
BRUXELLES EST

De l'électron à l'antenne

Thierry Eggen, ON5TE, 25 avril 2019

1

Raisons de cette présentation

Entendu régulièrement sur la fréquence

- La notion du fonctionnement d'une antenne simple reste apparemment assez mystérieuse
- La notion d'onde stationnaire est encore plus confuse
- Un vocabulaire imprécis (Radian, etc.) augmente la confusion

La théorie est pourtant

- Complète depuis approx. 1865
- Précise

2

Très bref hommage à James Clerk Maxwell

$$\operatorname{div}(\vec{E}) = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \operatorname{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

(Maxwell-Gauss) (Maxwell-Faraday)

$$\operatorname{div}(\vec{B}) = 0 \quad \operatorname{rot}(\vec{B}) = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

(Maxwell-Flux) (Maxwell-Ampère)

3

Buts de cette présentation

La théorie était pourtant

- Précise
- Complète
- Extraordinaire

Mais ...

- Imbuvable, pour rester poli

Donc nous allons introduire tout cela

- De façon simple et (quasi) sans formules
- Et de façon intuitive

4

Nous parlerons ...

De la structure de la matière

De l'électricité

De la génération de champs électromagnétiques

De quelques antennes simples

De lignes de transmission

Nous ne parlerons pas encore

- De SWR
- D'adaptations
- De trucs et ficelles pratiques
- Ce sera pour un autre exposé ...

5

Structure de la matière

La matière

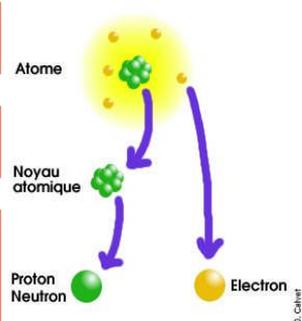
- Tout, y compris nous est constitué de molécules

Les molécules

- Sont des assemblages d'atomes

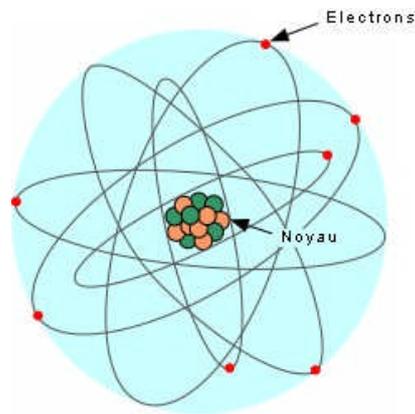
Les atomes

- Noyau
- Amas de 1 ou plusieurs protons
- C'est le nombre de protons qui détermine l'élément chimique (Hydrogène, Fer, Cuivre, Etc.)
- Eventuellement un ou plusieurs neutrons
- Nuage d'électrons
- Gravitent autour du noyau
- En principe, nombre d'électrons égal au nombre de protons



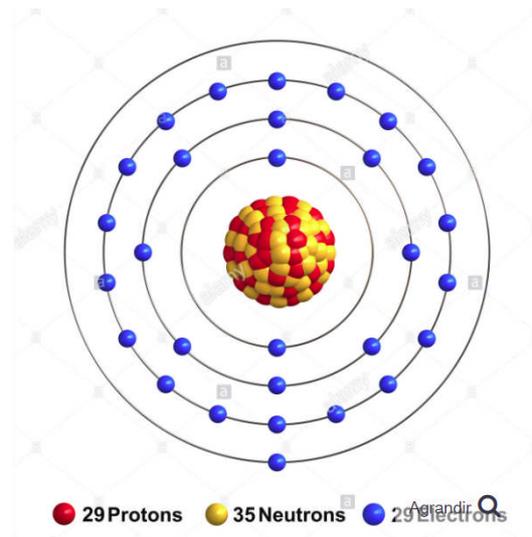
6

L'atome: Représentation classique



7

L'atome: Représentation en couches



8

L'Atome: quelques valeurs (pour info)

Masse (approximative)

- L'atome d'hydrogène est le plus simple: un proton et un electron
- Il est donc le plus léger
- Pourtant il en faut 600.000.000.000.000.000.000.000.000 pour 1 Kg
- Le noyau représente la presque totalité de la masse: 1 proton pèse 1.800 fois plus qu'un électron

Sur une file d'un mètre, on a à peu près

- 100.000 bactéries
- 10.000.000 virus
- 1.000.000.000 atomes
- 1.000.000.000.000.000 noyaux

Hydrogène: distance entre noyau et electron

- Approximativement 100.000 fois le diamètre du proton
- La lune gravite à approximativement à 380.000 km de la terre
- C'est comme si elle gravitait à 1.350.000.000 km de la terre

9

Comment tout cela tient-il ensemble?

Les 4 forces de l'univers



Gravité

- Attraction universelle des corps



Electro magnétique

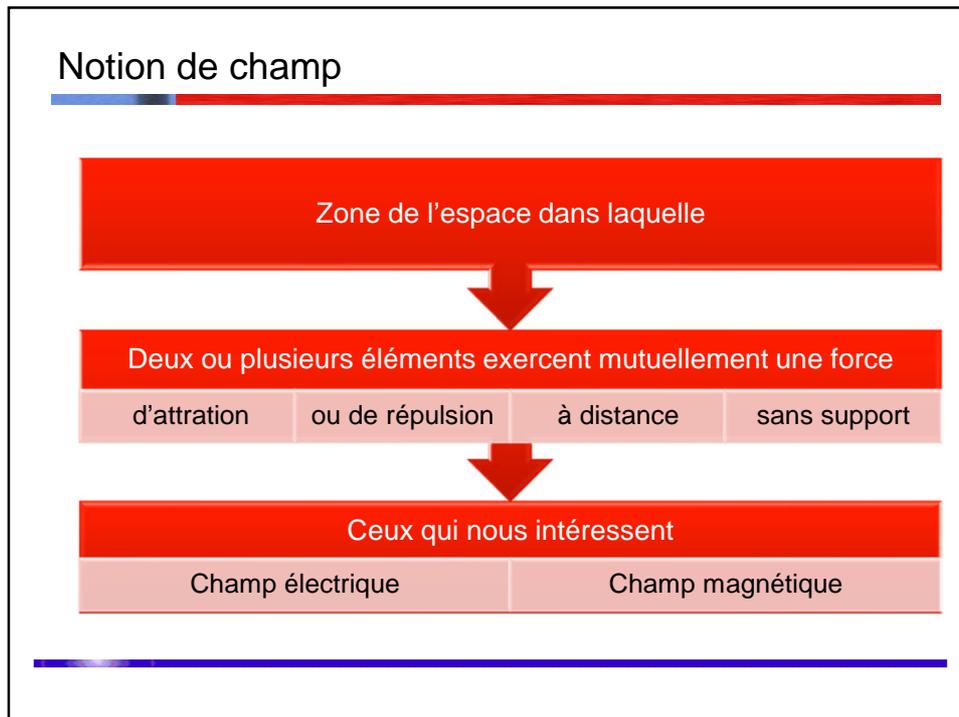
- Electro statique
- Electro dynamique



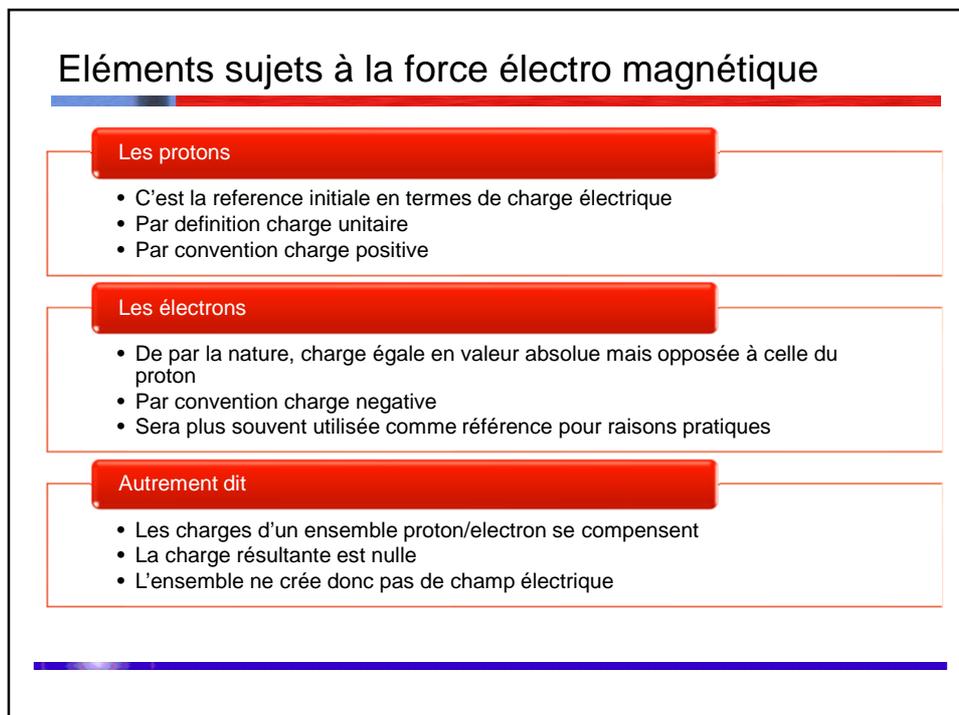
Nucléaire faible et nucléaire forte

- Cohésion au sein des atomes

10

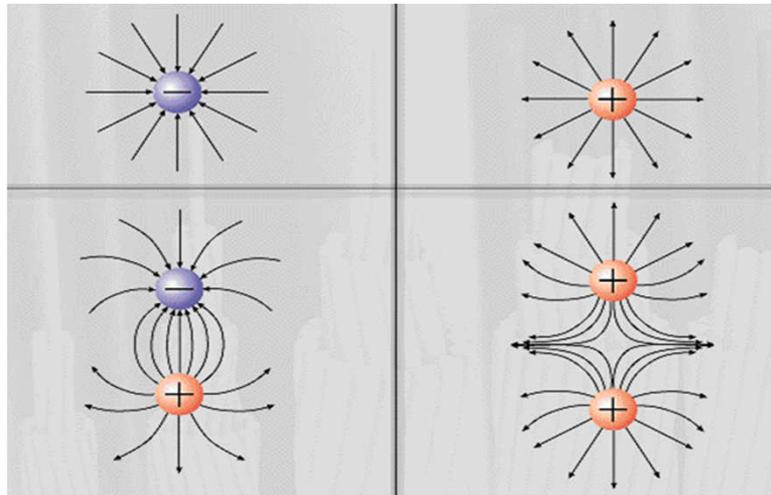


11



12

Champ électrique: Attraction ou répulsion de charges



13

Intensité relative des champs de force

L'intensité des forces

- Est exprimée par des formules quasi identiques

Proportionnelle au produit de la charge de chaque élément

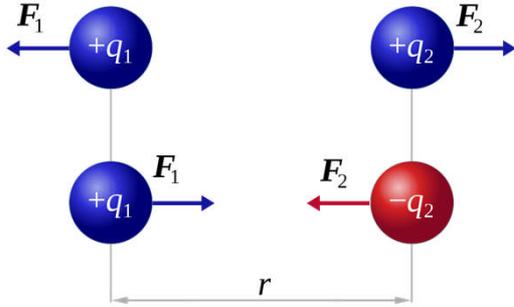
- Nombre d'électrons
- Nombre de protons
- Masse de la terre et de la lune par exemple

Inversement proportionnelle au carré de la distance les séparant

- On pense généralement à l'augmentation de distance qui diminue les forces
- **MAIS dans notre cas, les distances entre charges sont extrêmement faibles: Donc les forces peuvent devenir colossales**

14

Loi de Coulomb



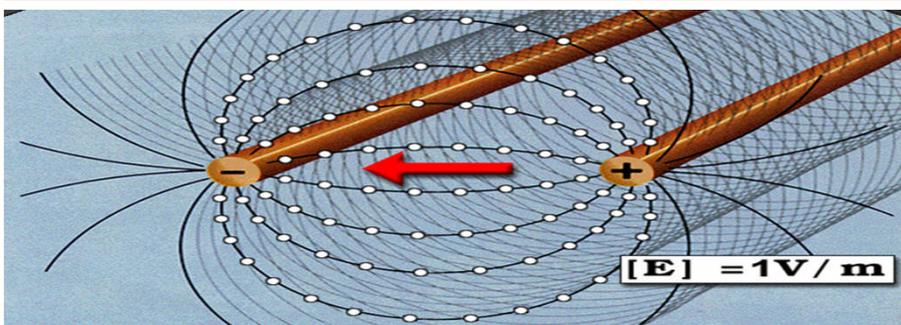
$$|\mathbf{F}_1| = |\mathbf{F}_2| = k_e \frac{|q_1 \times q_2|}{r^2}$$

15

Champ électrique: Les charges voudraient se mouvoir

Force électromotrice

- C'est la force attraction ou de répulsion des charges électriques
- Elle s'évalue en volts
- L'intensité du champ électrique s'évalue en volts par mètre



$[\mathbf{E}] = 1\text{V/m}$

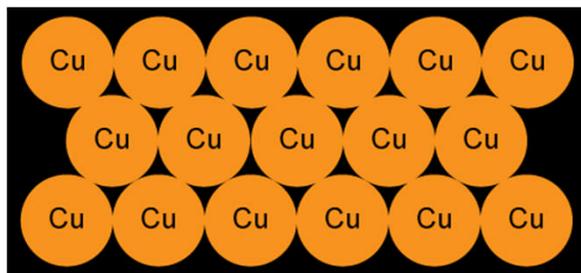
16

Valeurs courantes dans la nature



17

Dans un conducteur ...



Les atomes et donc leurs noyaux ne se déplacent pas, sauf:

Vibrations dues à la température Variations mécaniques (pliures, ...)

C'est négligeable en ce qui nous concerne

18

Par contre, les électrons ...

Peuvent éventuellement

- “Sauter” d'un atome à l'autre dans les conducteurs

Sachant toutefois que

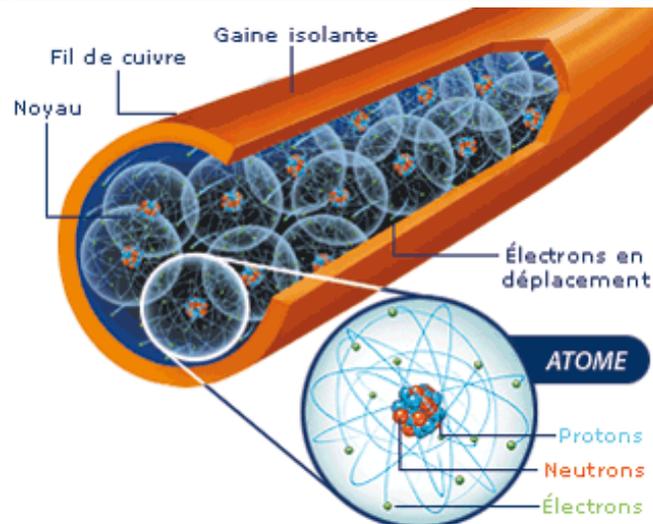
- Un atome à l'équilibre a autant d'électrons que de protons (29 dans le cas du cuivre)

Il tentera donc

- de “capturer” un électron en ballade s'il lui en manque
- de “se débarrasser” d'un électron en surplus

19

Un fil de cuivre isolé



20

On injecte 2 électrons sur un fil conducteur

Fil conducteur

- Ils peuvent se déplacer

Charges de même signe

- Ils se repoussent: force électro motrice

21

On injecte 3 électrons sur un fil conducteur

Ils se repoussent aussi

- Mais se distribuent de façon uniforme sur le fil

En effet

- La force de repulsion augmente quand la distance entre deux électrons diminue

Donc

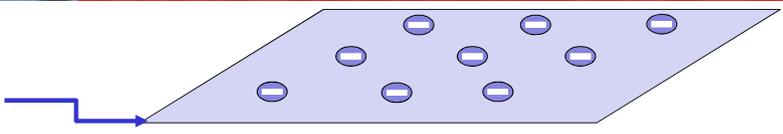
- Les électrons "s'étalent" comme de façon uniforme
- Ils sont comme reliés par de petits ressorts qui les repoussent sans arrêt
- C'est valable pour un nombre quelconque d'électrons

Ceci probablement le plus important de tout l'exposé

- Cela explique quasiment tout

22

Injection d'électrons sur un plan conducteur



La plaque est initialement neutre

- Le nombre total d'électrons est égal au nombre total de protons
- La plaque n'est donc pas chargée électriquement

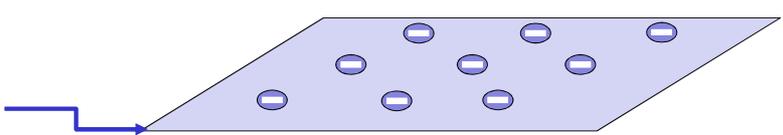
On injecte un certain nombre d'électrons

- Ils vont donc s'étaler uniformément

Mais alors combien d'électrons la plaque va t'elle accepter?

23

La capacité de cette plaque est fonction de:



Force électromotrice d'injection des électrons

- Plus cette force est élevée, plus les électrons seront forcés de se rapprocher
- En d'autres termes, cette f.é.m. correspond à une tension, à un voltage
- L'équilibre sera atteint lorsque la "pression" entre les électrons sera égale à celle de la source: le voltage sera égal à celui de cette source

Caractéristiques géométrique

- Plus la surface est grande, plus elle acceptera d'électrons soumis à une f.é.m. précise

24

Une première formule simple

$$Q = C.V$$

Q: la charge

- C'est une quantité d'électrons
- S'exprime en Coulomb (Charles-Augustin)
- 1 coulomb = $6,241\ 509\ 629\ 152\ 65 \times 10^{18}$ charges élémentaires (proton ou électron)

C: la capacité

- S'exprime en Farad (Michael Faraday)

V: la tension (ou voltage ou f.é.m.)

- S'exprime en volts (Alessandro Volta)

25

On joue ici avec deux plans conducteurs

Deux plaques proches mais sans contact

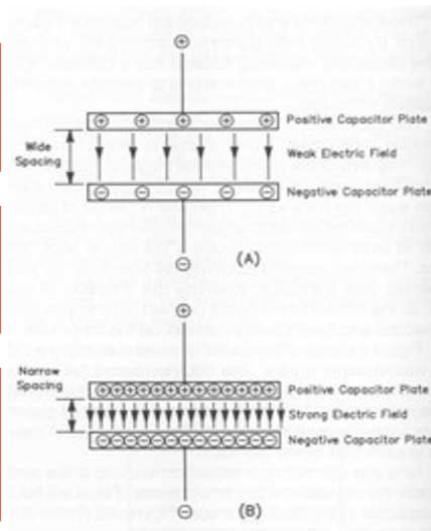
- On "chipe" des électrons sur la plaque du haut
- On les réinjecte sur la plaque du bas

Les électrons

- Sont attirés par la plaque du haut ...
- Mais ne peuvent l'atteindre: isolant (ou diélectrique)

Ils se concentrent

- ... ou plutôt se condensent
- Augmentant de ce fait la capacité des plaques ...
- Et forment un condensateur



26

Récapitulons

Dans un conducteur électriquement stable

- Les charges négatives peuvent se promener assez librement
- Elles se repoussent mutuellement

Si elles sont en excès

- Elles se distribuent uniformément sur toute la surface

Si elles sont en déficit

- Les "trous" se distribuent aussi uniformément sur toute la surface

Ce conducteur présente une certaine capacité fonction de:

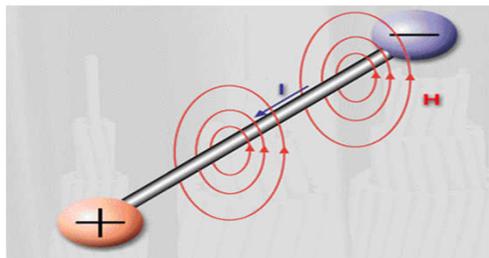
- sa géométrie
- l'influence éventuelle d'un autre conducteur (condensateur)

27

Quid lorsque les électrons se déplacent?

Une force électro motrice

- Met les électrons en mouvement
- Un Ampère (André-Marie), c'est un coulomb qui passe dans un conducteur en une seconde
- C'est la nature même du courant électrique: les électrons se repoussent de proche en proche sous la pression d'une f.é.m.



Le courant de charges (ici des électrons)

- Génère un champ magnétique autour de sa ligne de déplacement

28

Mais ...

Une charge électrique

- Qui se déplace dans un champ magnétique fixe
- Ou est plongée dans un champ magnétique variable

Subit une force électro motrice

- Les charges (électrons) sont déviées
- Ex: Tube cathodique, magnéto, dynamo, alternateur, ...

Loi de Lenz

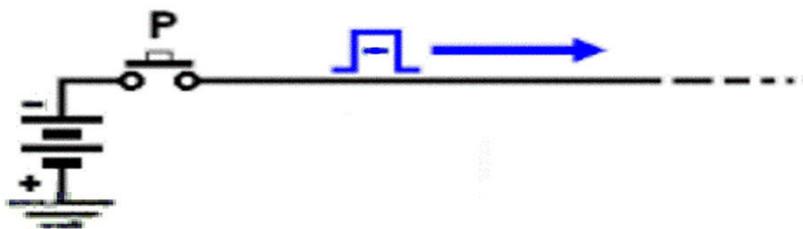
- Le champ magnétique s'oppose au mouvement qui l'a créé (Loi de Lenz)
- L'électron qui se déplace dans un conducteur est "freiné" par le champ magnétique qu'il a lui même créé
- C'est de la self-induction

29

On injecte des électrons dans un fil infini ...

Les électrons injectés vont

- Se repousser l'un l'autre vers l'infini
- Tenter d'arriver à une tension stable partout
- Mais n'y arrivent pas car ils s'écoulent vers l'infini



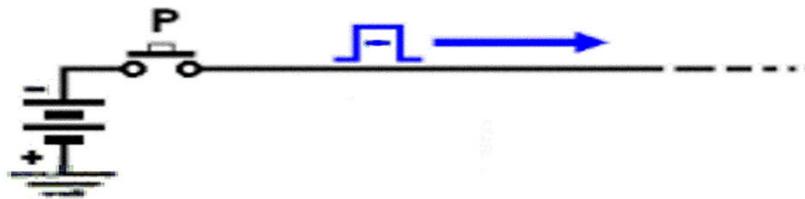
30

On injecte des électrons dans un fil infini ...

La Vitesse de "remplissage" du fil est limitée

- Par sa capacité: plus elle est élevée, plus il faut d'électrons pour augmenter la tension
- Par sa self-induction, qui « freine » l'établissement du courant
- Donc essentiellement par les dimensions géométriques du fil (son diamètre si il est rond) et l'environnement (pour mémoire dans ce cas)
- On évalue cette vitesse par rapport à celle de la lumière

C'est le Coefficient de vélocité



31

On injecte des électrons dans un fil infini ...

Le générateur fixe la f.é.m. d'injection

Le courant d'électrons est fonction

- Des caractéristiques du fil
- De cette f.é.m. d'injection: il lui est proportionnel

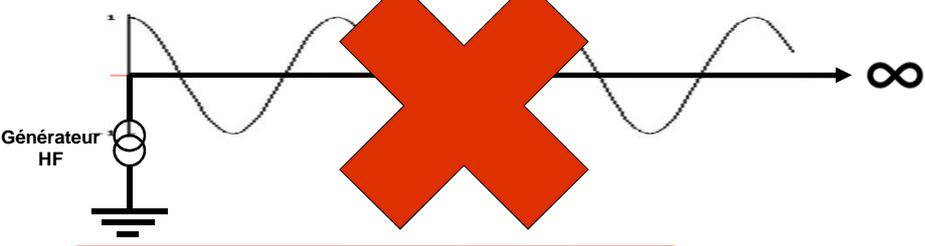
Le rapport entre cette f.é.m. et ce courant

- Est fixe pour un fil donné
- Suit la loi d'Ohm: $\Omega = V/A$

C'est l'Impédance caractéristique du fil

32

On injecte un signal alternatif

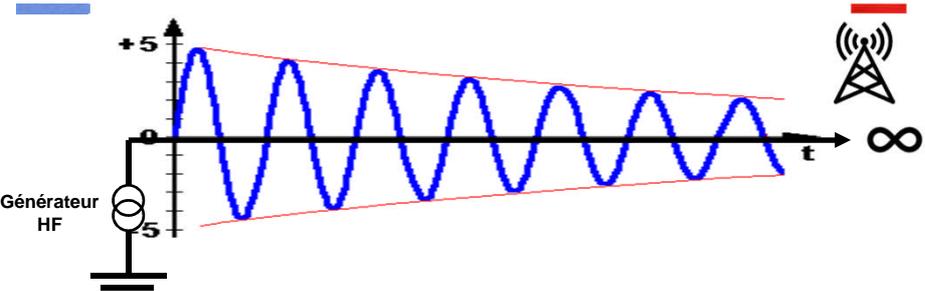


FAUX car

- La combinaison des champs électrique et magnétique rayonne de l'énergie
- Le signal perd donc de sa puissance le long du fil

33

On injecte un signal alternatif

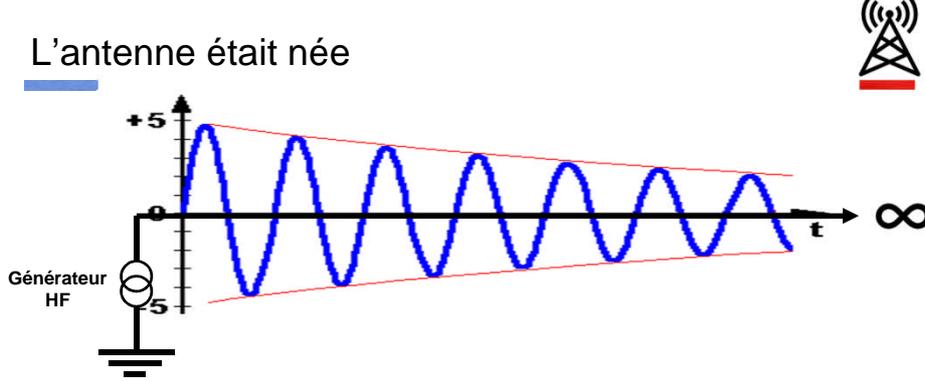


Nous avons maintenant dans ce fil

- Entre deux points distincts: une f.é.m. qui produit un champ électrique parallèle au fil
- Dans le fil, un courant d'électrons qui produit un champ magnétique circulaire perpendiculaire au fil
- La combinaison de ces champs: **c'est le champ électromagnétique**

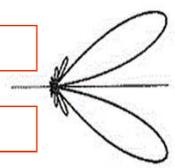
34

L'antenne était née



Notre fil est devenu une antenne

Avec son diagramme de rayonnement



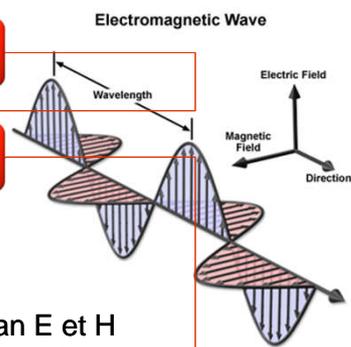
35

Champs électromagnétiques

Champs magnétique et électrique combinés

Leur relation mutuelle est décrite dans les équations de Maxwell

- Même fréquence
- Même phase
- Champs E et H orthogonaux
- Se propagent orthogonalement au plan E et H
- Intensité relative décrite par l'impédance du vide: $120 \cdot \pi$ Ohms



36

Mais ... 



Un fil qui va à l'infini

- Cela n'existe pas

Seule solution

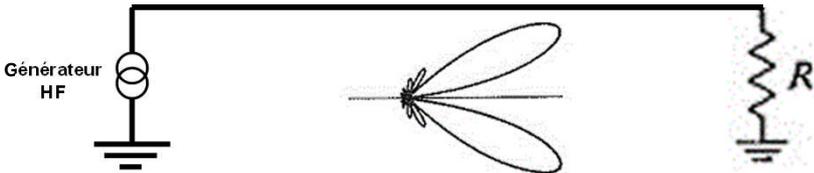
- Le couper quelque part

Mais alors

- On aura des réflexions et autres ennuis

37

Première solution 



Solution simple

- On « termine » le fil sur une résistance égale à son impédance caractéristique:
- Il n'y a pas de réflexions

Inconvénients

- La résistance va dissiper ce qui n'a pas été rayonné
- Cependant, plus l'antenne est longue, meilleur sera le rendement
- Les antennes sont malgré tout assez longues: plusieurs longueurs d'onde

Avantages

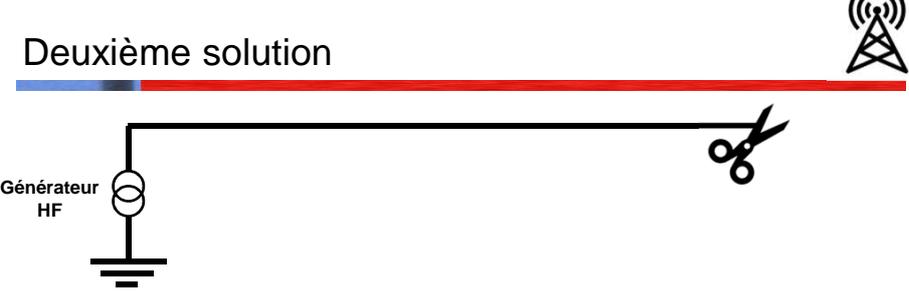
- Mais on a une antenne non-résonnante, donc indépendante de la fréquence
- Pas de problèmes d'accord, de réglage

Exemples célèbres

- Rhombique, W3HH, Beverage

38

Deuxième solution



On « termine » le fil sur une impédance infinie

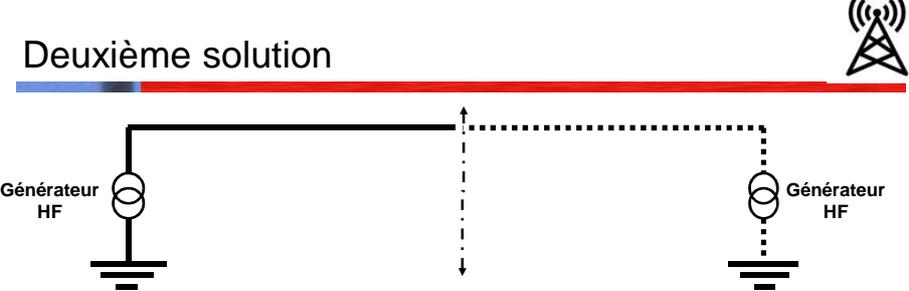
- Bref, on le coupe

Il y a réflexion totale

- Les électrons « arrivants » ne peuvent poursuivre leur chemin
- Ils vont s'accumuler tant que la tension d'arrivée est supérieure à la tension en bout d'antenne
- Ils vont repartir vers la source lorsque la tension d'arrivée diminue

39

Deuxième solution



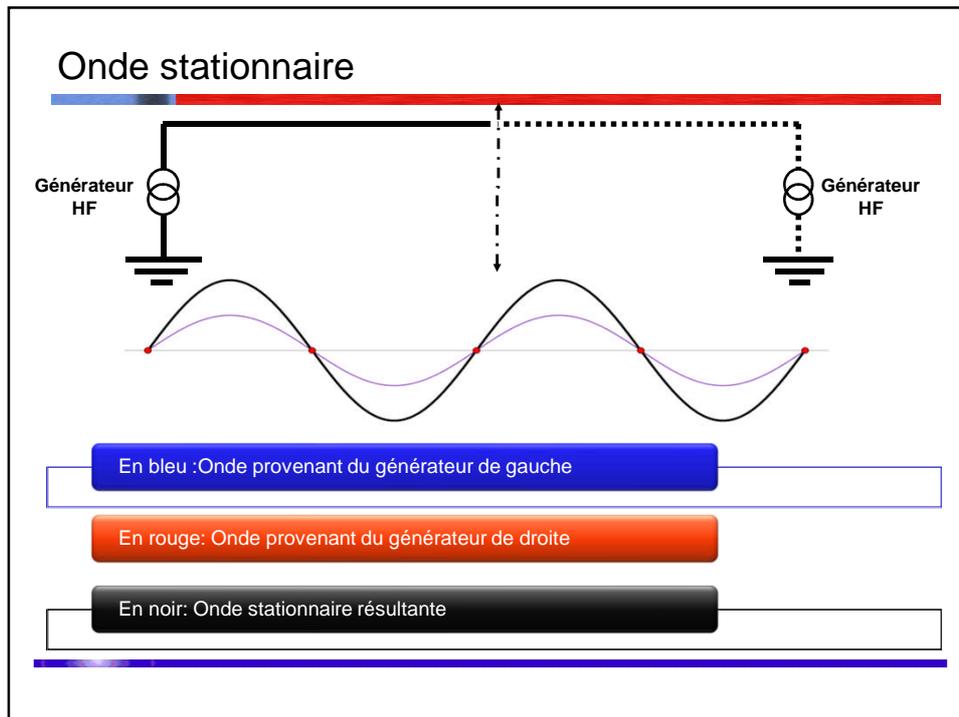
C'est comme si on avait un second générateur HF

- Connecté au bout de l'antenne, en miroir par rapport au premier
- Même fréquence

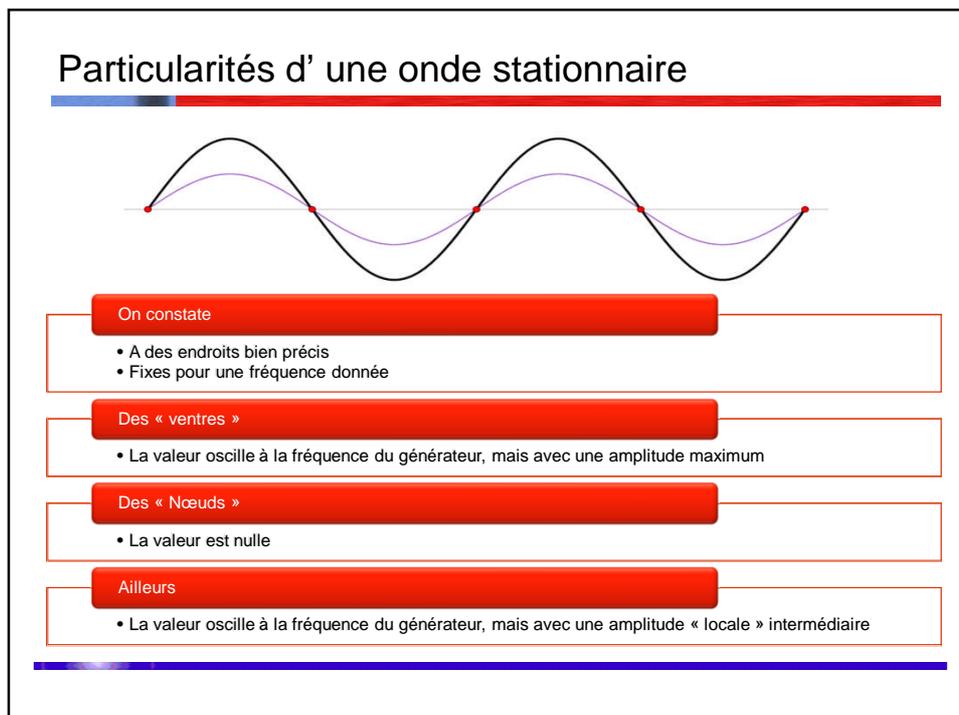
Ils génèrent chacun une onde progressive, en sens opposé

- On a deux ondes progressives qui se croisent
- Elles s'additionnent à chaque point du fil
- Cette addition résulte en une onde stationnaire: elle existe mais ne progresse pas

40

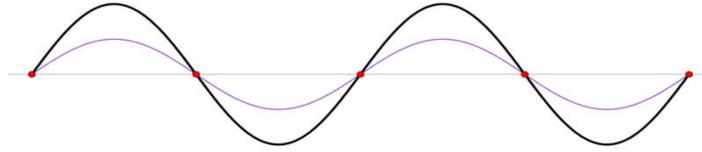


41



42

Dans le cas d'une antenne « coupée »



A la pointe de l'antenne

- Le courant sera nul: nœud de courant
- La tension pourra passer par un maximum: ventre de tension
- Le rapport tension/courant sera théoriquement infini (division par zéro)
- L'impédance en pointe est infinie

Si l'on recule vers le générateur

- Le premier point caractéristique sera le premier nœud de tension rencontré
- Le courant ne sera pas nul
- Le rapport tension/courant sera théoriquement nul
- L'impédance à cet endroit est nulle

43

Conclusions partielles

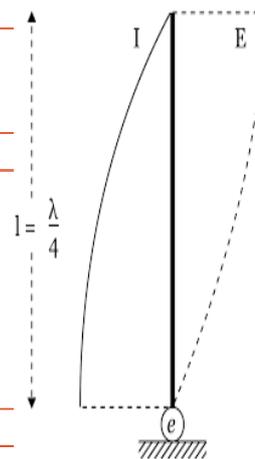
La distance entre ces deux points:
c'est $\frac{1}{4}$ d'onde, soit $\lambda/4$

- Son impédance théorique au point d'attaque du générateur est de zéro

Mais

- Comme ce fil $\lambda/4$ rayonne, sa résistance rayonnement est en série avec cette impédance
- L'impédance telle que vue du générateur pour $\frac{1}{4}$ d'onde à la résonance est résistive et de 36Ω
- ... en supposant que la « terre » ou « masse » soit réellement à un potentiel de référence fixe à toute fréquence, ce qui n'existe pas. Quoique ...

Le fil $\lambda/4$ est notre brique Lego de base



44

Mythe: Terre HF, masse, etc...

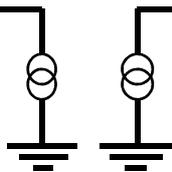
« Forcer » une mise à terre HF est illusoire

- On sera TOUJOURS connecté à une référence fixe, pour autant qu'elle existe, via un fil dont on a vu que l'impédance varie selon la distance entre connexions et la fréquence
- C'était valable en réception grandes ondes: le fil de mise à la terre était très court par rapport à λ
- Ce n'est pas le cas dans nos bandes de fréquence
- Le fil de mise à la terre risque de rayonner plus que l'antenne!

Mais alors que faire?

45

Première solution: symétriser



On symétrise

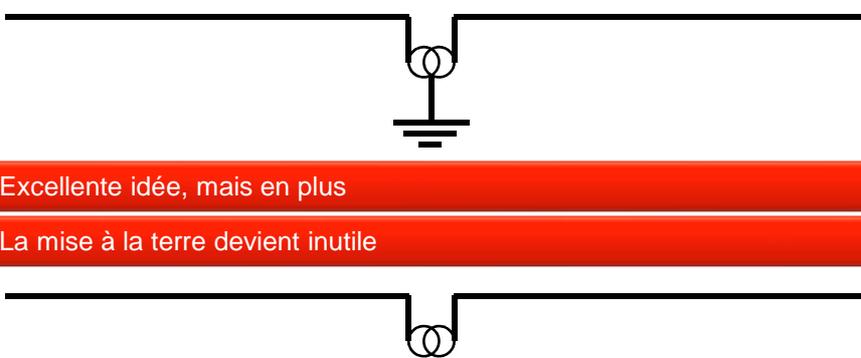
- Deux générateurs: même fréquence, opposition de phases
- Deux fils $\lambda/4$ opposés

Résultat

- Les champs électromagnétiques se renforcent
- Mais pourquoi ne pas avoir un seul générateur symétrique?

46

Première solution: symétriser



Excellente idée, mais en plus

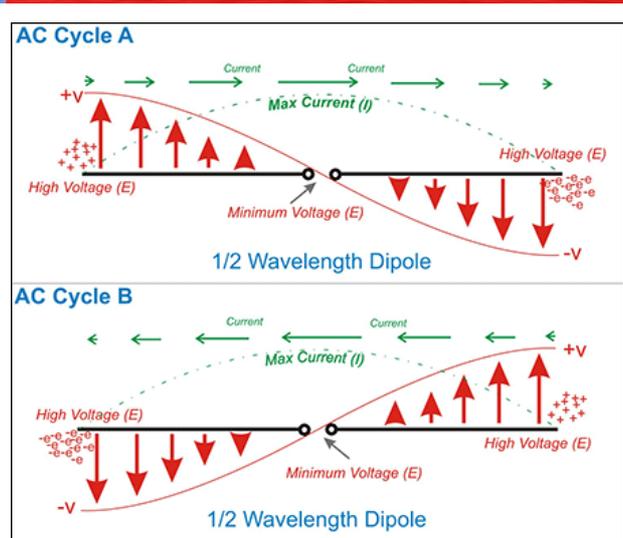
La mise à la terre devient inutile

Notons que

- Les résistances de rayonnement sont en série
- La résistance de rayonnement de ce dipôle devient donc 72Ω

47

Notre bon vieux dipôle demi-onde



AC Cycle A

Current → → → → →

Max Current (I)

High Voltage (E) +V

Minimum Voltage (E)

High-Voltage (E) -V

1/2 Wavelength Dipole

AC Cycle B

Current ← ← ← ← ←

Max Current (I)

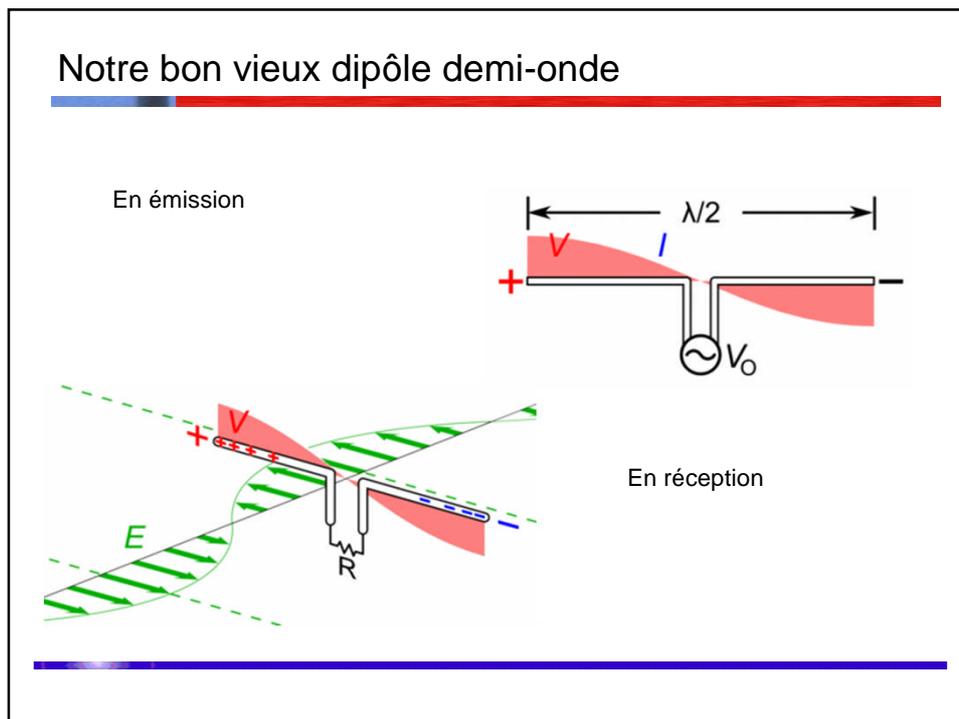
High Voltage (E) -V

Minimum Voltage (E)

High Voltage (E) +V

1/2 Wavelength Dipole

48



49

A la recherche du point neutre absolu ...

Et si l'on connectait deux $\lambda/4$ bout-à-bout?

The diagram shows two quarter-wave sections of length $\lambda/4$ connected at their ends to a ground plane. The impedance at the central connection point is labeled $Z = 0$.

L'impédance au point central

- Est nulle: c'est comme si on avait une terre parfaite
- La partie résistance de rayonnement est nulle aussi car il n'y a pas de rayonnement d'énergie

La mise à la terre devient inutile

- On a enfin trouvé notre « Terre HF »
- Valable seulement pour les λ multiples impairs de $\lambda/4$

50

La Ground Plane: Mythes

Ground plane avec radians

- Un radian, c'est un angle ou un moyen de chauffage
- Les brins horizontaux (ou presque) s'appellent des radiales

Ground plane avec 1 seule radiale

- Alors ce n'est pas une ground plane
- C'est une antenne en V, tout simplement

Ground plane avec « plan de masse »

- Par exemple le toit d'un véhicule
- Rien ne garantit cependant que l'impédance absolue au point central soit nulle

$\lambda/4$

$\lambda/4$

51

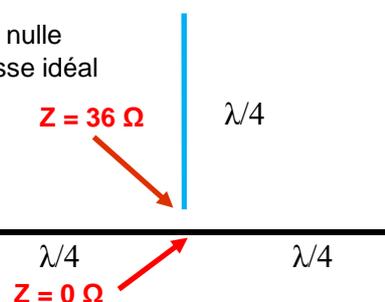
La Ground Plane: Réalités

Le brin vertical

- A une impédance qui se résume à sa résistance de rayonnement, soit 36Ω

Les brins horizontaux

- Ne rayonnent pas
- Leur point commun est à impédance nulle
- Leur nappe constitue un plan de masse idéal



52

Variations sur la Ground Plane

Brins horizontaux	Brins inclinés en cône	Cas limite: dipôle à jupe
<ul style="list-style-type: none"> • Il peut y en avoir plus de deux. • Ils doivent être distribués uniformément autour du point central. • Il y en a généralement 3 ou 4 	<ul style="list-style-type: none"> • Les brins ne sont plus opposés, ils commencent à rayonner • La résistance de rayonnement augmente • Astuce pour « régler » l'impédance de l'ensemble • Impacte le diagramme de rayonnement 	<ul style="list-style-type: none"> • La nappe se résume à un tube • Le feeder traverse ce tube • L'impédance est de 72Ω • On a tout simplement un dipôle demi onde vertical

53

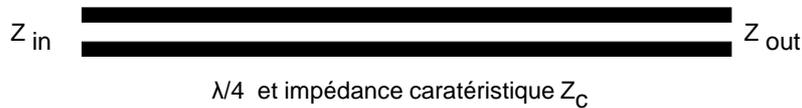
Ligne de transmission quart d'onde

Z_{in} Z_{out}
 $\lambda/4$ et impédance caractéristique Z_c

- On prend deux brins $\lambda/4$
 - On les associe en parallèle
 - On les exploite en mode différentiel (symétrique)
- On a fabriqué une ligne de transmission
 - Qui ne rayonne pas si on reste en mode différentiel
 - Tout courant dans un fil est exactement l'opposé de celui de l'autre fil
 - Il n'y aura donc pas de résistance de rayonnement
- Cette ligne a une impédance caractéristique
 - Uniquement fonction de sa géométrie et du diélectrique entre les fils

54

Ligne de transmission quart d'onde



Comportement vis-à-vis des impédances: $Z_{in} / Z_C = Z_C / Z_{out}$

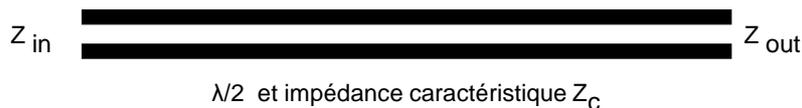
- $Z_{in} * Z_{out} = Z_C^2 =$ Constante qui dépend uniquement du câble

C'est-à-dire que

- Si je court-circuite la sortie, l'impédance à l'entrée sera infinie. Uniquement pour les fréquences correspondant aux multiples impairs de $\lambda/4$
- Si je laisse la sortie ouverte, ce sera juste l'inverse
- On peut utiliser ces lignes comme filtres
- Si je termine la sortie sur une résistance égale à l'impédance caractéristique de ligne, alors il y a adaptation et le Z_{out} est ramené à l'entrée

55

Ligne de transmission demi onde



On prend deux lignes $\lambda/4$

- On les associe en série
- On les exploite en mode différentiel (symétrique)

On a fabriqué une ligne de transmission

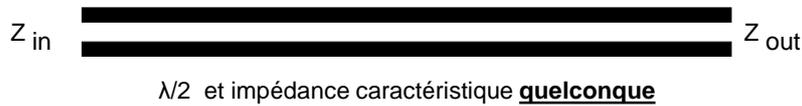
- Qui ne rayonne pas si on reste en mode différentiel
- Tout courant dans un fil est exactement l'opposé de celui de l'autre fil
- Il n'y aura donc pas de résistance de rayonnement

Cette ligne a une impédance caractéristique

- Uniquement fonction de sa géométrie et du diélectrique entre les fils

56

Ligne de transmission demi onde



Comportement vis-à-vis des impédances: $Z_{in} = Z_{out}$

- On applique en cascade la formule précédente sur les deux quarts d'onde en série
- Il vient que $Z_{in} = Z_{out}$

C'est-à-dire que

- Quelle que soit l'impédance caractéristique du câble,
- Quelle que soit l'impédance connectée à sa sortie,
- Cette impédance est ramenée à l'entrée

Autrement dit

- Cette fantastique propriété n'est valable que pour des multiples entiers de demi-ondes

57

Et le coaxial?

Le coaxial est-il une ligne symétrique?

- Oui, mais sa symétrie est différente: autour d'un point au lieu de d'autour d'un axe

Dans une ligne symétrique bifilaire classique

- On peut avoir malgré tout trois courants:
 - Deux courants opposés dans chaque fil: mode différentiel
 - Un courant dans les deux fils en même temps: mode commun
- C'est ce mode commun qui nous pose généralement des problèmes

Dans le coaxial, il peut aussi y avoir plusieurs courants

- Ces modes différentiel et commun existent aussi
- Mais en plus, à cause de l'effet pelliculaire, on aura:
 - Un courant dans le conducteur central
 - Un courant à la surface intérieure de la gaine (tresse)
 - Un courant à la surface extérieure de la gaine
- La séparation de ces deux derniers courants augmente avec la fréquence
- Info: l'effet pelliculaire peut déjà être ressenti à 50 Hz! Pour des fils de diamètre > 30 mm

58

Et en réception?

Nous avons vu que

- Un courant alternatif dans une antenne génère un champ électromagnétique dans l'espace

Les champ magnétique et électrique

- Se perturbent mutuellement
- Et finissent par cohabiter harmonieusement (impédance du vide)

Un conducteur placé dans ce champ

- Voit ses électrons libres perturbés et soumis à une f.é.m.
- Que l'on peut récupérer vers un récepteur

N'est-ce pas là une antenne de réception?

59

Cerise sur le gâteau (pour vous perturber)

Nous avons vu que

- Un courant alternatif dans une antenne d'émission
- Génère une f.é.m. dans une antenne de réception

La bonne vieille loi d'Ohm

- Nous dit que si l'on compare la f.é.m. de l'antenne de réception au courant nécessaire dans l'antenne d'émission pour produire cette f.é.m.

On obtient ce qu'on appelle impédance mutuelle entre les deux antennes

- Après tout, pourquoi pas?

60



C'est fini pour aujourd'hui

- Merci de votre attention

on5te@uba.be

61