

Chapitre 11 - Modélisation des rayonnements électromagnétiques

Activités et applications – épisode 02

Rayonnements électromagnétiques

0. Citer plusieurs exemples de rayonnements électromagnétiques :

Les rayonnements électromagnétiques peuvent être appréhendés à l'aide du modèle ondulatoire et du modèle corpusculaire. Dans ce chapitre, nous allons utiliser uniquement le modèle ondulatoire afin de comprendre les phénomènes électromagnétiques. Dans la suite, on suppose que l'air est un milieu transparent, homogène et isotrope pour les rayonnements électromagnétiques.

1. Rappeler la définition des mots « transparent, homogène et isotrope » pour un milieu :

I. Rayonnements et ondes électromagnétiques :

A. Pourquoi utilise-t-on le terme rayonnement « électromagnétique » ?

Le professeur introduit un aimant droit dans une bobine de fil de conducteur, reliée à un voltmètre. Puis il retire l'aimant droit.

2. Noter vos observations :

3. Interpréter vos observations :

Le professeur dispose une aiguille aimantée à proximité d'un fil conducteur. Il impose une tension (à l'aide d'un champ électrique) au sein du fil conducteur. Il déplace ensuite l'aiguille aimantée autour du fil. Enfin, il impose une tension de signe opposé au sein du fil conducteur.

4. Noter vos observations :

5. Interpréter vos observations :

Conclure en complétant le paragraphe IV.A du chapitre 11

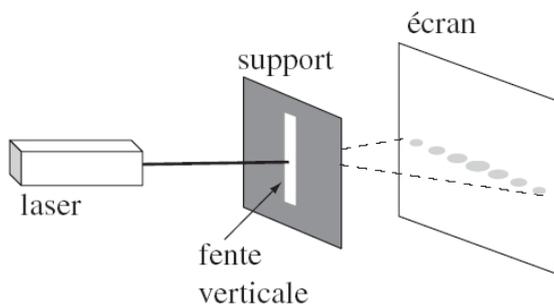
B. Pourquoi modéliser un rayonnement électromagnétique par une onde ?

❖ Des observations expérimentales liées aux phénomènes ondulatoires en mécanique :

A retenir pour comprendre la suite :

❖ Pour les rayonnements électromagnétiques appartenant au domaine visible :

Première expérience professeur :

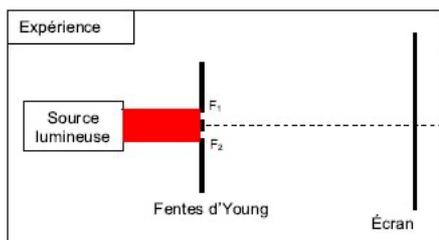


On place un LASER devant un obstacle, une fente de largeur a . On diminue cette largeur a petit-à-petit et on observe sur un écran, la lumière issue de la fente.

6. Noter vos observations :

7. Quel est le nom du phénomène observé ici pour les rayonnements électromagnétiques appartenant au domaine visible ?

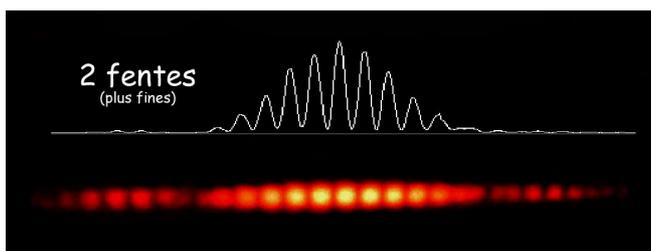
Deuxième expérience professeur :



On place un LASER devant un obstacle, deux fentes de largeur a . On observe sur un écran, la lumière issue de cet obstacle.

8. Noter vos observations :

Allure de la figure observée sur l'écran :



L'intensité lumineuse varie en fonction de la position M sur l'écran. Elle ne correspond pas à la somme de l'intensité des deux sources : $I \neq I_1 + I_2$

9. Quel est le nom du phénomène observé ici pour les rayonnements électromagnétiques appartenant au domaine visible ?

10. Conclure.

Dans la suite de ce chapitre, les rayonnements électromagnétiques sont modélisés par des ondes électromagnétiques (ce modèle est validé par des observations de diffraction et d'interférences des rayonnements électromagnétiques).

II. Formation/réception des rayonnement électromagnétique et puissance :

A. Simulation d'émission et de réception de rayonnements électromagnétiques :

Une antenne est un conducteur électrique constitué d'atomes : lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique (issu du signal d'entrée imposé à l'antenne), le nuage électronique de ces atomes est déformé. Cette déformation du nuage électronique engendre un rayonnement électromagnétique autour de l'antenne.

Première simulation :

Ouvrir le fichier TP24_antenne_champ_EM.jar, puis mettre sur MANUEL/COURBE AVEC VECTEURS/CHAMP ELECTRIQUE/CHAMP RAYONNE.

A l'aide de la souris, simuler cette déformation du nuage électronique sur la plus grande des antennes. Seul le champ électrique est représenté en vert. Le champ magnétique n'est pas représenté pour alléger la simulation.

11. Noter vos observations :

12. Comment expliquer que l'amplitude de la perturbation des champs diminue lorsque la distance parcourue par cette perturbation augmente ?

13. L'onde électromagnétique est-elle transverse ou longitudinale ? Justifier votre réponse.

14. L'onde électromagnétique est-elle progressive ou stationnaire ? Justifier votre réponse.

15. L'onde est-elle plane ? Justifier votre réponse.

Deuxième simulation :

Mettre sur MANUEL/CHAMP COMPLET/CHAMP ELECTRIQUE/CHAMP RAYONNE.

16. L'antenne (se comportant comme un doublet) émet-elle de façon isotrope ?
17. Dans combien de dimensions se propagent l'onde ? Quelle est l'allure des surfaces d'ondes ?
18. L'antenne étant relativement directive, dans quelle direction se propage **principalement** l'onde électromagnétique émise par un doublet ?
19. La valeur du champ électrique \vec{E} est-elle maximale lorsque le champ électrique est parallèle ou perpendiculaire au doublet ?

Troisième simulation :

Pour simplifier notre raisonnement, nous allons faire une approximation. Nous allons supposer que l'antenne est **isotrope**. L'onde électromagnétique se propage donc de façon identique selon les 3 directions.

20. Quelle est l'allure des surfaces d'ondes si l'antenne émet de façon isotrope ?
21. Sélectionner « Oscillant » puis mettre une haute fréquence et une amplitude faible : à proximité de l'antenne réceptrice, caractériser à l'aide du vocabulaire usuel, l'onde électromagnétique générée avec l'antenne (sans justifier).
22. A proximité de l'antenne réceptrice, c'est-à-dire loin du point source, quelle est l'allure de la surface d'onde ?

Pour simuler notre approximation d'OEMPPH, mettre la simulation sur « Courbe avec vecteurs ».

23. Qu'observez-vous concernant l'électron de l'antenne réceptrice ?

Il oscille autour de sa position d'équilibre à la même fréquence que l'onde EM (l'antenne réceptrice a donc ses bornes une tension électrique, image de celle ayant excité l'électron de l'antenne émettrice) : une antenne est donc un dispositif

Conclure en complétant le paragraphe IV.B du chapitre 11

B. Puissance surfacique rayonnée par une antenne isotrope :

Un téléphone portable (autour de 1 GHz) émet une puissance de $P_e = 1,00 \text{ W}$ de façon isotrope dans l'espace.

24. Calculer la puissance surfacique moyenne rayonnée par cette antenne à 10 cm, notée p_{iso} :

Un laser hélium-néon délivre une puissance de $P_e = 1,00 \text{ mW}$ focalisée dans un faisceau lumineux cylindrique de rayon $r = 1,00 \text{ mm}$.

25. Déterminer la valeur de la puissance surfacique moyenne rayonnée, notée p :

La puissance surfacique moyenne reçue sur Terre au niveau du sol terrestre si on néglige l'absorption par l'atmosphère est $1,400 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ (en tenant compte de l'absorption par l'atmosphère : $0,90 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$)

26. Retrouvez la puissance moyenne rayonnée par le soleil, notée P_e , sachant que la lumière met 8,0 min pour nous parvenir :

C. Expériences avec le « Kit Ondes centimétriques » :

❖ **Première expérience : ondes progressives ou ondes stationnaires ?**

Sur un rail gradué, on place une antenne conique, émettant des ondes électromagnétiques progressives sinusoïdales de fréquences $f = 9,4 \text{ GHz}$.

L'antenne conique réceptrice est placée sur le même rail, à faible distance de l'antenne émettrice. L'antenne conique réceptrice est reliée à un voltmètre (en mode DC) : on mesure une tension proportionnelle à la puissance moyenne surfacique reçue de l'onde.

27. Proposer un protocole expérimental permettant de vérifier si l'onde émise est plane.

28. Mettre ce protocole en œuvre et conclure.

❖ Deuxième expérience : observations d'ondes stationnaires

Placer l'antenne réceptrice à proximité de l'onde émettrice, puis interposer une plaque métallique entre les deux antennes.

29. Interpréter vos observations :

Placer la plaque métallique sur son support, perpendiculaire à la direction privilégiée de propagation de l'onde. A la place de l'antenne réceptrice précédente, on utilise une sonde au silicium : cette sonde mesure la puissance moyenne surfacique de l'onde en un point de l'espace. A l'aide d'un voltmètre (en mode DC), on mesure une tension proportionnelle à la puissance moyenne surfacique de l'onde.

30. Augmenter la distance entre la sonde et l'antenne émettrice : qu'observez-vous ? L'onde est-elle stationnaire ? progressive ?

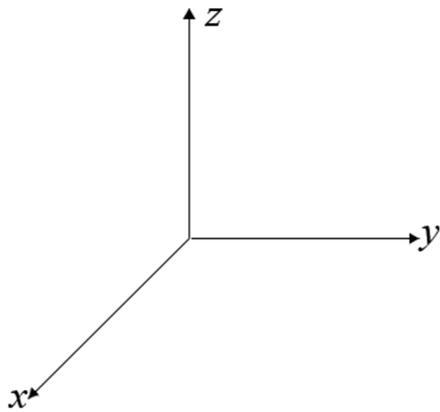
31. Mesurer la période spatiale λ_{exp} de l'onde et en déduire la valeur expérimentale de fréquence de l'onde. Conclure.

32. A l'aide de la sonde, déterminer le signe du coefficient de réflexion en amplitude à la surface du métal :

Compléter le paragraphe IV.C du chapitre 11

III. Le modèle de l'onde électromagnétique, plane, progressive et harmonique :

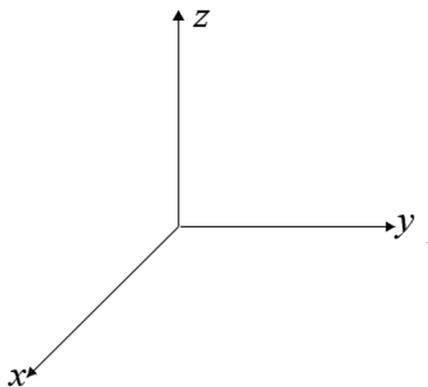
A. Onde EM plane progressive :



Premier exemple :

On étudie une onde électromagnétique plane progressive se propageant selon l'axe Oy et dont le champ électrique \vec{E} , à l'instant t considéré, est porté par l'axe Oz .

33. Tracer sur la base cartésienne ci-contre la direction de propagation \vec{e}_{prop} ainsi que les champs \vec{E} et \vec{B} .



Deuxième exemple :

On étudie une onde électromagnétique plane progressive se propageant selon l'axe Oy et dont le champ électrique \vec{E} , à l'instant t considéré, est porté par l'axe Ox .

34. Tracer sur la base cartésienne ci-contre la direction de propagation \vec{e}_{prop} ainsi que les champs \vec{E} et \vec{B} .

Compléter le paragraphe IV.D du chapitre 11

B. Quelques ordres de grandeurs et applications numériques :

35. Une onde plane progressive se propage dans le vide et le champ électrique a amplitude $E_0 = 30,0 \text{ V/m}$. Déterminer la valeur de l'amplitude du champ magnétique B_0 , en Tesla.

Le champmètre SEFRAM 9840 possède une bande passante de $[50 \text{ MHz} ; 3,5 \text{ GHz}]$. On l'utilise pour mesurer l'amplitude de E_0 (en V/m) dans cette bande passante.

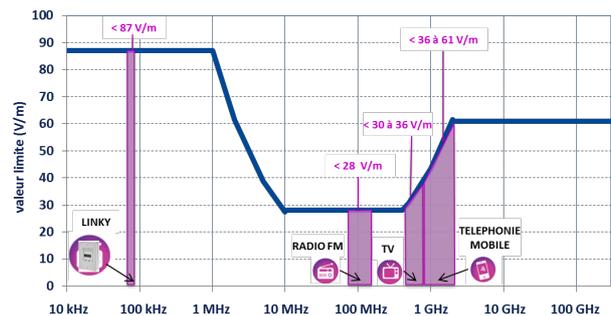
On donne dans le tableau ci-après quelques mesures réalisées par le champmètre RF :

Amplitude du champ électrique E_0	En un point quelconque de la salle A110	Dans l' armoire en métal en-dessous de l' imprimante en salle A110	À 2 cm au-dessus de la tranche d' un téléphone portable en fonctionnement	À 2 cm au-dessus de l' écran d' un téléphone portable en fonctionnement	À 2 cm au-dessus de l' écran d' un téléphone portable en mode avion	À 2 cm d'une « box internet » (autour de 2,4 GHz)	À 2 cm d'une « montre connectée »	A 10m d' une antenne relais
	600 $mV \cdot m^{-1}$	95,7 $mV \cdot m^{-1}$	12 $V \cdot m^{-1}$	18 $V \cdot m^{-1}$	600 $mV \cdot m^{-1}$	8,645 $V \cdot m^{-1}$	1,4 $V \cdot m^{-1}$	50 $V \cdot m^{-1}$

36. Le smartphone émet-il de façon isotrope ?

On donne les mesures suivantes effectuées avec un champmètre adapté à chaque bande passante des systèmes étudiés :

	Amplitude du champ électrique E_0
A 2 cm d'un compteur Linky (CPL bas débit 35,9 – 90,6 kHz)	1,0 $V \cdot m^{-1}$
A 2 cm d'une plaque à induction (25 kHz)	50 $V \cdot m^{-1}$
À proximité d'une ligne THT (50 Hz)	1,0 $kV \cdot m^{-1}$



Valeurs limites réglementaires fixées en France par le décret du 3 mai 2002 n° 2002-775

37. La mesure à proximité de la plaque à induction dépasse-t-elle le seuil limite imposé par la loi ?

38. La mesure à proximité de la box internet dépasse-t-elle le seuil limite imposé par la loi ?

Extrait de la résolution 1815 du Conseil de l'Europe (texte adopté par la Commission permanente, agissant au nom de l'Assemblée, le 27 mai 2011)

[...] l'Assemblée recommande aux États membres du Conseil de l'Europe : [...] 8.2.1. de fixer un seuil de prévention pour les niveaux d'exposition à long terme aux micro-ondes en intérieur, conformément au principe de précaution, ne dépassant pas 0,6 volt par mètre, et de le ramener à moyen terme à 0,2 volt par mètre.

39. La mesure dans la salle A110 dépasse-t-elle le seuil fixé par le principe de précaution ?

40. Pour le câble coaxial RG58, le constructeur indique que le coefficient de vélocité est $\gamma = 1,43$. En déduire la célérité des OEMPPH dans ce câble :

La célérité c des OEMPPH dans le vide est une valeur maximale : dans les autres milieux, la célérité est soit inférieure soit égale à c .

41. En déduire que le coefficient de vélocité du milieu γ est toujours supérieur ou égal à 1:

Le domaine du visible dans le vide s'étend pour la longueur d'onde, de $\lambda_{min} = 400 \text{ nm}$ à $\lambda_{max} = 800 \text{ nm}$.

42. Déterminer les fréquences limites f_{min} et f_{max} du domaine du visible dans le vide :

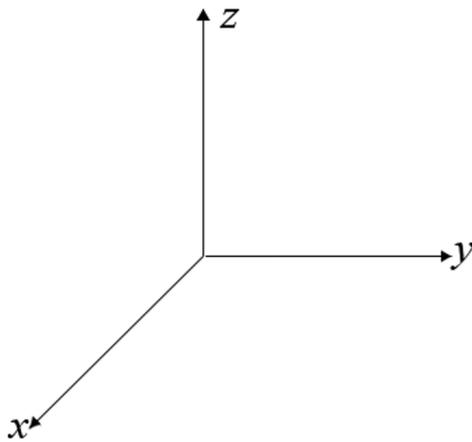
43. Quelle est la nature du filtrage réalisé par l'œil ? Quelle est la bande passante de l'œil ?

C. Propagation d'une OEMPPH dans le vide :

Premier exemple :

On note $(\vec{u}_x; \vec{u}_y; \vec{u}_z)$ les vecteurs unitaires de la base cartésienne.

On étudie une onde électromagnétique plane progressive harmonique se propageant dans le vide, dans le sens des « z décroissants » et dont le champ électrique \vec{E} , à l'instant t considéré, est porté par l'axe Ox . L'amplitude champ électrique est notée E_0 .



44. Sur la base cartésienne ci-contre, schématiser le vecteur « sens de propagation » noté \vec{e}_{prop} ainsi que le vecteur champ électrique \vec{E} .

45. Donner l'expression temporelle littérale de \vec{E} :

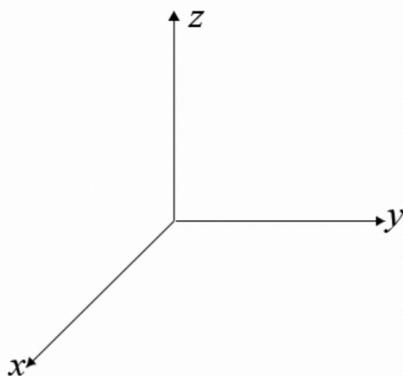
46. A l'aide de la règle de la main droite, tracer le vecteur champ magnétique \vec{B} .

47. En déduire l'expression temporelle littérale de \vec{B} .

\vec{B} est complètement déterminé par la connaissance de \vec{E} via la relation de structure :

Deuxième exemple :

Soit une OEMPPH se propageant suivant $(+Ox)$ et dont le champ électrique \vec{E} , à l'instant t considéré, est porté par (Oy) . L'amplitude champ électrique est E_0 .



48. Sur la base cartésienne ci-contre, schématiser le vecteur « sens de propagation » noté \vec{e}_{prop} ainsi que le vecteur champ électrique \vec{E} .

49. Donner l'expression temporelle littérale de \vec{E} :

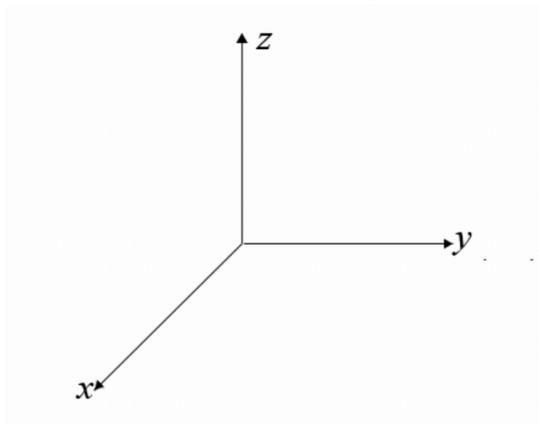
50. A l'aide de la règle de la main droite, tracer le vecteur champ magnétique \vec{B} .

51. En déduire l'expression temporelle littérale de \vec{B} .

\vec{B} est complètement déterminé par la connaissance de \vec{E} via la relation de structure :

Troisième exemple :

Soit une OEMPPH se propageant suivant $(-Oy)$ et dont le champ électrique \vec{E} , à l'instant t considéré, est porté par (Oz) . L'amplitude champ électrique est E_0 .



52. Sur la base cartésienne ci-contre, schématiser le vecteur « sens de propagation » noté \vec{e}_{prop} ainsi que le vecteur champ électrique \vec{E} .

53. Donner l'expression temporelle littérale de \vec{E} :

54. A l'aide de la règle de la main droite, tracer le vecteur champ magnétique \vec{B} .

55. En déduire l'expression temporelle littérale de \vec{B} .

\vec{B} est complètement déterminé par la connaissance de \vec{E} via la relation de structure :

IV. Polarisation de l'onde électromagnétique, plane, progressive, harmonique :

A. Expériences avec le kit d'ondes centimétriques :

Première expérience :

Sur un rail gradué, on place une antenne conique, émettant des ondes électromagnétiques transverses progressives sinusoïdales de fréquences $f = 9,4 \text{ GHz}$. L'antenne conique réceptrice est placée sur le deuxième rail, à faible distance de l'antenne émettrice. L'antenne conique réceptrice est reliée à un voltmètre (en mode DC) : on mesure une tension proportionnelle à la puissance moyenne surfacique reçue de l'onde. Tourner l'antenne émettrice autour de son axe, d'un angle de 90° .

56. Noter vos observations :

Le champ électrique est porté par une direction fixe : cette direction est la direction de polarisation de l'onde. On dit que l'onde électromagnétique est polarisée rectilignement.

Remettre l'antenne émettrice sur sa position initiale puis interposer entre les deux antennes, une grille métallique présentant des fentes parallèles. Les fentes sont placées à l'horizontale. Cette grille est appelée « polariseur ».

57. Noter vos observations :

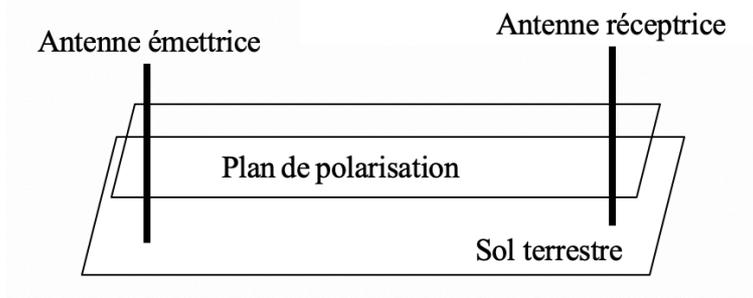
Placer alors les fentes de la grille à la verticale.

58. Noter vos observations :

59. Conclure sur la nature de la polarisation rectiligne du rayonnement :

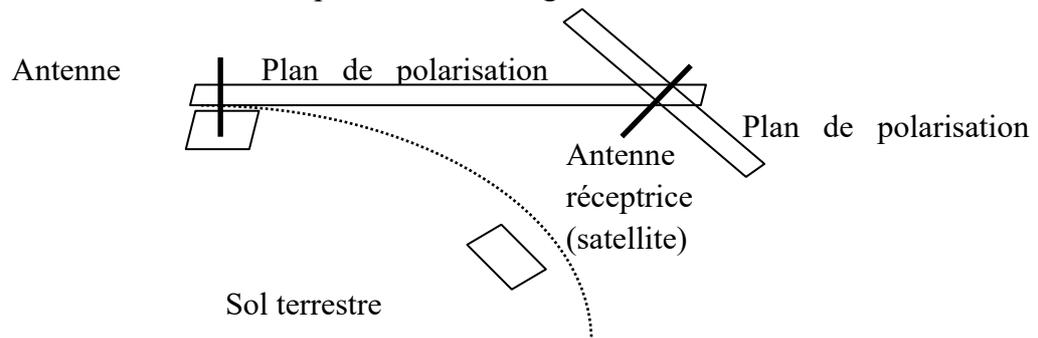
B. Antennes et polarisation :

Si la distance antenne d'émission-antenne de réception est suffisamment courte pour que la Terre puisse être considérée comme plate, et si les antennes ont la même polarisation, le plan de polarisation de l'antenne de réception coïncide avec le plan de polarisation de l'antenne émission, comme montré sur la figure suivante.



60. Quel est le type de polarisation de l'OEMPPH représentée sur la figure ci-dessus ? Est-elle verticale ou horizontale ?

Pour des longues distances, la situation est représentée sur la figure ci-dessous :



61. Dans cas, le plan de polarisation de l'antenne de réception coïncide-t-il avec le plan de polarisation de l'antenne émission ?

Le tableau suivant dont les gains théoriques dus à la désadaptation entre la polarisation de l'onde reçue et celle de l'antenne de réception.

		Polarisation antenne réception					
		H	V	oblique			
				45°	135°		
Polarisation de l'onde	H	0 dB	−∞	-3 dB	-3 dB	-3 dB	-3 dB
	V	−∞	0 dB	-3 dB	-3 dB	-3 dB	-3 dB
	oblique 45°	-3 dB	-3 dB	0 dB	−∞	-3 dB	-3 dB
	oblique 135°	-3 dB	-3 dB	−∞	0 dB	-3 dB	-3 dB
		-3 dB	-3 dB	-3 dB	-3 dB	0 dB	−∞
		-3 dB	-3 dB	-3 dB	-3 dB	−∞	0 dB

62. A quelle condition la transmission est optimale ?

63. Si la polarisation de l'onde reçue est circulaire avec sens inconnu, quel type d'antenne faut-il privilégier pour la réception ?

64. Si la polarisation reçue est rectiligne avec un angle inconnu, quel type d'antenne faut-il privilégier pour la réception ?

C'est le cas rencontré pour établir une liaison radioamateur Terre – Station orbitale ISS.

Remarque : modification de la polarisation d'une onde EM lors de sa propagation

Si la propagation a lieu en espace libre, il n'y a pas de modification de la polarisation. Si l'onde subit une réflexion, il peut y avoir modification, selon l'inclinaison et la direction du plan de réflexion par rapport au plan de polarisation de l'onde incidente (réflexion sur le sol ou sur l'ionosphère).

C. Dispositif présent dans l'entreprise Centralp :

L'entreprise Centralp possède une cage de Faraday « géante » qui lui permet de tester le fonctionnement de ses cartes électroniques lorsqu'elles sont soumises à des champs électromagnétiques d'amplitudes importantes.

65. Que vaut le champ électromagnétique à l'intérieur de la cage de Faraday ?

66. Quel type de polarisation permet de générer l'antenne présente dans la cage ?

67. On suppose que l'antenne émet une OEMPPHPR : que vaut le coefficient de réflexion à l'interface air/métal ? Quel type d'ondes peut apparaître dans la cage ?



68. Sur la table de la photo, on place la carte électronique testée : que risque-t-il de se passer si la carte est placée sur un nœud de champ électromagnétique ? sur un ventre ?

69. Expliquer la présence de « mousse » sur les parois intérieures ?