

LES ANTENNES

En radiocommande notre antenne émission est parfois considérée bien encombrante. Notre antenne réception n'est pas toujours la bienvenue à bord de nos modèles et l'on se pose parfois quelques questions à son sujet:

- Comment la disposer ?
- Peut on replier l'antenne sur elle même ?
- Peut on la raccourcir ?
- Quelle est la portée de nos ensembles RC ?

Pour tenter de répondre à ces questions nous ferons une brève explication de leurs modes de fonctionnement.

Pour rester dans le cadre de notre loisir certaines approximations ont été faites. De ce fait on peut arriver à une explication relativement simple. Un minimum d'équations est néanmoins nécessaire.

Les ondes radioélectriques peuvent indifféremment être appelées ondes électromagnétiques ou ondes hertziennes.

Comment rayonner de l'énergie électromagnétique ?

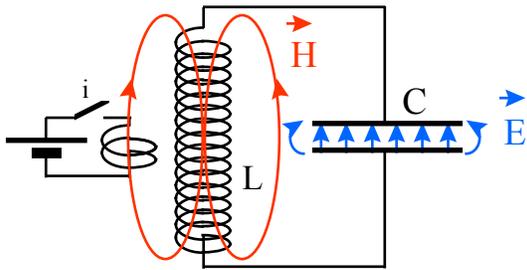


fig 1

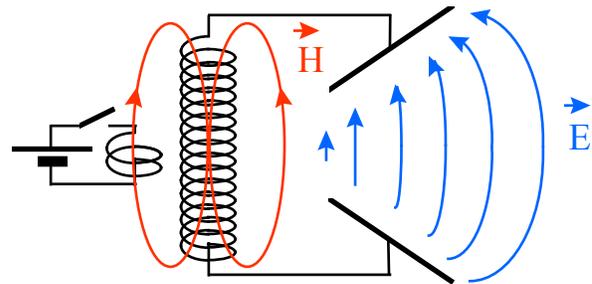


fig 2

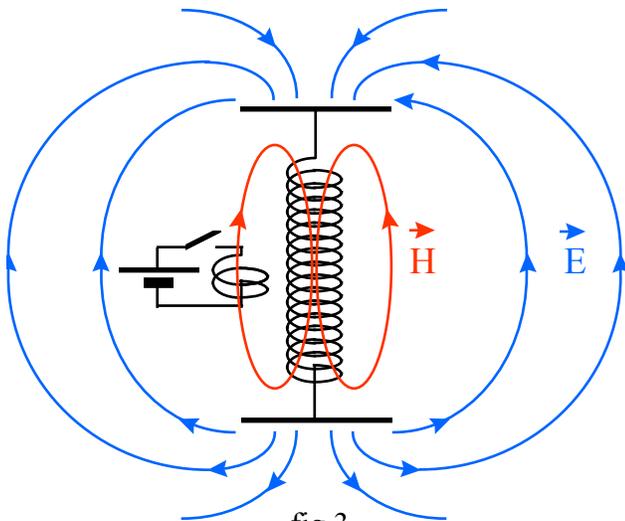


fig 3

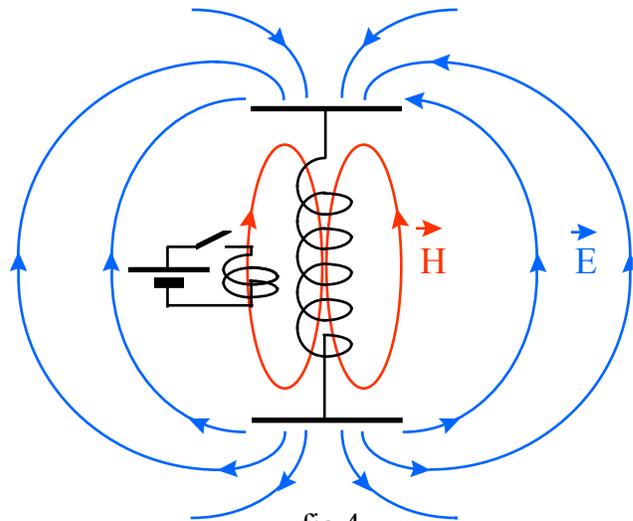


fig 4

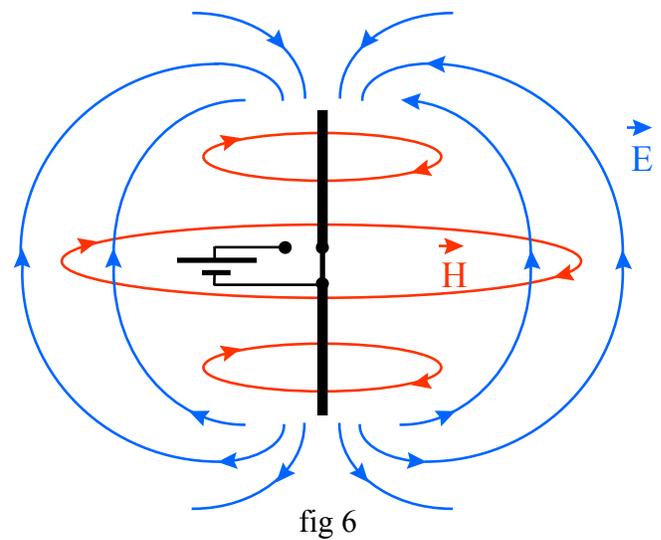
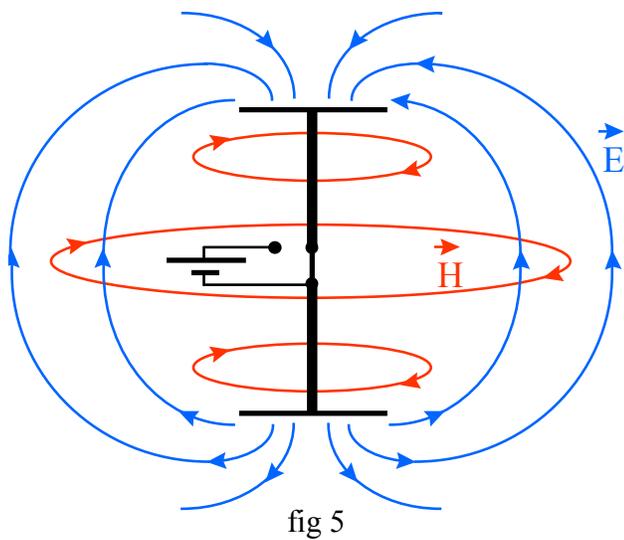


fig 5

fig 6

Fig. 1 Considérons le circuit principal constitué d'une self L et d'une capacité C.

Le circuit secondaire, constitué d'une petite self de couplage d'une pile et d'un interrupteur i, sert à alimenter en énergie électrique le circuit principal LC. Chaque fois que l'on ferme l'interrupteur i, on induit brièvement dans la self L un courant.

Dans le circuit principal LC va se produire une **décharge oscillante** de capacité C dans la self L

La visualisation en fonction du temps du courant électrique en un point quelconque du circuit est donnée en fig. 7

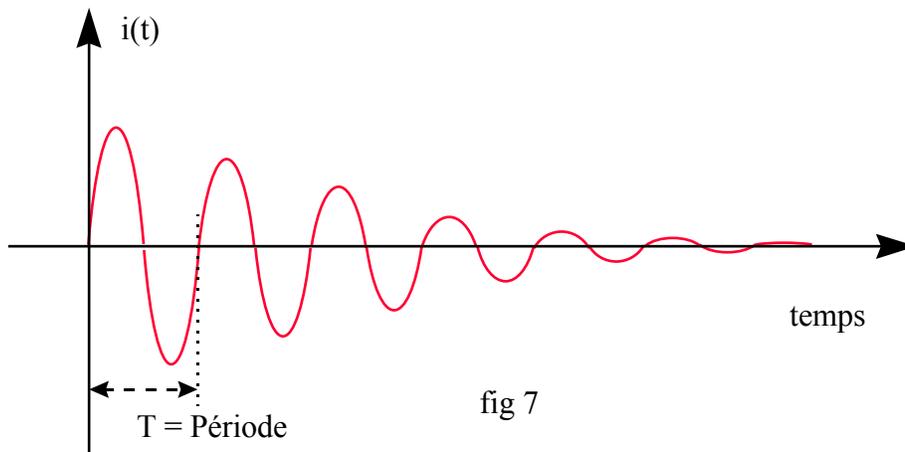


fig 7

Il apparaît une période d'oscillation T donc une fréquence d'oscillation $F = 1/T$ donnée par la célèbre formule de Thomson

$$LC(2\pi F)^2 = 1$$

Avec $L = 10 \mu\text{H}$ et $C = 100 \text{ pF}$ on obtient $F = 158 \text{ kHz}$ c'est le début des fréquences de radiodiffusion grandes ondes.

Pour simplifier on peut dire que le courant dans L produit un champ magnétique \vec{H} (lignes de champ rouges) et que les charges électriques sur C produisent un champ électrique \vec{E} (lignes de champ bleues)

Mais ce système rayonne assez mal puisque \vec{H} est cantonné autour du noyau de L et \vec{E} n'est présent qu'entre les armatures de C.

Fig. 2 On écarte les armatures de C, la capacité C diminue et la fréquence F augmente

Fig. 3 C diminue, F augmente, la capacité commence à rayonner \vec{E} .

Fig. 4 L diminue, F augmente et vaut quelques MHz

Fig. 5 On diminue L ramenée à un simple conducteur, L se met à rayonner \vec{H} .

Fig. 6 On diminue C dont la surface des armatures et alors réduite à la section du brin rayonnant. Si les brins sont très courts (quelques cm) F peut valoir de quelques dizaines de MHz à quelques GHz. Nous sommes dans le domaine des VHF (Very High Frequency) et UHF (Ultra High Frequency).

Le circuit de la fig.6 rayonne très bien : en tous les points de l'espace environnant coexistent les deux champs \vec{H} (champ magnétique) et \vec{E} (champ électrique). Ce circuit rayonne donc de l'énergie électromagnétique. La structure de l'onde électromagnétique est précisée au chapitre suivant. Si certaines précautions sont prises (conducteurs de forte section) l'énergie électrique fournie par la pile sera convertie en énergie électromagnétique avec un rendement voisin de 100%. A ce titre nous sommes en présence d'une antenne filaire très utilisée en radioélectricité.

La pile fournie de l'énergie au circuit par impulsion. De ce fait le courant donné en fig. 7 est de type oscillations amorties. En conséquence le train d'onde électromagnétique rayonné par le système sera également des ondes amorties. A ce stade on ne parle pas encore de fréquence de l'émetteur : se sont les dimensions physiques de l'antenne qui fixent la fréquence des oscillations. Ce point important est détaillé au chapitre suivant.

Antenne émission « dipôle $\lambda/2$ »

Ondes amorties

Reprenons l'expérience de la fig. 6 . Prenons 2 brins de longueur 1,82 m chacun

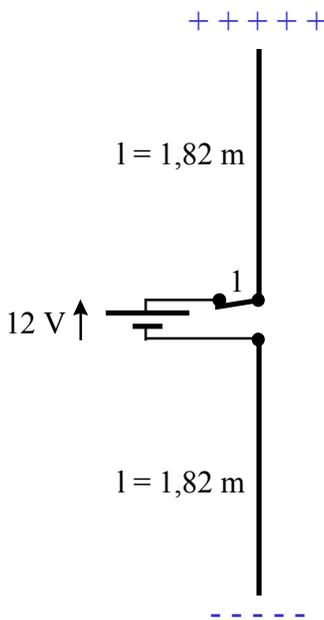


Fig 8

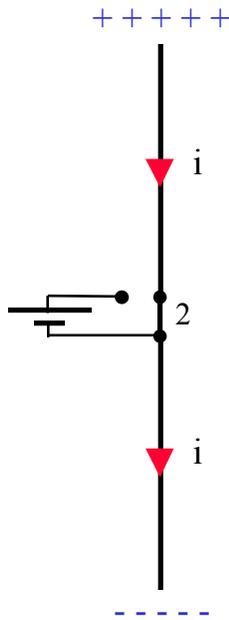


Fig 9

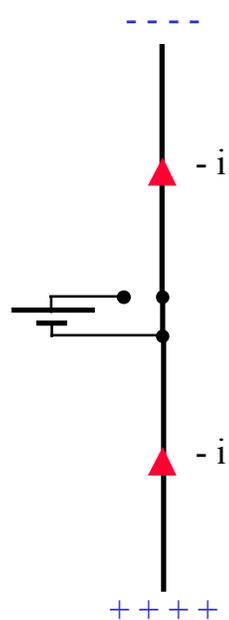


Fig 10

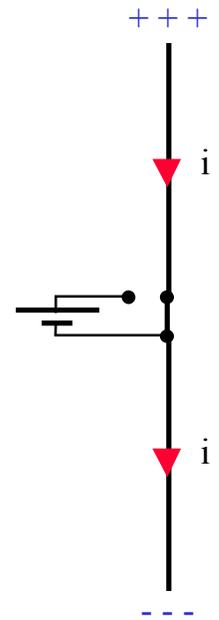


Fig 11

Fig. 8 Interrupteur en position 1, la pile charge les extrémités des 2 conducteurs, créant un déséquilibre électrique.

Fig. 9 Interrupteur en position 2, on ferme le circuit de l'antenne. Le système étant en déséquilibre électrique, les électrons du bas du brin inférieur vont se ruer vers le haut du brin supérieur produisant dans l'antenne un courant électrique (rappelons au passage que le sens conventionnel du courant, flèches rouges, est inverse du sens de déplacement réel des électrons).

Fig. 10 Nouvel état de déséquilibre qui va produire un courant électrique de sens opposé -i.

Fig. 11 Un nouveau cycle d'oscillation va se reproduire tel qu'en fig. 9 et 10.

De nombreux cycles vont se reproduire jusqu'à ce que l'énergie électrique stockée en fig. 8 soit convertie (avec un rendement voisin de 100%) en énergie électromagnétique.

Nous sommes donc en présence d'un véritable **pendule électrique oscillant** dans lequel circule un **courant oscillant et amorti** représenté en fig. 7.

Tel un pendule mécanique que l'on écarte de sa position d'équilibre, au bout de quelques oscillations, l'antenne électrique va revenir à son état d'équilibre initial : neutralité électrique des deux brins.

Les analogies de systèmes résonnant et oscillants ne manquent pas autour de nous ; En acoustique, les instruments à corde (harpe, piano à queue ..) voient leur fréquence de résonance liée à la longueur de la corde vibrante. Les instruments à vent sont accordés en jouant sur la longueur du tube acoustique (trombone à coulisse, orgue...). En mécanique, c'est la longueur du pendule qui conditionne directement la fréquence.

Avec les dimensions 2 x 1,82 m de l'antenne, au cours d'un cycle complet (fig. 9 et 10) les électrons vont parcourir 4 x 1,82 = 7,29 m pour un aller-retour dans les brins rayonnants.

L'onde électrique dans le métal se déplaçant à la vitesse $c = 300\,000\text{ km/s} = 3 \cdot 10^8\text{ m/s}$, la période c'est à dire le temps mise pour réaliser un cycle vaut :

$$T = 7,29\text{ m} / 3 \cdot 10^8\text{ m/s} = 2,43 \cdot 10^{-8}\text{ s}$$

La fréquence de cette oscillation, c'est à dire le nombre de cycles par secondes, vaut :

$$F = 1 / T = 1\text{ cycle} / 2,43 \cdot 10^{-8}\text{ s} = 41\,095\,100\text{ cycles/s} \cong 41,100\text{ MHz}$$

Au cours d'un cycle qui dure T sec l'onde électrique aura parcouru la distance 4 x 1,82=7,29 m. Cette distance est appelé **longueur d'onde λ** (lambda). Nous avons la relation

$$\lambda = c \cdot T = c / F$$

On exprime la longueur totale de l'antenne en fraction de longueur d'onde . Nous avons :

$$l = \lambda / 2$$

Cette antenne est donc appelée « **dipôle $\lambda / 2$** ». C'est la plus petite unité de longueur qui puisse entrer en résonance électrique. C'est l'antenne de référence utilisée dans les mesures en radioélectricité ainsi que dans maintes applications, les mobiles en particulier. En modélisme nous somme directement concernés.

Conclusion

$l = 2 \times 1,82\text{ m}$	en 41,100 MHz
$l = 2 \times 1,04\text{ m}$	en 72,250 MHz

Ondes entretenues

A la fig. 8 et 9 à chaque fois que l'on actionne l'interrupteur en position 1 puis 2 on obtient un train d'onde amorties. Ce n'est guère pratique. C'est pourtant ainsi qu'eurent lieu les premières transmissions radio : à la place de notre pile il y avait un éclateur à boules alimenté en haute tension, puis un arc électrique. La précision de l'émetteur était vaguement fixée par les dimensions de l'antenne.

Dans l'analogie de la balançoire que l'on pousse (la personne sur la sellette reste immobile), si on écarte le système de la position verticale (équilibre) et l'on relâche, il va s'établir naturellement des oscillations amorties. On comprend aisément que pour entretenir indéfiniment les oscillations de cette balançoire il faut qu'un aide au sol fournisse régulièrement un supplément d'énergie à chaque période en

poussant au bon moment. On peut imaginer aisément ce qui se passe si le pousseur au sol n'est pas **en phase** avec la balançoire : l'énergie cinétique de la balançoire peut blesser très sérieusement.

En d'autres termes il faut absolument que la fréquence de l'émetteur que l'on va connecter à l'antenne soit dans la bande de fonctionnement de celle ci. Auquel cas l'énergie électrique de l'émetteur va être intégralement transmise à l'antenne qui va la convertir en énergie électromagnétique.

Quand l'émetteur est hors bande de fonctionnement de l'antenne, l'énergie électrique est totalement réfléchi au niveau de l'entrée de l'antenne. L'antenne ne rayonne quasiment pas et cette énergie électrique revient dans l'émetteur.

Lorsque l'antenne télescopique de votre émetteur est repliée (un seul brin) l'énergie électromagnétique rayonnée est environ 100 fois plus faible qu'antenne déployée. Voici pourquoi les modules HF de nos émetteurs chauffent quelque peu lorsque l'antenne n'est pas connectée ou repliée : ils doivent dissiper en chaleur l'énergie (environ 250 à 400 mW) qui n'est pas rayonnée par l'antenne.

A partir de puissances de quelques Watt (CB 27 MHz par exemple), si l'émetteur n'a pas équipé de dispositif de mesure de puissance réfléchi (par l'antenne) coupant alors l'émission, il peut y avoir tout simplement destruction de l'émetteur.

Un émetteur est tout simplement un générateur sinusoïdal de puissance. Le symbole d'un tel émetteur est le suivant :



L'étude des modulations appliquées à l'émetteur sort du cadre de cet article. Lorsqu'il n'est pas modulé, le courant qu'il va injecter dans l'antenne est du type :

$$i(t) = I \sin(2\pi Ft)$$

$i(t)$: **courant instantané** fonction du temps en A

I : **amplitude du courant** en A

F : **fréquence** en Hz de l'émetteur, obligatoirement dans la bande de fréquence de fonctionnement de l'antenne

Les variations du courant en fonction du temps sont donnés en fig.12

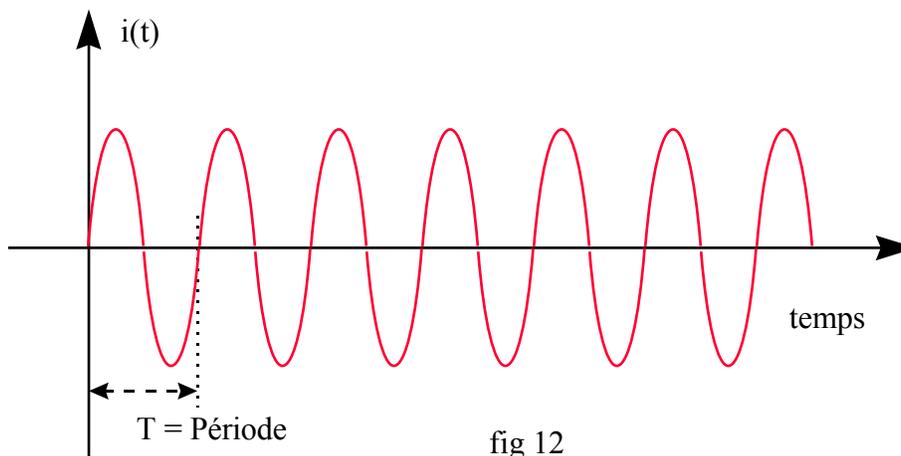
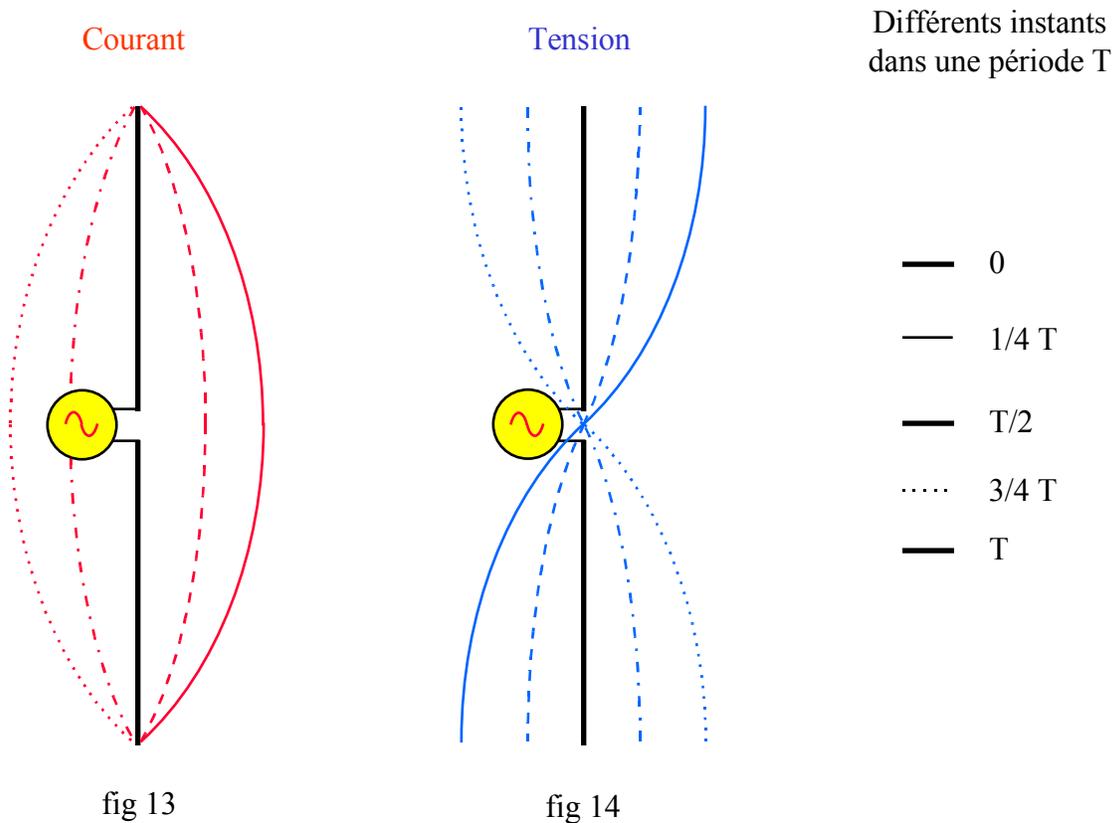


fig 12

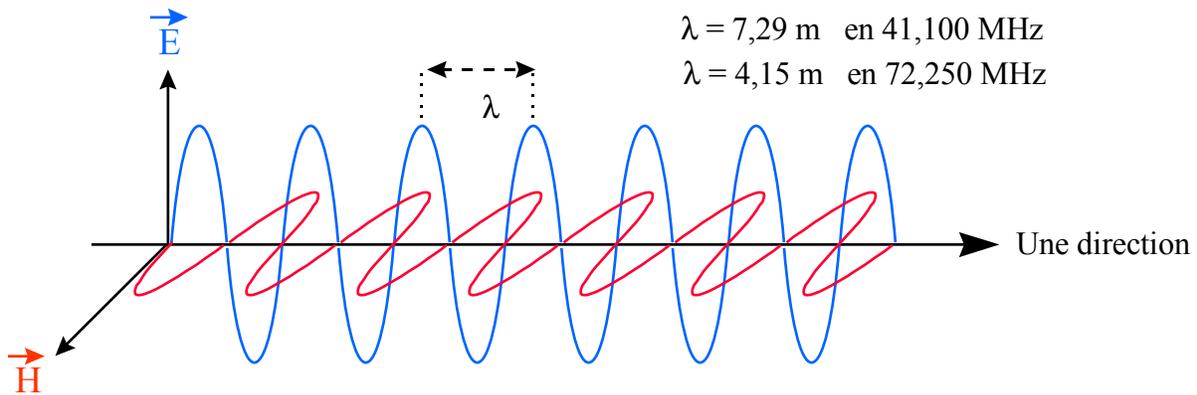
Pour un émetteur de 41,100 MHz nous connaissons sa période $T = 2,43 \cdot 10^{-8}$ sec.

Ce courant étant injecté dans notre dipôle $\lambda/2$, il va s'établir dans l'antenne un système d'ondes stationnaires. La fig.13 représente la répartition en courant (**traits rouges**), en tout point du conducteur. La fig.14 représente la tension (**traits bleus**) entre deux points opposés dans le dipôle $\lambda/2$. On dit qu'il y a un ventre de courant au centre du dipôle, et un ventre de tension entre les extrémités du dipôle.



Structure de l'onde électromagnétique

Nous avons déjà vu que l'onde électromagnétique est constituée de la présence des deux champs \vec{E} et \vec{H} . Sa structure est donnée en fig. 15.



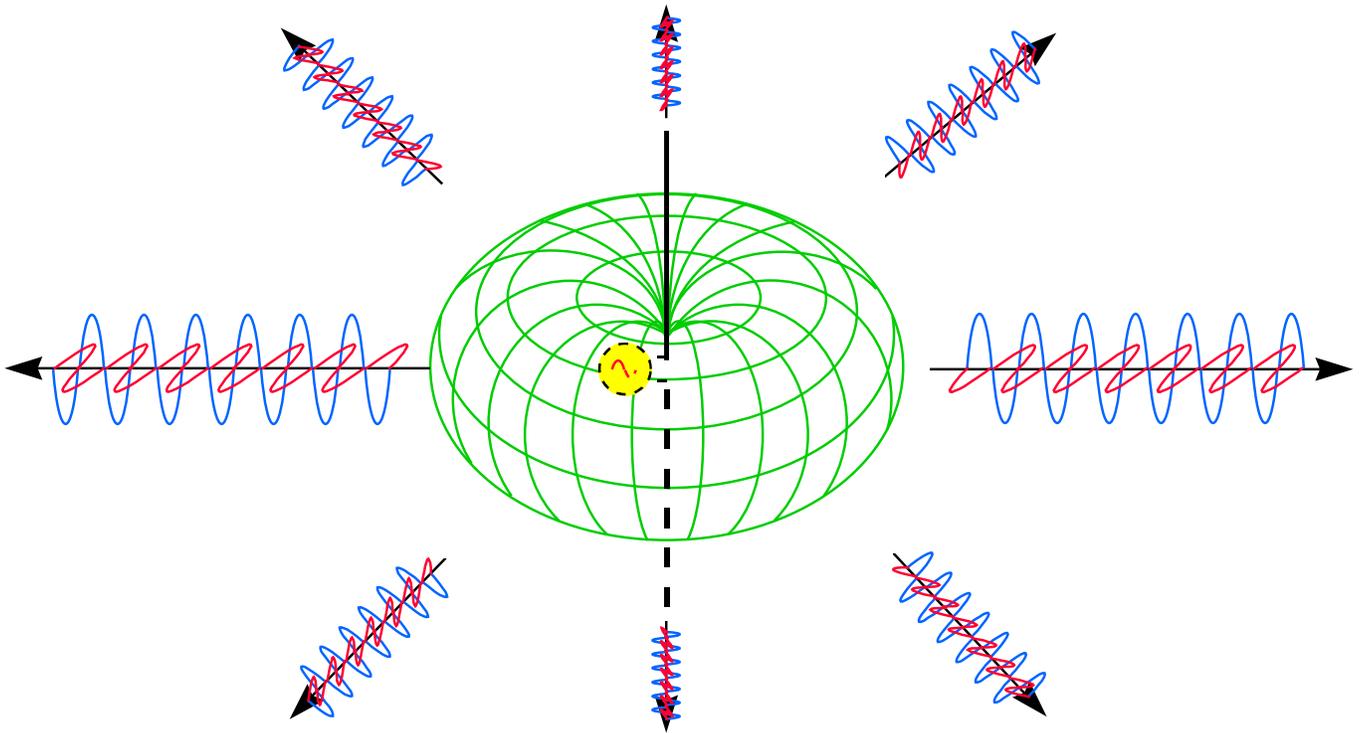
Structure de l'onde électromagnétique dans l'espace fig 15

Les **traits bleus** représentent les variations dans l'espace du **champ électrique** \vec{E} exprimé en V/m. Ce champs varie de façon sinusoïdale dans le temps (même fréquence que celle de l'émetteur), et compte tenu qu'il se propage à la vitesse $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ on retrouve la même longueur d'onde $\lambda = c / F$

Les **traits rouges** représentent les variations du **champ magnétique** \vec{H} exprimé en A/m.

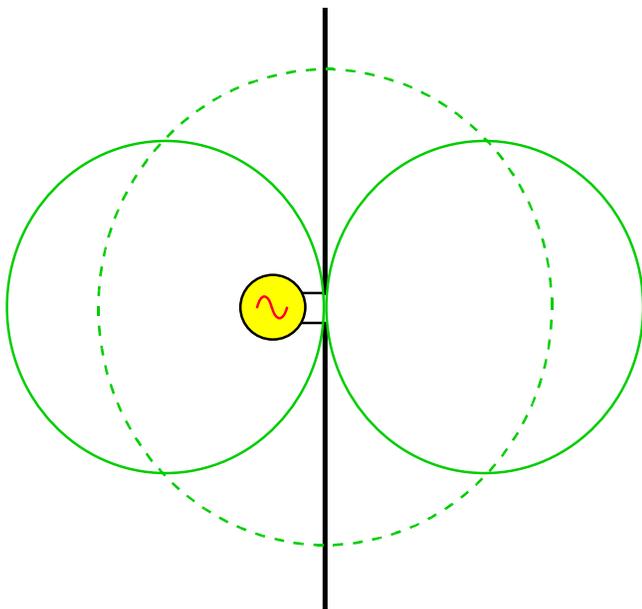
L'antenne dipôle $\lambda/2$ rayonne cette onde électromagnétique dans **plusieurs directions**

En un point la densité d'énergie électromagnétique en donnée par le produit de \vec{E} et \vec{H} . Cette densité d'énergie sera exprimée en VA/m^2 c'est à dire en W/m^2 . Si l'on tente de représenter en 3 dimensions la répartition relative de l'énergie (sans unités donc), on obtient ce que l'on appelle le diagramme de rayonnement en traits verts fig. 16. Pour simplifier on peut dire qu'il ressemble à une « pomme », la queue du fruit matérialisant l'antenne $\lambda/2$.

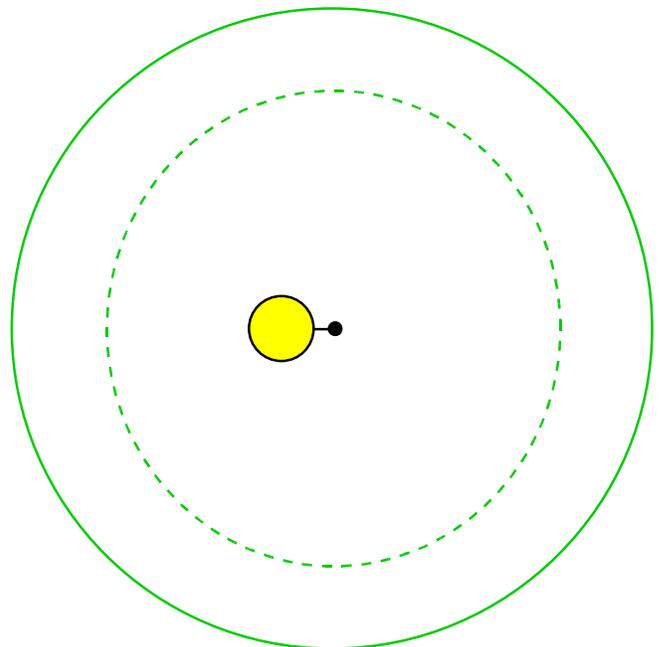


Répartition relative de l'énergie : diagramme de rayonnement (vert)
fig16

Comme cette représentation est peu précise on lui préfère les deux représentation dans les plans horizontaux et verticaux : figure 17 et 18



Plan vertical (en coupe)
fig 17



Plan horizontal (vue de dessus)
fig 18

Nous voyons que l'énergie électromagnétique n'est pas rayonnée de façon uniforme (isotrope) dans l'espace. Pour comparer la répartition d'énergie avec une telle antenne isotrope (qui n'existe

d'ailleurs pas mais sert aux calculs de portée) nous avons tracé en pointillés son diagramme de rayonnement : la sphère.

Dans la zone où le trait plein vert dépasse le pointillé vert on dit que l'antenne $\lambda/2$ a du gain par rapport à l'antenne isotrope. Ce gain est maximum dans la direction de l'horizontale et a pour valeur 1,63.

Cette valeur est sans unité car elle correspond à un rapport de puissance (de concentration d'énergie).

Pour terminer les caractéristiques, cette antenne est capable fonctionner entre 39 MHz et 43 MHz, soit sur une bande de fréquence égale à 10 % de sa fréquence nominale. Respecter donc sa longueur.

Résumé des caractéristique de l'antenne « dipôle $\lambda/2$ »

- Longueur $l = \lambda/2$ avec $\lambda = c / F$
- Bande passante faible : 10 % de F
- Impédance d'entrée $R = 73 \text{ Ohm}$
- Excellent rendement environ 90 %
- Directivité = « pomme »
- Gain par rapport à l'isotrope : 1.64

Comment recevoir l'énergie électromagnétique ?

Il existe deux solutions :

Récupération du champ électrique

Si l'antenne émission est verticale il suffit de tendre un conducteur **parallèle** à celui ci donc vertical et de longueur $\lambda/2$. Dans cette antenne de réception, en présence du champ \vec{E} les électrons de charge électrique $-e$ sont soumis à une force $\vec{F} = -e \cdot \vec{E}$. Ils vont provoquer au centre de cette antenne réception un courant électrique de même fréquence que celle de l'émetteur. C'est la solution adoptée en RC.

Récupération du champ magnétique

Il suffit de présenter une (ou plusieurs) spire dans laquelle il y aura un courant induit. Cette solution est employée dans les cadre ferrites de récepteur PO/GO de récepteurs de radiodiffusion AM. Cette solution n'est pas intéressante en RC en raison de l'encombrement de la spire sauf en goniométrie pour la recherche de modèles égarés et équipés d'une balise.

En réception notre antenne $\lambda/2$ convient donc très bien pour les applications mobiles. Mais pour donner le meilleur d'elle même il faut qu'elle soit **parallèle** à l'antenne émission, ce qui est très rarement le cas sur nos modèles.

Antenne « monopôle $\lambda/4$ »

Alimenter l'antenne $\lambda/2$ au centre n'est pas toujours facile, donc il existe une astuce qui consiste à remplacer le brin inférieur $\lambda/4$ par un plan de masse (en théorie de dimension infinies) lequel est capable de remplacer le brin manquant. Voir fig. 19. Cette antenne « monopôle $\lambda/4$ » est aussi appelée « antenne fouet » ou « verticale au sol ». Ce plan de masse est parfois appelé « contrepoids d'antenne ». Dans nos émetteurs RC ce plan de masse est constitué :

- Par le boîtier métallique de l'émetteur quand celui ici n'est pas en vulgaire matière plastique !
Heureusement certains fabricants sérieux ont pris soin de peindre l'intérieur du boîtier à l'aide de produit conducteur.

- Un peu par le pilote lui même, puisque le corps est conducteur d'électricité.
- Par le sol qui n'est pas très loin.

Pour le récepteur se sont la masse du circuit imprimé (petites dimensions) et les connexions électriques vers l'accus et les servos qui fournissent le brin manquant.

On comprend ainsi que tout allongement des fils allant aux servos (rallonges d'ailerons) puisse provoquer une réduction de portée par

- Modification des longueurs du contrepoids donc de l'accord en fréquence
- Rayonnement important des parasites des servos qui polluent l'antenne et son contrepoids.

L'usage de ferrites près du récepteur sur les rallonges permet dans ce cas d'éliminer ce problème

Résumé des caractéristique de l'antenne « dipôle $\lambda/4$ »

- Longueur $l = \lambda/4$ avec $\lambda = c / F$
- Bande passante faible : 10 % de F
- Impédance d'entrée $R = 36 \text{ Ohm}$
- Excellent rendement environ 90 %
- Directivité = « demi pomme »
- Gain par rapport à l'isotrope : $2 \times 1.64 = 3,28$

Ensemble RC avec antennes émission et réception monopôle $\lambda/4$

La fig. 19 représente en vert les diagrammes d'émission et de réception théoriques (répartition relative de l'énergie dans l'espace). En pratique les creux sont un peu moins marqués.

L'amplitude des courants dans les antennes (représentation simplifiée par rapport à la fig.13) est visualisée en trait rouge. Cette représentation du courant met en évidence le rôle très important du plan de masse qui conditionnent le fonctionnement correct des deux monopôles $\lambda/4$. Elle sera utile pour examiner le raccourcissement du $\lambda/4$.

Remarque importante

L'antenne $\lambda/4$ utilisée en RC possède une directivité telle que si l'on pointe l'antenne **vers** le modèle l'énergie rayonnée est **minimale**: environ 100 fois moins en puissance par rapport à la direction privilégiée.

Donc en cas de problème de lever l'émetteur (dégagement maximum du sol) et orienter l'antenne **perpendiculairement** au modèle. Cela peut sauver un modèle en limite de portée (expérience vécue sur un avion dont l'antenne était sectionnée au ras du récepteur).

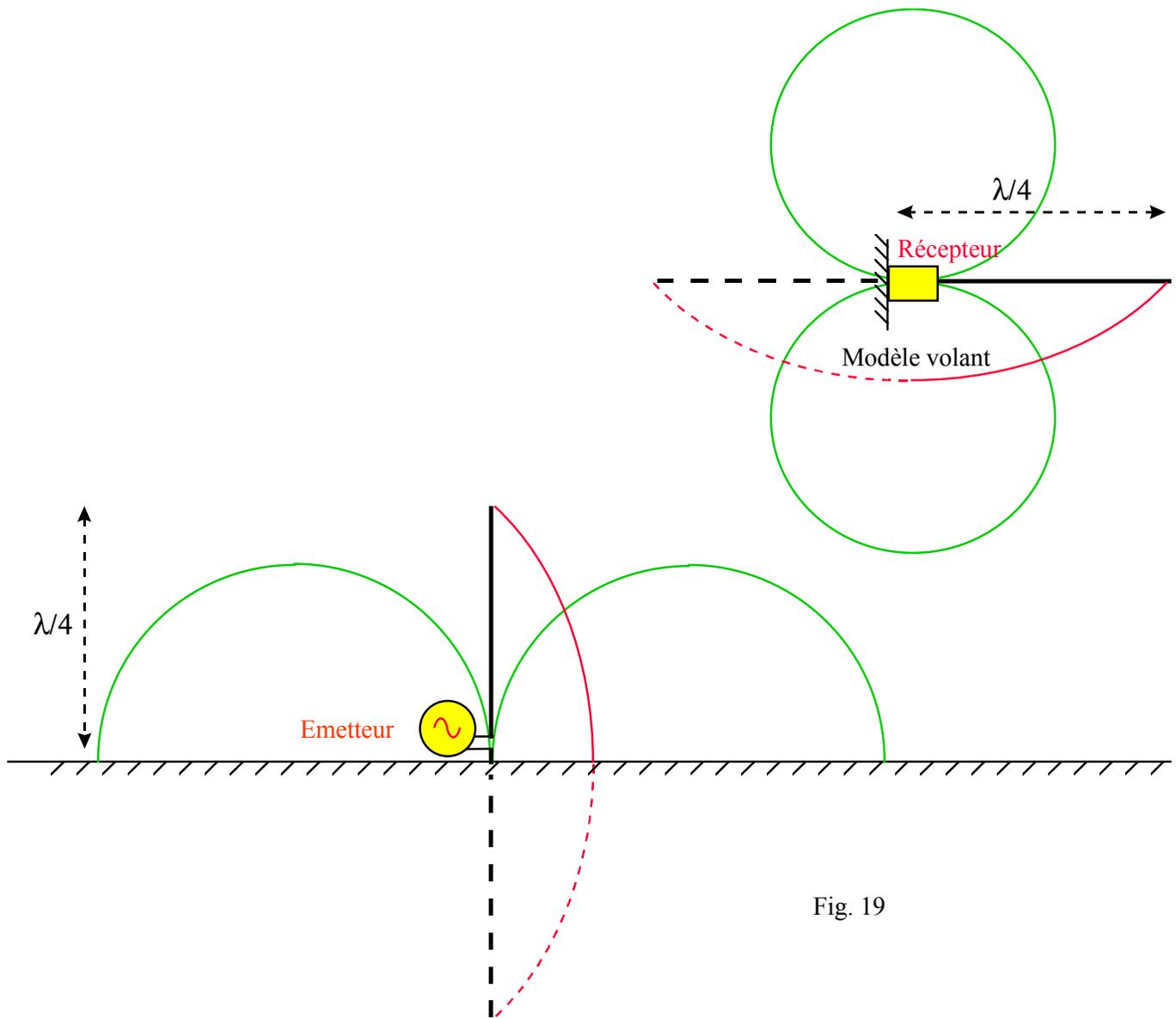


Fig. 19

Raccourcissement des antennes

Pour des raisons d'encombrement il parfois nécessaire de réduire la longueur du brin $\lambda/4$. Le plan de masse n'intervient pas, il s'adapte. Soit h cette nouvelle longueur.

Nous avons vu qu'à 41,100 MHz le brin $\lambda/4$ doit mesurer impérativement 1,82 m. Or visiblement nos antennes émission (respectivement. réception.) font 1.25 m (respectivement. 90 à 50 cm). Donc nous avons affaire à des antennes déjà raccourcies !

La théorie prévoit que si l'on coupe un monopôle $\lambda/4$ qui fait maintenant une longueur $h < \lambda/4$, et bien il ne va plus vouloir résonner (on le savait déjà) sur la fréquence $F = c/\lambda$. Son impédance réelle de 36 Ohms va baisser et présenter de plus une partie capacitive notée Z_c .

Si l'on veut que ce brin $h < \lambda/4$ résonne sur la fréquence $F = c/\lambda$ il faut intercaler à la base une self de valeur $Z_l = Z_c$ pour contenter l'effet capacitif.

Self à la base notre brin va résonner mais la répartition en courant est moins favorable que pour le cas $\lambda/4$: une grande partie de courant (hélas celle du ventre) est dissipée en chaleur dans la self qui ne rayonne quasiment pas. La conséquence est une réduction des performances de cette antenne raccourcie par rapport à l'antenne $\lambda/4$: diminution du gain (et du rendement). La conséquence directe est une

réduction de portée. En première approximation si on divise la longueur par r soit $h = l/r \cdot \lambda/4$ alors la portée sera également divisée par r.

Ensemble RC avec antennes émission et réception « monopôle $\lambda/4$ raccourci »

La fig. 20 met en évidence les réductions des performances. La partie centrale du ventre de courant (où le rayonnement est maximum) est « engloutie » dans la self qui ne rayonne pas.

En conséquence les diagrammes de rayonnement de la fig.20 sont globalement plus « petits » qu'à la fig. 19 : le gain a chuté. Il existe la possibilité de mettre la self au milieu du brin $\lambda/4$ là où le courant n'est pas maximum, donc d'améliorer le rendement de l'antenne. C'est le cas parfois en 27 MHz où la self au centre de l'antenne télescopique est bien visible.

En 41 MHz autant pour l'émetteur que pour le récepteur, la self à la base est intégrée dans le filtre d'antenne donc pas visible directement.

En 72 MHz on se rapproche quasiment du cas $\lambda/4$.

Dans le cas où l'on veut opérer un raccourcissement (supplémentaire) de l'antenne de réception, il faut s'attendre à une réduction inévitable de portée. Il faut en toute rigueur réaliser les deux opérations suivantes :

- 1 Intercaler entre l'entrée du récepteur et la base de l'antenne une self.
- 2 Reprendre les réglages de filtre d'antenne.

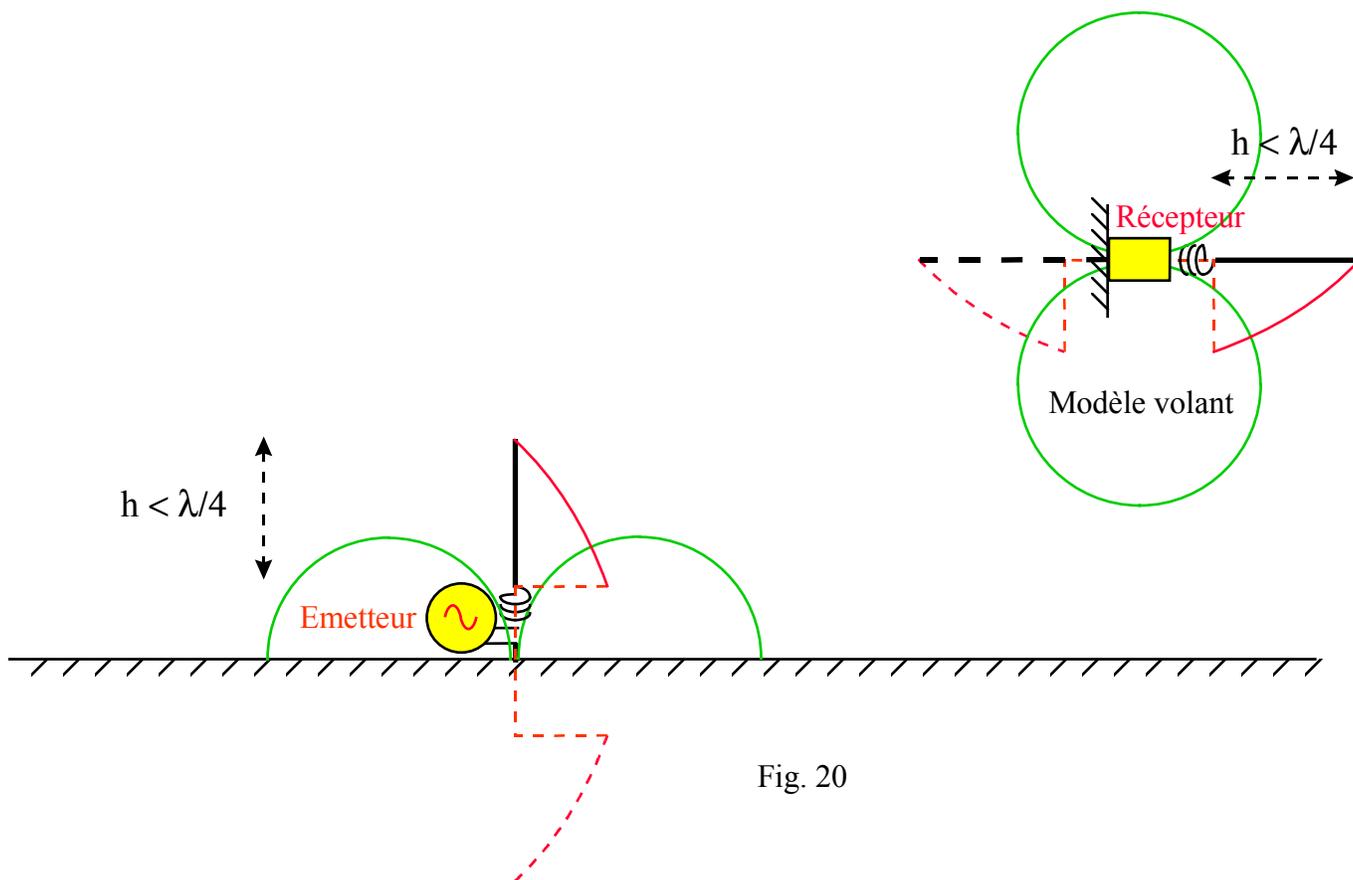


Fig. 20

Calcul de la self à la base

Dans le cas des antennes fouets à fils fins (1 mm de diamètre) la valeur de la self pour le raccourcissement des $\lambda/4$ est donnée par la formule suivante :

$$L = \frac{63}{F} \cot\left(360 \frac{h}{\lambda}\right)$$

L valeur de la self en Henry

F fréquence en Hertz

h longueur de l'antenne en mètre

$\lambda = c/F$ en mètre : 7,29 m en 41 MHz ; 4,15 m en 72 MHz

cot = cotangente en degrés

Le tableau suivant permet d'envisager les cas usuels possibles en radiocommande

	F = 41 MHz $\lambda/4 = 1,82$ m	F = 72 MHz $\lambda/4 = 1,03$ m
h = 90 cm	1,6 μ H	0,2 μ H
h = 70 cm	2,2 μ H	0,5 μ H
h = 50 cm	3,4 μ H	0,9 μ H
h = 30 cm	5,8 μ H	1,8 μ H
h = 10 cm	18 μ H	5,7 μ H

Vue les valeurs relativement élevées de $\lambda/4$ nos antennes sont quasiment toutes raccourcies en 41 MHz (un peu moins ou très peu en 72 MHz). La self de la base est intégrée dans le filtre d'antenne. En théorie il ne faut donc rajouter que la valeur supplémentaire de self.

Exemple En 41 MHz on possède un récepteur muni d'une antenne 90 cm que l'on veut raccourcir à 30 cm. Pour 90 cm le filtre d'antenne fournit les 1,6 μ H. Pour 30 cm il faut au total 5,8 μ H. La self à rajouter à la base doit fournir la différence soit $5,8 - 1,6 = 4,2$ μ H

Le tableau fournit donc une base de départ pour l'expérimentation.

Reprise du filtre d'antenne

Munie de sa self à la base l'impédance de l'antenne est purement résistive. Mais de 36 ohms pour $\lambda/4$ elle va tendre vers 0 Ohms pour des valeurs très courtes. Donc pour optimiser le transfert d'énergie vers le récepteur il faut reprendre le filtre d'antenne (généralement deux pots HF ajustages avec capacités fixes).

Cette méthode est en principe très bien détaillée par les concepteurs de montages RC. En résumé on branche un oscilloscope sur le dernier étage analogique (fréquence intermédiaire 455 kHz en général), on éloigne l'émetteur en limite portée (antenne repliée ou émetteur chargé par une ampoule pour limiter les distances) pour ne pas saturer les amplis et on reprend les noyaux du filtre d'antenne pour avoir l'amplitude maximum.

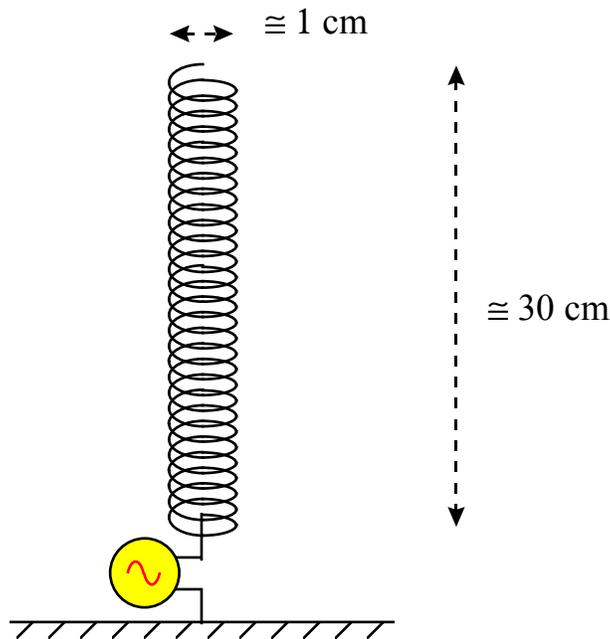
Conclusion Raccourcir une antenne réception est une opération quelque peu délicate. Elle s'accompagne d'une inévitable réduction de portée.

Antennes « courtes » pour émetteur

Certains fabricants proposent en accessoire une antenne dite « courte » qui fait environ 25 à 30 cm de long pour un diamètre 1 cm. Cette antenne est souple et l'on peut apercevoir sous la gaine protection le fil enroulé en spirale.

Il s'agit de l'antenne dite « **fouet spiralé** ». Moins encombrante que le « monopôle $\lambda/4$ », elle peut le remplacer avec toutefois une réduction des performances.

La fréquence de résonance dépend du diamètre et du nombre des spires, ainsi que de la nature du support isolant. L'expérience montre (en remplacement d'un monopôle $\lambda/4$ non raccourci) qu'une longueur totale de $\lambda/2$ enroulé en spirale à pas constant convient en première approche. Toutefois le réglage de la résonance et l'adaptation à l'impédance de l'émetteur est affaire de spécialiste surtout si elle remplace un « monopôle $\lambda/4$ raccourci ».



Les pertes dans le conducteur sont relativement importantes, à cause de longueur totale du fil d'une part. D'autre part en haute fréquence le courant ne circule qu'à la surface des métaux (effet pelliculaire), donc la situation est défavorisée par rapport à l'antenne télescopique classique constituée de tubes.

Dans le cas de nos ensembles RC la réduction de portée par rapport à une antenne télescopique classique est de 30% environ.

Son usage est donc déconseillé :

- En milieu agressif : d'autres émetteurs sur des canaux voisins (vous serez défavorisé).
- Si vous risquez d'avoir besoin d'une grande portée : trou en vol de pente par exemple.

Peut on calculer théoriquement la portée de nos ensembles RC

Il existe de nombreuses théories modélisant la propagation des ondes électromagnétiques. Deux équations relativement simples peuvent être appliquées dans le cas RC.

Portée sol/air

L'émetteur est normalement tenu au sol par le pilote, et le modèle en l'air. Il s'agit des conditions normales d'utilisation. La propagation est dégagée de tout obstacle : le récepteur ne reçoit que l'onde directe. Nous pouvons appliquer la formule de modélisation dite « **Propagation en espace libre** »

$$Pr = Pe \cdot Ge \cdot Gr \frac{1}{\left(\frac{4\pi D}{\lambda}\right)^2}$$

Pr = puissance reçue par le récepteur en Watt

Pe = puissance émission en Watt

Ge = gain isotrope de l'antenne de l'émetteur sans unités

Gr = gain isotrope de l'antenne du récepteur sans unités

D = distance entre l'émetteur et le récepteur en mètres

$\lambda = c/F$ en mètres

Les constructeurs d'ensembles de radiocommande ne sont guère loquaces sur les performances radio. Aucune mention de la puissance HF émise, encore moins du gain des antennes, quelquefois le seuil

de fonctionnement du récepteur (2 à 5 μV). On peut toutefois prendre les valeurs moyennes d'un ensemble milieu de gamme :

Exemple

$$P_e = 250 \text{ mW}$$

$$P_r = (5 \mu\text{V})^2 / 50 \text{ Ohms} = 0,5 \cdot 10^{-12} \text{ W} = 0,5 \text{ pW}$$

$G_e = G_r = 1/10$ valeur moyenne dans différentes directions, relativement faible due

- Aux mauvaises orientations relatives des antennes (elles devraient être parallèles)
- Au raccourcissement des antennes : $h < \lambda/4$
- Aux mauvais plans de masses (nécessaire pour le monopôle $\lambda/4$)

Un rapide calcul nous donne

$$D = 39 \text{ km en } 41 \text{ MHz}$$

$$D = 22 \text{ km en } 72 \text{ MHz}$$

Ces valeurs en apparence élevés laissent penser que nous sommes optimistes sur les valeurs du gain des antennes : elles dépendent fortement de la qualité du matériel (constructeur) et du soins apporté à l'installation à bord du modèle

Portée sol/sol

L'émetteur et le modèle sont au sol. Dans cette configuration le récepteur reçoit l'onde directe de l'émetteur mais aussi les ondes réfléchies par le sol. Lorsque le modèle est très bas les ondes réfléchies, sont en opposition de phase avec l'onde directe. Ces différentes ondes interfèrent entre elles au niveau de l'antenne réception. La conséquence est une réduction importante de la puissance reçue donc de la portée par rapport au cas d'espace libre (portée sol/sol) vu précédemment.

Nous pouvons appliquer la formule de modélisation dite « **Terre plate** » applicable en l'absence d'obstacles sur le sol et sur une terre parfaitement conductrice :

$$P_r = P_e \cdot G_e \cdot G_r \frac{(H_e \cdot H_r)^2}{D^4}$$

H_e = hauteur de l'antenne émission en mètres

H_r = hauteur de l'antenne réception en mètres

Exemple : Avec les mêmes valeurs $P_e = 0,25 \text{ W}$ et $P_r = 0,5 \cdot 10^{-12} \text{ W}$, si nous prenons $H_e = H_r = 1 \text{ m}$, nous obtenons $D = 265 \text{ m}$. en 41 ou 72 MHz. En pratique la portée est un peu supérieure (typiquement 500 m) du fait que le sol n'est pas parfaitement conducteur (hypothèse de la formule)

Remarques importantes

Dans le cas Sol / Air la puissance reçue par le récepteur varie en $1 / D^2$ et dans le cas Sol / Sol en $1 / D^4$.

Imaginons que vous atterrissez et que vous survolez relativement près un émetteur dont la fréquence est à 10 kHz de la vôtre. Le récepteur de votre modèle « voit » votre émetteur 10 fois plus loin donc le reçoit 10^4 moins fort (modèle de terre plate) Si en plus votre antenne émission est dirigée vers le modèle vous pouvez perdre jusqu'à $100 = 10^2$ en puissance rayonnée par rapport à l'émetteur survolé. Au total votre émetteur est reçu 10^6 fois moins fort que l'émetteur survolé sur le canal adjacent (10 kHz à côté). Et bien dans ces conditions l'émetteur à 10 kHz de votre fréquence va vous brouiller. En effet le récepteur atteint ses limites de filtrage : rapport de puissance 10^6 pour 10 kHz d'espacement. Les filtres parfaits n'existent pas !

On peut aussi imaginer un cas similaire de brouillage par intermodulation du troisième ordre (IM3) lors que votre émetteur(41,100 par exemple) est loin et que votre récepteur survolez deux émetteurs (41,060 et 41,080 ou 41,120 et 41,140 par exemple).

Pour éviter ces deux types de brouillages ; **les pilotes doivent rester groupés**. De ce fait votre récepteur n’ira pas « renifler » les autres émetteurs.

Quelles sont les portées réelles de nos ensembles RC ?

Pour obtenir les valeurs de portée dans diverses configuration de vol de nos modèles, nous avons fait les mesures sur le terrain avec deux ensembles RC « milieu de gamme », un en 41 MHz , l’autre en 72 MHz, de fabricants différents.

Les émetteurs sont munis chacun de leur antenne télescopique standard.

Les récepteurs sont à simple changement de fréquence.

Chaque ensemble de réception est à bord d’un planeur 2 axes dont l’installation radio est classiquement soignée : l’antenne court au fond du fuselage dans une gaine collée, longeant les deux cordes à piano de transmission des commandes fixées sur le côté du fuselage (distance 2 à 5 cm). Cette configuration n’est pas idéale, mais on a pris soin d’éloigner au maximum l’antenne des CAP métalliques. Ne pas descendre en dessous des distances mentionnées !

Dans le tableau suivant, l’émetteur est toujours tenu normalement par le pilote au sol en évitant de pointer l’antenne vers le modèle, l’antenne réception est toujours horizontale : position de vol du modèle

	41 MHz	72 MHz
1 Test sol/sol Emetteur tenu avec antenne connectée et rentrée : 1 seul brin rayonnant Récepteur à un 1 m de hauteur du sol	70 m	70 m
2 Test sol/sol Emetteur tenu avec antenne totalement déployée Récepteur à un 1 m de hauteur du sol	500 m	600 m
3 Atterrissage « trou » vol de pente Emetteur tenu sur le rebord de la pente, altitude 200 m, antenne totalement déployée Récepteur à un 1 m de haut. du sol au trou	1,5 km	2,0 km
4 Vol normal portée sol/air Emetteur tenu antenne totalement déployée Récepteur en vol	Estimée à 3 ou 4 km	

Remarques

- Globalement les deux ensembles RC, sur deux bandes différentes, ont les mêmes performances et il est parfaitement possible de les dépasser avec des récepteurs plus sensibles.
- Les conditions du test 2 (un terrain parfaitement dégagé sur plus de 500 m) sont difficiles à obtenir . Eviter cependant habitation ou lignes électriques. Ici il y avait quelques buissons.
- Les conditions du test 4 sont très difficiles à mettre en oeuvre La valeur affichée est donc estimée après concertation.
- Si l’on rentre complètement l’antenne de l’émetteur (un seul brin) la puissance rayonnée est environ 100 fois plus faible qu’antenne complètement déployée. Pour l’anecdote il est

parfaitement possible de piloter un modèle (un planeur par sécurité) à 200m d'altitude antenne émission rentrée (1 brin). Expérience vécue.

- Si l'on pointe l'antenne de l'émetteur vers le modèle, dans certaines configurations défavorables de l'antenne réception (horizontale et vue dans sont prolongement), il peut y avoir réduction d'un facteur 100 sur la puissance reçue. Réduction prévisible de la portée d'un facteur 10.

En conclusion : ce qu'il faut retenir

Avant le premier vol et régulièrement : essai de porté sol/sol :

Le modèle est tenu horizontalement à 1 m de haut (par l'avant pour dégager l'antenne) par un aide ou posé sur un support non métallique, terrain dégagé. L'antenne de l'émetteur est connectée mais complètement repliée (1 seul brin rayonnant), pas d'émetteurs allumés sur les canaux voisins, on doit obtenir **50 à 80 m** de portée.

L'émetteur

- La puissance radio est maximum perpendiculairement à l'axe de l'antenne : ne jamais la pointer vers le modèle en cas de difficultés Sinon réduction de puissance jusqu'à 100 fois et réduction de portée jusqu'à 10 fois.
- Les antennes courtes (fouets spiralés) réduisent la portée de 30% globalement. A n'utiliser que si vous êtes seul et que vous n'avez pas besoin de la portée maximum.

Le récepteur

- Dans tous les cas l'antenne doit être bien tendue pour respecter sa longueur électrique.
- Placée horizontalement, c'est la disposition la plus défavorable donc éviter autant que possible les longs cheminement auprès de fils conducteurs (CAP métalliques ou longeron carbone).
- Ne montez pas l'antenne à l'intérieur d'un fuselage renforcé au carbone (cage de Faraday)
- Une disposition avec coude inférieur à 90 degré (extérieur du fuselage par exemple) évite les « trous » de propagation lorsque les antennes émission et réception sont alignées et éloignées.
- Ne modifiez pas la longueur de votre antenne : la raccourcir électriquement une opération délicate qui conduit inévitablement à une réduction de portée
- Eloignez au maximum le récepteur des moteurs électriques et variateurs et faire le test de portée moteur en marche

En groupe

- Les pilotes doivent rester groupés en un lieu commun de pilotage.
- Autrement dit, votre récepteur ne doit jamais survoler des émetteurs proches tout en étant éloigné du vôtre : risque de brouillage sur canaux adjacents ou par intermodulation

Bons vols

Gérard MAGRET