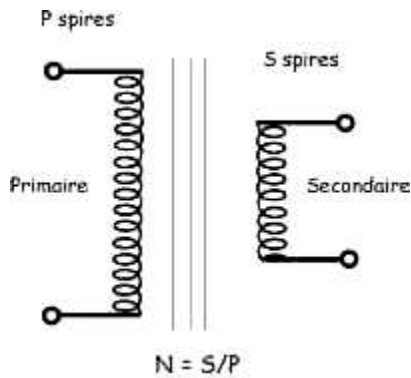


Transformateurs, adaptateurs d'impédance et symétriseurs - Application aux antennes.

Rappel sur les transformateurs



Voici le schéma classique d'un transformateur. Le bobinage primaire et le bobinage secondaire sont séparés mais couplés magnétiquement. Le couplage est amélioré par un noyau magnétique symbolisé ici par 3 traits verticaux. Ce noyau peut être constitué par du fer ou tout autre matériau magnétique (ferrite ou autres).

Le bobinage primaire est composé de P spires, le secondaire de S spires et le rapport $N = S/P$ est appelé rapport de transformation. Si l'on applique un courant alternatif au bobinage primaire de tension V_p Volts on mesurera aux bornes de l'enroulement secondaire une tension V_s proportionnelle au rapport de transformation. On écrira :

$$V_s/V_p = N \text{ ou } V_s = V_p \cdot N$$

Par exemple : si V_p est égal à 220 Volts et $N = 0,1$, V_s sera égal à 22 Volts.

En effectuant des mesures très précises on verra que V_s est légèrement inférieur à 22 Volts car aucun transformateur n'est parfait.

Dans la suite de l'exposé nous considérerons pour la commodité des explications que tous les transformateurs sont parfaits. Dans ce cas, l'énergie fournie au primaire sera égale à l'énergie recueillie au secondaire. Comme l'énergie, (exprimée en joules, en KWh...) est égale à la puissance multipliée par le temps ($E = P \cdot t$), on pourra écrire que **Puissance primaire = Puissance secondaire**, mais aussi $V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s$, I_p étant l'intensité circulant dans le circuit primaire et I_s celle du secondaire.

On peut également écrire : $I_p/I_s = V_s/V_p = N$

Si l'on appelle Z_p et Z_s les impédances des enroulements on pourra écrire

$$V_p = Z_p \cdot I_p \text{ et } V_s = Z_s \cdot I_s$$

Mais aussi :

$$Z_p \cdot I_p \cdot I_p = Z_s \cdot I_s \cdot I_s \text{ ou mieux } Z_p \cdot I_p^2 = Z_s \cdot I_s^2$$

$$\text{On en déduit que } Z_s/Z_p = I_p^2/I_s^2 = N^2$$

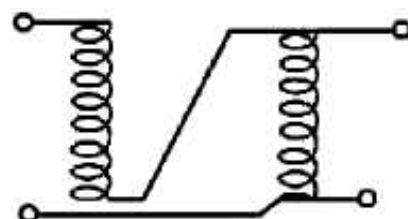
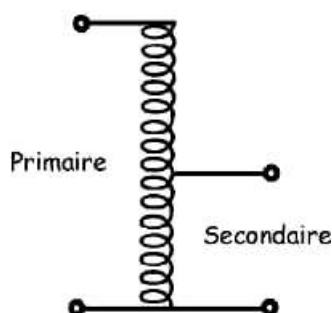
Dans un transformateur parfait le rapport des tensions entre le primaire et le secondaire est égal au rapport de transformation. **Le rapport des impédances est égal au carré du rapport de transformation.**

Dans l'exemple précédent, si : $I_s = 1 \text{ A}$, $Z_s = 22 \text{ Ohms}$, $I_p = 0,1 \text{ A}$ et $Z_p = 2200 \text{ Ohms}$.

Vérification : $2200 \times 0,1 \times 0,1 = 22 \times 1 \times 1$ ou $2200 / 100 = 22$

Transformateurs et autotransformateurs

Nous avons vu que les transformateurs possédaient un ou des enroulements primaires et un ou des enroulements secondaires séparés. C'est obligatoire par exemple pour les transformateurs d'alimentation en basse tension (sécurité des usagers). On s'est aperçu qu'il était parfois possible d'économiser du fil de bobinage en utilisant des spires communes pour le primaire et le secondaire : c'est le principe de l'autotransformateur. Tous les transformateurs d'impédance utilisés dans le couplage des antennes seront des autotransformateurs. En fait, l'autotransformateur est constitué par un seul grand bobinage muni de prises intermédiaires. Dans la pratique, pour améliorer l'induction magnétique et se rapprocher de la perfection, on va bobiner les diverses parties de l'enroulement les unes sur les autres. C'est ce que l'on appelle dans les ouvrages consacrés à ce sujet « bobiner avec 2 fils en main » par exemple.

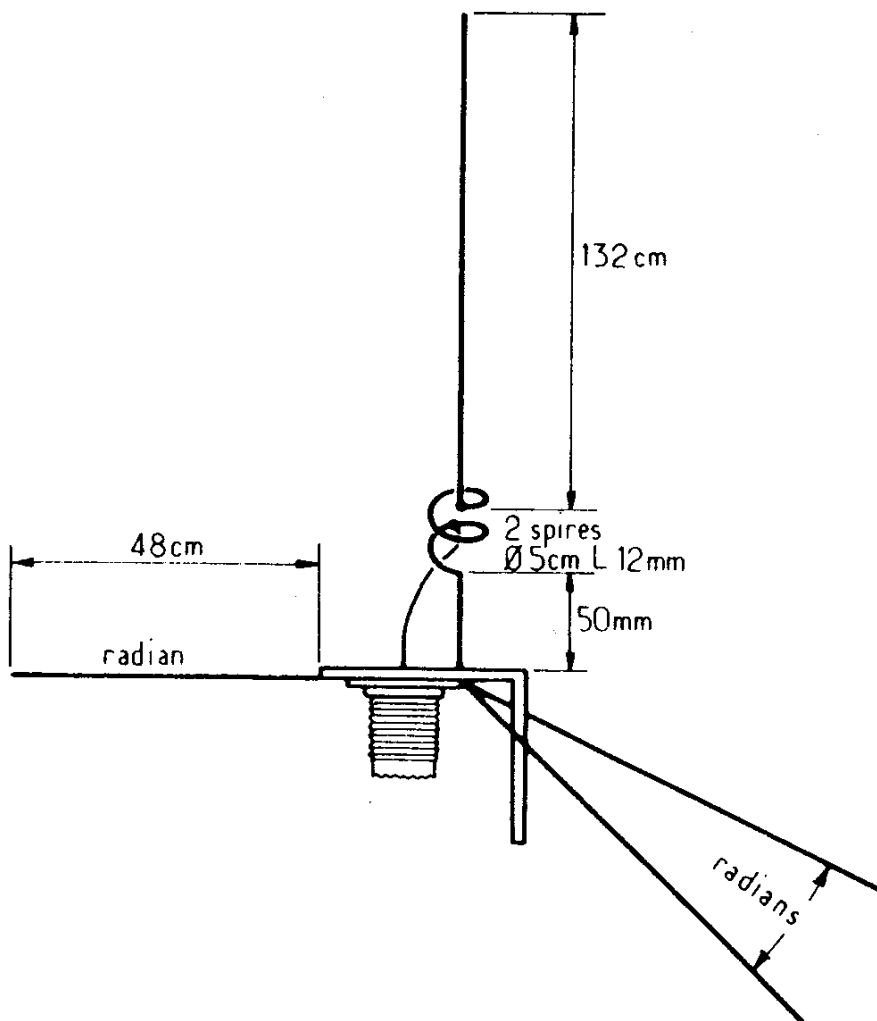


Les deux schémas ci-dessus sont les mêmes, celui de gauche est le schéma théorique et celui de droite le schéma « pratique ». C'est toujours ce dernier schéma qui est représenté dans les ouvrages. Je ne trouve pas que ce soit le plus simple à comprendre, surtout quand les schémas se complexifient en particulier lorsqu'on aborde les notions de symétrie / asymétrie.

Application pratique : adaptation d'impédance d'un fouet vertical.

Beaucoup d'OM ont certainement réalisé des montages sans prendre conscience qu'ils fabriquaient des transformateurs d'impédance. Voici une antenne décrite dans le livre : « Les antennes » de Brault et Piat (13^{ème} édition page 338, fig. VII-12a). Sa réalisation est facile et son fonctionnement apparemment garanti.

Il s'agit d'un fouet 5/8 d'onde pour la bande 144-146 Mhz.



La partie qui nous intéresse se situe au niveau des 2 spires à la base. Les auteurs préconisent pour régler l'antenne avec un ROS de 1:1 de procéder empiriquement par essais successifs en déplaçant le fil souple partant de l'âme de la prise PL sur les spires, puis en réduisant progressivement la longueur du fouet.

Il me semble légitime de penser (même si le bobinage sert en premier à compenser la composante capacitive des antennes 5/8) que la partie de l'enroulement allant de la masse jusqu'au point de soudure constitue le primaire d'un autotransformateur chargé par les 50 Ohms du coaxial (et du TX), le secondaire étant constitué par les deux spires entières reliées à l'antenne dont l'impédance est certainement supérieure à 50 Ohms (Davantage de spires qu'au primaire). Dans ce cas nous dirons que le transformateur d'impédances est **asymétrique/asymétrique** car le coaxial et le fouet 5/8 sont deux systèmes asymétriques dont la masse est commune. Expliquons

simplement la différence entre symétrique et asymétrique.

Symétrie et asymétrie

Tout d'abord il faut dire que symétrie s'entend par rapport à la masse qui est par définition constituée par l'ensemble des points ayant 0Volt comme potentiel.

- Si l'on mesure la tension en chaque point d'un signal asymétrique, on constatera qu'elle est toujours positive (ou toujours négative) par rapport à la masse.

- Si l'on mesure la tension en chaque point d'un signal symétrique, on constatera que la moitié des points est à un potentiel positif et l'autre moitié à un potentiel négatif (Par rapport à la masse, évidemment).



La figure ci-contre illustre cette explication. Le signal de gauche sera toujours positif, on dit qu'il aura une composante continue. En électronique on peut éliminer cette composante, entre des étages d'amplification par exemple, en insérant un condensateur de valeur appropriée (Calculée en fonction de la fréquence du signal et de l'impédance des étages).

Exemple : le signal fourni par un amplificateur construit autour d'un transistor monté en émetteur commun est asymétrique. En revanche, le signal à la sortie d'un ampli opérationnel est symétrique mais ce composant nécessite une alimentation positive et une alimentation négative.

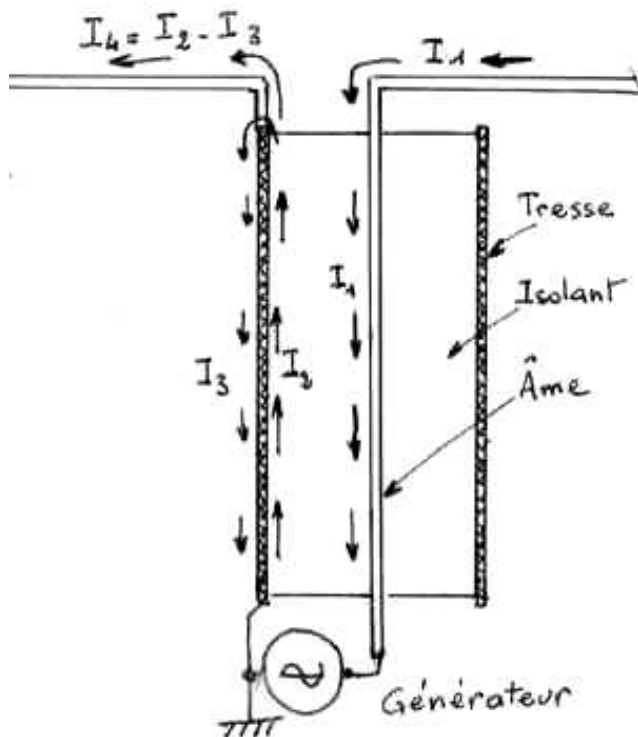
Le signal émis par un TX et véhiculé par un câble coaxial, asymétrique par construction à la différence des lignes bifilaires, sera asymétrique bien entendu. Le connecter à une antenne symétrique comme un doublet demi-onde n'aura pas de conséquences fâcheuse pour les équipements, mais aura tendance à générer des perturbations radioélectriques en particulier dans les postes de télévision (TVI).

Pour cette raison on a imaginé des dispositifs de symétrisation appelés « BALUNS » par les anglosaxons : ce mot signifie BALANCED/UNbalanced, c'est à dire symétrique/asymétrique. Comme ces BALUNS sont construits à partir d'enroulements, il sera commode, le cas échéant de combiner symétrisation et adaptation d'impédance.

Pourquoi faut-il utiliser des baluns ?

Pour comprendre ce qui se passe quand on alimente un doublet (symétrique) par un coaxial (asymétrique) il faut observer la circulation des courants dans le système.

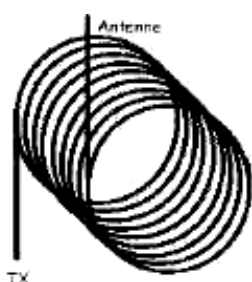
Voici l'explication simple donnée par L'ARRRL Antenna Book :



Le schéma représente une portion de coaxial reliée d'une part à un générateur HF (TX) et d'autre part à un doublet demi-onde. On constate un phénomène singulier : le courant circulant dans la tresse de masse se partage en I_2 qui passe du côté intérieur de la tresse se dirigeant vers une des branches du doublet, et I_3 qui revient vers le générateur par le côté extérieur de la tresse.

L'existence du courant I_3 a deux conséquences. La première est que le doublet ne sera pas très bien alimenté, mais ce n'est pas très grave. La seconde, plus ennuyeuse, est que le coaxial va rayonner à la manière d'un long fil et va causer ainsi des interférences radioélectriques qui peuvent être ennuyeuses pour les téléviseurs avoisinants.

Les systèmes de symétrisation sont de plusieurs sortes. Il y a les systèmes en courant et les systèmes en tension. Les auteurs de l'ARRRL Antenna Book semblent privilégier les systèmes en courant et les auteurs français les systèmes en tension. Il existe également un problème de bande passante .



Nous nous intéresserons ici à des systèmes à large bande passante., dont voici le plus aisé à construire dans la mesure où il consiste seulement en une façon particulière de disposer le câble coaxial.

Il s'agit d'un balun en courant (fig. ci-contre)

Pour éliminer le courant parasite I_3 , une des façons les plus simples et les plus connues est de fabriquer un « choke-balun » ou « balun de choc » dans le sens où l'on dit « une self de choc ».

Pour cela, il suffit d'enrouler le coaxial près de l'antenne afin de réaliser une bobine à spires bien régulières de 20 à 30 cm de diamètre et comportant de 8

à 10 spires.

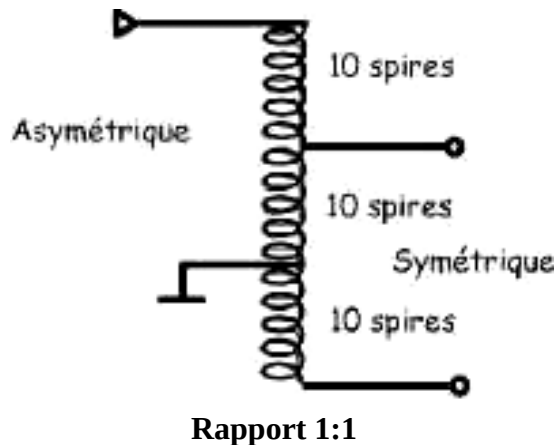
L'inductance de cet enroulement va opposer au courant I_3 une très forte impédance et l'éliminer ainsi en très grande partie. Il n'y a pas d'influence sur les courants I_1 et I_2 . Toute la difficulté de la réalisation consiste à faire tenir les spires en place et à supporter le poids de l'enroulement.

En plus, 10 spires de 30 cm font quand même de 9 à 10 mètres de câble supplémentaire avec les pertes supplémentaires en cas de ROS.

Les symétriseurs et adaptateurs d'impédance sur noyau magnétique

Il s'agira d'auto-transformateurs dont les spires sont enroulées sur des barreaux ou des tores de matériau magnétique. De nombreux ouvrages ou revues ont publié de tels montages. Le propos ici est d'en expliquer le fonctionnement le plus simplement possible.

Le principe du symétriseur



Le schéma ci-contre décrit un symétriseur simple, sans adaptation d'impédance. On dit que c'est un « balun 1:1 ». S'il n'y a pas de transformation d'impédance, il faut, bien évidemment, que le nombre de spires du primaire soit égal au nombre de spire du secondaire.

- C'est bien le cas ici : il y a 20 spires au primaire et 20 au secondaire. La symétrisation est réalisée par une disposition particulière des enroulements.
- Au primaire (asymétrique) la masse est située à une extrémité de l'enroulement.
 - Au secondaire (symétrique) la masse (commune) est située au milieu de l'enroulement.

Lorsqu'on a compris cela, on est en mesure de fabriquer tous les baluns que l'on désire, avec tous les rapports de transformation possibles. Il suffira d'adapter le nombre de spires au secondaire en respectant les principes énoncés au début de l'article.

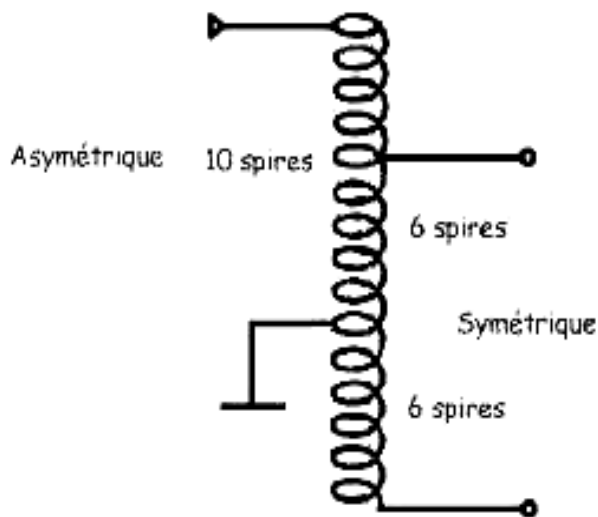
Les symétriseurs adaptateurs d'impédance

Maintenant que les principes sont établis il nous faut calculer le rapport du nombre de spires afin de construire le balun qui nous intéresse. Voici un tableau qui répond à la question. Nous avons pris parti de donner 10 spires au primaire asymétrique venant du TX.

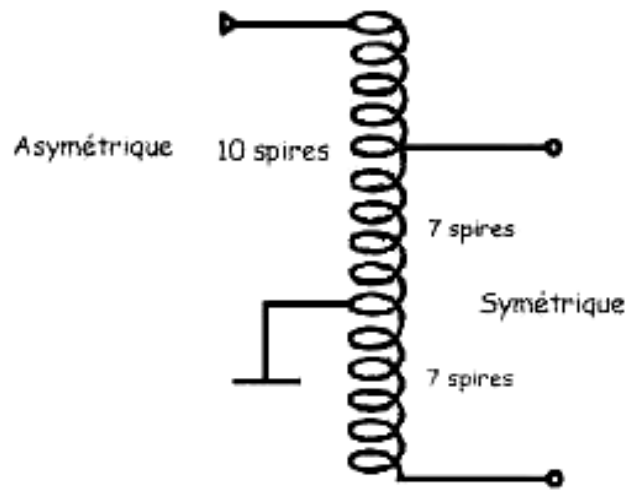
On utilisera pour les enroulements, par exemple, le tore de Micrometals (rouge) T200-2 de 2 pouces de diamètre extérieur (50,8 mm). Ne prenez pas plus petit comme tore, ne tombez pas dans l'excès de certains coupleurs commerciaux !!! Vous pouvez aussi assembler deux tores pour en augmenter la section magnétique.

Rapport de transformation	Nombre de spires au primaire et impédance	Rapport nombre spires primaire/secondaire	Nombre de spires au secondaire et impédance
1:1	10 - 50Ω	1	10 - 50 Ω
1:1,5	10 - 50Ω	1,225	12 - 75 Ω
1:2	10 - 50Ω	1,414	14 - 100 Ω
1:4	10 - 50Ω – 75 Ω	2	20 - 200 Ω - 300 Ω
1:6	10 - 50Ω	2,45	25 - 300 Ω
1:9	10- 50Ω	3	30 - 450 Ω

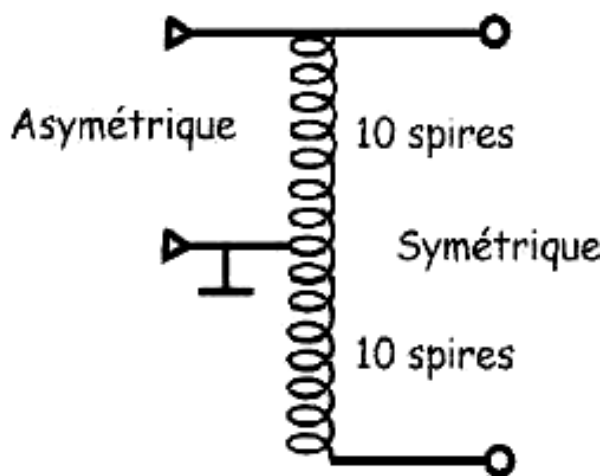
Les rapports sont ceux qui correspondaient à toutes les impédances d'antennes les plus fréquemment rencontrées. Selon le nombre de spires au secondaire, les schémas vont être légèrement différents, le rapport 1:4 constituant un cas particulier car le nombre de spires au secondaire sera le double de spires du primaire. Pour expliciter cela voici quelques schémas.



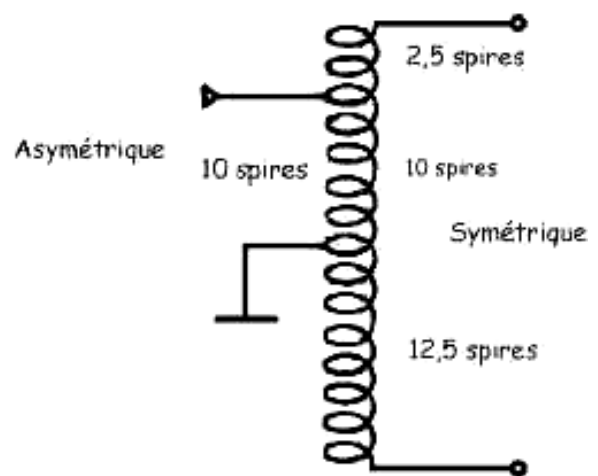
Rapport 1:1,5



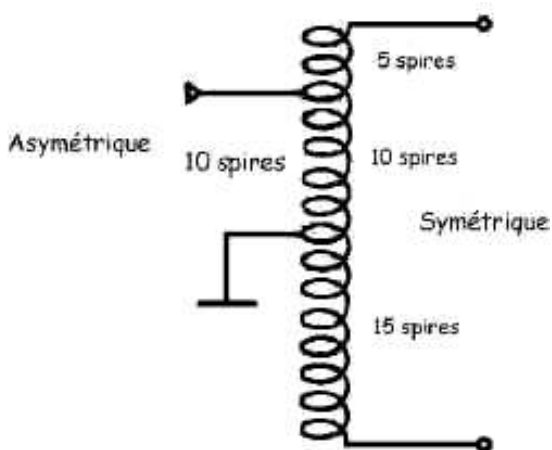
Rapport 1:2



Rapport 1:4



Rapport 1:6



Rapport 1:9

Réalisation pratique : quelques idées.

Le choix du nombre de spires au primaire. : Nous avons été étonnés à la lecture des divers ouvrages ou articles sur ce sujet, car ce nombre varie de 5 à 20 !

Bien que seul le rapport du nombre des spires influence le rapport de transformation, on ne peut pas faire n'importe quoi ! Imaginez un transformateur d'alimentation 220V/12V qui n'aurait qu'une dizaine de spires au primaire : c'est le court-circuit garanti !

Dans notre cas, le nombre de spires influe sur la bande passante du balun. Si l'on est un amateur de bandes basses, autant augmenter le nombre de spires et faire l'inverse pour les bandes hautes. Un nombre allant de 8 à 12 semble faire l'unanimité pour l'ensemble des bandes décadiques.

Comment enrouler les fils? Pour que les divers enroulements soient bien couplés, il est recommandé de les bobiner les uns sur les autres.

- Pour les rapports 1:1, 1:1,5 et 1:2 il nous semble commode de bobiner avec 3 fils en main puis d'effectuer les raccordements selon les schémas. Pour 1:1 les 3 enroulements auront le même nombre de spires. Pour les autres, on débutera 3 spires en main pour 4 ou 3 spires selon le cas, puis on continuera avec 2 fils en main pour 6 ou 7 spires.
- Pour le rapport 1:4 c'est très simple, on bobine avec deux fils en main des enroulements égaux.

- Pour les rapports supérieurs, il nous paraît judicieux de bobiner avec deux fils en main et d'effectuer une prise intermédiaire à 2,5 ou 5 spires du début de l'un des deux bobinages. Mais tout cela est affaire d'expérimentation...

- Les connexions entre bobinages se feront en observant les schémas ci-dessus.

Et le balun « universel » ? On peut tout à fait imaginer un balun qui pourrait avoir plusieurs rapports de transformation commutables. Il faudrait partir du schéma du balun de rapport 1:9 et rajouter des prises intermédiaires symétriquement par rapport à la masse puis utiliser un commutateur à deux circuits et autant de positions que nécessaire qu'il faudrait choisir de telle sorte qu'il puisse supporter des courants HF importants.

On pourrait également imaginer de conserver toujours le même nombre de spires au secondaire (symétrique) et faire varier le nombre de spires du primaire, sans toucher à la connexion de masse. Cela simplifierait la commutation ! A expérimenter !!! mais il me semble plus réaliste de construire un balun par antenne!

Voici à titre indicatif la gamme des tores MICROMETALS pour F = 1 à 100 MHz.

Tores MICROMETALS							
Couleur	Matériau	QRG	Type	Al	D	H	d
Rouge Red	2	1-30MHz	T20-2	27	5.0	1.8	2.2
			T37-2	40	9.5	3.2	5.2
			T50-2	49	12.7	4.8	7.6
			T68-2	57	17.5	4.8	9.4
			T94-2	84	24.0	8.0	14
			T200-2	120	50.8	14	32
Jaune Yellow	6	20-50MHz	T20-6	22	5.0	1.8	2.2
			T30-6	36	7.8	3.3	3.8
			T50-6	40	12.7	4.8	7.6
Jaune orangé	10	40-100MHz	T25-10	19	6.4	2.4	3.0
			T37-10	25	9.5	3.2	5.2
			T50-10	31	12.7	4.8	7.6
Vert Green	12	50-100MHz	T12-12	7	3.2	1.3	1.6
			T20-12	10	5.0	1.8	2.2
			T37-12	15	9.5	3.2	5.2
			T50-12	18	12.7	4.8	7.6
Formule de calcul: Nombre de tours = 100 X Racine carrée de (Inductance en nH / Al)							

En conclusion

Le sujet n'est bien sur pas épuisé et pour plus d'informations pratiques la lecture d'ouvrages spécialisés sur les antennes est bien sur conseillé. Si toutefois vous avez compris comment fonctionne un adaptateur d'impédance et un symétriseur d'antennes, le but est atteint, ce qui vous permettra d'expérimenter sans suivre aveuglément des « recettes de cuisine » trouvées ici ou là. Il est recommandé également la prudence dans vos essais : toujours passer en émission en puissance QRP, même si votre TX possède toutes les sécurités les plus récentes. L'idéal serait une analyse préalable à l'analyseur d'antenne pour les heureux possesseurs de cet équipement, mais dans le monde amateur, l'emprunt est bien sur toujours possible. Vous pourrez ainsi réaliser vos expériences sans risquer d'endommager votre matériel de transmission . Pour vérifier si le rapport de transformation est bien celui qui était attendu, chargez le secondaire avec des résistances au carbone ayant comme valeur l'impédance de l'antenne à alimenter. En connectant l'analyseur d'antenne au primaire vous pourrez lire l'impédance du montage : elle devra se rapprocher de 50 Ω dans toute la plage de fréquences prévue.

Si ce n'était pas le cas, modifiez vos bobinages, mais ne cherchez pas à obtenir 50 Ω juste, la précision serait illusoire!