

# ANTENNES ET ULM

## 1. Nos besoins

La radio à bord de nos ULM n'est pas obligatoire et il faut tout faire pour conserver cette liberté essentielle de pouvoir choisir d'avoir ou de ne pas avoir, d'utiliser ou de ne pas utiliser cet équipement.

Certes, lorsque que l'on désire se rendre autre part que sur des bases ULM, il est avantageux, voire indispensable d'être équipé. Sans radio, l'accès à certains terrains de France et de Navarre n'est pas autorisé. L'aspect sécuritaire est lui aussi indéniable lors du transit ou de l'accès aux terrains ouverts à la C.A.P. et en auto-information. Écouter le trafic local suffit souvent à améliorer votre sécurité lors de l'approche en perfectionnant votre connaissance de l'environnement. Savoir qu'un "tagazou" est à 5 minutes dans le secteur Sud, à 1 500 pieds Québec Novembre Hôtel alors que vous êtes à l'Est et à 400 m Québec Fox Échos d'un terrain dont la piste est à une altitude de 100 m, vous permet de mieux appréhender la mise en visuel de cet aéronef. S'annoncer à son tour dans ces circonstances ne peut-être que positif. Mais, comme le veut l'adage, cet équipement ne doit être utilisé qu'avec modération et que lorsque cela s'avère utile. Ne saturez pas inutilement la fréquence en décrivant réglementairement votre tour de piste "ULM", car à juste titre, les "tagazous" en tour de piste "avion" n'apprécieraient pas. En plagiant le chef pilote de "Tonton Paul (VM n° 196)", je résumerai cela par cette formule fort pertinente : *"la radio n'est pas faite pour raconter sa vie, mais pour essayer de la préserver ainsi que celle des autres"*.

### 1.1. Le contexte réglementaire

L'installation et l'utilisation d'une radio à bord répondent à des obligations réglementaires que nous survolerons très rapidement :

- Le pilote doit être détenteur au minimum d'un Certificat Restreint de Radiotéléphoniste. Ce certificat, autrefois remis par France Telecom, s'appelle maintenant "Qualification de radiotéléphonie". Il est remis après formation, par un instructeur habilité. Le District Aéronautique l'inscrit ensuite sur le Brevet et Licence de pilote d'ULM,
- Le poste radio doit être agréé STNA (une évolution européenne est en cours) et en cours de validité. Ces équipements doivent être vérifiés périodiquement par un centre agréé qui délivre une attestation (certificat d'autorisation de livraison – étiquette de navigabilité appelé maintenant certificat de conformité JAA FORM ONE) valable 6 ans,
- L'installation à bord doit faire l'objet d'une demande auprès du STNA avec présentation du schéma d'installation et de l'attestation de navigabilité. Cet organisme délivre, une Licence de Station d'Aéronef, L.S.A. à renouveler tous les 6 ans, (ex Certificat d'Exploitation de l'Installation Radioélectrique de Bord, C.E.I.R.B ) et attribue un indicatif d'appel "Foxtrot-Juliette, x, y, z" (à ne pas confondre avec le numéro d'identification et à ne pas afficher sur les ailes ou la cellule de votre appareil),
- L'entretien et la vérification de l'émetteur/récepteur doivent être faits dans un centre agréé. Pour les ULM qui utilisent des émetteurs/récepteurs portables, l'installation à bord ne subit pas cette obligation.

À ce propos, l'installation de postes radio 720 canaux reste possible jusqu'au 31 décembre 2002. À partir de cette date, cette dérogation deviendra obsolète (les postes récents doivent avoir 760 canaux). Tirez en les conséquences si vous détenez un indestructible 720 canaux et que le renouvellement de votre L.S.A. doit se faire en 2003 ou 2004, un renouvellement anticipé vous la prolongera de 6 ans.

## 2. Un peu de théorie

### 2.1. Théorème de réciprocité

Selon le théorème de réciprocité, les antennes ont les mêmes propriétés, caractéristiques et performances à l'émission comme à la réception (à l'exception de la puissance admissible qui est souvent limitée pour les antennes de réception). En résumé, une antenne qui reçoit bien, émet bien.

### 2.2. Impédance caractéristique nominale

L'impédance caractéristique nominale est un paramètre commun à tous les composants d'une chaîne de transmission, émetteur, récepteur, câble coaxial et antenne.

Généralement en réception et pour les produits "grand public", elle est fixée à 75 Ohms. Cette valeur correspond, en effet, à une optimisation du paramètre "affaiblissement" dans les câbles coaxiaux. De ce fait, elle est normalisée, par exemple, pour la réception TV hertzienne, par satellite ou par câbles. En émission et pour les produits "professionnels et semi-professionnels", elle est fixée à 50 Ohms. Cette valeur correspond, en effet, à une optimisation du paramètre "puissance admissible" dans les câbles coaxiaux. C'est le cas de nos équipements radio, mais aussi, par exemple, des stations d'émission de TV (pour reprendre l'exemple précédent).

Sous peine de désadaptation, tous les équipements d'une chaîne de transmission doivent avoir la même impédance caractéristique.

Une chaîne de transmission est toujours composée d'un générateur, d'une ligne de transmission et d'une charge.

L'équipement à bord comprend un émetteur/récepteur, un câble coaxial et une antenne.

L'émetteur/récepteur est, comme son nom l'indique, un dispositif double comprenant un émetteur et un récepteur. Par défaut, ce dispositif est configuré en récepteur, mais lorsqu'une action est faite sur la commande PTT (Push To Talk) le dispositif est configuré en émetteur.

En mode réception, le générateur est constitué par l'antenne qui collecte les signaux électromagnétiques, la ligne de transmission par le câble coaxial et la charge par le circuit d'entrée du récepteur.

En mode émission, le générateur est constitué par le circuit de sortie de l'émetteur, la ligne de transmission par le câble coaxial et la charge par l'antenne qui rayonne les signaux électromagnétiques.

### 2.3. Rapport d'ondes stationnaires

Le Rapport d'Ondes Stationnaires, **R.O.S.**, quantifie le niveau d'adaptation (ou plus exactement de désadaptation). Ce rapport varie de 1 lorsque la chaîne est parfaitement adaptée, à l'infini, lorsque la chaîne est totalement désadaptée. On peut aussi exprimer cette grandeur en termes de "coefficient de réflexion" ( $\rho$ ) ou "d'affaiblissement de l'onde réfléchie, appelé couramment Return Loss" ( $\alpha_{dB}$ ). Autrefois, cette grandeur était exprimée en pourcentage et s'appelait Taux d'Ondes Stationnaires ou T.O.S. Cette forme de caractérisation est maintenant complètement abandonnée et les termes de T.O.S. et de TOSmètre ne correspondent plus aux méthodes actuelles sont obsolètes et devenus totalement archaïques.

Le Return Loss est donné par :

$$\alpha_{dB} = 20 \cdot \log \frac{U_1}{U_2}$$

Le coefficient de réflexion est donné par :

$$\rho = \frac{U_1}{U_2}$$

Le R.O.S. est donné par :

$$R.O.S. = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|}$$

En outre, le R.O.S. correspond au rapport entre l'impédance caractéristique nominale et l'impédance réelle

$$R.O.S. = Z_C / Z_O$$

(ou  $Z_O / Z_C$  car le résultat doit être compris entre 1 et  $\infty$ )

Par exemple, dans une configuration d'impédance caractéristique nominale de 50 Ohms, où l'antenne a une impédance 100 Ohms, le R.O.S. est égal à 2. De même si l'impédance de l'antenne est de 25 Ohms, le R.O.S. sera de 2. Une impédance de 8,3 Ohms (ou de 300 Ohms) induit un R.O.S. de 6.

Dans les exemples ci-dessus et pour simplifier la démonstration, les impédances indiquées sont toutes, purement résistives. En fait, les impédances sont des valeurs de "forme complexe"  $Z = R \pm jX$  et font appel aux calculs imaginaires. Cela signifie qu'elles peuvent prendre des valeurs complexes comprenant une part résistive (**R**) appelée partie réelle et une part capacitive (**-jX**) ou selfique (**+jX**) appelée partie imaginaire.

Lorsque l'impédance de l'un ou de plusieurs des maillons d'une chaîne de transmission s'écarte de la valeur de l'impédance caractéristique nominale, le système est désadapté, le R.O.S. augmente avec, comme conséquence, une baisse du rendement.

Cela signifie que la puissance délivrée par le générateur, baptisée "puissance incidence" n'est pas totalement absorbée par la charge et donc qu'une partie de celle-ci, baptisée "puissance réfléchie", retourne vers le générateur et est perdue.

Le R.O.S. peut aussi être caractérisé par le rapport entre la puissance réfléchie ( $P_r$ ) et la puissance incidente ( $P_i$ ):

$$\text{R.O.S.} = \frac{1 + \sqrt{P_r/P_i}}{1 - \sqrt{P_r/P_i}}$$

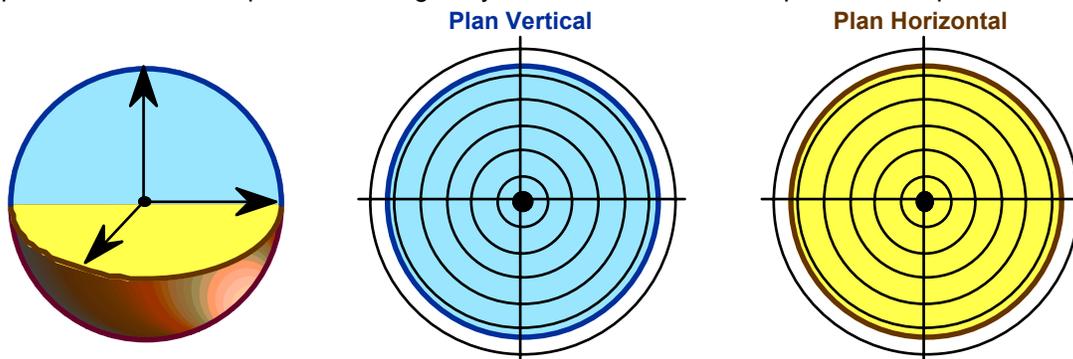
Par exemple, dans une configuration désadaptée où 10% de la puissance est réfléchi, le R.O.S. est de l'ordre de 2 (1,92 pour être précis). Lorsque la puissance réfléchi est de 50% (soit la moitié de la puissance incidence) le R.O.S. est de l'ordre de 6 (5,82 exactement).

Une forte désadaptation entraîne en plus de la chute du rendement, des surtensions et des surintensités. Les Ondes Stationnaires, à l'origine de ces surtensions et surintensités, sont induites par l'association vectorielle de la puissance incidence et de la puissance réfléchi. Il en résulte des "ventres de tension" et des "ventres d'intensité". Ces "ventres" correspondent à des coïncidences de phase entre les vecteurs tensions ou intensités incidents et réfléchis où la somme vectorielle est maximale. Ils peuvent endommager et même détruire les transistors de sortie de l'émetteur. C'est pour cela que les constructeurs d'émetteurs/récepteurs indiquent dans leur documentation technique qu'il ne faut jamais émettre sans que la sortie antenne ne soit raccordée à cette dernière ou à une charge fictive. Maintenant, la plupart des constructeurs emploient des transistors résistant à ce genre de torture. Toutefois, lorsqu'ils sont anormalement sollicités ces composants chauffent exagérément, ce qui peut entraîner une baisse irréversible de leurs performances.

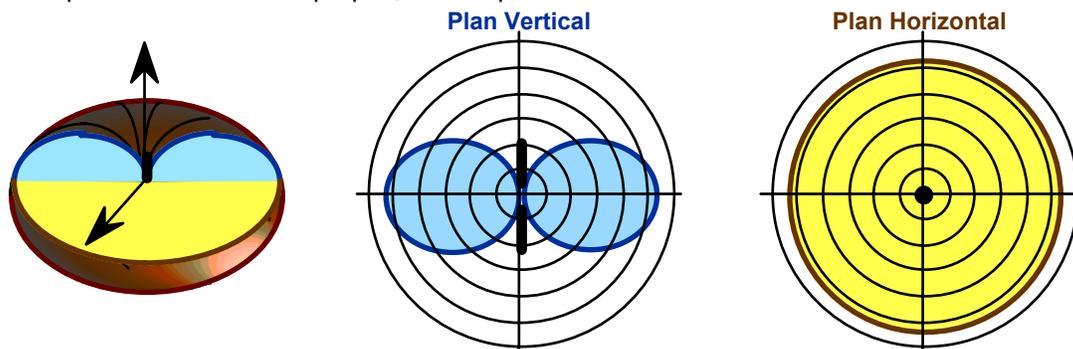
## 2.4. Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement est une représentation de la façon dont l'antenne collecte ou rayonne l'énergie électromagnétique dans l'espace.

Une antenne (hypothétique) qui rayonne son énergie uniformément dans toutes les directions (c'est-à-dire avec la même amplitude) est baptisée **antenne isotrope**. Ce type d'antenne sert de référence quantitative. La représentation physique de son diagramme de directivité correspond à une sphère, car elle rayonne (ou collecte) une quantité d'énergie identique quelle que soit la direction examinée dans l'espace. Pour améliorer leur lisibilité, les diagrammes de directivité sont représentés par une coupe dans le plan vertical et une coupe dans le plan horizontal et la quantité d'énergie rayonnée ou collectée est baptisée "champ".



Lorsque le rayonnement d'une antenne n'est pas uniforme, on dit que cette dernière est directive. Par exemple, le diagramme de directivité d'un modèle d'antenne élémentaire baptisée **dipôle**, dont nous parlerons fréquemment lors de ce propos, est torique.



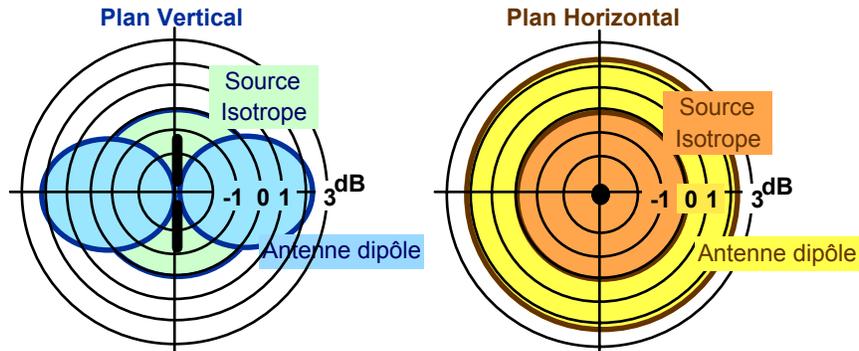
On peut remarquer que lorsque cette antenne est placée verticalement, elle rayonne (ou collecte) la même quantité d'énergie dans le plan horizontal. On dit qu'elle est omnidirectionnelle en azimut. Par contre, dans le

plan vertical, son rayonnement est directif. L'énergie rayonnée (ou collectée) au zénith est nulle (alors qu'elle est maximale à l'horizontale). On dit qu'elle est directionnelle en site.

## 2.5. Gain

Pour une antenne directive, l'énergie sera plus faible dans certaines directions et plus importante dans d'autres.

Le gain d'une antenne peut être défini comme étant le rapport entre le niveau d'énergie rayonné (ou collecté) dans la direction de champ maximum par rapport à celui de l'antenne isotrope.



Le gain est généralement donné en  $\text{dB}_{\text{iso}}$  car exprimé en décibels du rapport entre les quantités d'énergies rayonnées dans la direction de champ maximum par l'antenne concernée et celles de la source isotrope de référence.

$$G_{\text{iso}} = 10 \cdot \log P_{\text{ant}}/P_{\text{iso}}$$

en termes de vecteur "champs électromagnétiques", cette formule devient :

$$G_{\text{iso}} = 20 \cdot \log H_{\text{ant}}/H_{\text{iso}}$$

Par exemple, le gain d'une antenne dipôle est de 2,15  $\text{dB}_{\text{iso}}$ .

Certains constructeurs d'antennes expriment le gain par rapport à celui de l'antenne dipôle. Dans ce cas, le gain d'une antenne spécifique peut-être converti en  $\text{dB}_{\text{iso}}$  en ajoutant 2,15 dB à la valeur indiquée.

$$G_{\text{iso}} = G_{\text{dip}} + 2,15$$

Le gain est un paramètre important d'une antenne, car il correspond à sa sensibilité en réception et son efficacité en émission. Plus le gain d'une antenne est important, plus la portée de la transmission est grande.

Une antenne dont le gain est de 3 dB permet de rayonner (ou de collecter) une puissance DOUBLE à celle d'une configuration identique mais pourvue d'une antenne dont le gain ne serait que de 0 dB ( 0 dB ne signifie pas que la puissance rayonnée est nulle mais qu'elle est égale à celle de l'antenne isotrope de référence).

## 2.6. Affaiblissement

Les pertes dans une chaîne de transmission correspondent à la somme des différents affaiblissements. On peut décliner les affaiblissements suivants :

- Affaiblissement dû au R.O.S.
- Affaiblissement dans câbles coaxiaux,
- Pertes de structure de l'antenne.

### 2.6.1. Affaiblissement dû au R.O.S.

L'affaiblissement dû au R.O.S. est donné par l'expression suivante :

$$\alpha_{dB} = 10 \cdot \log \frac{P_i}{P - P_r}$$

Pour reprendre les exemples précédents, un R.O.S. de 2 induit un affaiblissement de 0,5 dB (10% de puissance sont perdus) et un R.O.S. de 6 induit un affaiblissement de 3 dB (50% de la puissance sont perdus).

### 2.6.2. Affaiblissement dans les câbles coaxiaux

Dans les câbles, l'affaiblissement est linéique, c'est-à-dire qu'il est proportionnel à la longueur du câble. Il dépend aussi de la fréquence de fonctionnement et des matériaux utilisés lors de sa réalisation. Deux types de pertes se cumulent :

- Les pertes ohmiques qui dépendent de la résistivité du métal utilisé pour les conducteurs mais aussi de la fréquence, à cause d'un phénomène appelé "effet de peau " (plus la fréquence est élevée et moins l'épaisseur de pénétration du courant est importante, de ce fait la lorsque la fréquence augmente la section conductrice diminue et la résistance augmente). C'est pour cela que le cuivre, métal peu résistif, est le matériau de prédilection pour la fabrication des câbles coaxiaux de qualité professionnelle ou semi-professionnelle.
- Les pertes diélectriques qui dépendent de la "tangente de l'angle de perte" du diélectrique employé. Le "polyéthylène" (PET) est l'un des meilleurs diélectriques actuels et certainement le plus couramment utilisé. L'air sec possède des caractéristiques diélectriques supérieures, c'est pour cela que l'on trouve fréquemment des câbles coaxiaux dont le diélectrique est constitué de "polyéthylène cellulaire" (cette mousse de polyéthylène est composée de polyéthylène et de bulles d'air). Les performances (l'affaiblissement) sont améliorées. Cette technologie est couramment utilisée pour les câbles de réception TV et satellites.

Dans nos installations, le câble le plus approprié est un câble coaxial professionnel appelé "RG58U" selon la norme MIL-C17 ou "KX15" selon la norme C 93550.

Ce câble d'excellentes qualités et très couramment employé et son approvisionnement ne pose pas de problèmes particuliers.

Ses caractéristiques principales sont :

- **Électriques**

|                                    |                       |
|------------------------------------|-----------------------|
| Impédance caractéristique nominale | 50 Ohms               |
| Affaiblissement                    | 15 dB/100 m à 127 MHz |
- **Mécaniques**

|                    |                                   |
|--------------------|-----------------------------------|
| Diamètre extérieur | 5 mm                              |
| Gaine extérieure   | polychlorure de vinyle (PVC) noir |
| Tresse de masse    | cuivre argenté                    |
| Diélectrique       | polyéthylène (PET)                |
| Conducteur central | multibrins en cuivre argenté      |

Ces câbles sont couramment équipés de connecteurs coaxiaux type BNC.

L'affaiblissement apporté par ce type de câble n'est pas trop pénalisant. Les liaisons entre l'antenne et l'émetteur/récepteur sont généralement inférieures à 5 m et dans ces conditions, l'affaiblissement est de l'ordre de 0,75 dB, soit une perte de 16% de la puissance. Cette perte, sans être négligeable, reste acceptable, mais cet exemple montre bien tout l'intérêt que l'on a dans la recherche de l'optimisation de la configuration de l'installation et dans la mise en place du câble coaxial le plus court possible.

### 2.6.3. Pertes de structure de l'antenne

Le rendement de l'antenne est un paramètre qui dépend du gain, de l'adaptation d'impédance et des pertes ohmiques de structure.

Celles-ci dépendent de la nature des matériaux employés pour sa réalisation.

Le cuivre est un métal à faible résistivité mais c'est un métal mou. Il est utilisé pour la réalisation d'antenne fouet professionnelle mais dans ce cas, le fil de cuivre est enrobé dans une gaine en composite de stratifié de verre et polyester qui lui confère résilience et souplesse.

Des fils en acier inoxydable sont utilisés pour leur élasticité mais au détriment des performances radioélectriques, car la résistivité de l'acier est plus élevée que celle du cuivre. Malgré cet inconvénient, ce métal est fréquemment employé pour les antennes, ses caractéristiques mécaniques et de tenue à la corrosion compensant ses faiblesses électriques.

## 2.7. Le rendement

Le rendement global d'une chaîne est déterminé par le bilan de transmission. Ce bilan correspond à la somme des pertes et des gains. Le rendement est donné par le rapport entre le bilan de la configuration et celui d'une chaîne optimale caractérisée par des pertes minimum et gain maximum. Il est exprimé en pourcentage.

## 2.8. Mode de transmission symétrique/dissymétrique

Cette caractéristique est propre à chaque sous-ensemble et détermine sa configuration de raccordement.

On dit qu'un sous-ensemble fonctionne en mode symétrique lorsque, par conception, ses deux pôles de raccordement sont en mode flottant, c'est-à-dire qu'aucun d'entre eux n'est référencé à la masse.

À l'inverse, un sous-ensemble fonctionne en mode dissymétrique lorsque l'un de ses pôles est référencé à la masse.

Par exemple, une liaison en câble plat bifilaire (la sortie antenne FM des tuners de nos chaînes HI-FI est généralement de ce type) ou une antenne dipôle (telle que l'antenne YAGI de réception TV) sont des sous-ensembles fonctionnant en mode symétrique parce que les pôles de raccordement sont indépendants de la masse.

A contrario, une liaison en câble coaxial fonctionne en mode dissymétrique parce que la gaine extérieure tressée du câble est au potentiel de la masse, elle est d'ailleurs raccordée à cette dernière via, au moins, l'un des connecteurs d'extrémité.

Lorsqu'une chaîne de transmission est hétérogène, il est nécessaire d'intégrer des dispositifs de transformation entre les sous-ensembles fonctionnant dans des modes différents.

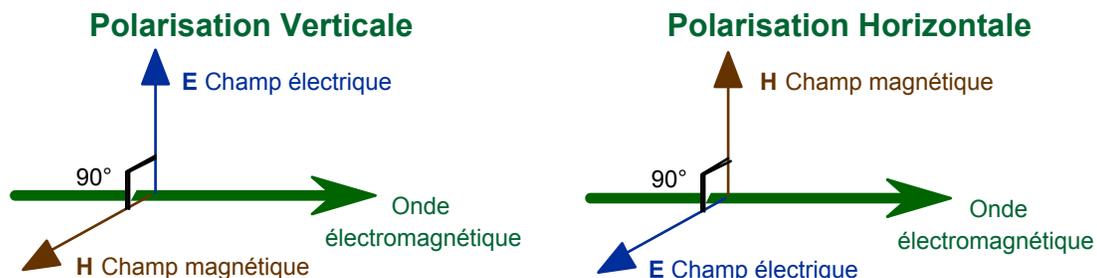
C'est notamment le cas lorsque l'on raccorde une antenne dipôle à un câble coaxial.

## 2.9. La bande passante

La bande passante d'un dispositif peut être définie comme étant la plage de fréquences pour laquelle les caractéristiques techniques restent dans les tolérances déterminées.

## 2.10. Le plan de polarisation

L'onde électromagnétique est rayonnée selon un plan de polarisation. Elle est composée de deux "vecteurs en quadrature" appelés "champ électrique" ou E et "champ magnétique" ou H. On dit qu'ils sont en quadrature lorsque qu'ils sont déphasés de  $90^\circ$  l'un par rapport à l'autre.



Par convention, le plan de polarisation est défini selon l'orientation du champ électrique. Lorsque la configuration de l'antenne place le champ électrique verticalement, on dit que la polarisation est verticale. À l'inverse, lorsque la configuration de l'antenne place le champ électrique horizontalement, on dit que la polarisation est horizontale. Dans certaines conditions, la polarisation peut être aussi "circulaire droite ou circulaire gauche".

## 2.11. Les antennes

Les antennes ont pour fonction :

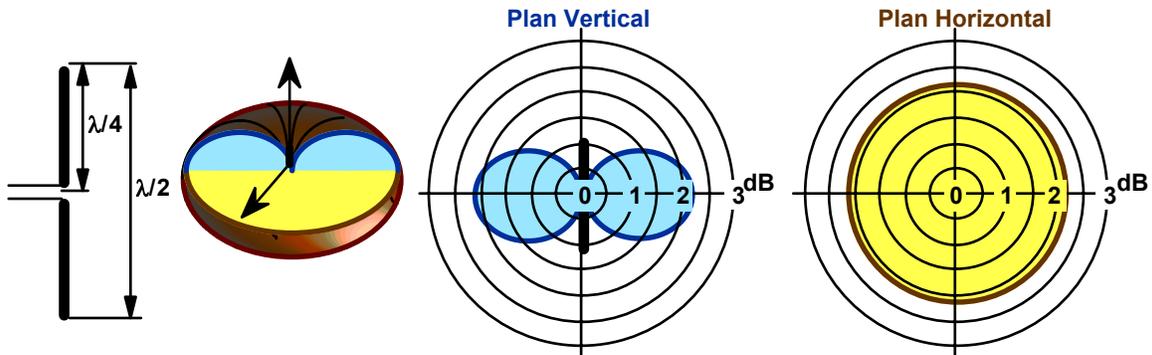
- À la réception, de collecter l'énergie électromagnétique et de la transformer en énergie électrique,
- À l'émission, de transformer l'énergie électrique en énergie électromagnétique et de la rayonner.

À l'exception de la puissance admissible, les caractéristiques d'une antenne sont identiques à la réception comme à l'émission (théorème de réciprocité). Les caractéristiques principales d'une antenne sont :

- L'impédance caractéristique,
- Le mode de raccordement,
- Le diagramme de directivité,
- Le gain,
- La bande passante,
- La polarisation,
- La puissance admissible.

### 2.11.1. Dipôle

C'est l'antenne élémentaire à partir de laquelle sont déclinés de nombreux autres types d'antennes. L'antenne dipôle est constituée de deux brins symétriques.



Les caractéristiques optimales de ce type d'antenne sont obtenues lorsque les brins ont une dimension spécifique au regard de la fréquence centrale de fonctionnement.

La longueur de chaque brin doit, pour cela avoir une longueur très légèrement inférieure à  $\lambda/4$  (**0,98  $\lambda/4$** ), l'envergure de l'ensemble mesure donc un peu moins de  $\lambda/2$  (**0,98  $\lambda/2$** ).

$\lambda$  est la longueur d'ondes qui est déterminée à partir de la fréquence centrale de fonctionnement :

$$\lambda = 300/F \quad \text{avec } \lambda, \text{ longueur d'ondes en mètres (m) et } F, \text{ fréquence en mégahertz (MHz)}$$

Par exemple, en bande aviation (118-136 MHz) la fréquence centrale est 127 MHz. À cette fréquence, la longueur d'ondes  $\lambda$  est de 2,36 m, l'envergure d'un dipôle est de 1,157 m et chaque brin doit mesurer 0,579 m arrondi à 580 mm).

Lorsque ces conditions sont respectées, les caractéristiques principales sont :

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| • Impédance caractéristique nominale | 75 Ohms  |
| • Mode de raccordement               | symétrique   |
| • Diagramme de directivité           | omnidirectionnelle dans le plan du champ H   |
| • Gain                               | 2,15 dB <sub>iso</sub>   |
| • Bande passante pour un R.O.S. <2   | ± 8%   |
| • La polarisation                    | verticale lorsque les brins sont verticaux et horizontale lorsque les brins sont horizontaux |
| • Puissance admissible               | Dépendante de la morphologie de l'antenne  |

On peut remarquer que l'antenne dipôle accordée a une impédance caractéristique nominale de 75 Ohms, un mode de raccordement symétrique et possède une directivité dans le plan E et que la bande passante pour un R.O.S. <2 est limitée à ±8%.

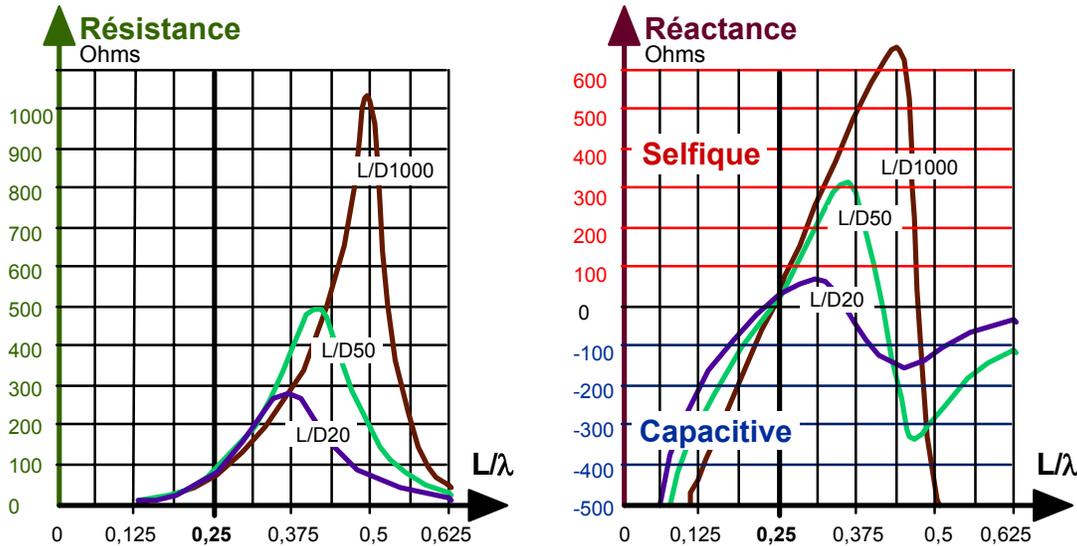
Le diamètre des brins, ou plus précisément le rapport Longueur/Diamètre (L/D), intervient sur la bande passante. Lorsque le rapport L/D diminue, la bande passante devient plus importante, mais ce paramètre est

mécaniquement difficile à mettre en oeuvre dans les antennes embarquées car l'augmentation de la bande passante ne devient très sensible que lorsque le rapport  $L/D$  est inférieur à la dizaine.

A contrario, la longueur des brins est le paramètre dimensionnel dominant et les principales caractéristiques techniques dépendent de celle-ci.

L'impédance caractéristique ( $Z$ ) est, rappelons le, déterminée par la forme complexe  $Z = R \pm jX$  où ( $R$ ) correspond à la part des "réels" ou composante résistive et où ( $\pm jX$ ) correspond à la part des "imaginaires" ou composante réactive. Cette composante peut être de forme capacitive lorsque est négative ( $-jX$ ) et de forme inductive lorsque est positive ( $+jX$ ).

Les effets de la longueur des brins du dipôle sur les composantes de l'impédance caractéristique sont les suivantes :



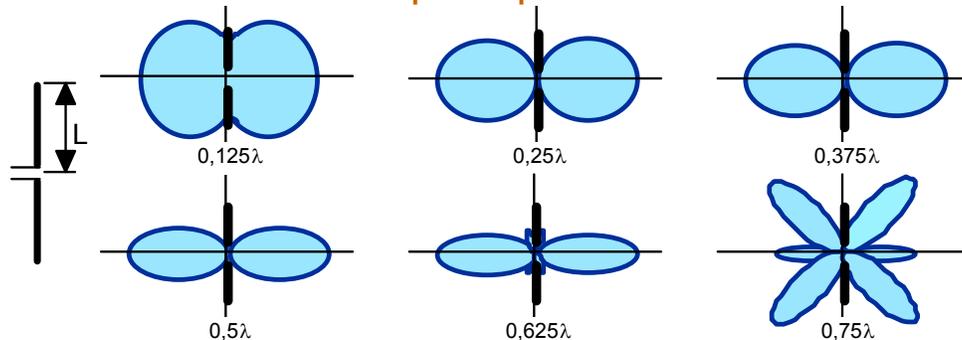
On peut remarquer qu'avec une longueur de  $0,25\lambda$  la part réactive est quasiment nulle et la part résistive est aux environs de 75 Ohms. C'est dans cette configuration, que l'antenne dipôle a une impédance caractéristique de 75 Ohms.

Les effets de la longueur des brins du dipôle sur le diagramme de directivité influent exclusivement sur le plan du champ magnétique (H). Le plan du champ électrique (E) reste omnidirectionnel.

Lorsque les brins sont plus grands que ceux du dipôle accordé ( $\lambda/4$ ) les lobes s'affinent et conjointement le gain augmente. Ensuite, des lobes secondaires se forment puis deviennent les lobes principaux. Le champ dans l'axe (ex) principal devient nul.

À l'inverse, lorsque la longueur des brins diminue par rapport à ceux du dipôle accordé ( $\lambda/4$ ), le champ en quadrature n'est plus nul, l'amplitude des lobes devient plus petite et conjointement le gain diminue.

### Diagramme de rayonnement Plan Vertical- dipôle en polarisation verticale

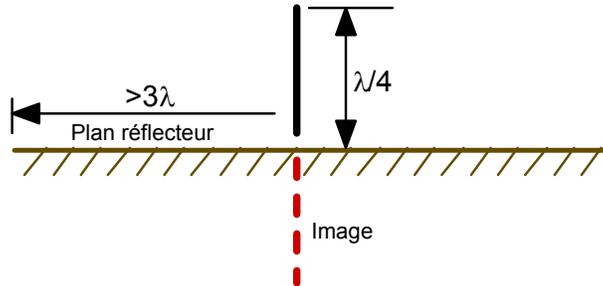


Des variantes de l'antenne dipôle corrigent certaines insuffisances de cette dernière telles que l'impédance caractéristique ou le mode de raccordement symétrique. En effet, pour être compatible avec les câbles coaxiaux, ce type d'antenne nécessite la mise place d'un transformateur/symétriseur.

### 2.11.2.Monopôle

L'antenne "monopôle" est une demi-antenne dipôle. Théoriquement elle est constituée d'un brin placé au-dessus d'un réflecteur de dimension infinie. En pratique, un fouet quart d'ondes placé au-dessus d'un plan métallique de grande dimension (par rapport à la longueur d'ondes, 2 à 3 $\lambda$  au minimum), la cellule métallique d'ULM par exemple, peut être assimilée à ce modèle.

Selon la "théorie des images", l'antenne monopôle fonctionne comme une antenne dipôle, l'image du monopôle reconstituant la part manquante du dipôle.



Ses caractéristiques générales sont identiques à celles de l'antenne dipôle à l'exception de :

- Impédance caractéristique nominale 37,5 Ohms
- Mode de raccordement **dissymétrique**
- Polarisation préférentielle verticale ou horizontale

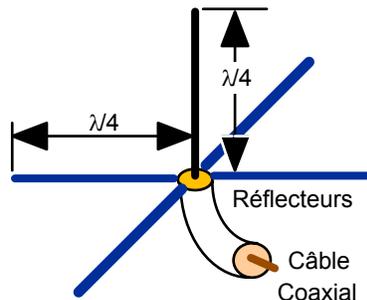
Ce type d'antenne peut être raccordé directement à un câble coaxial.

Pour être exploitée efficacement, elle doit être associée à un transformateur d'impédance 37,5/50 Ohms.

Sans cet équipement, elle auto-génère un R.O.S. de 1,33. Cette valeur est acceptable, les pertes étant  $< 0,1$ dB (rendement de 98%.) et l'équipement à bord peut -être réalisé sans cet accessoire.

### 2.11.3.Groundplane

L'antenne "Groundplane" (plan de terre) est une antenne monopôle pourvue d'un plan réflecteur accordé. Celui-ci est fréquemment constitué de 4 brins placés en quadrature et longs de 0,25  $\lambda$ .



Ses caractéristiques générales sont identiques à celles de l'antenne dipôle à l'exception de :

- Impédance caractéristique nominale 37,5 Ohms
- Mode de raccordement **dissymétrique**
- Polarisation préférentielle verticale (à cause de sa morphologie)

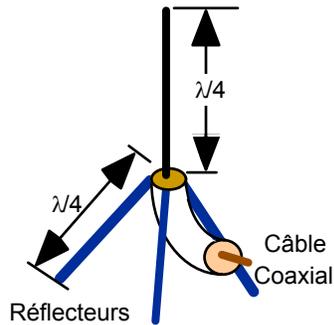
Ce type d'antenne peut être raccordé directement à un câble coaxial.

Sa morphologie la prédestine aux installations à terre où elle est généralement équipée par construction, d'un transformateur d'impédance 37,5/50 Ohms.

### 2.11.4.Jupe conique

L'antenne "jupe conique" est une antenne monopôle pourvue d'un plan réflecteur accordé. Elle correspond au compromis physique et électrique entre l'antenne "Groundplane" qui a une impédance caractéristique

nominale de 37,5 Ohms et l'antenne à "jupe cylindrique" qui a une impédance caractéristique nominale de 75 Ohms. Le plan réflecteur est fréquemment constitué de 3 brins inclinés à 60° et longs de  $0,25\lambda$ . Cette configuration, mécaniquement très simple à réaliser, lui confère des caractéristiques techniques intéressantes et notamment une impédance caractéristique nominale de 50 Ohms.



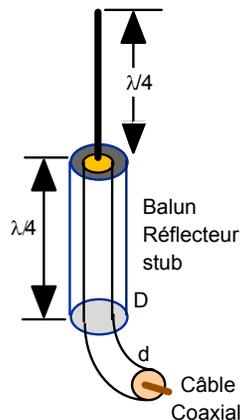
Ses caractéristiques générales sont identiques à celles de l'antenne dipôle à l'exception de :

- Impédance caractéristique nominale **50 Ohms**
- Mode de raccordement **dissymétrique**
- Polarisation préférentielle **verticale (à cause de sa morphologie)**

Ce type d'antenne peut être raccordé directement à un câble coaxial sans accessoire tel que transformateur/symétriseur. Sa morphologie la prédestine aux installations à terre. C'est ce type d'antenne qui équipe souvent les stations de base.

### 2.11.5. Jupe cylindrique

L'antenne "à jupe cylindrique" est une antenne monopôle pourvue d'un "balun" accordé. Ce balun a une fonction de transformateur /symétriseur et constitue le plan réflecteur. Il est réalisé à l'aide d'un tube long de  $0,25\lambda$  placé autour de l'arrivée coaxiale. Ce tube est en court-circuit côté alimentation et en circuit ouvert côté câble coaxial. Cet ensemble constitue avec la gaine extérieure du câble une structure coaxiale baptisée "Stub". La bande passante du dispositif est assujettie au rapport des diamètres D et d.



Ses caractéristiques générales sont identiques à celles de l'antenne dipôle à l'exception de :

- Impédance caractéristique nominale **75 Ohms**
- Mode de raccordement **dissymétrique**
- Polarisation préférentielle **verticale (à cause de sa morphologie)**

Ce type d'antenne se raccorde directement à un câble coaxial.

Sa morphologie la prédestine aux installations à terre où elle est généralement équipée par construction, d'un transformateur d'impédance 75/50 Ohms. Par ailleurs, sa morphologie et ses dimensions présentent un intérêt indéniable pour nos avions comme nous le verrons dans le chapitre consacré à la pratique.

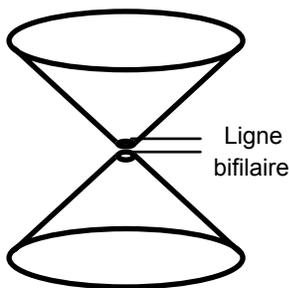
C'est en fait, malgré son impédance caractéristique nominale de 75 Ohms, l'antenne la plus appropriée à nos installations embarquées. A bord, elle peut-être installée en faisant l'économie du transformateur d'impédance 75/50 Ohms, équipement de fabrication complexe, qui n'apporterait que 4% de rendement en plus.

## 2.12. Autres antennes dérivées

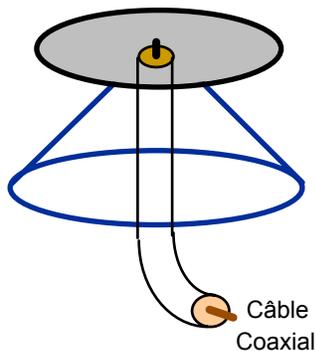
On peut citer quelques antennes dérivées de l'antenne dipôle :

- L'antenne "biconique" est une antenne dipôle dont les brins sont énormément grossis dans le but d'élargir notablement la bande passante. Pour cela chaque brin est conique. Son mode de raccordement est symétrique et implique l'association avec un transformateur/symétriseur. Elle peut être placée en polarisation verticale comme horizontale,
- L'antenne "discone" est un hybride entre l'antenne groundplane et l'antenne biconique. Ce type d'antenne est très couramment utilisé à terre dans les stations de base professionnelles. Sa morphologie la prédestine à la polarisation verticale,
- L'antenne "yagi" est une antenne dipôle associée à des brins réflecteurs et des brins directeurs placés sur le même axe et dans le même plan. Cette configuration lui confère une directivité unidirectionnelle et un gain important. C'est l'antenne de prédilection à la réception TV hertzienne.

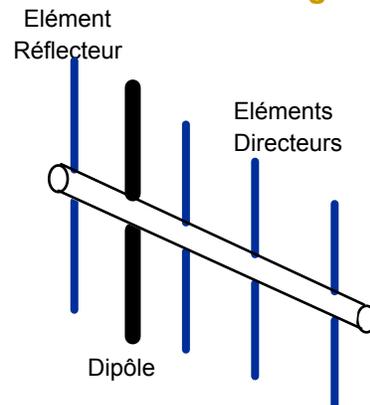
### Antenne Biconique



### Antenne Discone



### Antenne Yagi



## 3. Et maintenant la pratique

### 3.1. Caractéristiques des émetteurs/récepteurs portables bande aviation

Les ULM sont le plus souvent équipés de postes émetteurs/récepteurs portables, même si cette tendance évolue avec les nouveaux 3 axes haute gamme hyper-équipés.

Les principales caractéristiques techniques des portables sont les suivantes :

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| • Gamme de fréquences :              | 118-136,975MHz (135,975MHz pour les anciens modèles) |
| • Nombre de canaux                   | 760 (720 pour les anciens modèles)                   |
| • Espacement entre canaux            | 25 kHz   |
| • Polarisation                       | verticale  |
| • Modulation                         | A3E (modulation d'amplitude)                         |
| • Impédance caractéristique nominale | 50 Ohms  |
| • Connecteur de sortie               | BNC femelle  |
| • Puissance de sortie antenne        | 1,5 W moyen - 5 W crête/crête avec modulation à 85%  |
| • Sensibilité en réception           | 1µV pour 6 dB de S/B et modulation de 1 kHz 30%      |
| • Alimentation                       | 12V  |

## 3.2. Conception des antennes

### 3.2.1. Définition du besoin

Nos antennes doivent répondre aux critères suivants et à la recherche du meilleur compromis possible entre eux, lorsque des dérives de caractéristiques doivent être retenues :

- **Généraux**

|               |  |
|---------------|--|
| Pondéral      | le plus léger possible                   |
| Aérodynamique | faible prise au vent                     |
| Coût          | bon marché                               |
| Conception    | réalisation simple et installation aisée |

- **Radioélectriques**

|                                    |                                  |
|------------------------------------|----------------------------------|
| Fréquence centrale                 | 127 MHz                          |
| Bande passante pour un R.O.S. <2   | 118 - 137 MHz                    |
| Impédance caractéristique nominale | 50 Ohms                          |
| R.O.S.                             | < 2 sur la bande                 |
| Directivité                        | omnidirectionnelle en azimut     |
| Polarisation                       | verticale                        |
| Gain                               | 2,15 dB <sub>iso</sub> (ou plus) |
| Mode de raccordement               | dissymétrique                    |
| Connecteur                         | BNC mâle                         |

- **Compatibilité ElectroMagnétique (C.E.M.)**

Dans les aéronefs et dans les ULM en particulier, le principal générateur de parasites est le moteur et notamment le circuit d'allumage. Les parasites sont conduits et rayonnés. Les circuits d'alimentation des émetteurs/récepteurs sont pourvus de filtres éliminant la quasi-totalité des parasites conduits. Les parasites rayonnés sont collectés par l'antenne et malgré des filtres spécifiques (ANL), ils restent sensibles voire gênants dans certaines configurations. C'est pour cette raison qu'il est toujours judicieux de choisir un point d'installation de l'antenne le plus éloigné possible du moteur.

### 3.2.2. Modèles

#### 3.2.2.1. ULM à structure métallique

Pour les ULM à structure métallique, c'est à dire pourvu d'un revêtement métallique de surface importance une antenne type monopôle convient parfaitement. Le brin d'antenne doit être le plus vertical et éloigné du moteur.



### 3.2.2.2. ULM à structure composite et tube/toile

Pour les ULM à structure composite, stratifié de verre polyester, époxy ou carbone époxy, ainsi que les tubes/toiles, l'antenne peut-être du type dipôle avec transformateur/symétriseur ou jupe cylindrique. Les brins d'antenne doivent être les plus verticaux possible et éloignés du moteur. Généralement, l'extrémité des ailes se prête bien à installation d'antennes de ce type.

L'antenne dipôle a une prise au vent double de celle du monopôle et sans transformateur d'impédance, les pertes de désadaptation sont plus élevées tout en restant très acceptable (4% au lieu de 2% soit 0,2 dB au lieu de 0,1 dB).

L'antenne à jupe cylindrique est plus simple à réaliser et plus performante.

### 3.2.2.3. ULM pendulaire

La morphologie des pendulaires les limite généralement aux antennes à jupe cylindrique. Le brin d'antenne doit être le plus vertical possible et éloigné du moteur.

L'implantation de l'antenne est plus délicate que sur les multiaxes. L'avant de la poutre principale est souvent utilisé. Certains l'installent sur le nez de l'aile ce qui implique de modifier le cache ou au sommet du mâtereau de l'aile ce qui nécessite un hauteur du hangar importante.

### 3.2.2.4. Paramoteur

Là, je ne connais pas de solution élégante et le portable muni de son embryon d'antenne souple reste la solution la mieux adaptée à ce type d'aéronef.

L'antenne fournie avec le portable est du type "hélice à mode normal". Elle est constituée d'un fil d'acier inox spiralé recouvert d'une gaine en caoutchouc et raccordé à un connecteur BNC mâle. Ce type d'antenne de faibles dimensions a évidemment un rendement mauvais. Le R.O.S. est élevé, le gain est faible et le diagramme de directivité normalement torique, est sensible aux changements d'environnement.

## 3.2.3. Réalisation

### 3.2.3.1. Antenne monopôle

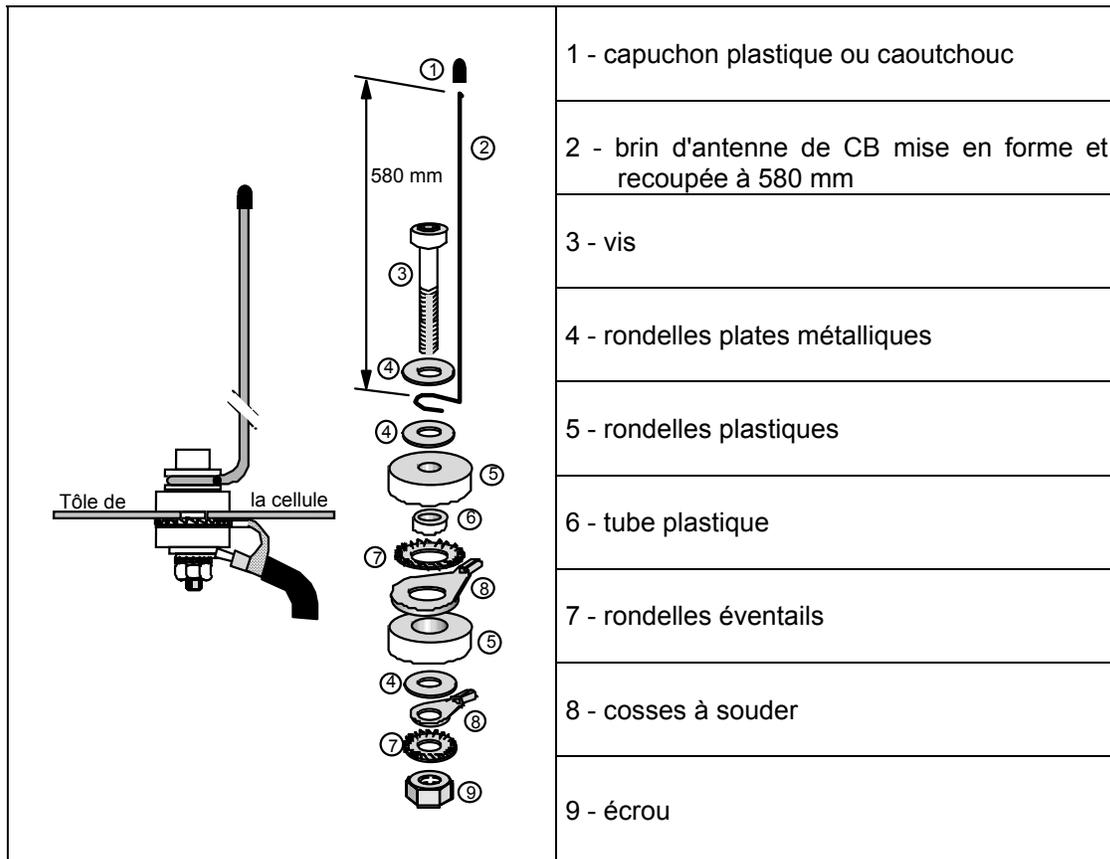
La méthode la plus simple consiste à acheter une antenne radio d'automobile. Toutefois, le brin d'antenne doit être long de 600 mm au minimum et totalement dépourvue de ressort (les constructeurs automobile installent de plus en plus souvent des antennes courtes réalisées à l'aide fils enroulés en spirale. Ces derniers modèles ne sont pas utilisables pour nos réalisations.

Le brin doit être recoupé à 580 mm et le capuchon de protection qui équipe généralement ces antennes doit être placé à la nouvelle extrémité du brin d'antenne. Le dispositif de raccordement, généralement fourni, doit aussi être récupéré et le câble coaxial doit être changé. En effet, l'impédance des câbles coaxiaux qui équipe les antennes autoradio grand public (RG 62) est de 93 Ohms. Il faut le remplacer par du RG58 équipé à son extrémité d'un connecteur BNC mâle.

Le monopôle peut être aussi facilement réalisé à partir de brin d'antenne de CB, d'une vis, d'un écrou et de rondelles en matière plastique.

Les matériaux de base sont :

- De l'imagination et de l'huile de coude,
- Brin de rechange d'antenne de CB ou fil d'acier inoxydable  $\varnothing$  2.5 mm mis en forme et à longueur. Ce brin peut être recouvert d'un manchon de gaine thermorétractable de couleur vive,
- Vis et écrou M6 en acier inoxydable,
- Rondelles plates adaptées aux différents diamètres,
- Rondelles éventails adaptées aux différents diamètres. Elles garantissent un contact intime entre les pièces,
- Cosses à souder adaptées aux différents diamètres,
- Rondelles en Polyéthylène, Rilsan ou PVC adaptées aux différents diamètres,
- Tube en Polyéthylène, Rilsan ou PVC adapté aux différents diamètres,
- Capuchon en plastique, caoutchouc ou gaine thermorétractable.
- Câble coaxial RG 58,
- Connecteur BNC mâle droit ou coudé selon la configuration de l'installation.

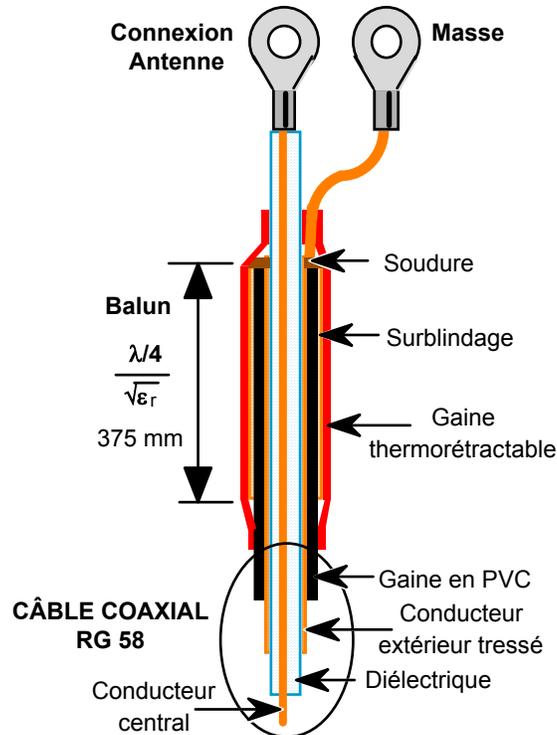


**Monopôle placée sous la partie métallique de la cellule d'un multiaxe**

### 3.2.3.2. Balun

Le balun doit être associé obligatoirement aux dipôles ainsi qu'aux antennes monopôles installées sur des structures tubes/toiles ou composite (y compris sur les composites en fibres de carbone qui restent de mauvais conducteurs). En fait, la mise en place systématique d'un balun, quelle que soit la structure, ne peut-être bénéfique. Ce dispositif bloque "les courants de gaine" et de ce fait stabilise le R.O.S. et le rendement de l'antenne.

La réalisation d'un balun est extrêmement aisée comme le montre le croquis suivant.



Un surblindage placé autour de la gaine extérieure en PVC est raccordé par soudure à l'étain au conducteur extérieur du câble coaxial. Cette connexion doit être réalisée à l'aplomb du raccordement avec l'antenne. L'autre extrémité doit rester isolée. Ce surblindage est constitué d'un morceau de conducteur extérieur récupéré sur un tronçon de câble coaxial. Sa structure tressée permet, en le retroussant, d'augmenter son diamètre afin de pouvoir l'enfiler par dessus la gaine extérieure en PVC du câble coaxial. Ensuite, après l'avoir ramené au diamètre de la gaine PVC du câble coaxial, le surblindage est mis à longueur puis recouvert d'une gaine thermorétractable qui assure sa protection mécanique, son maintien et la finition de l'ensemble. L'autre extrémité du câble est équipée d'un connecteur BNC mâle droite ou coudée selon la configuration.

Le balun doit avoir une longueur de  $\lambda/4$ . La longueur mécanique  $L_m$  doit tenir compte de "la vitesse de propagation" dans le diélectrique, en l'occurrence du PVC.

La vitesse de propagation dépend de la permittivité du matériau qui est caractérisée par la constante diélectrique  $\epsilon_r$ . De ce fait, en présence d'un diélectrique, la longueur mécanique est obtenue en appliquant la formule suivante :

$$L_m = \frac{\lambda/4}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

La constante diélectrique  $\epsilon_r$  du PVC est de l'ordre de 2,50 ce qui permet de déterminer une longueur de balun de 375 mm.

### 3.2.3.3. Antenne dipôle

Constituée de deux monopôles associés, l'un est raccordé au conducteur central du câble coaxial, l'autre est raccordé à la gaine tressée de ce dernier. Un balun, peu visible sur la photo, assure la fonction transformateur/symétriseur. Ce modèle peut-être installé sur les multiaxes ailes hautes.



#### 3.2.3.4. Antenne à jupe cylindrique

C'est tout simplement une antenne monopôle associée à un balun. Sur les deux exemples ci-dessous, les baluns sont visibles au niveau de la connexion de l'antenne. On les distingue, gaine (thermorétractable) rouge sur le pendulaire et gaine bleue sur le multiaxe. Cette antenne est le modèle **Passe-Partout**.



### 3.2.4. Installation

L'installation doit, dans la mesure du possible, répondre aux critères suivants :

- L'antenne doit être la plus éloignée possible du moteur (C.E.M),
- Le câble coaxial doit être le plus court possible, ce qui implique que l'antenne doit être le plus près possible de l'émetteur/récepteur, (contrairement à une certaine rumeur sans fondement technique, le câble coaxial peut-être raccourci et mis à longueur),
- Le brin d'antenne doit être le plus vertical possible,
- L'installation doit être aisée,
- L'antenne et son raccordement doivent rester accessibles,
- L'antenne doit être éloignée, autant que faire se peut, des structures métalliques verticales (afin de limiter les déformations du diagramme de directivité).

La connexion de masse au point de jonction surblindage/gaine extérieure du câble coaxial peut être ou ne pas être raccordée à la masse de l'aéronef. Cette décision doit être prise à la suite d'essais radio en vol. La configuration la plus favorable (absence ou minimum de parasites) sera retenue. Si le raccordement de la connexion de masse s'impose, celle-ci doit être la plus courte possible.

### 3.2.5. Contrôle

Lorsque les dimensions du brin rayonnant et du balun sont respectées, ce type d'antenne est optimisé pour fonctionner à 127 MHz et a un excellent rendement de 118 à 137 MHz.

Le contrôle élémentaire consiste à vérifier, à l'aide d'un multimètre en position ohmmètre la continuité entre la broche centrale de la connecteur BNC et le brin d'antenne et l'absence de court circuit entre cette même broche et la masse du coaxial.

Sans être indispensable, une mesure de l'adaptation d'impédance à l'aide d'un ROSmètre (encore souvent appelé à tort TOSmètre) permet de valider l'installation. Toutefois les réserves suivantes doivent être formulées :

- Le ROSmètre doit fonctionner dans la bande aviation (les ROSmètre de CB ne sont pas compatibles. Ils fonctionnent dans la bande des 27 MHz et leur utilisation dans la bande aviation, donne des résultats totalement erronés).
- La proximité du sol modifie des caractéristiques de l'antenne et l'idéal consiste à effectuer la mesure en vol (avec un pilote et un manipulateur évidemment).

### 3.2.6. Obligations réglementaires

Les obligations réglementaires sont les suivantes :

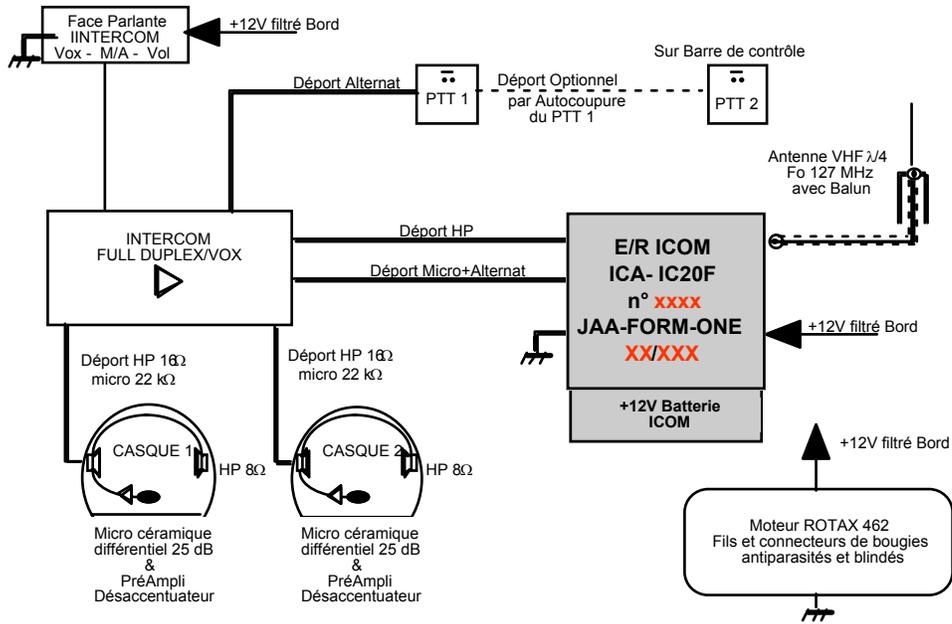
- Être détenteur, au minimum, de la qualification de radiotéléphoniste, mention à faire inscrire sur le brevet et licence de pilote d'ULM,
- L'émetteur/récepteur doit être homologué STNA et le certificat de conformité (JAA Form One) en cours de validité,
- L'entretien et la vérification de l'émetteur/récepteur doivent être faits dans un centre agréé. Pour les ULM qui utilisent des émetteurs/récepteurs portables l'installation à bord ne subit pas cette obligation.
- Avoir **obligatoirement à bord** l'original de la Licence de Station d'Aéronef L.S.A.

La demande de L.S.A. doit être adressée au district aéronautique avec les documents suivants :

- Copie recto-verso de la carte d'identification de l'ULM,
- Copie de la facture d'achat de l'émetteur/récepteur,
- Copie du certificat de conformité, JAA Form One de l'émetteur/récepteur,
- Synoptique de l'installation à bord,
- Schéma d'implantation à bord.

Des exemples de synoptique d'installation et de schéma d'implantation à bord sont donnés ci-après :

ULM AIR CREATION GTI CHRONOS 14 - IDENTIFICATION **XXXX**  
 SYNOPTIQUE RADIO EMBARQUEE



**SCHEMA D'IMPLANTATION À BORD**

