

# Rayonnement or not Rayonnement ?

## *Petit problème de physique*

Robert BERRANGER F5NB

*Qui ne s'est interrogé un jour sur les principes fondamentaux utilisés par sa station pour émettre des champs électromagnétiques à l'autre bout de la planète à partir du courant continu d'une batterie ? Le problème a été posé dans Radio-REF de xxxx et la réponse a été publiée dans celui de xxxx.*

Tout d'abord un petit problème préliminaire afin de faciliter l'approche du vrai problème.

Soit le montage de la figure 1.

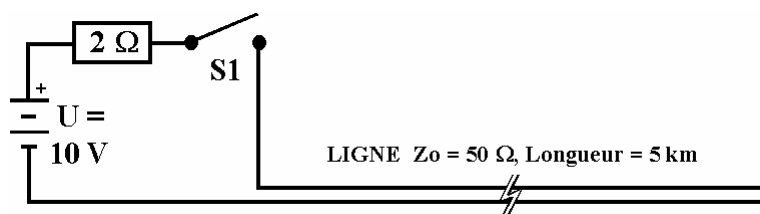


Figure 1

La source est une batterie parfaite de 10V (résistance interne nulle).

Pour S1, nous prendrons un "vibreur", composant bien connu des OM ayant eu des autoradios à lampes dans les années cinquante. Notre composant est un interrupteur fonctionnant 10 000 fois par secondes. Chaque cycle est composé de deux périodes égales "ouvert / fermé".

La résistance de deux ohms représente l'impédance "ON" de notre vibreur.

En position "OFF", le vibreur a une impédance infinie.

La ligne n'a aucune perte.

Nous démarrons le vibreur à l'instant T0 et nous ne l'arrêtons plus.

**Question :** *Est-ce que la batterie va se décharger (un peu, beaucoup, pas du tout) ?*

**Réponse :**

Nous procéderons en deux étapes pour déterminer les courants et tensions lors du processus. Nous allons d'abord examiner la réponse du système à un échelon de tension, puis nous verrons l'effet des interruptions du circuit par S1.

### **1- Réponse d'une ligne ouverte à un échelon de tension.**

Lors de la fermeture de S1, un courant de charge va circuler de la batterie vers la ligne. Ce courant est égal à  $10V / 52\Omega = 192 \text{ mA}$  (au début du processus, la ligne présente une impédance égale à son impédance nominale, comme si elle était de longueur infinie).

Ce courant va engendrer un front de tension de  $10 \times 50 / 52 = 9,615 \text{ V}$

Au bout d'un temps égal au temps de propagation dans les 5 km de la ligne ( $16,7 \mu\text{s}$ ), le front de tension arrive au bout de celle-ci. Comme elle est ouverte, il se produit une réflexion

positive de 100%, et la tension double (19,23 V), ce qui occasionne un front de tension en retour de +9,615 V.

Au bout d'un temps encore égal à 16,7  $\mu$ s, le front arrive à la batterie, stoppe le courant aller et occasionne un courant de retour à la batterie. La tension chute alors de  $(19,23 - 10) \times 50 / 52 = -8,88$  V (inversion du signe, puisque ligne fermée). La tension au bout de la ligne est de  $19,23 - 8,88 = 10,35$  V, soit un courant de -175 mA, ce qui correspond à la propagation d'un front de -8,88 V dans une ligne de 50  $\Omega$  (aux arrondis près).

Au bout de 16,7  $\mu$ s, le front négatif arrive au bout de la ligne. Là, il double (ligne ouverte) et la tension devient  $19,2 - (8,88 \times 2) = 1,47$  V.

Un front de -8,88 V retourne vers la batterie où il arrive au bout de 16,7  $\mu$ s.

De nouveau nous avons une inversion avec un front égal à  $(10 - 1,47) \times 50 / 52 = +8,2$  V et la tension devient  $1,47 + 8,2 = 9,67$  V. La batterie recharge la ligne avec un courant égal à  $0,33 / 2 = 165$  mA.

Et c'est reparti pour un tour, et un autre, et un autre... Au fur et à mesure, on s'aperçoit que la tension moyenne se rapproche de la tension batterie et que le courant tend vers zéro.

Si nous avons eu une résistance interne plus grande que 2  $\Omega$ , l'amortissement des oscillations aurait été plus rapide. Lorsque cette résistance tend vers l'infini, les oscillations tendent à disparaître et le temps de chargement tend vers l'infini. Cas particulier : lorsque  $R = Z_0$ , avec une ligne sans pertes, le chargement demande juste un aller-retour. Nous avons sur la figure 2 les diagrammes du processus.

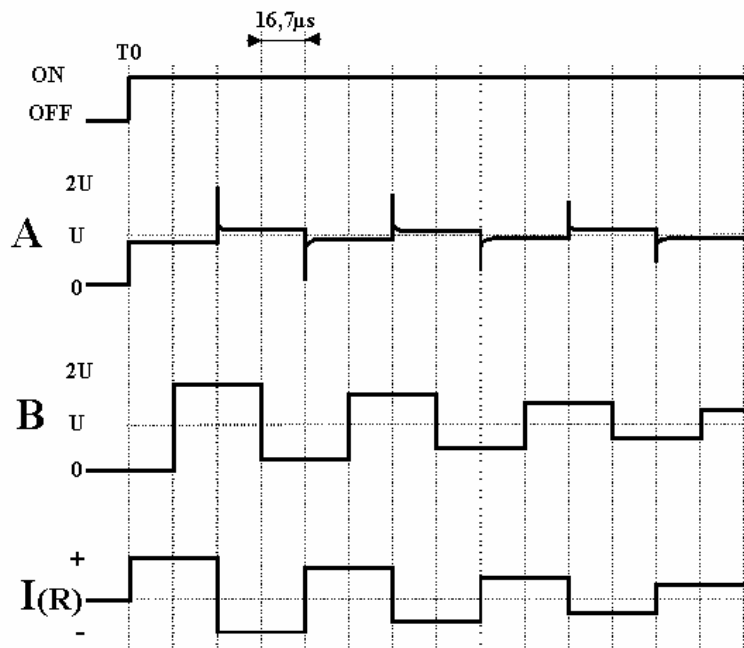


Figure 2

Nous noterons les impulsions extrêmement fines au point A. L'utilisation d'une ligne ouverte est d'ailleurs un bon moyen pour obtenir de telles impulsions, par exemple, pour un échantillonneur, ou un radar.

Avec  $R = Z_0$ , la tension au point B n'a plus qu'un échelon et celle au point A, qu'une impulsion.

## 2- Réponse de la ligne avec l'interrupteur vibreur.

L'interrupteur ne reste fermé que 50  $\mu$ s, soit trois A/R dans la ligne. Quand il s'ouvre, la ligne se trouve ouverte aux deux bouts. Globalement elle conserve sa charge. Celle-ci va avoir tendance à se répartir uniformément dans la ligne. La conséquence, c'est que le front en cours

de propagation va se transformer en impulsion qui va diminuer d'amplitude et de largeur au fur et à mesure de sa progression. Je pense qu'au bout de  $50 \mu\text{s}$ , la charge aura terminé de se répartir.

Dans notre cas, la tension aux bornes de la ligne sera un peu supérieure à celle de la batterie. Quand on refermera l'interrupteur, le front de tension sera très réduit. Donc l'amortissement des oscillations sera accéléré.

En fait, nous sommes dans la meilleure situation pour l'amortissement avec un rapport impair entre la durée de la demi-période de l'interrupteur et le temps de propagation dans la ligne. Si ce rapport était pair, l'effet sur l'amortissement serait minimum.

### 3- Conclusion.

La charge prise à la batterie sera celle de la ligne plus les pertes dues au courant traversant la résistance  $R$  pendant la période transitoire de chargement. Ensuite, la tension aux bornes de la ligne sera constante et égale à celle de la batterie, et celle-ci ne débitera plus aucun courant.

*Après cette mise en bouche, voici le vrai problème.*

Soit le montage de la figure 3. Par rapport à la figure 1, le changement majeur se trouve dans le système antennaire que nous avons branché au bout de la ligne. Par ailleurs, nous avons maintenant des composants "réalistes", avec des pertes et des capas parasites.

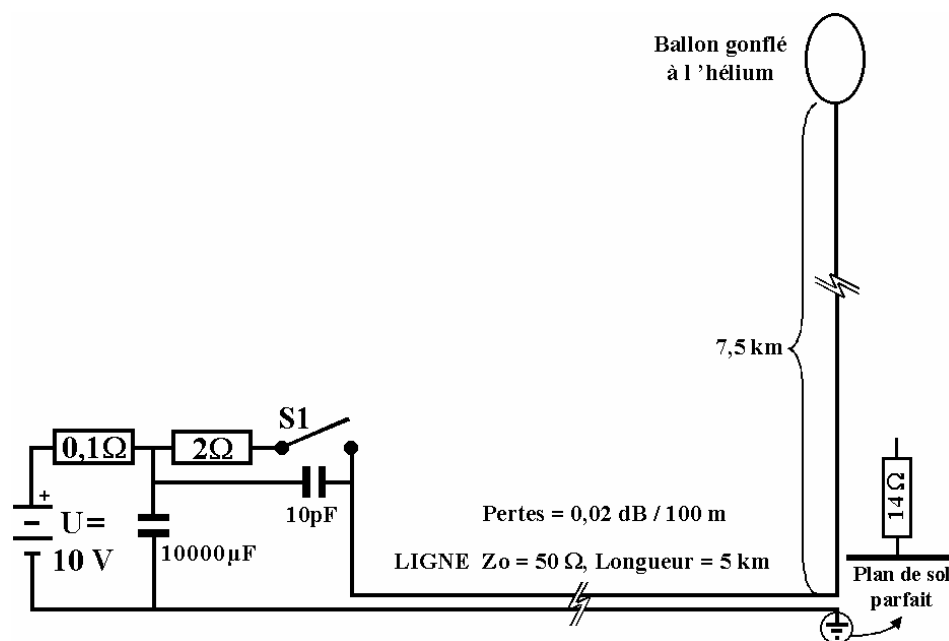


Figure 2

La mise à la terre du deuxième fil présente une résistance série de 14 ohms.

N-B : Le ballon gonflé à l'hélium ne joue aucun rôle électrique, il n'est là que pour maintenir le fil de l'antenne bien vertical.

Le vibreur a une impédance "ON" de 2 ohms et une impédance "OFF" de 10 pF. Il fonctionne toujours 10 000 cycles par secondes, chaque cycle constitué de 50% "ON" et 50% "OFF".

**Question : Maintenant, est-ce que la batterie va se décharger significativement (d'une manière non négligeable) ?**

## Réponse :

La question comportait un sous-entendu : « Est-ce que l'antenne va rayonner un signal (à 10 kHz) ? ». D'où le titre de cet article.

Nous allons d'abord simplifier le schéma. La résistance de  $0,1 \Omega$  a un rôle négligeable. Grâce au condensateur de  $10\,000 \mu\text{F}$ , la source peut être quelconque et assimilable à une batterie parfaite. La capacité parasite de S1 a aussi un rôle négligeable, nous en reparlerons.

En ce qui concerne les pertes de la ligne, celle-ci étant aérienne, elles sont dues à la résistance ohmique des fils et constituent une résistance série de  $11,5 \Omega$  qui s'ajoutent aux  $2 \Omega$  de S1 pour l'amortissement.

Jusque là, pas de changement de principe avec la ligne ouverte de la question 1.

Maintenant, voyons l'effet de l'ajout en bout de ligne du fil vertical de  $7,5 \text{ km}$ .

Il y avait un piège et presque tout le monde est tombé dedans en faisant le raisonnement suivant :

- La commutation a lieu à une fréquence de  $10\,000 \text{ Hz}$
- A cette fréquence, le brin vertical a une impédance de  $36 \Omega$  (quart d'onde)
- Avec la résistance du sol de  $14\Omega$ , l'ensemble charge la ligne avec une impédance de  $50\Omega$ .

Ce raisonnement erroné résulte de la méconnaissance du processus de rayonnement. Pour résumer, il se base sur le principe qu'une antenne rayonne parce qu'elle présente une résistance de rayonnement. Or c'est l'inverse : une antenne présente une résistance de rayonnement **parce qu'elle rayonne**. La résistance de rayonnement n'est pas une résistance physique. Si les **conditions de rayonnement** ne sont pas réunies, l'antenne (genre fouet) n'est qu'un bout de fil qu'on peut modéliser (avec un plan de sol parfait) comme une ligne ouverte à impédance augmentant progressivement vers l'infini. Et les seules résistances mises en jeu sont les résistances ohmiques constituant les pertes.

Alors, quelles sont les conditions de rayonnement ? Les voici, très résumées :

- 1- Il faut que le dispositif soit alimenté avec une **tension alternative** (mouvement périodique de la tension à la fréquence F)
- 2- Que ses dimensions ne soient pas négligeables devant la longueur d'onde (F) pour que le rayonnement soit significatif (avec un certain rendement).
- 3- Et qu'il soit asymétrique, pour ne pas produire que des couples de champs conjugués comme dans une ligne à faible espacement (s'il y a deux fils comme dans un doublet, il faut que les champs s'ajoutent, au moins partiellement).

En effet c'est le **retard des potentiels** (alternatifs) le long du fil qui permet à une partie des lignes de forces du champ électrique de se refermer dans l'espace et non sur le fil. Les lignes de force qui se referment sur le fil constituent le champ réactif et les lignes de force qui se referment dans l'espace, le champ actif, celui qui est rayonné<sup>(1)</sup>. Ce rayonnement absorbe une certaine puissance en consommant au point d'alimentation un courant en phase avec la tension. Le rapport tension /courant détermine une **résistance équivalente** appelée par convention résistance de rayonnement quand l'alimentation s'effectue à un ventre de courant (je m'excuse auprès des débutants).

Donc, il faut au moins une période complète pour provoquer un rayonnement dans un doublet demi-onde.

Maintenant, regardons le comportement de notre système et voyons ce qui va changer par rapport au premier :

Nous avons une source de tension parfaite ( $10\,000 \mu\text{F}$ ) avec une résistance série de  $2 \Omega$  (S1) suivi d'une ligne  $50 \Omega$  de  $5 \text{ km}$  avec une résistance série répartie de  $11,5 \Omega$  et suivi d'une ligne ouverte d'une impédance passant progressivement de  $50 \Omega$  à plusieurs milliers d'ohms.

## Analyse :

### a) Echelon de tension.

Lorsque nous fermons l'interrupteur, un front de +9,615 V va entrer dans la ligne. A la sortie, à cause des pertes, le front sera descendu à  $9,615 \times 50 / 61,5 = +7,82$  V.

Ce front "entre" dans la ligne "antenne" (sans pertes) et arrive à l'extrémité avec une amplitude X fois supérieure. Elle se réfléchit positivement en doublant et repart vers la ligne  $50 \Omega$ . Ce faisant elle reperd X fois son amplitude.

Arrivé au bout, deux possibilités :

- Soit il n'y a pas eu rayonnement et la tension est égale à  $2 \times 7,82$  V
- Soit l'aller et retour a provoqué des champs tels que les conditions de rayonnement ont été remplies, et il en résultera une consommation d'énergie assimilable à une perte. Alors, la tension de retour sera plus faible.

Supposons un rendement tel que la tension chute de moitié, nous obtenons  $7,82 + (7,82 / 2) = 11,73$  V. Avec les pertes, le front de tension de 3,91 V ne fait plus que 3,18 V au retour à S1. Ces 3,18 V sont à comparer aux 9,615 V avec la ligne ouverte sans pertes. Nous constatons que l'amortissement a lieu beaucoup plus rapidement si le fil vertical rayonne, et cela se terminera de la même manière : calme plat et tension constante tout au long de la (des) ligne(s).

N-B : *l'amortissement amené par l'antenne n'étant pas le même pour toutes les fréquences, il est probable que le front se transformera plus ou moins en impulsion avant de disparaître.*

### b) Interrupteur vibrant.

Un aller et retour demande maintenant  $2 \times (16,7 + 25) = 83,3 \mu\text{s}$ . Or, l'interrupteur s'ouvre au bout de  $50 \mu\text{s}$ . Nous avons vu que son effet était d'égaliser la tension dans la ligne. Quand il s'ouvre, le front de tension a à peine commencé son retour depuis l'extrémité de "l'antenne". Personnellement, je pense que grâce à la résistance série de la ligne, au bout de  $50 \mu\text{s}$ , la tension sera très proche de celle de l'alimentation. Donc, lorsque l'interrupteur se refermera, nous entamerons un deuxième processus, beaucoup plus faible que le premier.

Rapidement, il ne se passera plus rien. La ligne n'aura plus de pertes, car aucun courant n'y circulera. L'ensemble restera chargé à la tension de l'alimentation et celle-ci ne fournira plus aucun courant.

*Et le condensateur de 10 pF ?*

Quand l'interrupteur est ouvert, il se charge à la tension différentielle présente à ses bornes en absorbant un peu d'énergie qui se dissipera dans la  $2 \Omega$  quand l'interrupteur se fermera.

Ensuite, quand la tension différentielle devient nulle, c'est comme si le condensateur n'existait plus.

### c) Conclusion.

Par rapport à la ligne seule, nous aurons consommé un peu d'énergie en plus, celle rayonnée et celle perdue dans le sol, mais elles représentent une infime partie de la charge de la ligne. Par ailleurs, l'énergie rayonnée se répartit sur une large bande, harmonique de la fréquence de résonance du fil vertical en combinaison (multiplication) avec celle de l'inter (qui sont ici les mêmes). Ainsi, le système ne rayonnera pas une énergie continuellement.

C'est donc "**not rayonnement**".

F4DXU, qui a fourni des réponses identiques aux miennes, mais sans les détailler à fond, se demandait s'il n'y aurait pas un cas particulier (longueur relative des lignes, pertes...) où il pourrait se produire un démarrage d'auto-oscillations qui s'entretiendraient par la suite. Personnellement, je ne pense pas, parce que les conditions nécessaires que nous allons examiner maintenant, ne sont pas réunies.

### Que faut-il faire pour que ça rayonne ?

Tout simplement, il faut décharger la ligne (dont fait partie l'antenne), entre deux fermetures de l'interrupteur. C'est d'ailleurs ce qu'ont fait inconsciemment ceux qui ont considéré l'inter comme une source de signaux carrés d'impédance  $2 \Omega$ .

Si la ligne se décharge, alors, après une période transitoire, nous trouverons à la base du fil vertical (une antenne maintenant) une tension alternative superposée à une composante continue. Les conditions de rayonnement étant réunies, on pourra appliquer les formules de calcul d'impédance. Si le ROS est de 1 pour la fondamentale, celui-ci augmente avec les harmoniques (impairs uniquement pour un signal carré), et la tension à la base de l'antenne sera un peu différenciée. Il y aura donc des impulsions baladeuses dans la ligne pendant la période de chargement. Ensuite, une fois les ondes stationnaires établies (qui ici ne seront pas sinusoïdales, mais une combinaison de sinusoïdes), seule la puissance rayonnée transitera dans la ligne.

### Comment procéder ?

Les différentes méthodes se trouvent sur la figure 4. A gauche, nous avons les schémas de principe correspondant au petit problème, et à droite, des schémas d'application génériques avec des transistors<sup>(2)</sup>.

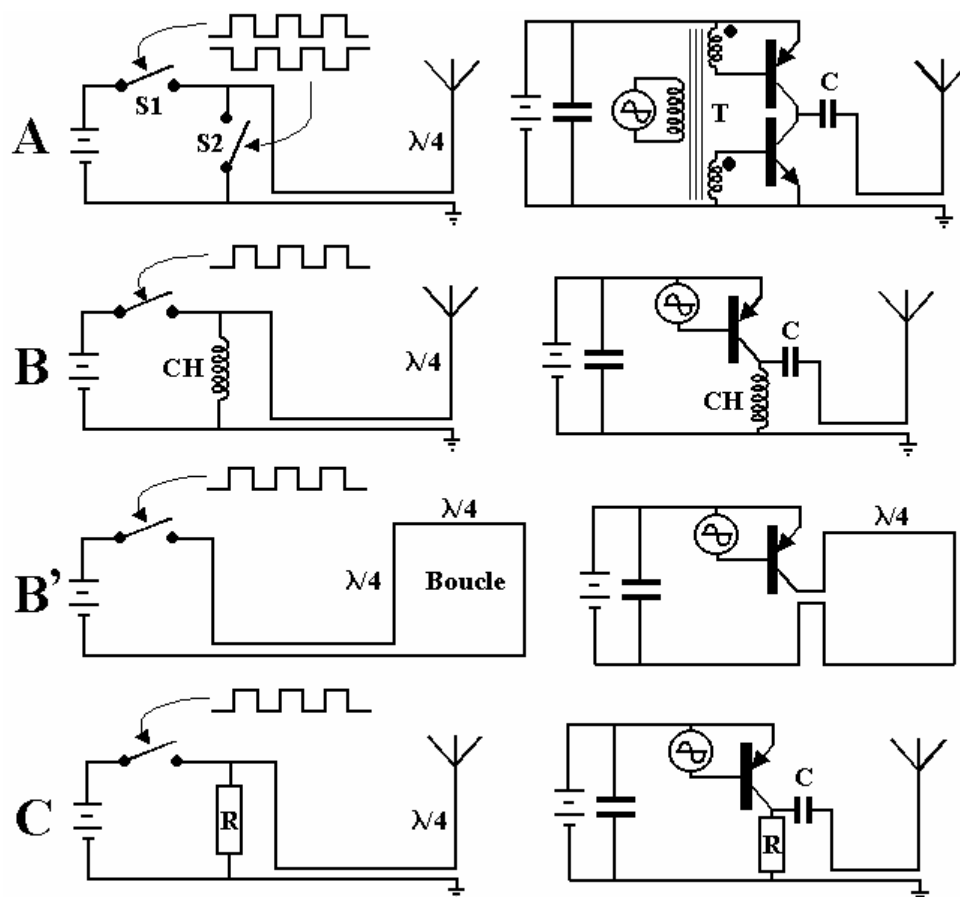


Figure 4

**En A**, nous déchargeons la ligne avec un deuxième interrupteur en opposition de phase avec le premier (solution aussi proposée par F4DXU). Examinons le processus :

Au repos, les deux interrupteurs sont ouverts.

Lors de la première fermeture de S1, il se produit le même effet que s'il était tout seul. Quand il s'ouvre et que S2 se ferme, cela revient à envoyer dans la ligne un nouveau front, négatif, celui là. Si la ligne avait acquis une charge répartie uniformément au moment de la fermeture de S2, nous aurions exactement le processus inversé du précédent. Sinon, nous avons une combinaison des deux.

La différence essentielle par rapport à un seul inter, c'est que maintenant, nous avons un processus alternatif qui se renouvelle à chaque période (entretenu). Ainsi, l'antenne va commencer à rayonner, sa résistance de rayonnement va entraîner un amortissement de la ligne, et nous allons rapidement nous trouver dans un régime **stationnaire**.

Nous avons donc une phase **transitoire** pendant laquelle la ligne se charge, avec établissement d'ondes stationnaires si la charge n'est pas adaptée, et pendant laquelle la puissance rayonnée augmente **progressivement**.

**En B**, S2 est remplacé par une bobine. Si la self-induction de la bobine est suffisante, celle-ci a la propriété d'emmagasiner de l'énergie pendant que S1 est fermé. Quand S1 s'ouvre, la bobine inverse la tension à ses bornes, ce qui a pour effet d'envoyer un front négatif dans la ligne, comme avec un deuxième interrupteur. La différence au final, réside dans le doublement de la tension alternative dans la ligne (en régime établi), et donc quadruplement de la puissance rayonnée (et quadruplement de la consommation).

**En B'**, nous avons une variante où c'est la self-induction de la charge qui permet le déchargement de la ligne (par l'autre bout, mais le résultat est le même).

**En C**, le déchargement de la ligne s'effectue à travers une résistance. La décharge sera partielle, donc la puissance fournie sera réduite, et nous pourrions au mieux avoir une puissance moitié et un rendement de 50 % quand la résistance sera égale à la charge.

L'examen de ces solutions fait apparaître la condition indispensable pour qu'il y ait transformation du courant continu fourni par la batterie en courant alternatif consommé par la charge (ici par rayonnement) :

**Il faut que le circuit puisse passer le courant continu fourni par la batterie.**

Le rendement sera d'autant meilleur que la résistance du circuit sera faible pour le courant continu.

Le passage du continu est moins évident avec le circuit A. Il ne fonctionne que s'il y a un "réservoir" (bobine ou condensateur) en série avec la charge. Celle-ci sera parcourue une fois dans un sens par le courant de charge du réservoir et une fois dans l'autre sens par le courant de décharge. Ainsi la charge sera bien parcourue par un courant alternatif, mais l'alimentation ne fournira que le courant de charge du réservoir (continu pulsé).

Il y aurait beaucoup de développements à faire sur le sujet, mais je m'arrêterai ici aux principes fondamentaux.

Dans un autre article à paraître, je traite du rendement des amplis HF de puissance selon les classes de fonctionnement et la désadaptation. Il constitue une bonne suite logique à celui-ci.

F5NB.

Ont répondu de différentes manières : F6FQX, F6BPS, F4DXU, F8IC et F9LS. Merci à eux, soit pour la relecture, soit pour la correspondance. Merci aussi aux OM du radio-club F6KRK pour les discussions constructives.

**Notes :**

- (1) Avec une antenne résonante (demi-onde), le champ réactif est de quelques unités supérieur au champ actif. Mais avec une antenne très raccourcie, donc fortement réactive, le champ réactif peut être des centaines de fois supérieur au champ actif. Il faudra des centaines de périodes pour que le signal rayonné atteigne sa pleine puissance car il faut charger l'antenne (et il en faudra autant pour la décharger). C'est pourquoi les antennes très raccourcies ont une bande passante réduite au point de ne pouvoir passer une modulation rapide.
- (2) En A, le transformateur réalise une séparation des commandes qui sont en phase, puisque nous avons des transistors complémentaires. Il y a de multiples variantes. Les condensateurs C d'isolation de la composante continue sont "transparents" après la phase transitoire de la mise en route. Noter l'universalité de ces schémas qui se retrouvent aussi bien dans les émetteurs, que dans les amplis audio et les alimentations à découpage, partout où il faut convertir une puissance continue en une puissance alternative.