



UNIVERSITÉ TOULOUSE III

TOULOUSE

Génie Électrique et
Informatique
Industrielle

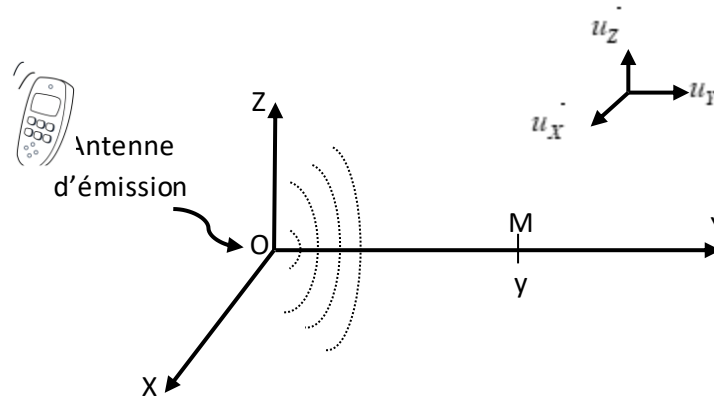
ANTENNE/PROPAGATION HERTZIENNE

Cahier de TD ENOC

Janvier 2022

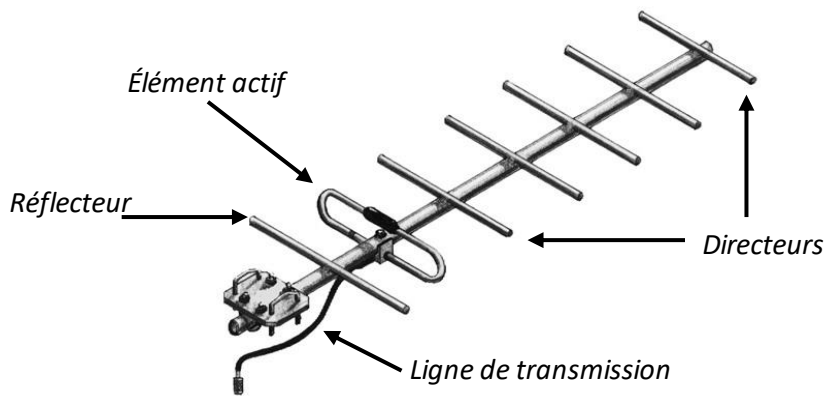
TD 1&2: Propagation des ondes électromagnétiques

1. Structure d'une OEM progressive plane : le pourquoi de la géométrie des antennes TV.



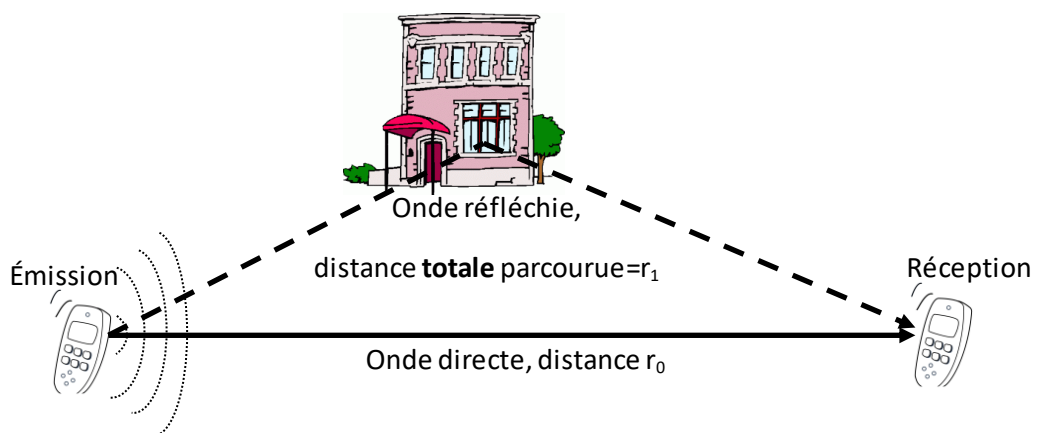
Une antenne omnidirectionnelle localisée en O émet une onde électromagnétique (OEM) à **polarisation verticale** (selon $\vec{u}_z$), de **fréquence $f=2.6$ GHz** (réseau 4G d'Orange ou SFR). On désignera par $\vec{E}_o$ et $\vec{H}_o$ les champs électrique et magnétique (respectivement) émis au niveau de l'antenne. L'espace sera rapporté au repère orthonormal direct $(O, \vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$. *Rappel : vitesse de la lumière dans le vide $c=3.10^8$ m/s.*

- 1) Quelle est la période temporelle T [s] de l'OEM émise par l'antenne ? Quelle est sa vitesse de propagation v [m/s] dans l'air (indice de réfraction $n=1$) ? Quelle est sa période spatiale λ [m] ? Quelle est sa pulsation ω [rad/s] ? Que vaut la norme $k=\|\vec{k}\|$ [rad/m] du vecteur d'onde $\vec{k}$?
- 2) En régime harmonique -dépendance temporelle en $\cos(\omega t)$ - et considérant une propagation par **onde plane**, donner l'expression des champs électrique $\vec{e}=\vec{e}(M,t)$ et magnétique $\vec{h}=\vec{h}(M,t)$ instantanés en un point M ($x=0,y,z=0$) quelconque de la direction OY, à l'instant t .
- 3) Expliciter les coordonnées (e_x, e_y, e_z) et (h_x, h_y, h_z) des vecteurs champ électrique instantané $\vec{e}(M,t)$ et champ magnétique instantané $\vec{h}(M,t)$ dans la base $(\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$.
- 4) Donner une représentation graphique des champs électrique $\vec{e}(M,t_o)$ et magnétique $\vec{h}(M,t_o)$ instantanés à l'instant $t_o = [\pi/2 + 2\pi]/\omega$.
- 5) En guise d'antenne de réception, on dispose d'une simple tige métallique de section cylindrique, de longueur $l=\lambda/2$ (antenne dipôle onde entière). Comment positionner celle-ci par rapport à l'OEM incidente se propageant dans la direction OY pour garantir un niveau de puissance maximal en réception ? Qu'en déduisez-vous quant à la polarisation des OEM porteuses du signal de la Télévision Numérique Terrestre (TNT, cf. figure ci-dessous) ?



Antenne Yagi utilisée pour la réception de la TNT.

2. Interférences entre 2 OEM planes : le pourquoi du « je t'entends mal, mon portable ne passe pas ! » au « Ok, tu disais... » 1 pas plus loin.



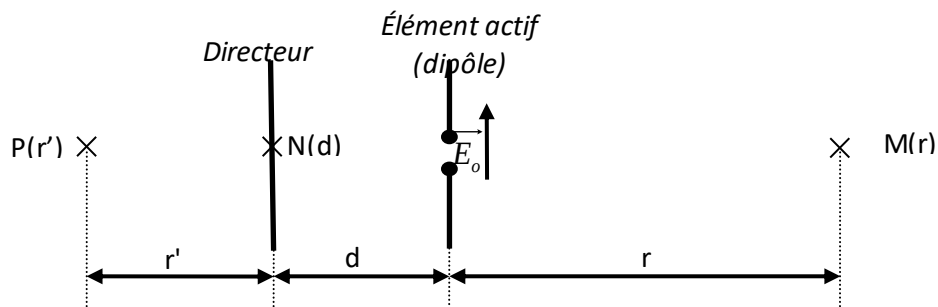
On considère une OEM de fréquence $f=2.6 \text{ GHz}$ (réseau 4G d'Orange ou SFR) émise en **polarisation horizontale** par un téléphone portable dont l'antenne d'émission est omnidirectionnelle. En environnement urbain, le signal total reçu au niveau du récepteur se compose d'une **OEM directe parcourant la distance r_0** et d'une **OEM arrivant après réflexion sur un immeuble en parcourant la distance totale r_1 (multitrajet)**.

Comme dans l'exercice 1, on désignera par $\vec{E}_o$ l'amplitude du champ électrique émis au niveau de l'antenne du portable d'émission.

- 1) En régime harmonique et considérant une propagation par onde plane, donner l'expression du champ électrique instantané réel $\vec{e}_D$ arrivant directement sur le récepteur.

- 2) Considérant que l'immeuble introduit un coefficient de réflexion réel $\Gamma = +1$, donner l'expression du champ électrique instantané réel $\vec{e}_R$ arrivant après réflexion sur le récepteur.
- 3) En déduire l'expression du champ électrique instantané total $\vec{e}_T$ qui parvient au niveau du récepteur par multitrajet. En utilisant l'identité trigonométrique $\cos p + \cos q = 2 \cos \frac{p+q}{2} \cos \frac{p-q}{2}$, on donnera $\vec{e}_T$ sous la forme $\vec{e}_T = \vec{E} \cdot \cos(\omega t + \varphi)$ où les termes d'amplitude $\vec{E}$ et de phase φ seront explicités en fonction de la longueur d'onde λ , de r_0 , de r_1 et de $\vec{E}_o$.
- 4) En espace libre, la densité de puissance p [W/m²] d'une OEM est proportionnelle au carré de l'amplitude de son champ électrique instantané. Donner l'expression de la densité de puissance créée par l'émetteur au niveau du récepteur :
 - a. dans le cas où il n'y a pas de multitrajet.
 - b. dans le cas du multitrajet étudié dans les questions 1) à 3) lorsque la différence de chemin $r_1 - r_0$ entre les ondes directes et réfléchies vaut $\lambda/2 + m\lambda$ où m est un entier positif.
 - c. dans le cas du multitrajet étudié dans les questions 1) à 3) lorsque la différence de chemin $r_1 - r_0$ entre les ondes directes et réfléchies vaut $m\lambda$ où m est un entier positif.

3. Interférences entre 2 OEM planes : augmentation du gain d'antenne (et de l'utilité des nombres complexes).



Une antenne omnidirectionnelle (élément actif de type dipôle) est alimentée et rayonne à son niveau un champ électrique $\vec{E}_o$. Le directeur, situé à une distance d de l'élément actif, rayonne par induction le champ électrique créé à son niveau par le dipôle avec un déphasage (entre champ incident et champ rayonné) de 180° (loi de Lenz).

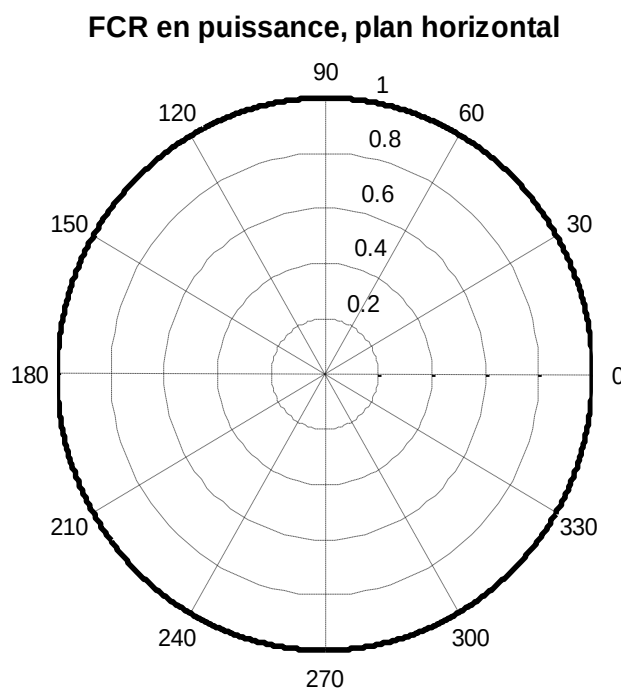
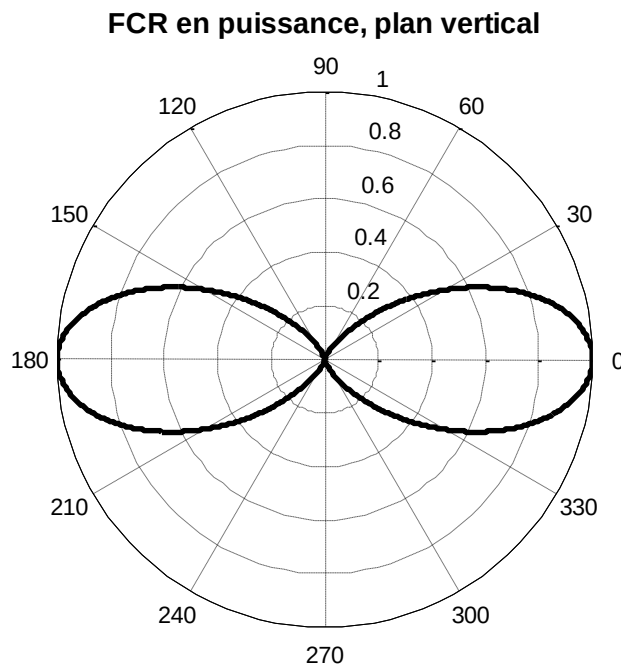
- 1) En régime harmonique et considérant une propagation par onde plane, donner l'expression du champ électrique instantané **complexe** $\vec{e}_{Dipôle}$ créé par le dipôle **seul** aux points $M(r)$, $P(r')$ et au niveau du directeur -i.e. en $N(d)$ -.
- 2) Donner l'expression du champ électrique instantané **complexe** $\vec{e}_{Directeur}$ rayonné par induction par le directeur aux points $M(r)$ et $P(r')$.

- 3) Donner l'expression du champ électrique instantané **complexe** total $\vec{e}_T$ créé par l'ensemble élément actif+directeur au point M(r). En déduire l'expression de l'amplitude vectorielle complexe $\vec{E}_T$ du champ électrique instantané complexe total $\vec{e}_T$ au point M(r) ainsi que l'expression du champ électrique réel $\vec{e}_T$. Que vaut le champ électrique total $\vec{e}_T$ au point P(r').
- 4) On fixe $d=\lambda/4$. Quelles sont les conséquences de ce choix en terme d'amplitude du champ électrique total en M(r) et en P(r') ? Conclusion ?

4. Refaire l'exercice 2 en utilisant les notations complexes.

TD3 & TD4: Antennes et le bilan de liaison

1. Savoir interpréter un diagramme de rayonnement.



On relève expérimentalement les FCR en puissance d'une antenne de type dipôle dans les plans E (vertical) et H (horizontal). Déduire **graphiquement** la (les) direction(s) θ_0 de rayonnement principal de cette antenne ainsi que son angle d'ouverture à -3dB noté $2\theta_3$ dans les plans E et H. On expliquera la signification physique de ces grandeurs.

2. Comprendre une datasheet d'antenne.

On envisage l'acquisition d'une antenne bas coût pour le déploiement d'une liaison hertzienne terrestre dont la fréquence est prévue entre 800 MHz et 2GHz (la fréquence qui nous sera finalement allouée relève d'une décision de l'Agence Nationale des Fréquences –ANFR–). En réponse à notre besoin, le fabricant Siretta nous propose l'antenne Yagi Oscar 3A dont la datasheet est disponible sous moodle.

1) Dans la rubrique « Key specifications - Electrical »

- Quelle sont les fréquences de fonctionnement de cette antenne spécifiées par le constructeur?
- Quelle est l'impédance caractéristique du câble à utiliser pour une connexion optimale ?
- Que signifie « VSWR<1.6 » ?
- Que signifie « polarisation verticale » ?
- Quel est le gain de l'antenne ? Quelle est sa signification physique (on justifiera l'unité dBi) ?

2) Sur le relevé « Test reports/Log Magnitude »

- Que représente ce relevé ?
- Que signifie $s_{11}=0\text{dB}$? Que signifie $s_{11}=15\text{dB}$ (discuter du signe !) ?
Théoriquement, quelle est la meilleure valeur possible de s_{11} en dB ? En valeur naturelle ? En déduire **parmi les 4 marqueurs affichés** la fréquence de fonctionnement optimale de cette antenne en termes de s_{11} .
- Si l'on admet un s_{11} maximum admissible de -20dB , sur quelle(s) plage(s) de fréquences peut-on utiliser cette antenne ?

3) Sur le relevé « Test reports/VSWR »

- Théoriquement**, quelle est la meilleure valeur possible de VSWR ?
- En déduire **parmi les 4 marqueurs** la fréquence de fonctionnement optimale de cette antenne en termes de VSWR.
- Relever les valeurs de s_{11} (en dB) et de VSWR indiquées par le constructeur à la fréquence de 896.2473 MHz. À partir de la valeur de VSWR, comment retrouver par le calcul la valeur de s_{11} ? Retrouve t'on la valeur mesurée de s_{11} ?

4) Dans la section « Radiation pattern »

- Que représente les relevés H-Plane et E-plane ?
- Quels sont les angles d'ouverture à -3dB $(2\theta_{3\text{dB}})_H$ et $(2\theta_{3\text{dB}})_V$ dans les plans H et V, respectivement ? Les représenter sur la documentation technique.
- Quels sont les angles d'ouverture à -10dB $(2\theta_{10\text{dB}})_H$ et $(2\theta_{10\text{dB}})_V$ dans les plans H et V pour lesquels la puissance décroît de 10dB par rapport à la direction principale de rayonnement ?

3. Savoir faire un bilan de puissance : cas d'une liaison terrestre

L'objectif de cet exercice est d'étudier la liaison qui permet l'accès Internet haut débit à l'IUT par un réseau WIFI, l'antenne émettrice étant localisée à l'UPS. Les caractéristiques de la liaison sont les suivantes :

- Le gain G_E de l'antenne émettrice de l'UPS est de 10dBi.
- Les pertes dans les câbles/guides à l'émission sont de 0,4dB.
- L'antenne émettrice de l'UPS est située à une distance de 1,2km de l'antenne réceptrice de l'IUT.
- Les pertes liées à l'atténuation troposphérique sont estimées à 2dB.
- L'antenne réceptrice est caractérisée par un gain G_R de 5,5 dBi.
- Les pertes dans les câbles/guides de réception sont de 0,5dB.
- La liaison se fait à la fréquence de 2,4 GHz.

L'objectif est d'obtenir une puissance en réception supérieure à -77dBm.

- 1) Si la puissance d'émission P_E est de 0,1W,
 - a- Quelle est sa valeur en dBm et en dB ?
 - b- Quelle est la valeur de la PIRE en dBm et en dB ?
 - c- Quelle est la valeur en dB des pertes en espace libre ?
 - d- Quelle est la valeur de la puissance reçue en dB, en dBm puis en watt ?
- 2) Calculer la valeur minimale en watt de la puissance d'alimentation P_E de l'antenne émettrice qui permettrait d'obtenir une puissance en réception supérieure à -77dBm.

4. Savoir faire un bilan de puissance : cas d'une liaison spatiale

La sonde spatiale Voyager 2 se trouvait en août 1993 à 6 milliards de kilomètres de la Terre. La puissance P_E de son émetteur était de 20 W et le gain G_E de son antenne (parabole) d'émission est de 48 dBi. La fréquence utilisée par cette sonde est $f=8.4$ GHz.

- 1) La connectique embarquée sur le satellite est assurée par des guides d'onde métalliques dont les pertes d'affaiblissement sont nulles tandis que l'adaptation d'impédance à l'antenne embarquée sur le satellite est supposée parfaite. Qu'en déduisez-vous quant aux pertes α_E dans les guides d'ondes à l'émission ?
- 2) Calculer la PIRE en dB.
- 3) Quelle est la valeur en dB des pertes de propagation en espace libre lors d'une transmission jusqu'à la Terre ?
- 4) Le gain de l'antenne parabole utilisée en réception sur Terre est de 70 dBi. Quelle est la puissance reçue au niveau de la Terre ?
- 5) Calculer le diamètre de l'antenne parabole située sur la sonde spatiale sachant que son facteur de gain $f_g=0.6$.

5. Savoir dériver les principales caractéristiques d'une antenne à partir de l'expression mathématique de sa FCR.

Le diagramme de rayonnement **en champ** d'une antenne est $f(\theta)=\cos^4\theta$.

- 1) Quelle est sa direction de rayonnement maximal ?
- 2) Quelle est l'expression de sa FCR en puissance $r(\theta)$?
- 3) Calculer son angle d'ouverture à -3 dB.
- 4) Déterminer la valeur de sa fonction caractéristique de rayonnement (FCR) en champ et en puissance pour un angle $\theta=60^\circ$.
- 5) Calculer son gain en supposant un rendement $\eta=1$ et un rayonnement limité au demi-espace des $z>0$ ($0\leq\theta\leq\pi/2$).