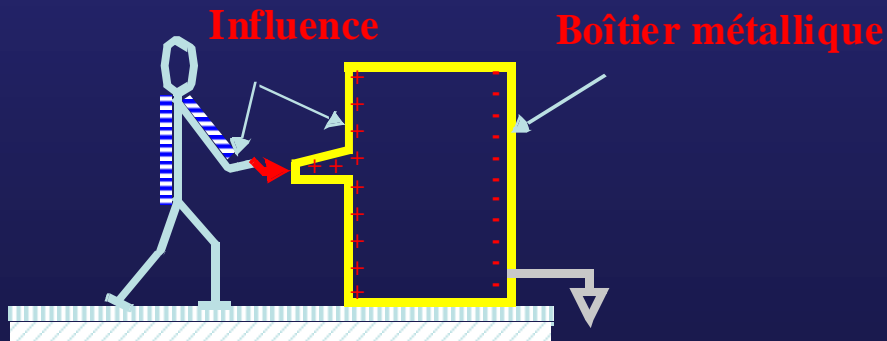
# Exemple : La charge d'une personne

- 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 !
- 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.

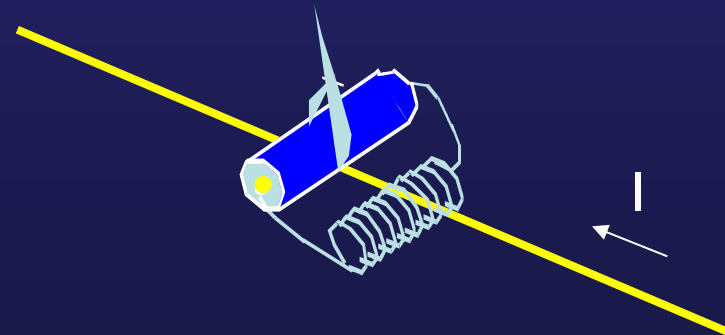
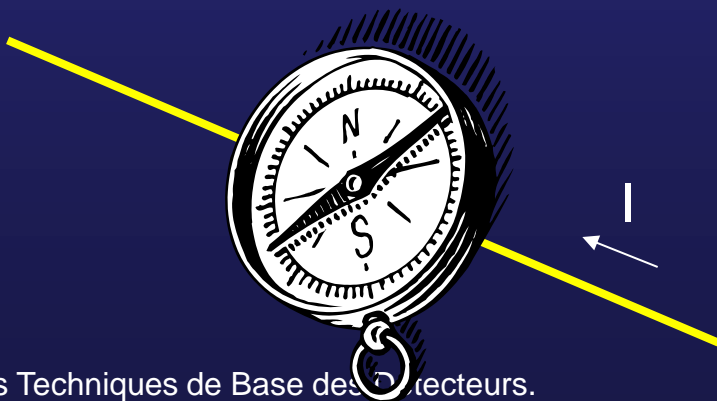
# L'onde électromagnétique

- **Courant et champ magnétique**

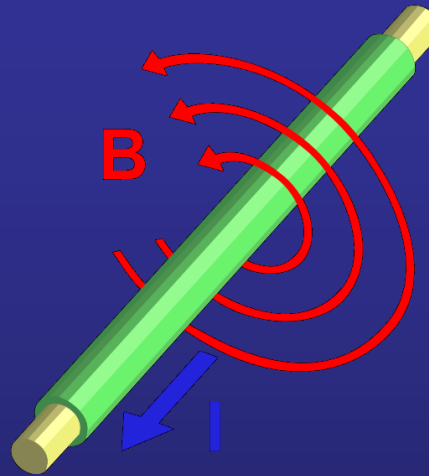
Au dessus d'un fil parcouru par un courant  $I$ , plaçons une boussole.

- 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



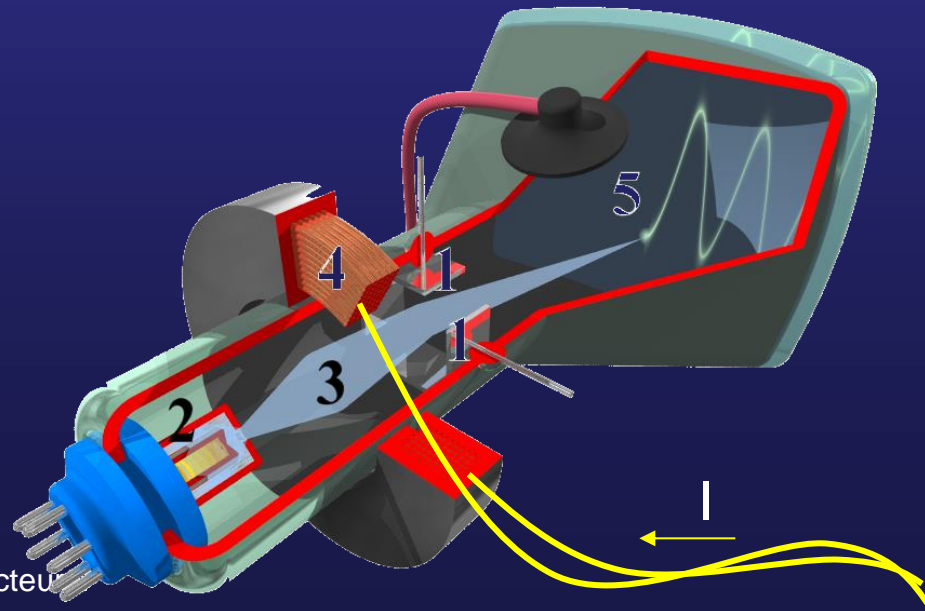
- Si l'on plaçait des petites aiguilles aimantées tout autour du fil, on aurait un ensemble de cercles représentant le champ magnétique.



# 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.

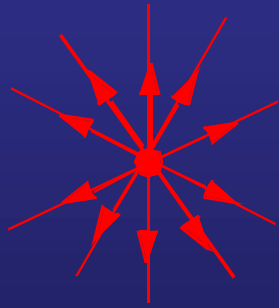
On appelle champs de forces électriques ou champs électriques les régions de l'espace où une charge électrique se trouve soumise à une force électrique

- 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.

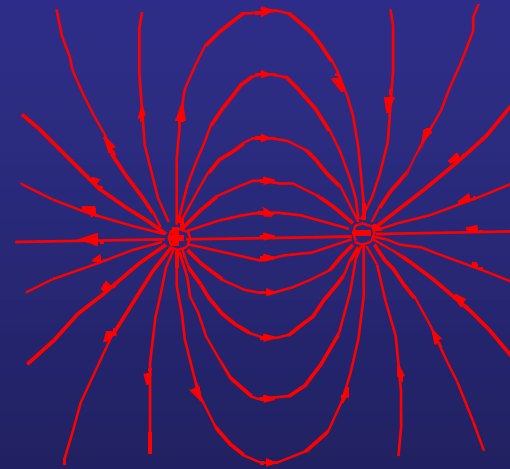
L'intensité du champ électrique varie avec la distance. Elle est exprimé en V/m

# L'onde électromagnétique

- Une tension sur un conducteur engendre un champ électrique



Lignes de champs créées par  
une charge ponctuelle

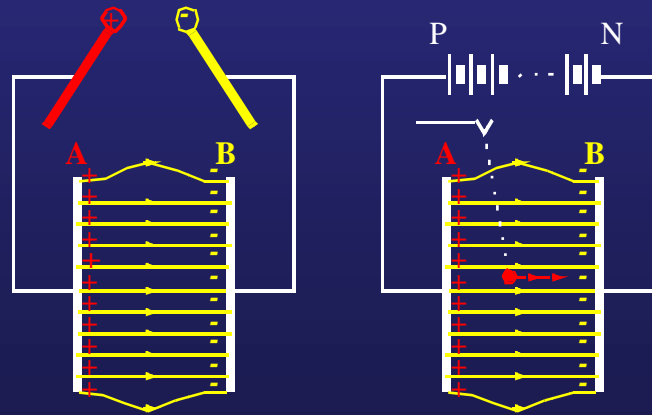


Lignes de champs créées par  
deux charges ponctuelles

# 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

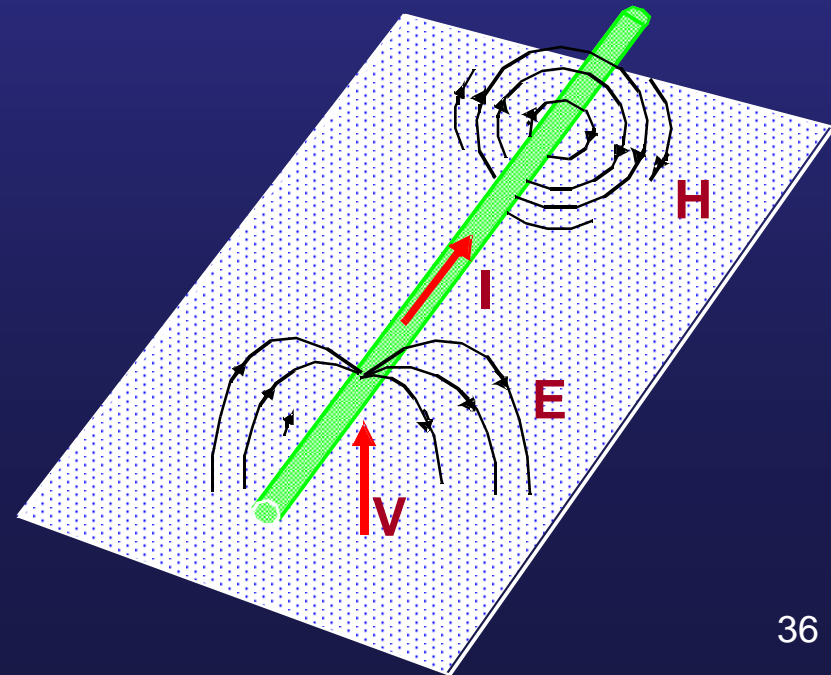
# L'onde électromagnétique

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.

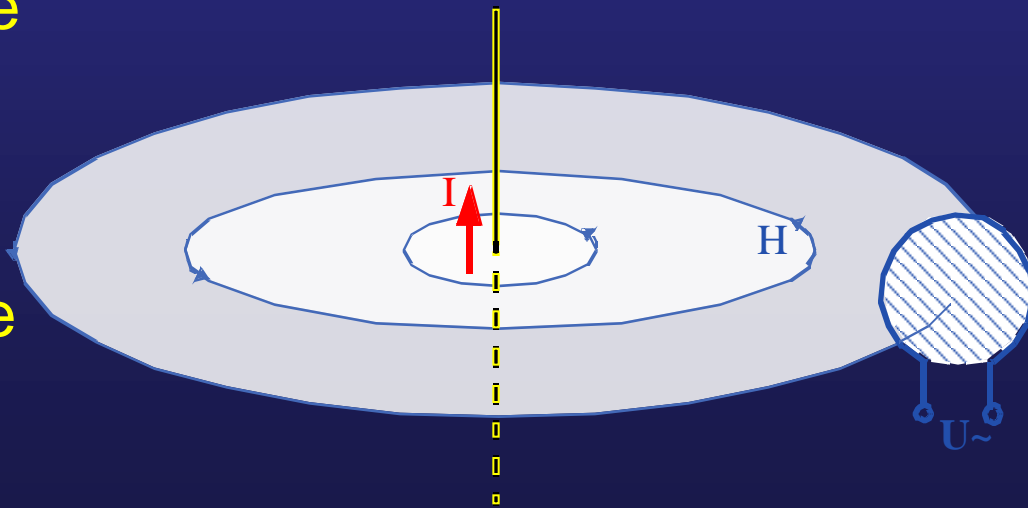
D'une manière générale, à un signal électrique, qui est l'évolution au cours du temps d'un courant et d'une tension, est associé une onde électromagnétique.



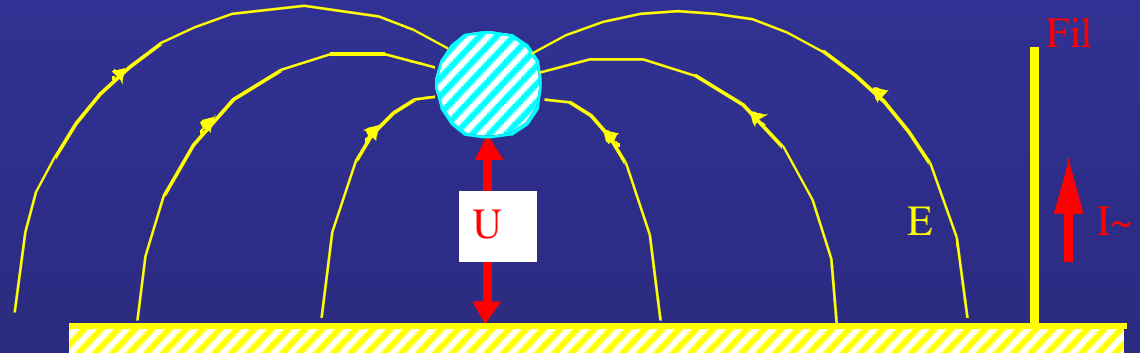
# Les effets du champ électromagnétique

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

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



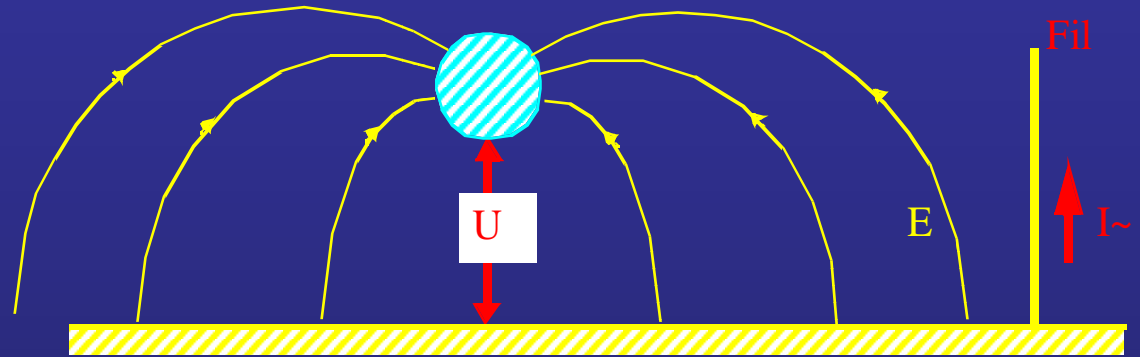
# Les effets du champ électromagnétique



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

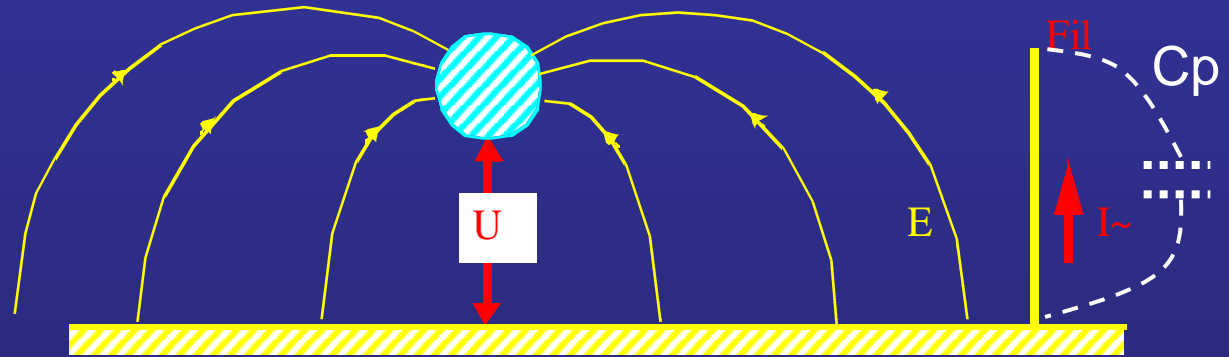
Ces 2 effets sont fondamentaux en CEM, leur connaissance permet de mieux s'en protéger.

# Les effets du champ électromagnétique



Mais où va donc le courant  $I$  ?

# Les effets du champ électromagnétique



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



# Le champ magnétique : Quelques chiffres

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

Rasoir électrique : 15 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.

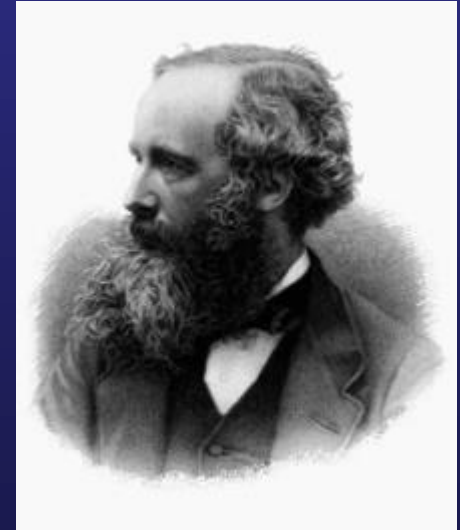
En CEM, il est nécessaire de pouvoir considérer ces deux composantes indépendamment l'une de l'autre. Une protection contre le champ magnétique sera différente d'une protection contre le champ électrique.

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

La théorie

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

Mais...



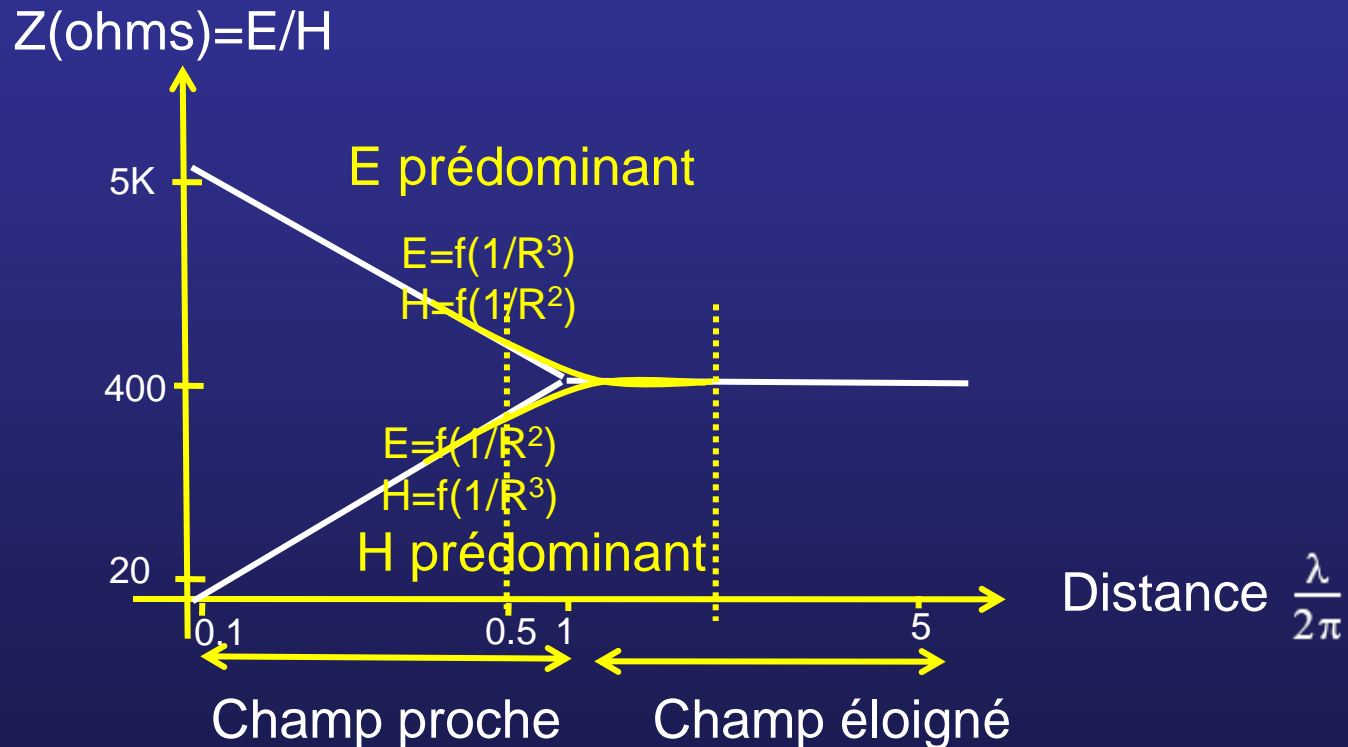
# Pour aller un peu plus loin avec le champ électromagnétique

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

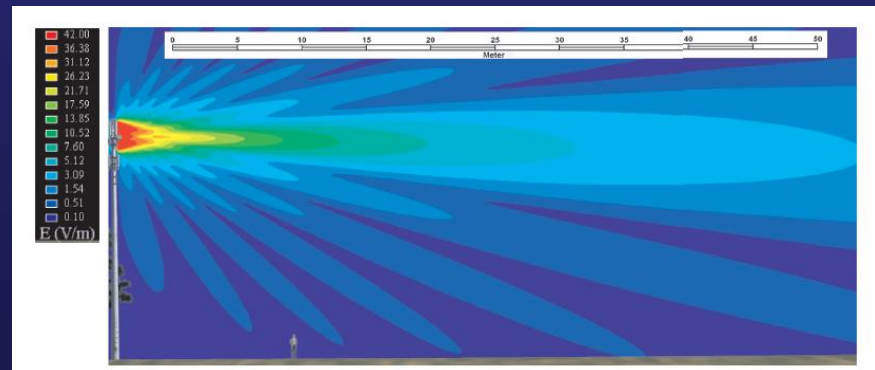
- Rappel :  
E en V/m  
H en A/m
- Le produit  $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$  est homogène à une puissance par m<sup>2</sup>  $\text{W/m}^2$ . c'est le vecteur de **Pointing**.
- Le rapport  $\mathbf{E}/\mathbf{H}$  est homogène à une impédance et s'exprime en **ohms**. C'est l'impédance de l'onde en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

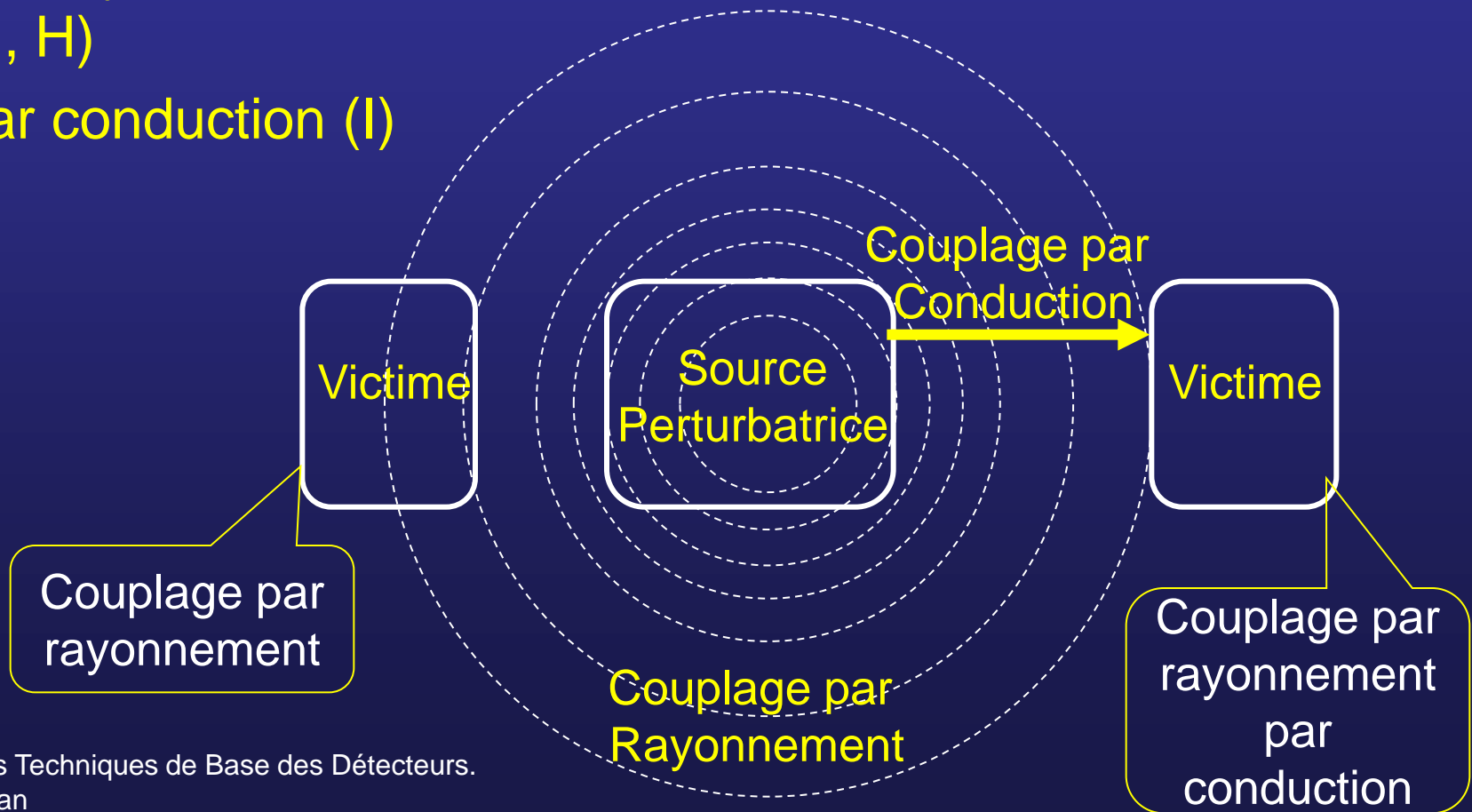
- Effets possibles
  - Micro-ondes (si 0,25W f entre 900 et 1800MHz)  $dT < 0,1^{\circ}\text{C}$
  - Champ électrique
  - Champ magnétique
  - Psychologique



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

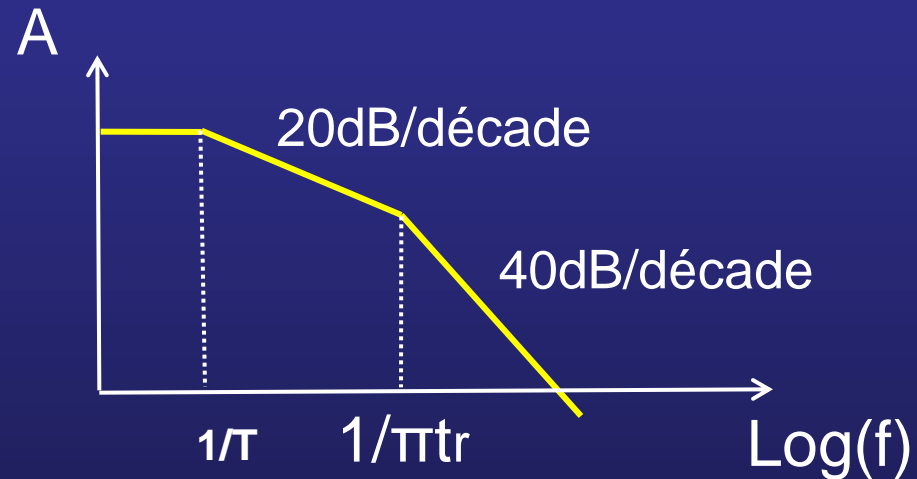
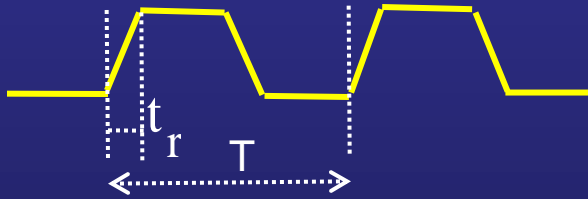
# Modes de transmission des perturbations

- 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 transitions rapides sont plus importantes que la fréquence !



# Du continu au 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,  $L\omega=6,28 \Omega/\text{m}/\text{MHz}$

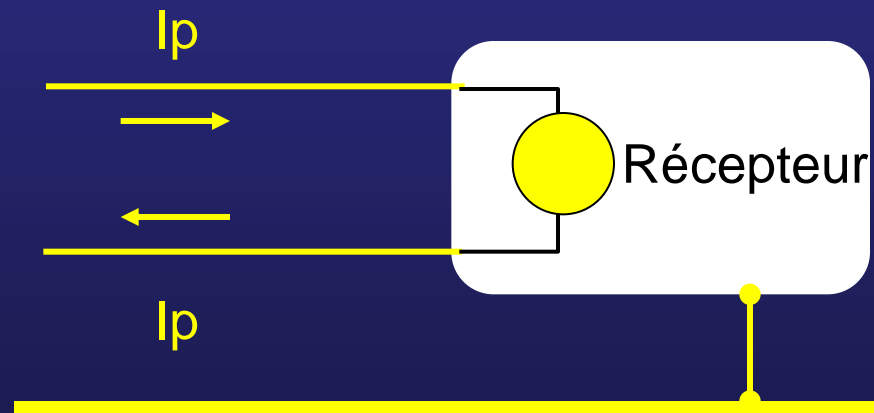
Par exemple à 100MHz 1cm de fil à une impédance de :

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



# Le mode différentiel

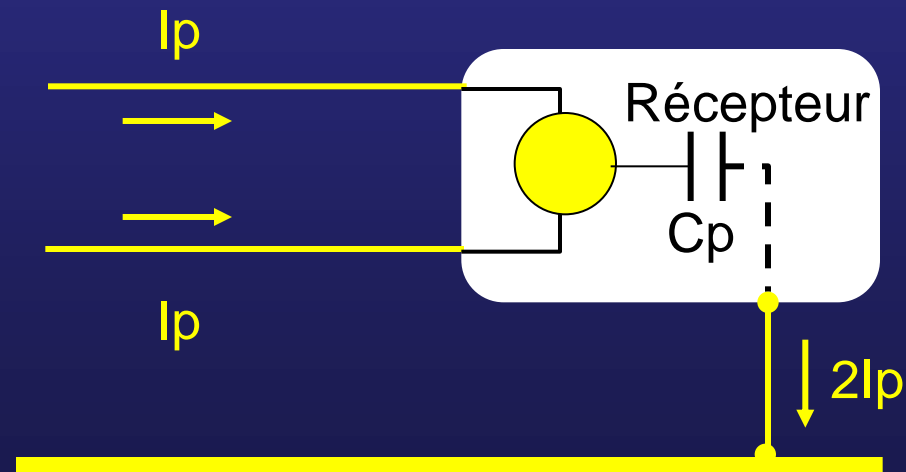
- Dans ce mode la perturbation  $I_p$  est transmise à un seul des 2 conducteurs. Le courant de mode différentiel se propage sur l'un des conducteurs, passe à travers le récepteur et revient par un autre conducteur.
- Les signaux utiles sont également transmis dans ce mode !



# Le mode commun

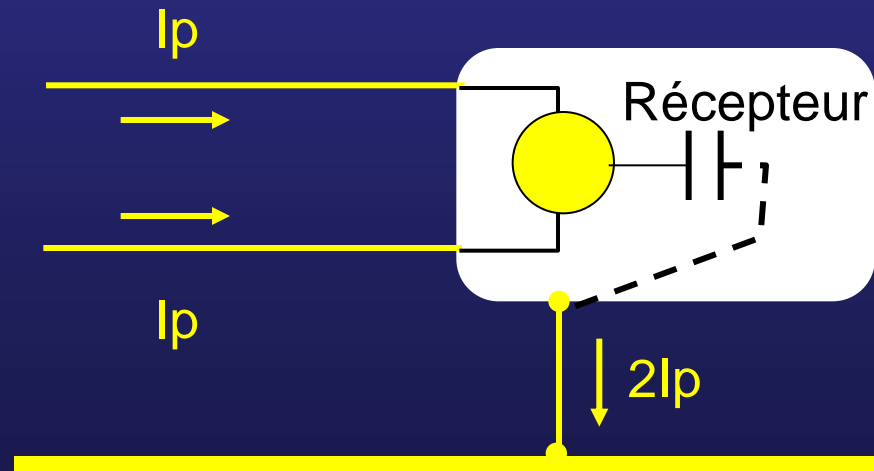
- Dans ce mode la perturbation  $I_p$  est transmise, dans le même sens, à l'ensemble des conducteurs et revient à la masse par les capacités parasites.

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



# Le mode commun

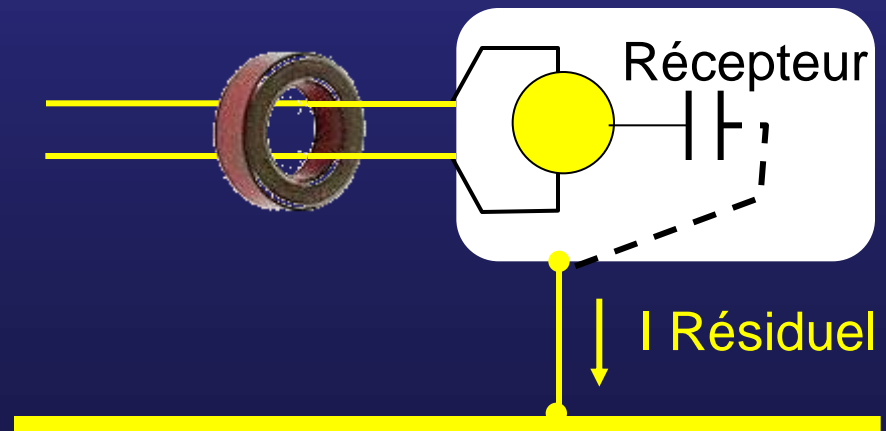
- Pour limiter les perturbations de mode commun, il faut que le récepteur soit correctement relié à la masse !



# Le mode commun

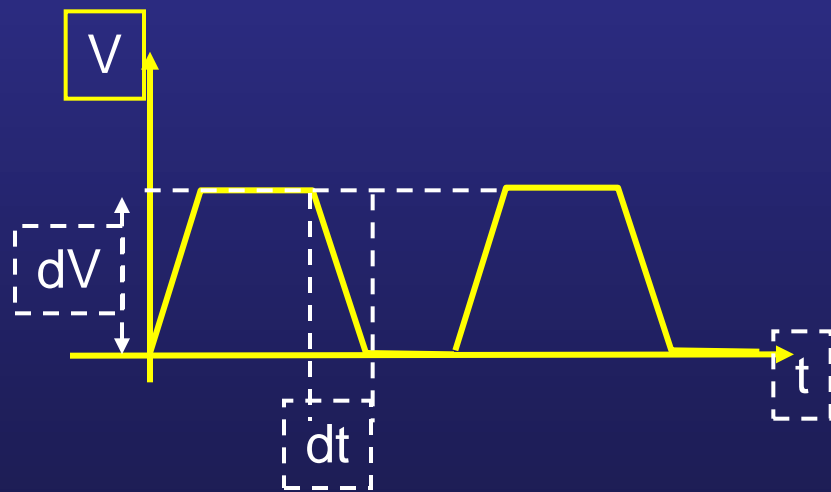
- Pour limiter les perturbations de mode commun, il faut que le récepteur soit correctement relié à la masse et **l'on peut rajouter une ferrite !**

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

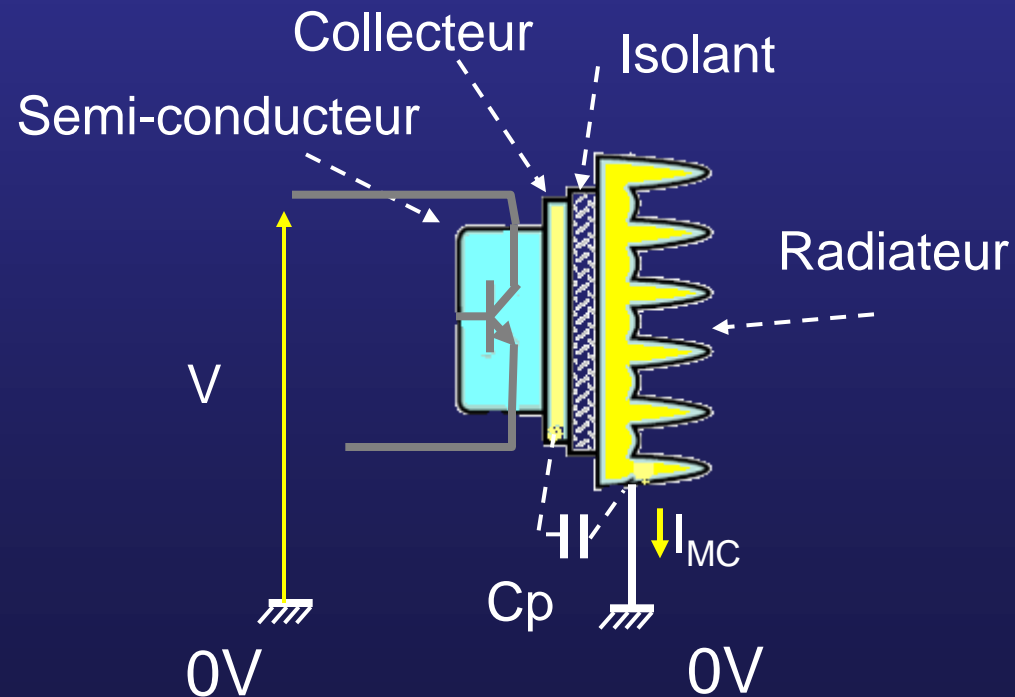


# Exemple de source de perturbations conduites en électronique de puissance

Exemple d'une alimentation à découpage



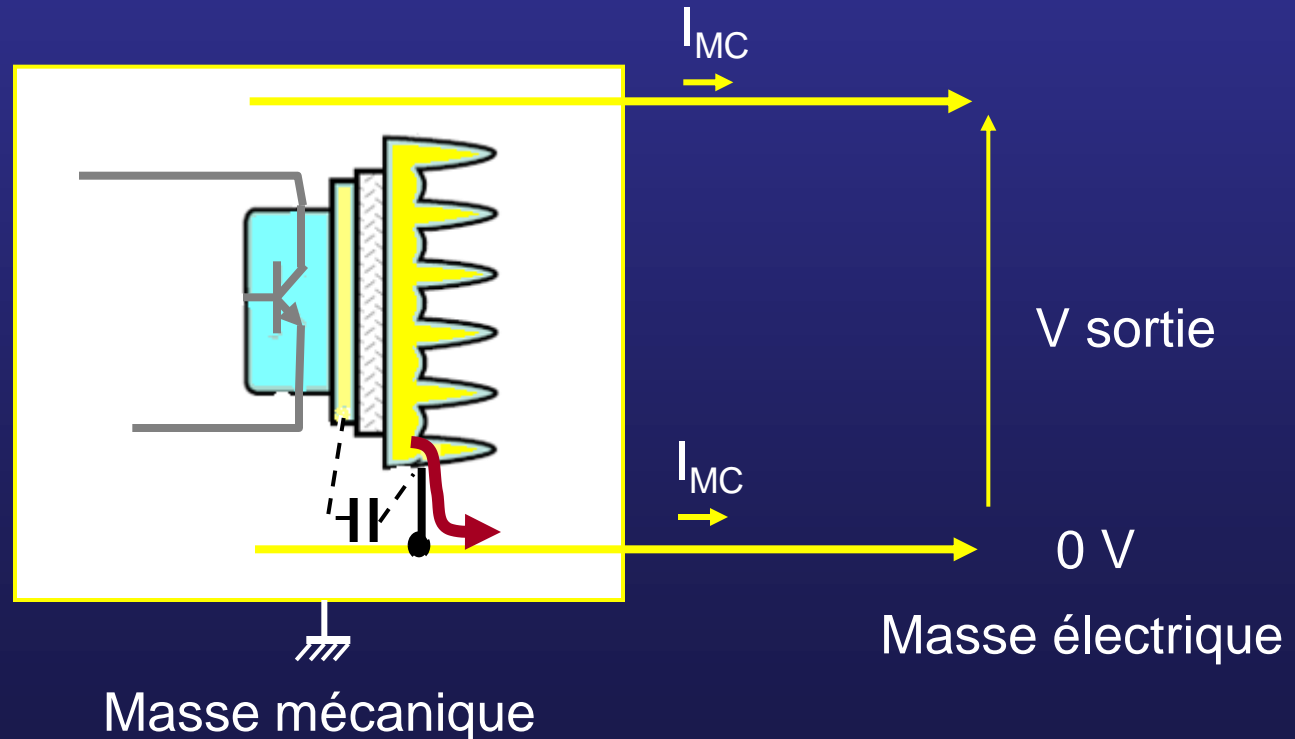
$$I_{MC} = C_p \frac{dV}{dt}$$



# Exemple de source de perturbations conduites en électronique de puissance

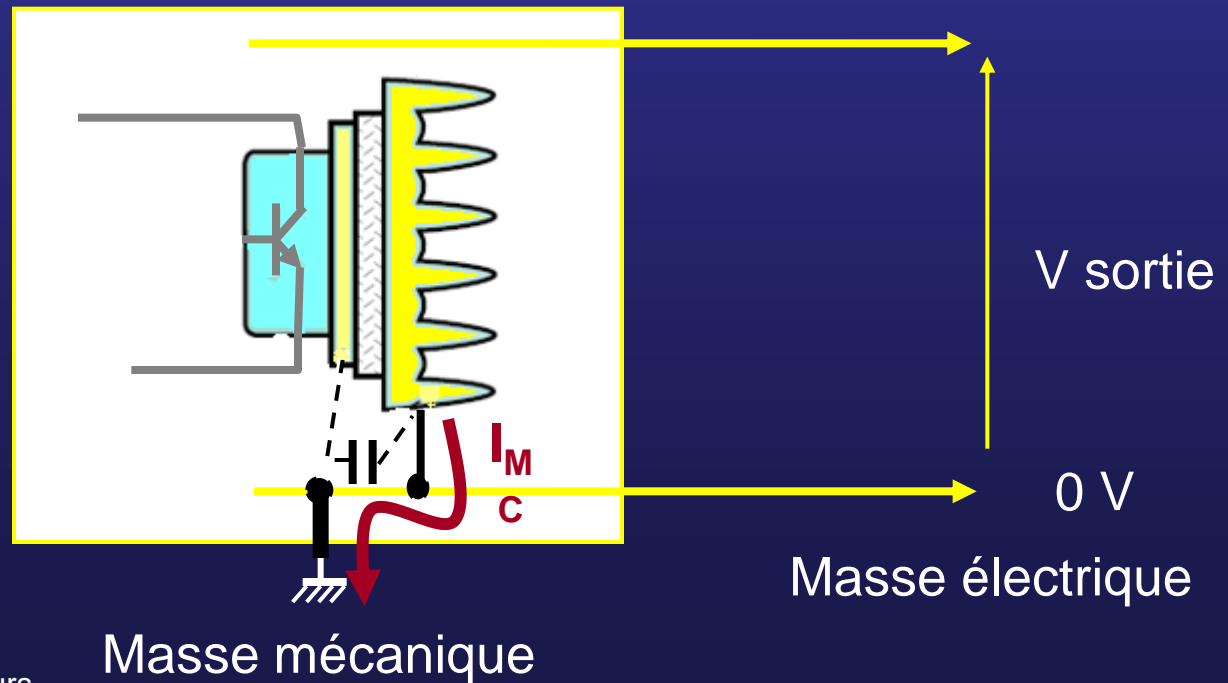
Cas d'une alimentation flottante, le 0V électrique n'est pas relié à la masse mécanique

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



BON

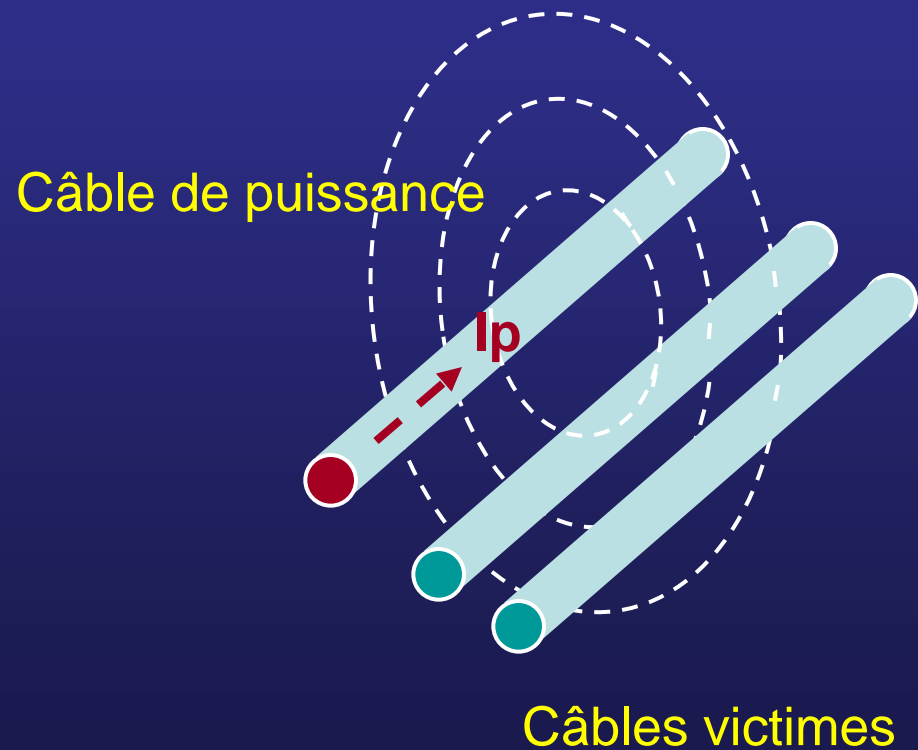


MAUVAIS

# Couplage par rayonnement

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

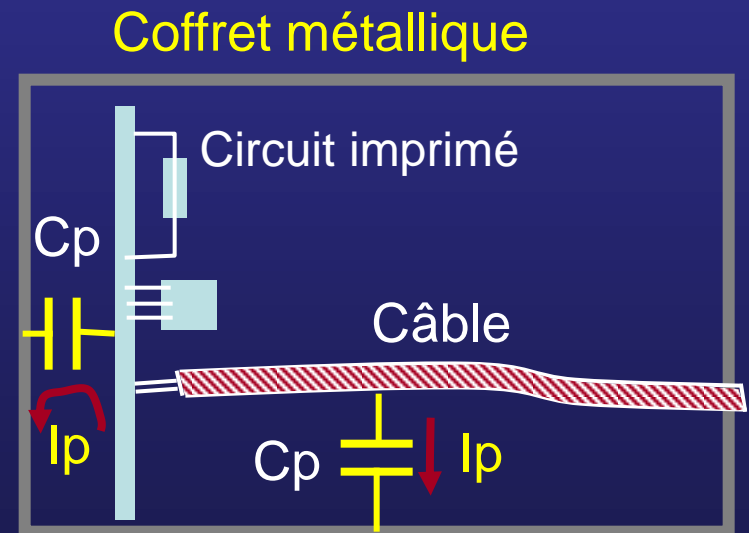
Une tension induite peut être gênante si le courant perturbateur est élevé ou de variation rapide.



# 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

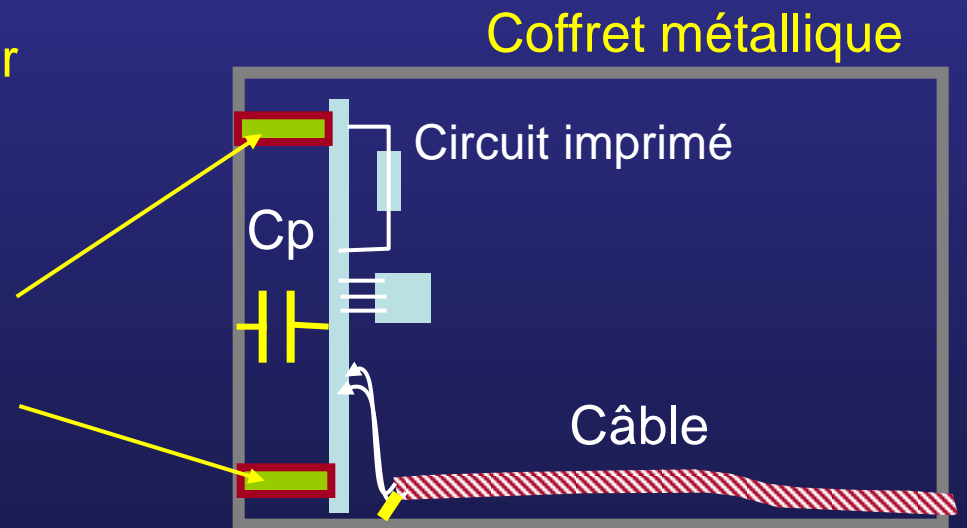
**Toute différence de potentielle entre ces éléments engendrera un courant parasite par couplage capacitif.**



# 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.



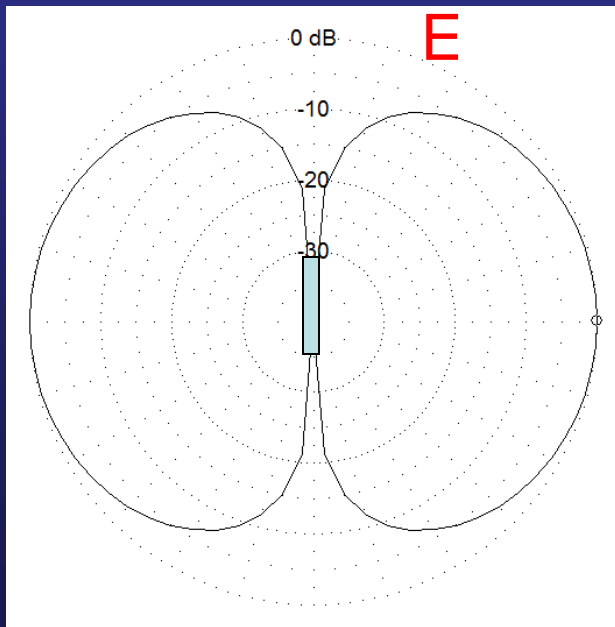
Plaquer le câble ou mieux le blinder

# Fente dans un plan de masse

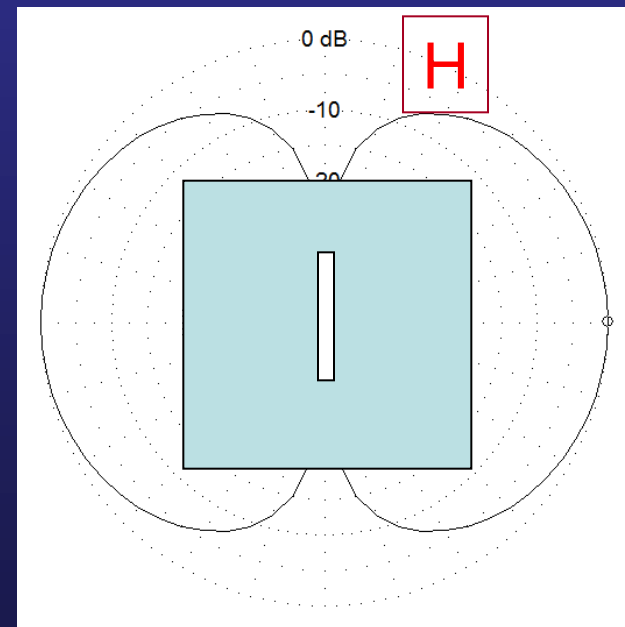
Un plan de masse a une impédance faible s'il ne présente pas de fente.  
Une fente dans un plan de masse rayonne comme une antenne métallique complémentaire (avec les champs E et H inversés).

**Il faut donc éviter de fendre un plan de masse !**

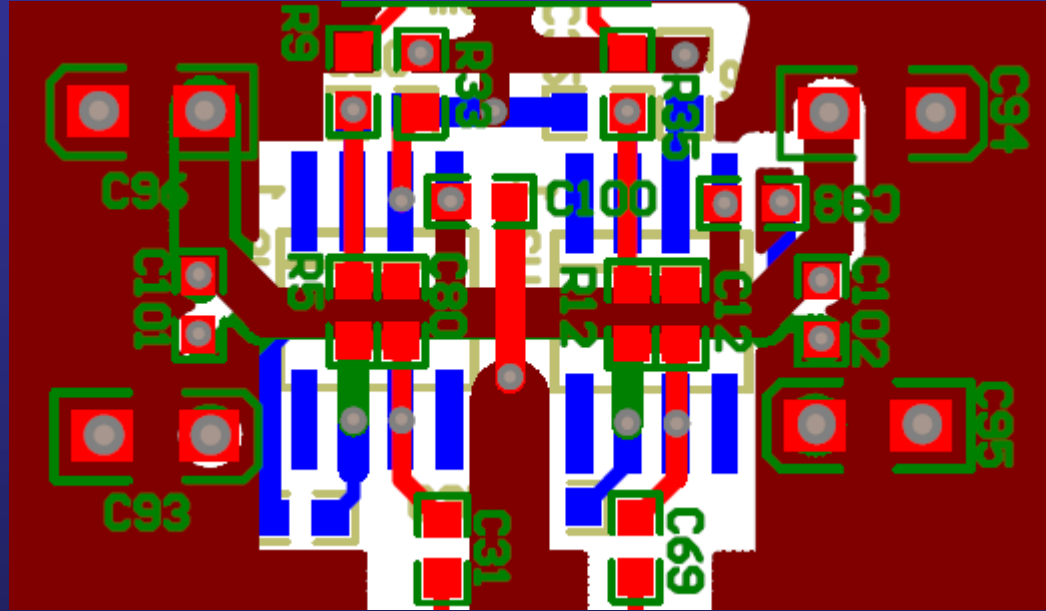
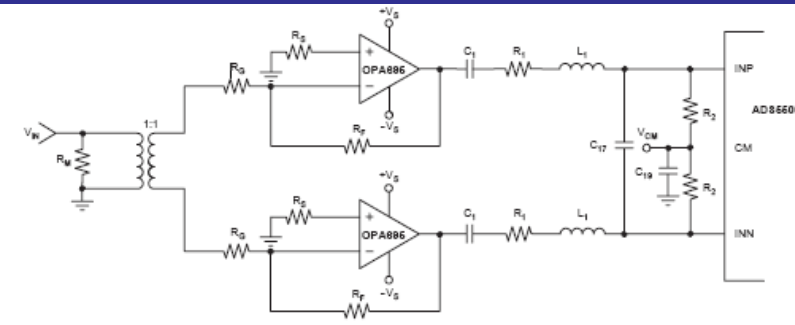
Champ électrique



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**

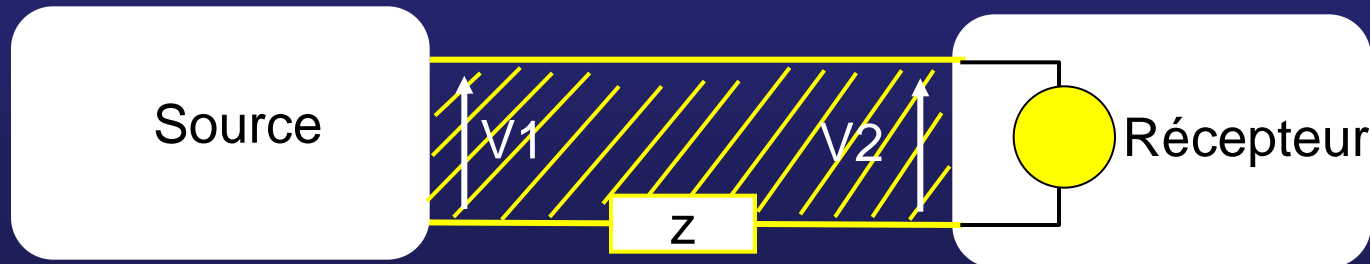
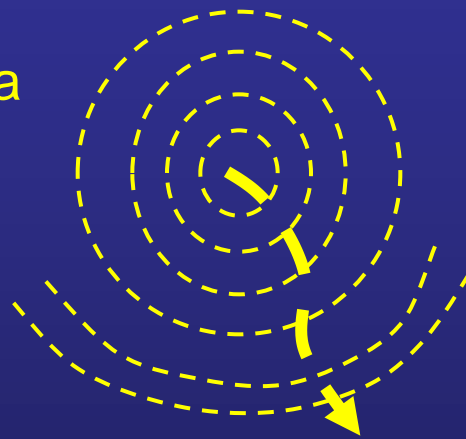
# Les connexions entre éléments

- 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

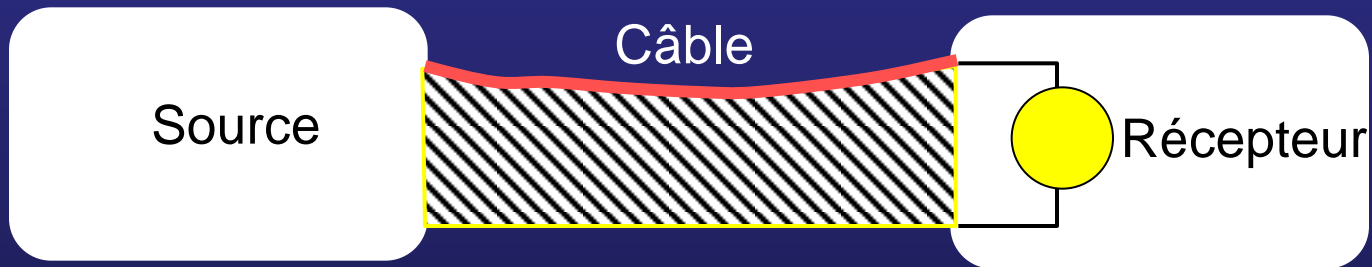
- Les fameuses boucles de masse
- Peut-on les éviter ?

# Les connexions entre éléments

- Les fameuses boucles de masse

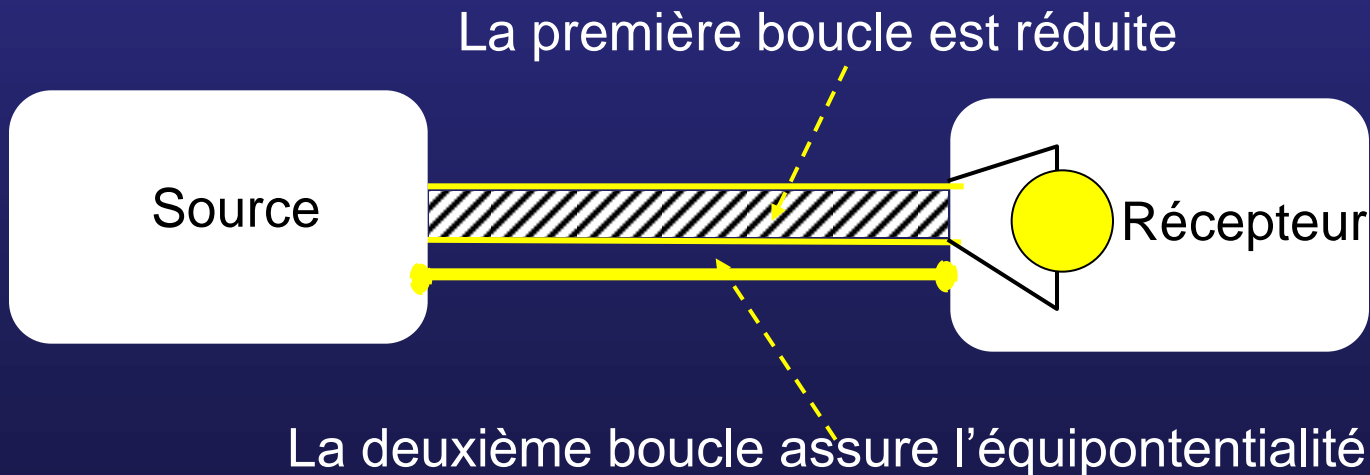
Dés que l'on connecte 2 éléments on crée une boucle !

# 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.



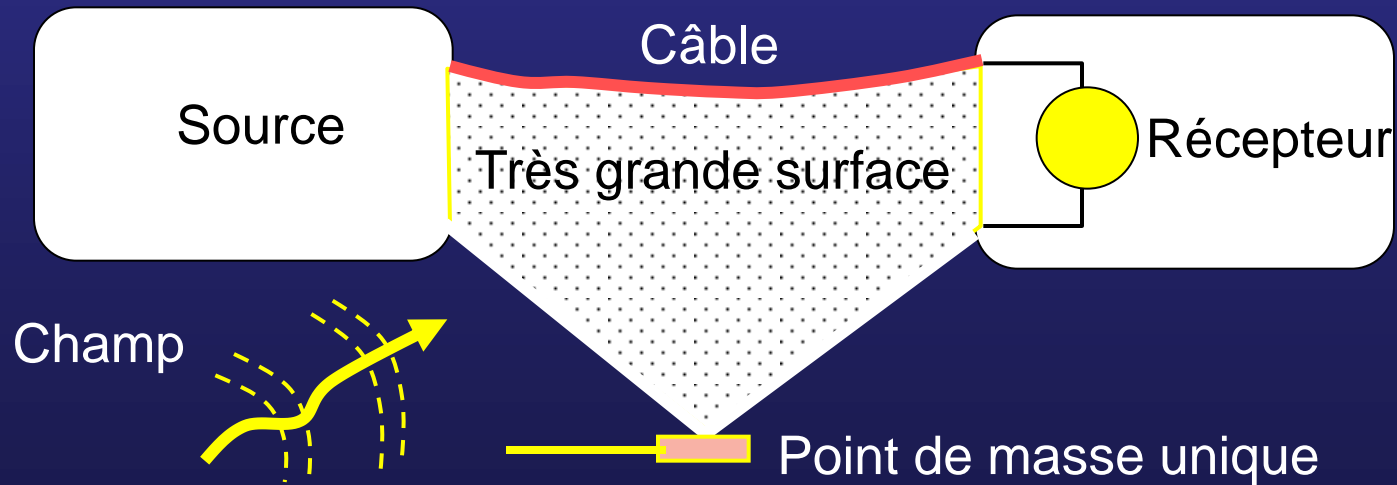
# Les connexions entre éléments

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



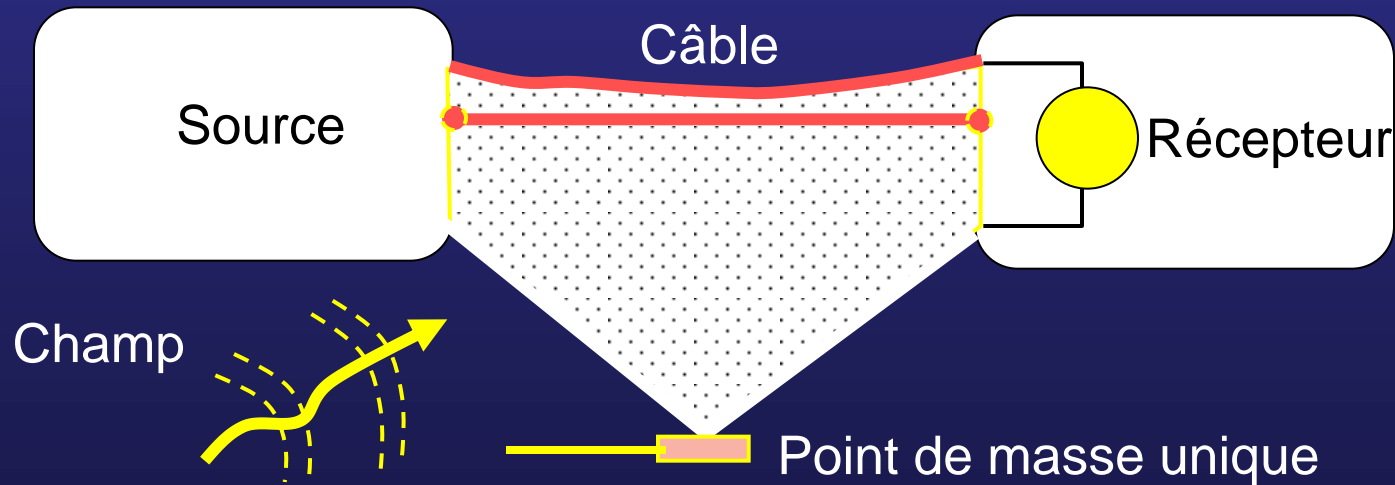
# Les connexions entre éléments

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



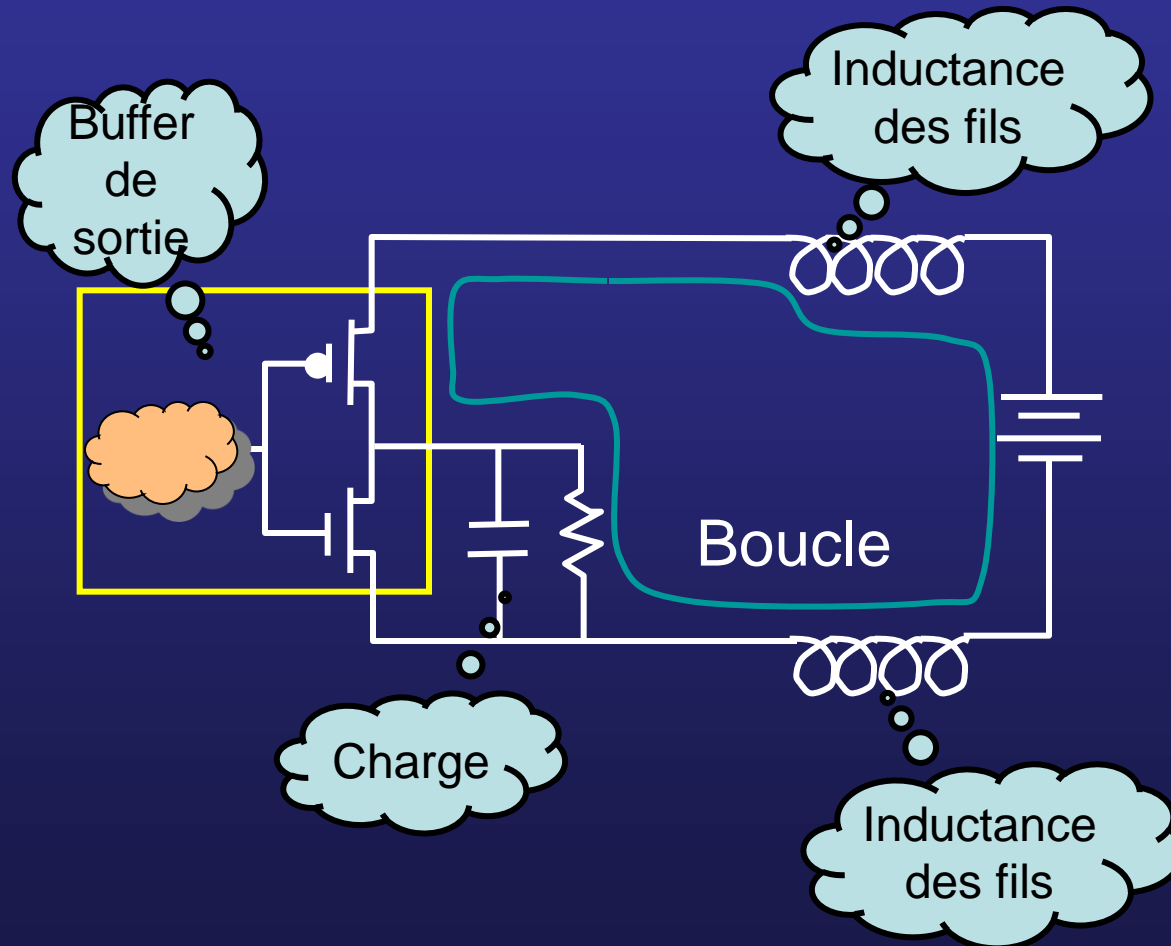
# Les connexions entre éléments

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



# Les connexions entre éléments

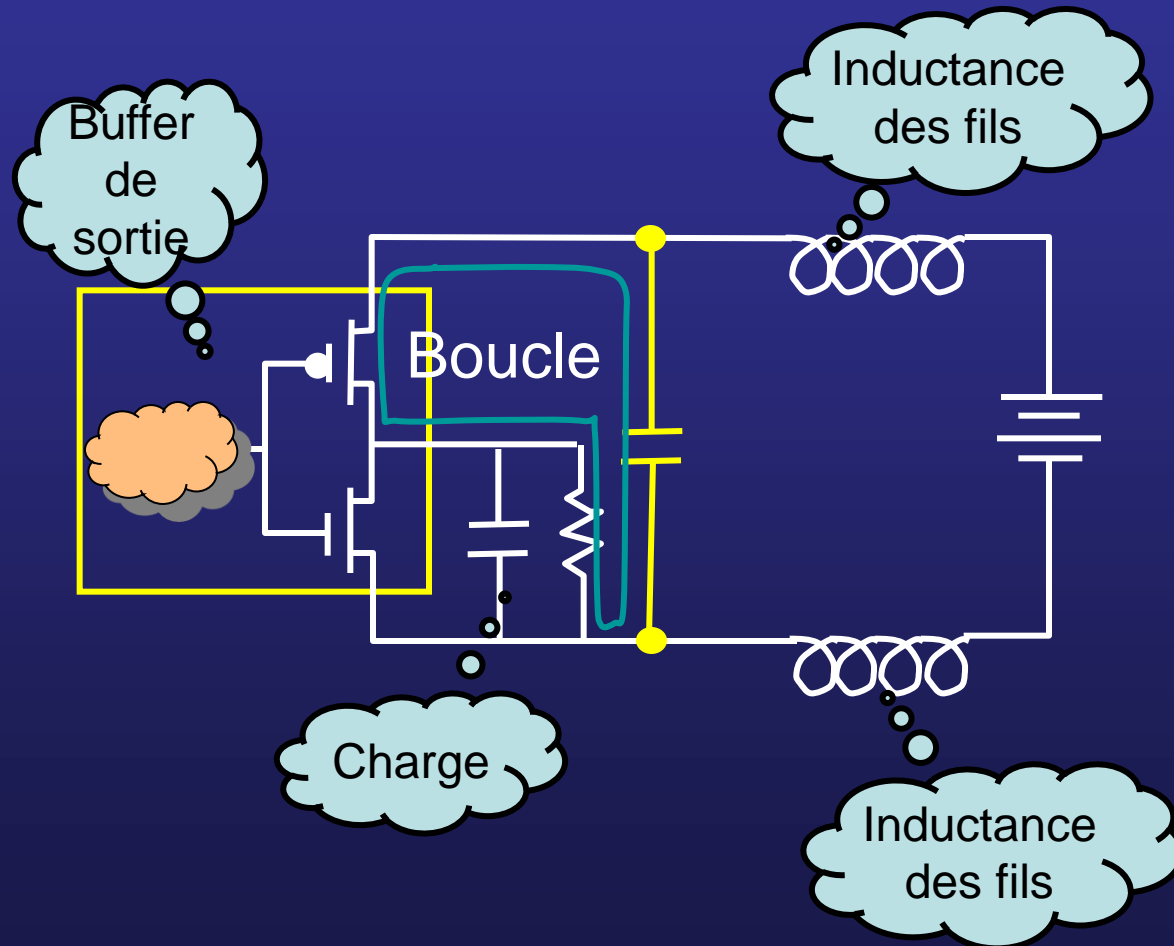
Sans condensateurs de découplage, la boucle peut être importante



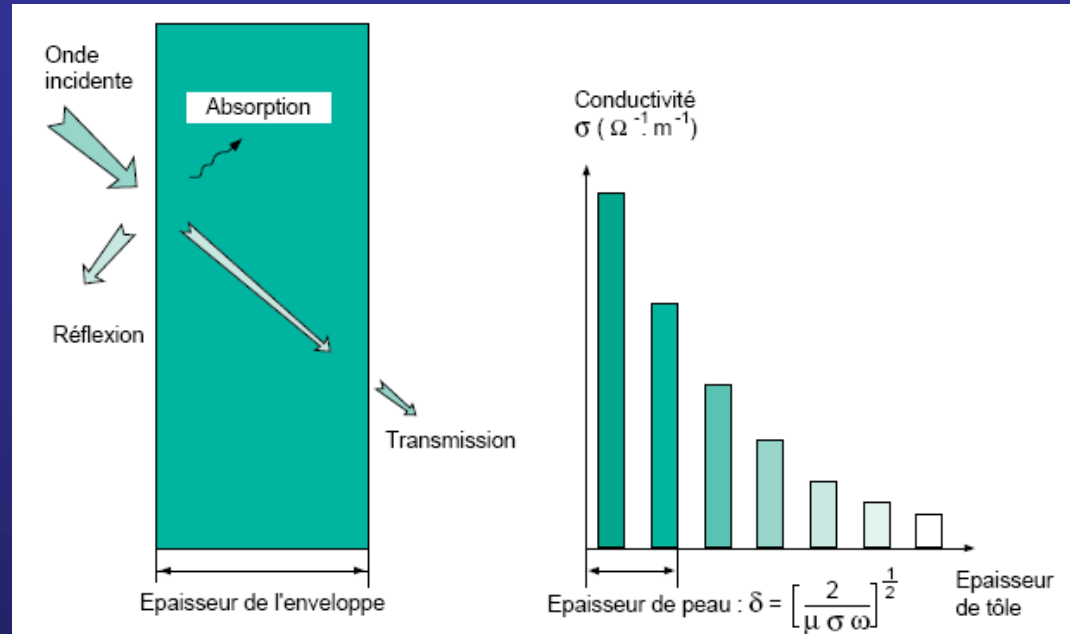


# Les connexions entre éléments

Avec un condensateur de découplage, la boucle est réduite !



# 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 !

# 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

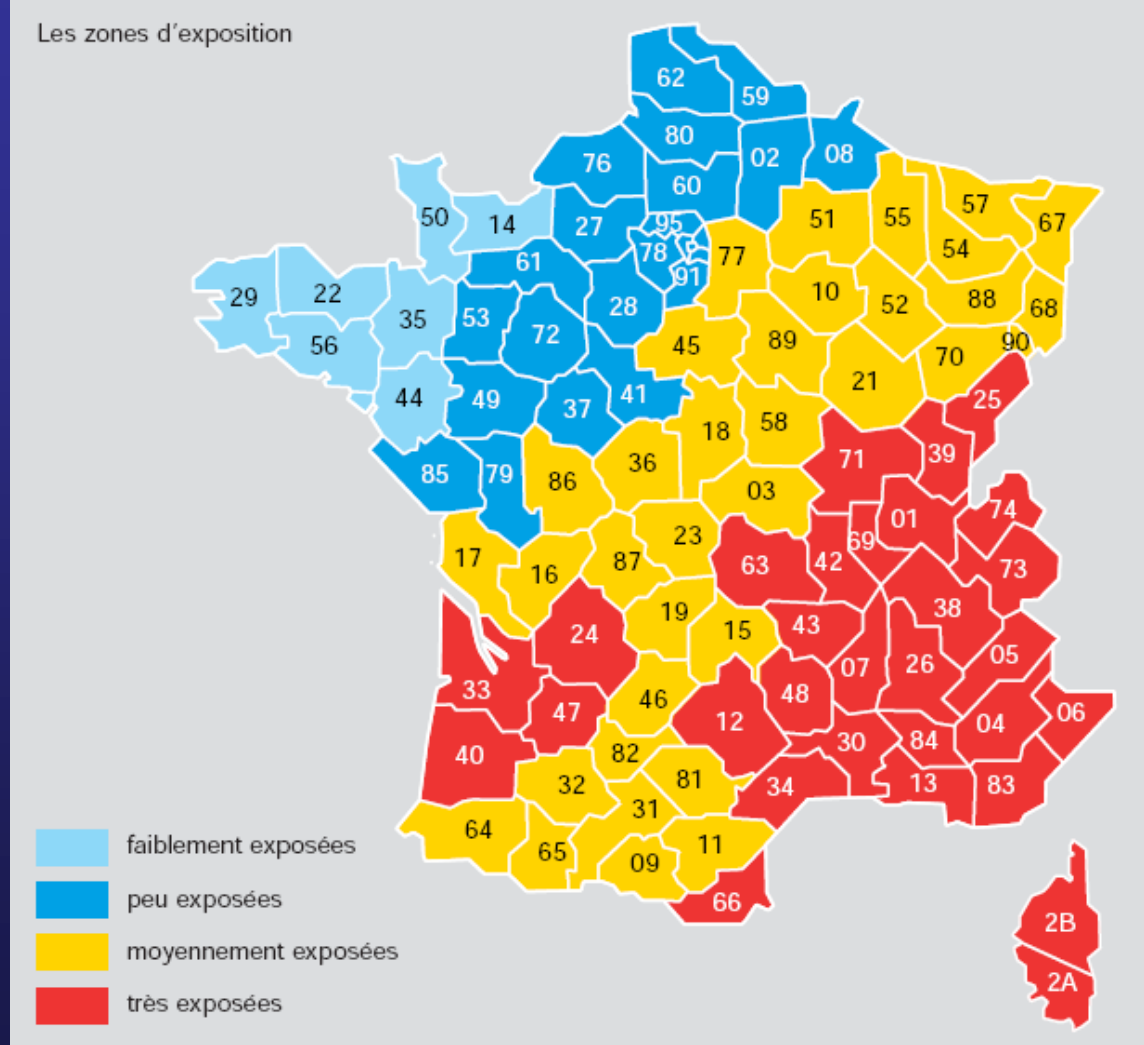
Mais il n'est pas rentable de protéger toutes les lignes.

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

# La foudre



Obligation de se protéger dans les zones à risque



# La foudre

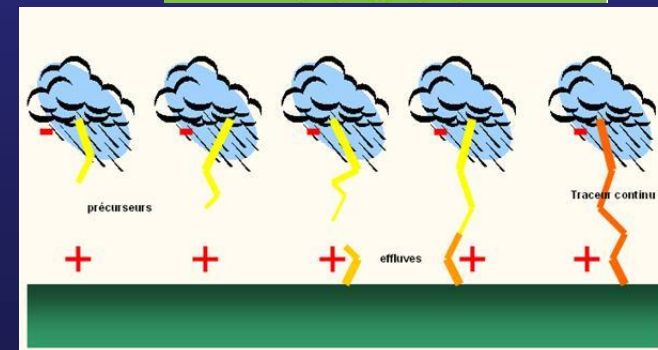
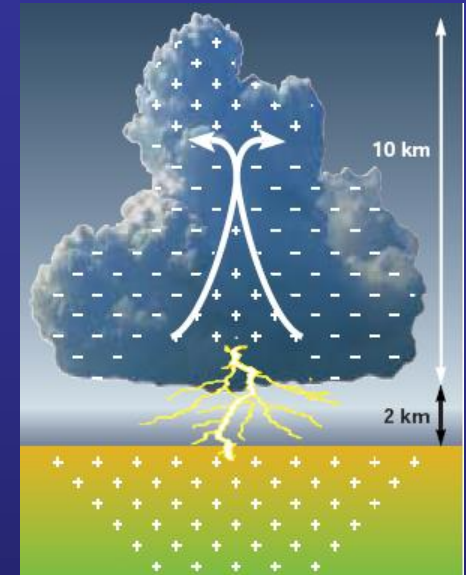
L'humidité du sol et la chaleur provoque un gros nuage : le cumulo-nimbus.

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.

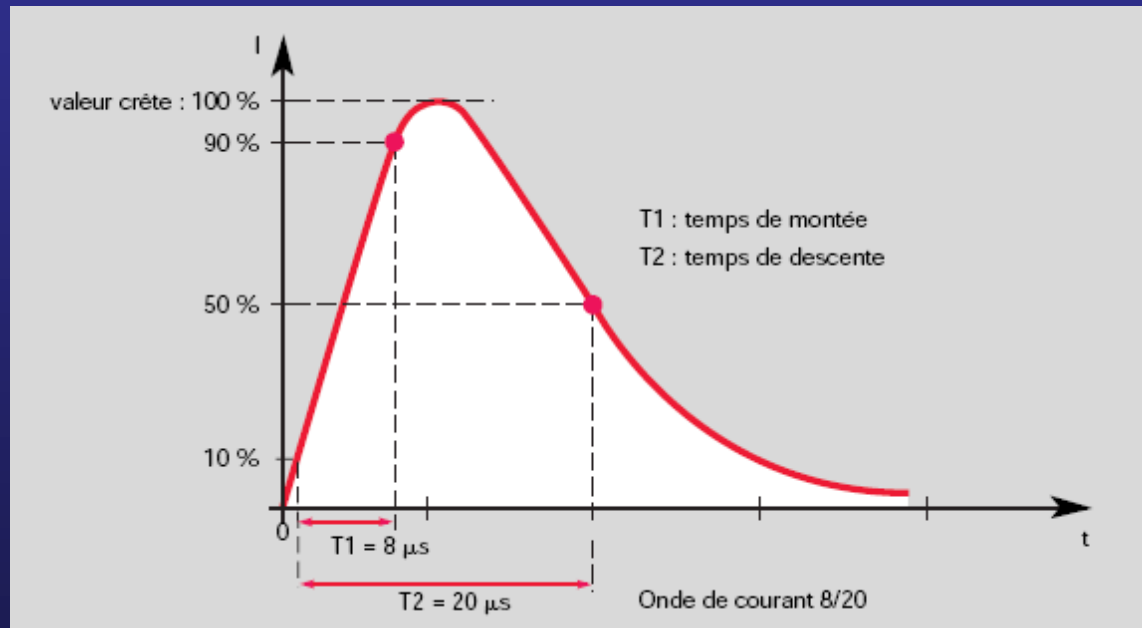
A quelques dizaines de mètres du sol un arc en retour monte du sol vers le nuage. Quand les 2 arcs se rejoignent c'est la décharge vers le sol. Le tonnerre est l'onde sonore qui accompagne la décharge.



# 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  $>10\text{KV}$  peut créer un courant  $>1\text{KA}$  !



## Par rayonnement

Le champ rayonné va créer des surtensions dans toutes les boucles



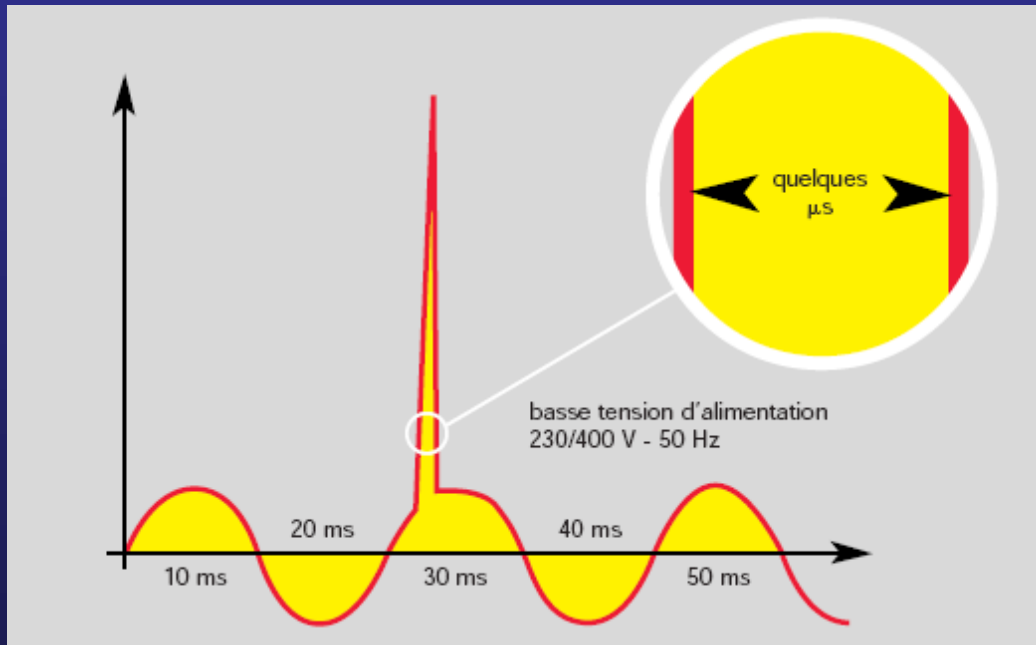
## Par montée du potentiel de terre

Les fils de terre peuvent s'élever en potentiel :  $>1000\text{V}$



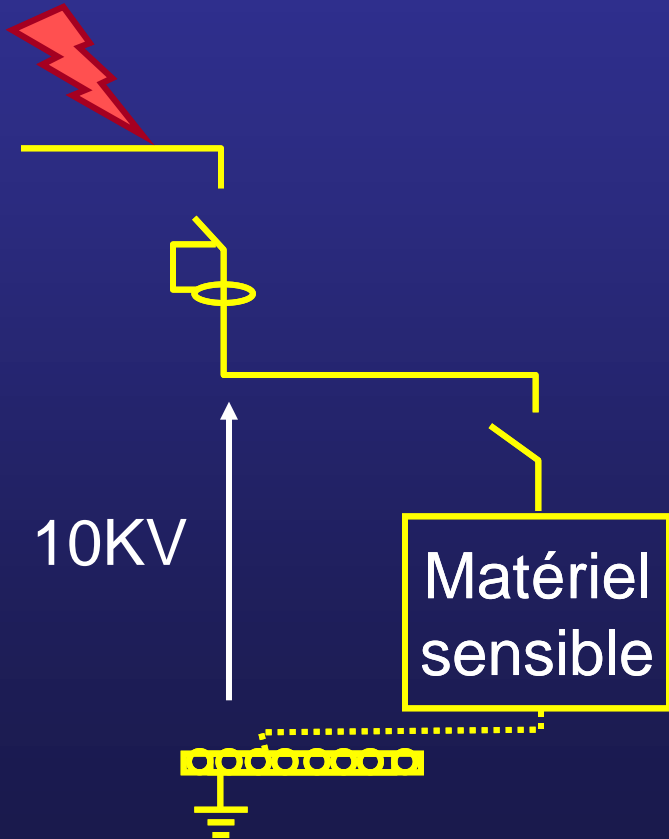
# La foudre

## Les surtensions transitoires...

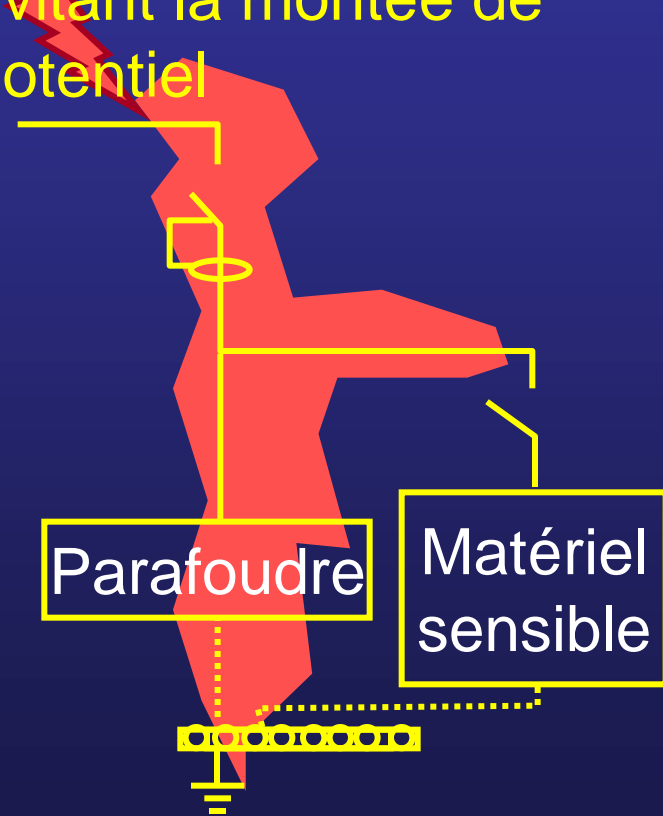


# La foudre

Sans parafoudre le matériel sera détruit



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

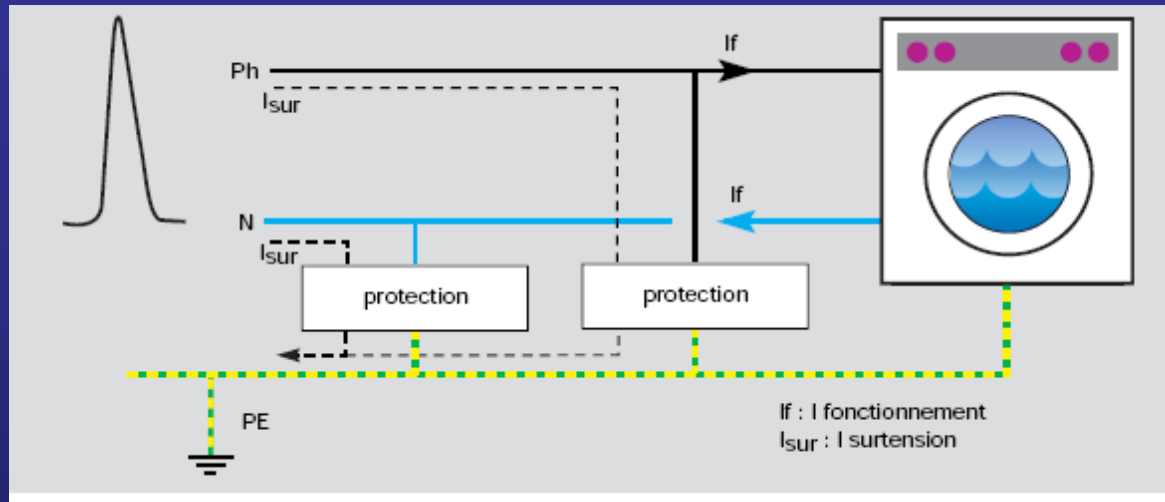


# La foudre

## Protection en mode commun

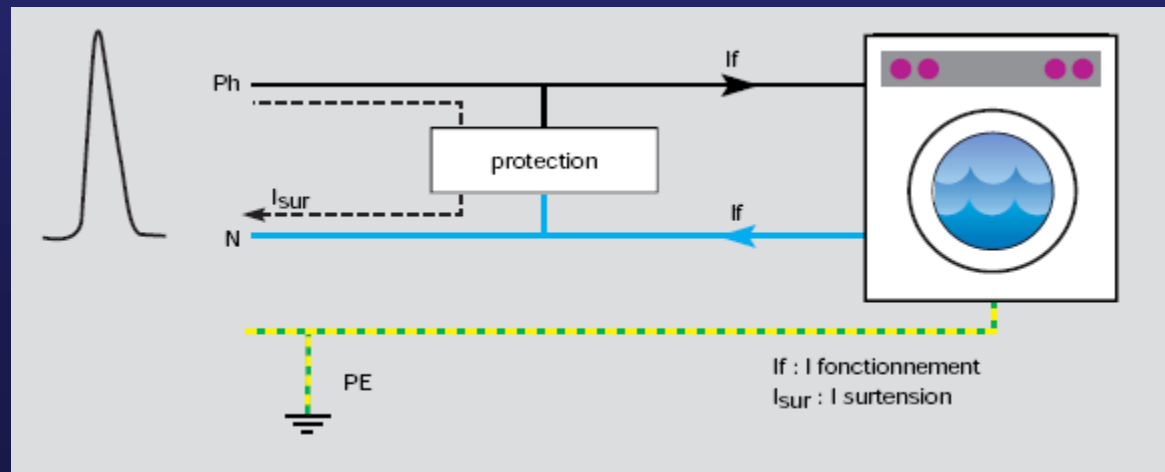
Entre phases et terre

Entre neutre et terre

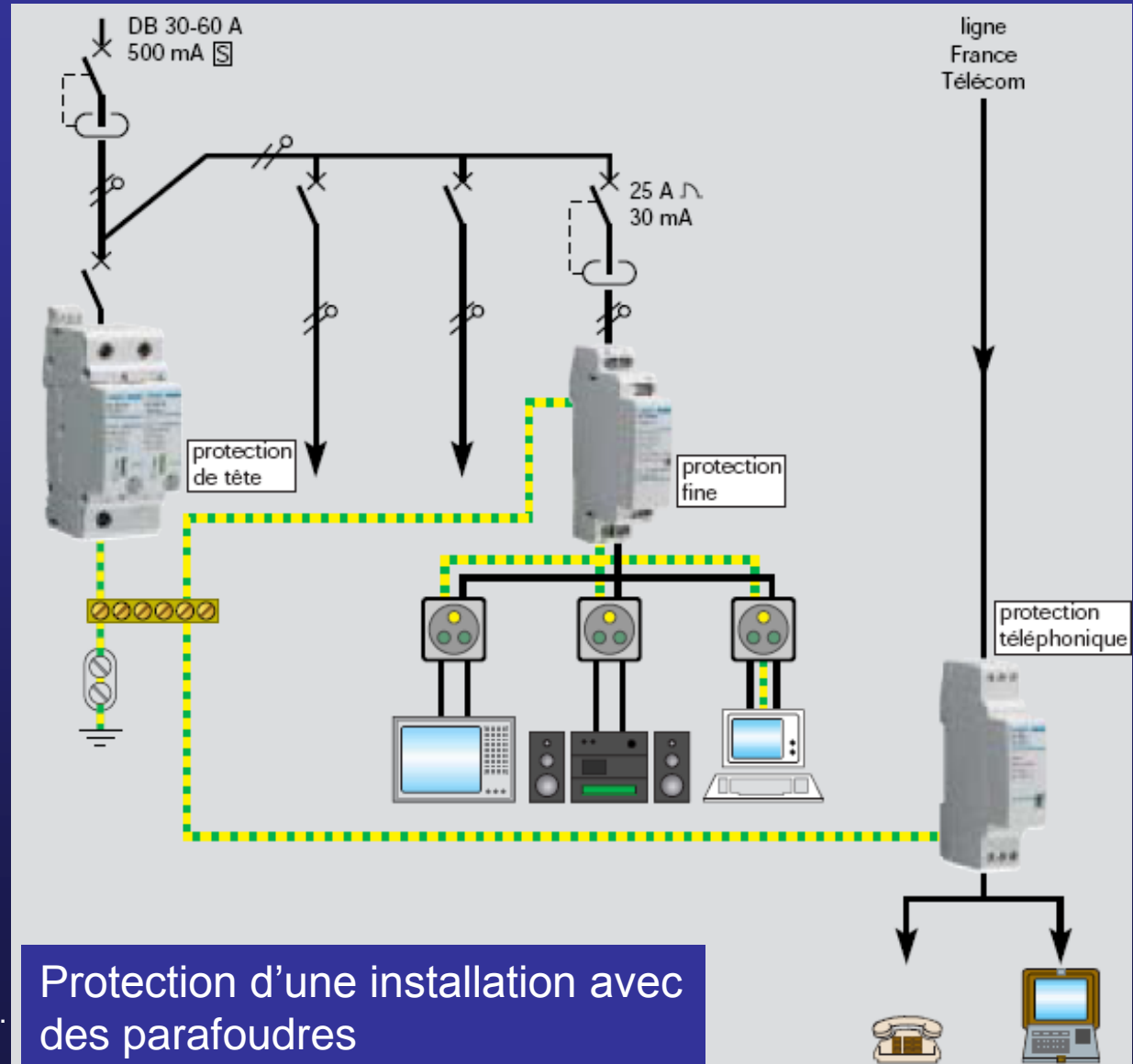


## Protection en mode différentiel

Entre phases et neutre



# La foudre



# 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  $10\text{KV/m}$
- 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

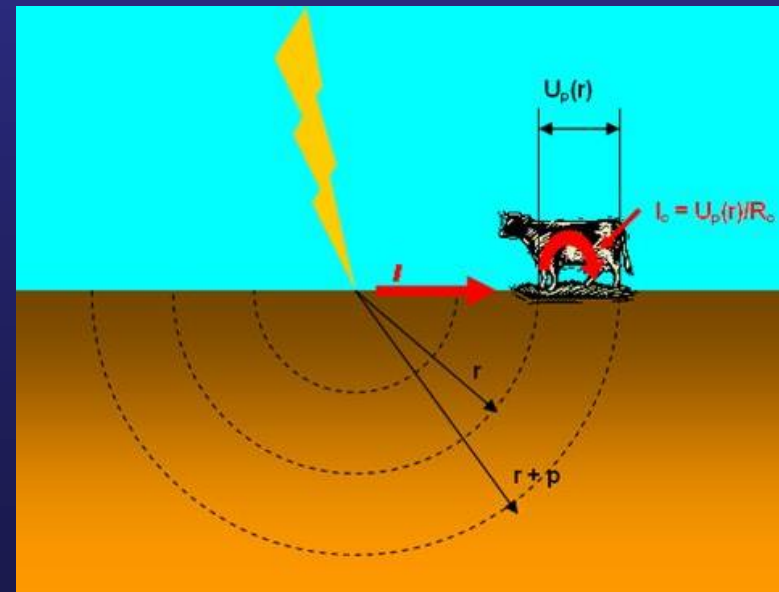
Quelle est la DDP entre les pattes d'une vache qui broute à 100 m du point d'impact d'un choc de foudre de 25KA ? (la résistivité du sol est ~ de 1000 ohms.m).

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

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

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

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



# Fin

Merci !