Couplage d'un émetteur à une antenne par un circuit en T
Calculs théoriques et pratiques

Depuis les tout premiers débuts de la radio, le couplage de l'étage de sortie des émetteurs au système antennaire (ligne + antenne) a fait l'objet de soins particuliers, et ceci pour plusieurs raisons :
-optimiser le transfert de puissance vers l'aérien
-protéger la lampe ou le transistor final contre surtension et surintensité
-réduire l'amplitude des harmoniques rayonnés
-faciliter l'émission sur plusieurs bandes de fréquences
Divers dispositifs ont été utilisés (circuit LC bouchon à prises,

image 0

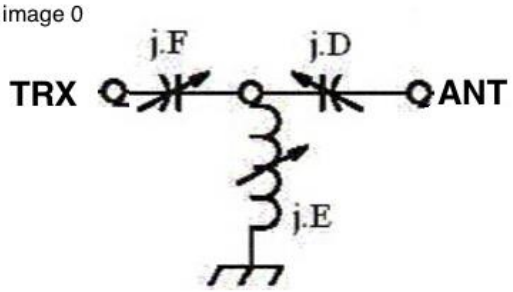


schéma le plus fréquent d'un couplage en T

circuit en gamma, circuit en PI, circuit en T, etc.), qui ont correspondu à des époques différentes des technologies, et des soucis spécifiques (exemple : dans les années 70, la fin des PA à tubes chez les amateurs a coïncidé avec la télévision hertzienne analogique très sensible à certains harmoniques des bandes amateur et abouti au règne des PA avec un circuit en PI, pour réduire ces harmoniques).
Aujourd'hui, les PA sont à transistors et les circuits de couplage, intégrés ou non aux émetteurs, automatiques ou pas, sont la plupart du temps à base de circuits en T, plus souples à régler mais couvrant des plages d'adaptation moins amples que les PI.
Cet article explique les bases du calcul des circuits de couplage en T puis, en première partie, calcule les impédances d'antenne qu'un circuit en T peut accorder, en deuxième partie détermine les valeurs de ses 3 composants (self et condensateurs) pour accorder une impédance d'antenne donnée. Il traite ces sujets d'abord d'un point de vue théorique, ensuite sur des exemples concrets. Sa compréhension ne nécessite pas de niveau mathématique supérieur à celui de la classe de Terminale actuelle.

I/ Première partie : Calcul des valeurs d'impédance Z d'une antenne pouvant être accordées en faisant varier les 3 réactances (D, E, F) d'un circuit de couplage en T :

1-<u>Quelques rappels à propos des nombres complexes</u> :

Au nombre complexe Z de partie réelle x et de partie imaginaire y, nombre que les physiciens notent $Z = x + jy$ correspond un point du plan M de coordonnées (x, y). Ce point M est appelé l'image du nombre Z et nombre Z est appelé l'affixe du point M.
Entre un émetteur et une antenne, on insère un coupleur fait de selfs et de condensateurs et on fait varier un seul à la fois de ces composants : ceci a pour effet de transformer l'impédance de l'antenne en une autre impédance, dont l'image M dans le plan se déplacera soit sur une parallèle à l'axe Oy, soit sur un cercle tangent à cet axe (propriété qu'on démontre simplement à partir de transformations géométriques, les inversions de centre 0, les symétries et les translations)

image 1

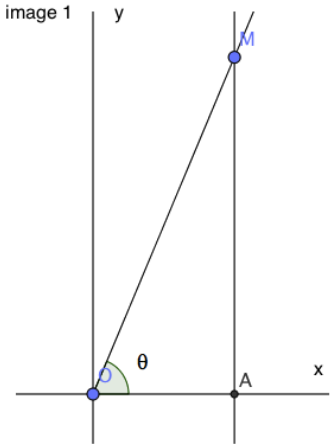
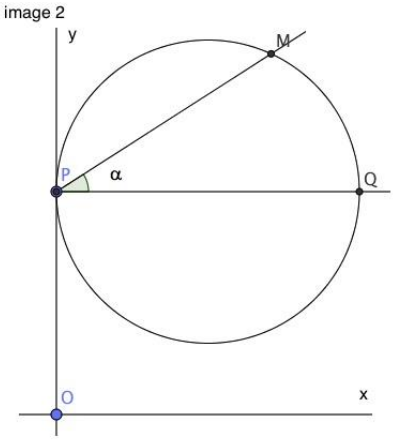


image 2



Quand M se déplace sur une parallèle à Oy (cf. image 1), on a :
-une donnée $a = \overline{OA}$
-un angle variable $téta$ tel que $Z = a.[1 + j\tan\theta]$

Quand M se déplace sur un cercle tangent à Oy (cf. image 2), on a :
-deux données $p = \overline{OP}$ et $q = \overline{PQ}$
-un angle variable α tel que $Z = jp + q.\cos\alpha\,.\exp(j\alpha)$

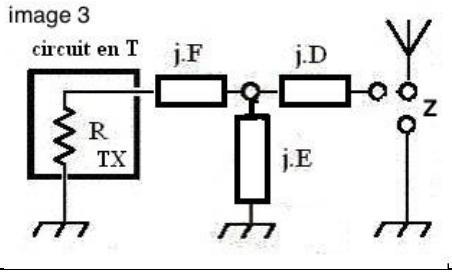
2-<u>Relation entre les composantes du circuit en T, la résistance de sortie de l'émetteur et l'impédance de charge (ligne + antenne) à l'accord</u> :

A l'accord, l'impédance de l'ensemble « coupleur + antenne » est « vue par l'émetteur comme étant égale à R », ce qui permet de calculer Z :

$$R = jF + \frac{1}{\frac{1}{jE} + \frac{1}{Z + jD}} \Rightarrow Z = \frac{R(D+E) - j(DE + EF + FD)}{(E+F) + jR}$$

cf. démonstrations dans l'encadré ci-après :

image 3



<u>Calcul de la partie réelle et de la partie imaginaire du rapport de 2 nombres complexes</u>

$$\frac{(a+jb)}{(c+jd)} = \frac{(a+jb)(c-jd)}{c^2+d^2} = \frac{(ac+bd)+j(bc-ad)}{c^2+d^2} = \frac{ac+bd}{c^2+d^2} + j\frac{bc-ad}{c^2+d^2}$$

<u>Calcul de l'impédance Z obtenue à l'accord grâce à un circuit en T</u>

$$R = jF + \frac{1}{\frac{1}{jE} + \frac{1}{Z+jD}} \quad => \quad \frac{1}{R-jF} = \frac{1}{jE} + \frac{1}{Z+jD} \quad => \quad \frac{1}{R-jF} = \frac{Z+jD+jE}{E(-D+jZ)} \quad =>$$

$$E(-D+jZ) = (R-jF)(Z+jD+jE) \quad => \quad -DE + jEZ = RZ + jRD + jRE - jFZ + FD + EF \quad =>$$

$$Z(jE - R + jF) = jRD + jRE + FD + EF + DE \quad =>$$

$$Z = \frac{(FD+EF+DE) + jR(D+E)}{-R + j(E+F)} = \frac{R(D+E) - j(FD+EF+DE)}{(E+F)+jR}$$

En fait, pour mieux analyser comment varie Z quand on fait varier D, E ou F, il est intéressant de transformer la 2ème relation et d'exprimer Z sous les 3 formes suivantes :

1ère forme : $Z = a[1 + j\tan\theta]$ avec $a = \frac{E^2.R}{(E+F)^2+R^2}$ et $\tan\theta = \frac{-(D+E).R^2-(E+F).(DE+EF+FD)}{E^2.R}$	
2ème forme : $Z = -j.D + b.\cos\alpha.exp(j\alpha)$ avec $b = \frac{F^2+R^2}{R}$ et $\tan\alpha = \frac{-E.F-F^2-R^2}{E.R}$	
3ème forme : $Z = -j(D+E) + c.\cos\beta.exp(j\beta)$ avec $c = \frac{E^2}{R}$ et $\tan\beta = \frac{E+F}{R}$	

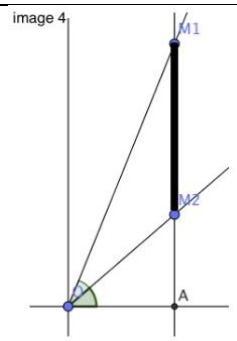
3-<u>Lieu de M, image de l'impédance Z dans le plan, quand D seul ou E seul ou F seul varie</u> :

-<u>quand D seul varie</u> :
On prend Z sous la 1ère forme et, d'après l'image 1 du §1, on voit que M se déplace sur la parallèle à Oy d'abscisse

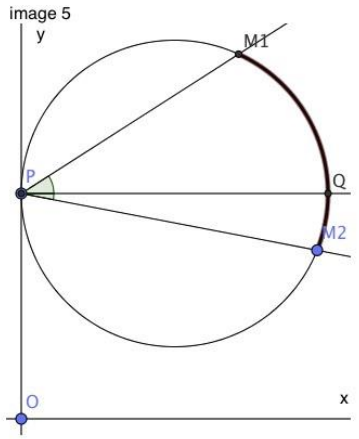
$$a = \overline{OA} = \frac{E^2.R}{(E+F)^2+R^2}$$

Plus précisément sur le segment de cette droite M1M2, dont les extrémités correspondent aux 2 valeurs extrêmes de D (cf. image 4).

image 4



-<u>quand E seul varie</u> :
On prend Z sous la 2ème forme et, d'après l'image 2 du §1, on voit que M se déplace sur le cercle tangent à Oy en P tel que : $\overline{OP} = -D$ et de diamètre $\overline{PQ} = \frac{F^2+R^2}{R}$
Plus précisément, sur l'arc M1M2 de ce cercle dont les extrémités correspondent aux valeurs extrêmes de E (cf. image 5).
-<u>quand F seul varie</u> :
On prend Z sous la 2ème forme et, d'après l'image 2 du §1, on voit que M se déplace sur le cercle tangent à Oy en P tel que : $\overline{OP} = -D - E$ et de diamètre $\overline{PQ} = \frac{E^2}{R}$
Plus précisément, sur l'arc M1M2 de ce cercle dont les extrémités correspondent aux valeurs extrêmes de f (cf. image 5).

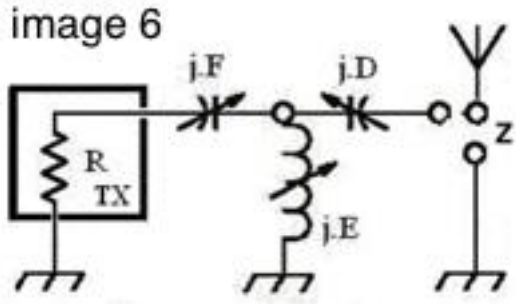


-<u>remarques concernant les 3 cas ci-dessus</u> :
Il y a autant de segments M1M2 que de couples (D_{min}, D_{max}).
Il y a autant d'arcs M1M2 que de couples (E_{min}, E_{max}) et (F_{min}, F_{max}).
Dans le cas le plus fréquent où E ou F ne change pas de signe (i.e. s'il s'agit toujours d'une self ou toujours d'un condensateur), l'arc M1M2 ne comprend pas le point Q.

4-<u>Lieu de M, image de l'impédance Z dans le plan, quand au moins 2 des paramètres D, E et F varient</u> :

On voit qu'il s'agit d'un sous-ensemble compact (au sens de la topologie) du plan complexe (la portion du plan balayée par les segments (de droite) et les arcs (de cercle) M1M2 du §3 précédent.
La frontière de cette portion du plan est donc faite des segments de droites et d'arcs de cercles correspondant aux valeurs extrêmes de D, de E, de F.

Pour visualiser cela, on peut reprendre, en le détaillant, l'exemple traité dans la réponse à la question n°300 d'allo docteur (Radio-REF 10/2003). Il s'agissait du circuit en T ci-contre dans lequel, en ohms :
R = 50
Emin = 25, Emax = 100
Dmin = Fmin = -100
Dmax = Fmax = -25



<u>4-1-cas où D seul varie</u> :

4-1-1- cas où E=25 ; F=-25 => $Z = \frac{R(D+E)-j(DE+EF+FD)}{(E+F)+jR}$
=> pour D=-25, alors Z=12,5+j0
=> pour D=-50, alors Z=12,5+j25
=> pour D=-100, alors Z=12,5+j75
=> l'image de Z décrit le segment qui va de M1(12,5 ;0) à M2(12,5 ;75)

4-1-2- cas où E=25 ; F=-100 => $Z = \frac{R(D+E)-j(DE+EF+FD)}{(E+F)+jR}$
=> pour D=-25, alors Z=3,85-j.5,77
=> pour D=-50, alors Z=3,85+j.19,23
=> pour D=-100, alors Z=3,85+j.69,23
=> l'image de Z décrit le segment qui va de M'1(3,85 ; -5,77) à M'2(-3,85 ;69,23)

4-1-3- cas où E=100 ; F=-25 => $Z = \frac{R(D+E)-j(DE+EF+FD)}{(E+F)+jR}$
=> pour D=-25, alors Z=61,54-j.17,31
=> pour D=-50, alors Z=61,54+j.42,31
=> pour D=-100, alors Z=61,54+j.92,31
=> l'image de Z décrit le segment qui va de M''1(61,54 ; 17,31) à M''2(61,54 ;92,31)

4-1-4- cas où E=100 ; F=-100

=> pour D=-25, alors Z=200-j.75

=> pour D=-50, alors Z=200-j.50

=> pour D=-100, alors Z=200+j0

=> l'image de Z décrit le segment qui va de M'''1(200 ; -75) à M'''2(200 ; 0)

<u>4-2-cas où E seul varie</u> :

4-2-1- cas où D=-25 ; F=-25 => $Z = \frac{R(D+E)-j(DE+EF+FD)}{(E+F)+jR}$

=> pour E=25, alors Z=12,5+j.0

=> pour E=50, alors Z=40-j.5

=> pour E=100, alors Z= 61,54+J.17,31

=> l'image de Z décrit l'arc de cercle P1(12,5 ; 0), P3(40 ; -5), P2(61,54 ; 17,31)

4-2-2- cas où D=-25 ; F=-100 => $Z = \frac{R(D+E)-j(DE+EF+FD)}{(E+F)+jR}$

=> pour E=25, alors Z=3,85-j.5,77

=> pour E=50, alors Z=25-j.50

=> pour E=100, alors Z=200-j.75

=> l'image de Z décrit l'arc de cercle P'1(3,85 ; -5,77), P'3(25 ; -50), P'2(200 ; -75)

4-2-3- cas où D=-100 ; F=-25 => $Z = \frac{R(D+E)-j(DE+EF+FD)}{(E+F)+jR}$

=> pour E=25, alors Z=12,5+j.75

=> pour E=50, alors Z=40+j.70

=> pour E=100, alors Z=61,54+j.92,31

=> l'image de Z décrit l'arc de cercle P''1(12,5 ; 75), P''3(40 ; 70), P''2(61,54 ; 92,31)

4-2-4- cas où D=-100 ; F=-100 => $Z = \frac{R(D+E)-j(DE+EF+FD)}{(E+F)+jR}$

=> pour E=25, alors Z=3,85+j.69,23

=> pour E=50, alors Z=25+j.25

=> pour E=100, alors Z=200+j+0

=> l'image de Z décrit l'arc de cercle P'''1(3,85 ; 69,23), P'''3(25 ; 25), P'''2(200 ; 0)

<u>4-3-cas où F seul varie</u> :

4-3-1- cas où D=-25 ; E=25 => $Z = \frac{R(D+E)-j(DE+EF+FD)}{(E+F)+jR}$

=> pour F=-25, alors Z=12,5+j.0

=> pour F=-50, alors Z=10-j.5

=> pour F=-100, alors Z=3,85-j.5,77

=> l'image de Z décrit l'arc de cercle Q1(12,5 ; 0), Q3(10 ; -5), Q2(3,85 ; -5,77)

4-3-2- cas où D=-25 ; E=100 => $Z = \frac{R(D+E)-j(DE+EF+FD)}{(E+F)+jR}$

=> pour F=-25, alors Z=61,54+j.17,31

=> pour F=-50, alors Z=100+j.25

=> pour F=-100, alors Z=200-j.75

=> l'image de Z décrit l'arc de cercle Q'1(61,54 ; 17,31), Q'3(100 ; 25), Q'2(200 ; -75)

4-3-3- cas où D=-100 ; E=25 => $Z = \frac{R(D+E)-j(DE+EF+FD)}{(E+F)+jR}$

=> pour F=-25, alors Z=12,5+j.75

=> pour F=-50, alors Z=10+j.70

=> pour F=-100, alors Z=3,85+j.69,23

=> l'image de Z décrit l'arc de cercle Q''1(12,5 ; 75), Q''3(10 ; 70), Q''2(3,85 ; 69,23)

4-3-4- cas où D=-100 ; E=100 => $Z = \frac{R(D+E)-j(DE+EF+FD)}{(E+F)+jR}$

=> pour F=-25, alors Z=61,54+j.92,31

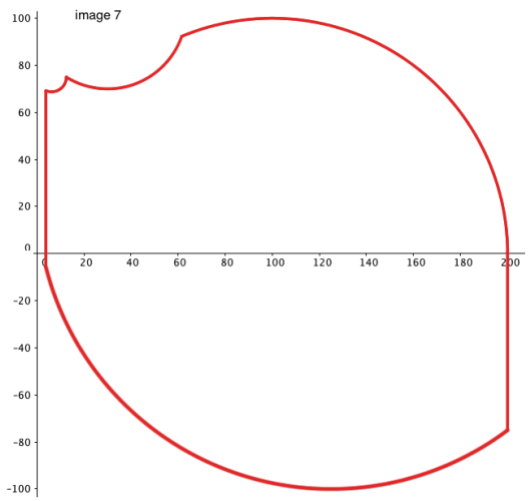
=> pour F=-50, alors Z=100+j.100

=> pour F=-100, alors Z=200+j+0

=> l'image de Z décrit l'arc de cercle Q'''1(61,54 ; 92,31), Q'''3(100 ; 100), Q'''2(200 ; 0)

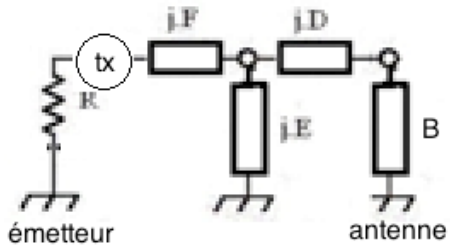
4-4- <u>Récapitulation : Portion du plan complexe où se situe l'image M de Z quand E, F, G varient</u> :

Il s'agit de la portion intérieure à la figure de l'image 7 ci-dessous :

Cette portion du plan complexe est un hexagone délimité par 2 segments de droites parallèles à l'axe des ordonnées et 4 arcs appartenant à des cercles tangents à ce même axe. Elle est inscrite dans le carré correspondant à des valeurs arrondies réelles de 0 à 200 ohms, et imaginaires comprises entre -100 ohms et 100 ohms. A noter qu'un circuit en PI construit avec les 3 mêmes composants (D, E, F) couvrirait une portion du plan beaucoup plus importante (cf. réponse à la question n° 300 d'allo docteur d'octobre 2003).	

II/ Deuxième partie : Problème inverse de celui de la première partie, à savoir calcul des réactances (D, E, F) qu'on doit utiliser pour coupler une impédance $Z = B + jX$ donnée (dimensionnement d'un coupleur en T) :

Dimensionnement d'un coupleur en T

<u>O</u>n se propose ici de concevoir un coupleur en T adaptant un émetteur à une antenne d'impédance $Z = B + j0$ = B[1]. Les barres horizontales du T sont des condensateurs variables (d'impédances respectives D et F, sont donc des valeurs négatives), la barre verticale est une self de valeur E (>0). L'impédance de sortie de l'émetteur est R. Le problème consiste à déterminer les relations liant les 3 inconnues (D, E, F) en fonction des 2 données R et B.	

A l'accord, l'impédance « coupleur + antenne » est « vue par l'émetteur » égale à R, d'où :

$R = jF + \frac{1}{\frac{1}{jE}+\frac{1}{B+jD}} = jF + \frac{1}{\frac{1}{jE}+\frac{1}{B+jD}}$; $\boldsymbol{\frac{1}{R-jF} - \frac{1}{B+jD} = \frac{1}{jE}}$ ou $Y_1 - Y_2 = Y_3$; $Y_1 = \frac{1}{R-jF}$; $Y_2 = \frac{1}{B+jD}$; $Y_3 = \frac{1}{jE}$

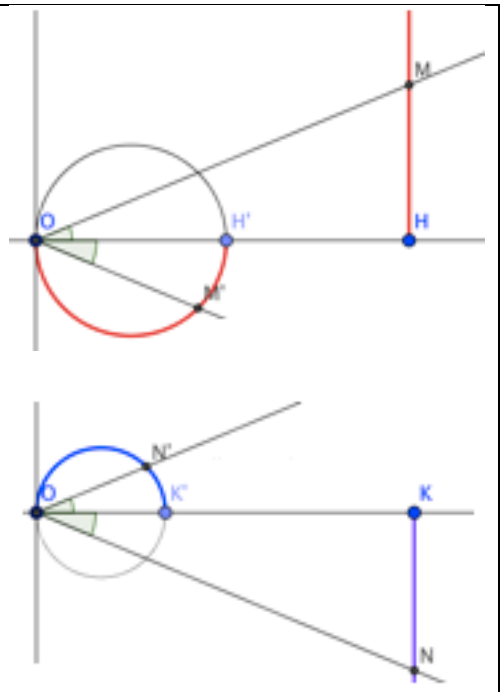
Ce qui signifie que les 2 admittances Y1 et Y2 ne diffèrent que par un nombre imaginaire pur, donc que ces 2 admittances des parties réelles égales.

[1] Il n'est pas nécessaire de prévoir les calculs dans le cas où l'impédance de l'antenne comporterait un terme non nul, car il suffit alors de modifier in fine la valeur de D en mettant en série la réactance qui convient.

Rappel sur les nombres complexes, leur interprétation géométrique et l'inversion

Soit, dans le plan complexe :
-un point H de l'axe Ox d'abscisse positive
-un point M d'affixe $Z = \overline{OH} + j.\overline{HM}$
-si M'est l'image du complexe $Y = {}^{1}/_{Z}$
-alors M'appartient à la droite symétrique de OM par rapport à Ox et au cercle de diamètre OH' tel que$\overrightarrow{OH'} = \overrightarrow{OH}/OH^2$. Quand M décrit la demi-droite rouge de H vers l'infini (cf. figure ci-contre), M'décrit le demi-cercle rouge de H' vers O.

De même, si dans le plan complexe, on a :
-un point K de l'axe Ox d'abscisse positive
-un point N d'affixe $Z = \overline{OK} + j.\overline{KN}$
-si N'est l'image du complexe $Y = {}^{1}/_{Z}$
-alors N'appartient à la droite symétrique de ON par rapport à Ox et au cercle de diamètre OK' tel que $\overrightarrow{OK'} = \overrightarrow{OK}/OK^2$. Quand M décrit la demi-droite bleue de K vers moins l'infini (cf. figure ci-contre), N'décrit le demi-cercle bleu de K' vers O.



Application de ce qui précède au circuit en T

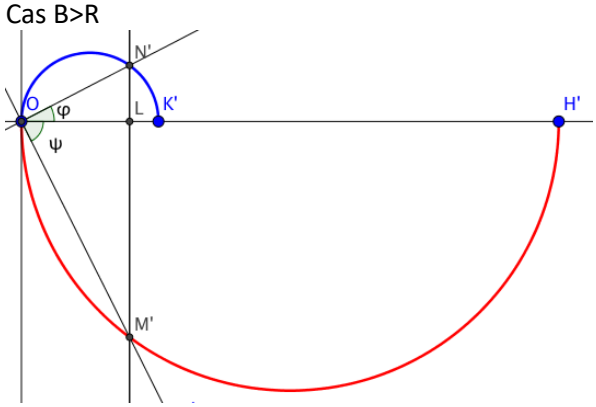
On revient à notre équation $Y_1 - Y_2 = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{R-jF}} - \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{B+jD}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{jE}} = Y_3$

On va représenter ces admittances dans le plan complexe avec les hypothèses suivantes :

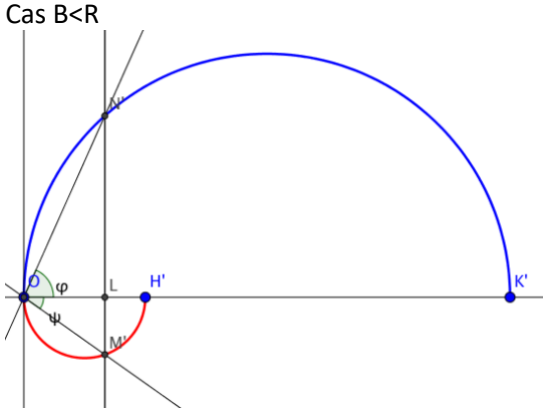
$\overline{OH} = R > 0$	$\overline{OK} = B > 0$	$\overline{HM} = -F > 0$	$\overline{KN} = D < 0$

On en déduit que M est l'image de Z_1, M'l'image de Y_1, N est l'image de Z_2 et N'l'image de Z.
On a donc 2 figures différentes suivant que B>R ou que B<R (le cas B=R est sans intérêt puisqu'alors le coupleur est inutile).

Cas B>R



Cas B<R



Sur ces 2 graphiques, M'est l'image de Y_1, N'est l'image de Y_2, donc ces 2 points ont la même projection L sur l'axe des abscisses puisque Y_1 et Y_2 ont même partie réelle, comme on l'a vu.
On a alors les relations suivantes :

$$\overline{OL} = \overline{OK'}.cos^2\varphi = \overline{OH'}.cos^2\psi = {}^{cos^2\varphi}/_{B} = {}^{cos^2\psi}/_{R} \Rightarrow cos\psi = \sqrt{{}^{R}/_{B}}.cos\varphi$$

$$Y_2 = \overline{OL} + j.\overline{LN'} = \overline{OK'}.cos^2\varphi + j.\overline{OK'}.cos\varphi.sin\varphi = ({}^{1}/_{B}).(cos^2\varphi + j.cos\varphi.sin\varphi)$$

$$Y_1 = \overline{OL} + j.\overline{LM'} = \overline{OH'}.cos^2\psi + j.\overline{OH'}.cos\psi.sin\psi = ({}^{1}/_{R}).(cos^2\psi - j.cos\psi.sin\psi)$$

$$\Rightarrow -{}^{j}/_{E} = Y_3 = Y_1 - Y_2 = -j.\left[{}^{cos\varphi.sin\varphi}/_{B} + {}^{cos\psi.sin\psi}/_{R}\right]$$

$E = {}^{1}\!/\left[{}^{cos\varphi.sin\varphi}\!/_{B} - {}^{cos\psi.sin\psi}\!/_{R}\right]$

$F = -\Im(Z_1) = \overline{OH}.tg\psi = \left({}^{1}\!/_{\overline{OH'}}\right).tg\psi = R.tg\psi$

$D = -\Im(Z_2) = -\overline{OK}.tg\varphi = -\left({}^{1}\!/_{\overline{OK'}}\right).tg\varphi = -B.tg\varphi$

<u>Attention</u> : l'angle ψ est négatif, donc son sinus et sa tangente le sont également.

La méthode de détermination des 3 grandeurs (D, E, F), connaissant le couple (B, R) va donc consister à construire un tableur EXCEL à partir de valeurs de φ comprises entre 0 et 90°, puis à calculer les valeurs correspondantes :

-de ψ à partir de l'équation $cos\psi = \sqrt{{}^{R}\!/_{B}}.cos\varphi \Longrightarrow \psi = -Arccos\left(\sqrt{{}^{R}\!/_{B}}.cos\varphi\right)$

-de D à partir de l'équation $D = -B.tg\varphi$

-de E à partir de l'équation $E = {}^{1}\!/\left[{}^{cos\varphi.sin\varphi}\!/_{B} - {}^{cos\psi.sin\psi}\!/_{R}\right]$

-de F à partir de l'équation $F = R.tg\psi$

Ensuite, on analysera les valeurs obtenues pour sélectionner celles correspondant à des composants (sels, condensateurs) réalisables pratiquement.

En annexe, voir un exemple de tableur pour R=50 et B=200

Les annexes à cet article sont au nombre de 3 (voir pages suivantes) :

1-Graphique GEOGEBRA des admittances

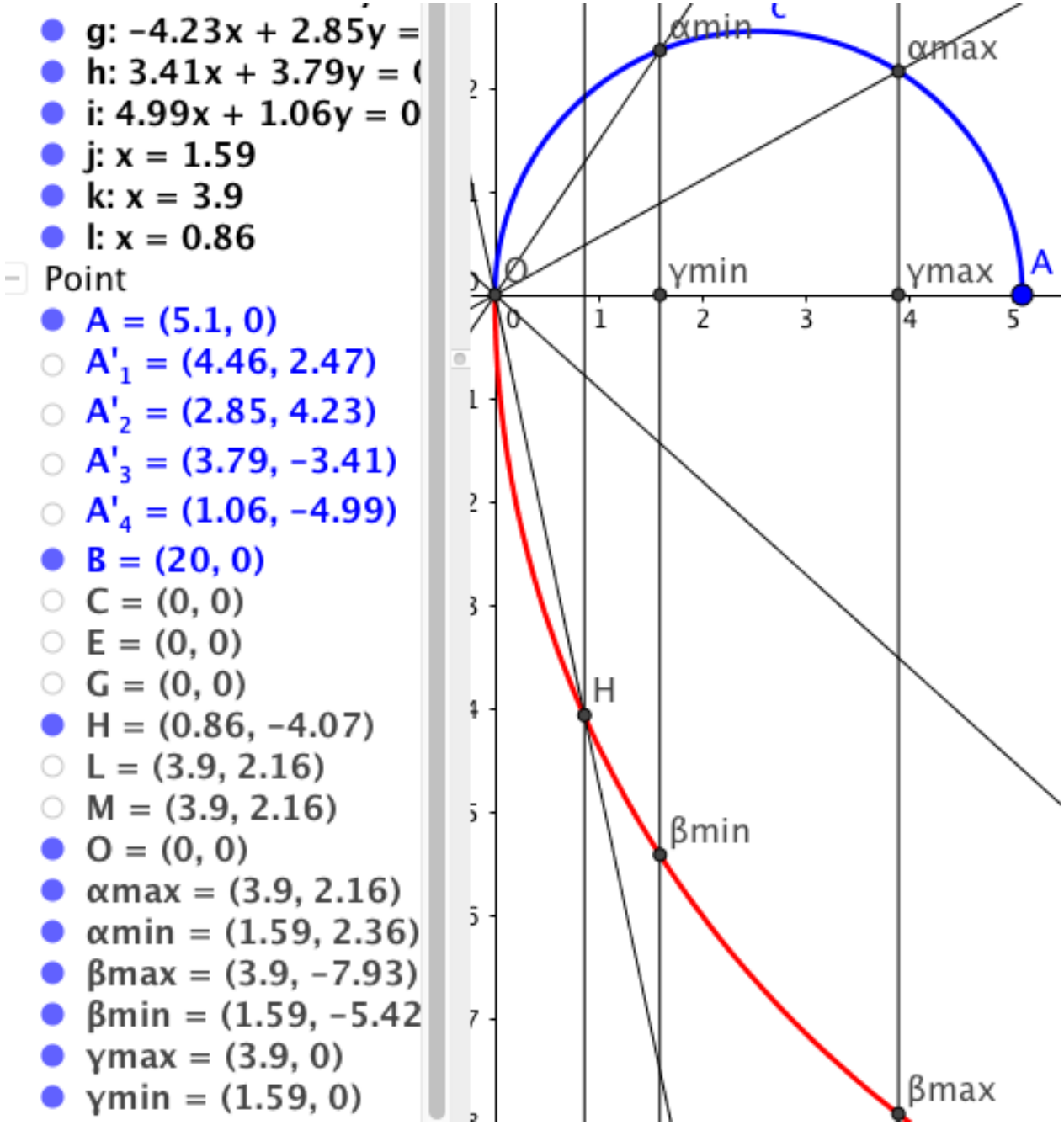
2-Question n°300 d'allo docteur d'octobre 2003

3-Capture d'écran tableur EXCEL pour R=50 et D=200

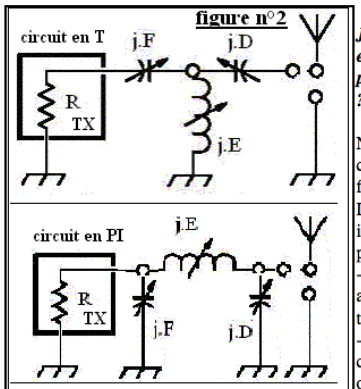
ANNEXES

1-<u>Graphique GEOGEBRA des admittances</u>

:



2-Question n°300 d'allo docteur d'octobre 2003 :



accord si impéd. antenne et transformée de R (par T ou PI) conjuguées (parties réelles égales, parties imaginaires opposées), soit

$$Zant_{T} = \frac{R(D+E)+j.(DE+EF+FD)}{(E+F)-j.R}$$

$$Zant_{PI} = \frac{DR(E+F)-j.DEF}{F(D+E)+j.R(D+E+F)}$$

Question n°300

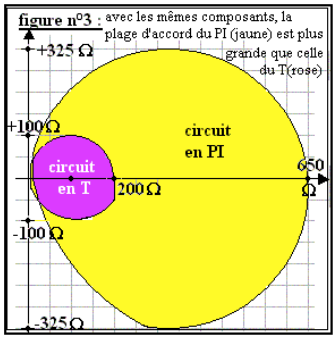
Je dispose de 2 CV et d'une self variable avec lesquels je souhaiterais faire une boîte de couplage. J'hésite entre circuit en T et circuit en PI (cf. figure n°2). On m'a dit que le T offrait une plage d'adaptation plus grande que le PI. Est-ce vrai ? Comment calculer cette plage, par exemple en supposant que l'impédance de chaque composant varie de 25 à 100 Ohms, et qu'il faille s'adapter sur 50 Ohms ?

Réponse

Non, le T n'offre pas une plage plus grande que le PI, cela dépend des valeurs des composants (par exemple, avec vos valeurs, la plage d'adaptation du PI est, en surface, 10 fois celle du T (cf. figure n°3).

Déterminer la plage d'adaptation nécessite de savoir faire des opérations sur les nombres imaginaires, et de connaître les transformations dans le plan complexe. Globalement, on peut dire que :

- à chaque trio (D, E, F) de valeurs des composants correspond une valeur d'impédance adaptée qui est égale à l'impédance conjuguée de celle que voit l'antenne (50 Ohms à travers la boîte de couplage).
- quand 2 des 3 composants sont fixes et le 3ème variable, le point M affixe dans le plan complexe de cette impédance adaptée se déplace sur des cercles tangents à l'axe des ordonnées (et, dans certains cas particuliers, sur des droites parallèles à cet axe).
- on peut ramener le PI à un circuit en T, plus simple à calculer, par inversion de pôle O.



Auteurs : *Les réponses de ce mois ont été préparées par Jean F5GZJ, Jean-Pierre F6BPS, Daniel F6CNW, Robert F5NB et Jean-Pierre F6FQX.*

3- Capture d'écran tableur EXCEL pour R=50 et D=200 :

φ deg	φ rad	cosφ	cosψ	ψ rad	D	F	interm	E	self µH	capa D pF	capa F pF
0	0	1	0,5	-1,047	0	-86,6	0,017	115,47	1,3127	#DIV/0!	131,2688
1	0,0175	1	0,5	-1,047	-3,491	-86,62	0,017	114,33	1,2997	3256,423	131,2422
5	0,0873	0,996	0,498	-1,049	-17,498	-87,04	0,018	110,23	1,2531	649,6964	130,6041
10	0,1745	0,985	0,492	-1,056	-35,265	-88,38	0,019	106,08	1,206	322,3617	128,6297
15	0,2618	0,966	0,483	-1,067	-53,59	-90,65	0,019	103,01	1,171	212,1338	125,4036
20	0,3491	0,94	0,47	-1,082	-72,794	-93,94	0,02	100,99	1,1481	156,1696	121,0156
25	0,4363	0,906	0,453	-1,1	-93,262	-98,36	0,02	100,06	1,1375	121,8961	115,5792
30	0,5236	0,866	0,433	-1,123	-115,47	-104,1	0,02	100,29	1,1401	98,45162	109,2223
35	0,6109	0,819	0,41	-1,149	-140,04	-111,4	0,02	101,81	1,1574	81,17746	102,0776
40	0,6981	0,766	0,383	-1,178	-167,82	-120,6	0,019	104,84	1,1919	67,74055	94,27507
45	0,7854	0,707	0,354	-1,209	-200	-132,3	0,018	109,72	1,2473	56,84107	85,93562
50	0,8727	0,643	0,321	-1,244	-238,35	-147,3	0,017	116,97	1,3298	47,69532	77,16755
55	0,9599	0,574	0,287	-1,28	-285,63	-167	0,016	127,49	1,4493	39,80055	68,06452
60	1,0472	0,5	0,25	-1,318	-346,41	-193,6	0,014	142,73	1,6226	32,81721	58,70521
65	1,1345	0,423	0,211	-1,358	-428,9	-231,3	0,012	165,4	1,8803	26,50543	49,15408
70	1,2217	0,342	0,171	-1,399	-549,5	-288,1	0,01	200,93	2,2842	20,68846	39,4629
75	1,309	0,259	0,129	-1,441	-746,41	-383,1	0,008	262,03	2,9788	15,23052	29,67261
80	1,3963	0,174	0,087	-1,484	-1134,3	-573,7	0,005	386,85	4,3978	10,02261	19,81553
85	1,4835	0,087	0,044	-1,527	-2286	-1146	0,003	766,37	8,7123	4,972949	9,917473
90	1,5708	6E-17	3E-17	-1,571	-3E+18	-8E+17	3E-18	7E+17	7E+15	3,48E-15	1,39E-14

en rouge : un condensateur de capacité infinie (DIV/0!) correspond à une impédance nulle,
on est donc en présence d'un circuit en Γ et non plus en T

en vert : les valeurs correspondant à des CV faciles à récupérer (100/500 pF)