

Tutorial : Aspects de la puissance

Première partie

1 INTRODUCTION

La puissance se manifeste sous différents aspects, et c'est une notion que le citoyen moyen, même radio-amateur, a quelquefois de la peine à appréhender dans toutes ses subtilités. Bien entendu, étant donné la complexité et l'étendue du sujet, il n'est pas possible ici d'en faire une étude complète, mais nous allons tenter d'en débroussailler les aspects en rapport avec la technique, et en particulier les points se rapportant plus directement au monde du radio-amateur.

1.1 Définitions

Différentes unités sont utilisées pour représenter la puissance, selon que l'on s'occupe d'électricité ou de mécanique. De plus, certaines de ces unités, sont soit périmées, soit d'un usage peu courant.

Le travail ou l'énergie sont des termes équivalents. Les unités principales de travail sont le Joule (J), le Watt-heure ou kilowatt-heure (kWh). Cette dernière unité nous permet de détecter que le travail est une puissance, utilisée pendant une certaine durée. Ceci est confirmé lorsque l'on sait que le Joule vaut 1 Watt-seconde (Ws).

Il découle donc que l'unité de puissance usuelle est le Watt (W), et comme un Joule vaut 1 W.s (Watt.seconde), la puissance peut aussi se mesurer en J/s. Une autre unité de puissance est encore en usage courant, bien que périmée, le cheval-vapeur (ch, CV ou hp).

1.2 Que vaut réellement un cheval vapeur

Avant de continuer, arrêtons-nous un instant sur le cheval en tant qu'unité de puissance. Certains documents donnent la puissance équivalente à 1 cheval comme étant de 736 W et d'autres comme équivalent à 746 W. Cette différence est faible, mais demande que l'on éclaircisse ce point, d'autant plus que ceci nous permettra de nous forger une vision mécanique de la puissance.

Cette différence provient en fait de la définition du cheval vapeur, unité initialement créée par des mécaniciens. Cette définition plutôt arbitraire - le cheval animal n'étant pas exactement quantifiable - est basée sur un chiffre rond, 75 kg m/s en Europe (kilogrammes.mètre/seconde) et 550 lb ft/s en Amérique (550 livres.pied/seconde). Pour calculer la puissance correspondant à ces deux définitions du cheval, il faut encore faire intervenir l'accélération due à la gravité, soit $9,81 \text{ m/s}^2$. Le tableau suivant résume ces calculs.

Tableau 1 Définition du cheval-vapeur.

		Europe	Amérique
Définition		75 kg m/s	550 ft lb/s
Conversion en métrique ^a		75 kg m/s	76,11 kg m/s
Puissance équivalente ^b		735,5	746,4 W

a. En utilisant 454 g par livre et 30,48 cm par pied.

b. En utilisant $9,807 \text{ m/s}^2$.

Et voilà la clé du mystère ; les chevaux américains sont légèrement plus puissants que les chevaux européens (1,5%).

Cette petite incursion dans la mécanique nous a aussi permis de déterminer que la puissance peut être définie en termes d'une masse (kg) déplacée verticalement, c'est-à-dire contre la gravité (m) par unité de temps (s).

1.3 Electricité

Ces considérations mécaniques derrière nous, passons aux aspects de la puissance électrique.

En électricité, la puissance est définie comme le produit de la tension et du courant :

$$P = U \cdot I$$

Cette relation, par diverses manipulations et substitutions par la loi d'Ohm prend les formes suivantes :

$$P = I^2 \cdot R \quad P = U^2 / R$$

Ces définitions ne sont bien entendu valables que si l'on est en courant continu ou en courant alternatif en présence de charges uniquement résistives. Lorsque l'on est en présence de charges réactives (inductances, condensateurs) cela se complique quelque peu comme nous allons le voir ci-dessous.

2 PUISSANCE EN COURANT CONTINU.

C'est le cas le plus simple, la puissance est déterminée en considérant le courant et la tension pour une résistance. Dans ce cas, la puissance est dissipée entièrement en chaleur dans la résistance. Ce qui implique que la résistance chauffe. C'est pourquoi les dimensions physiques de la résistance sont en rapport avec la puissance qu'elle doit pouvoir dissiper, de façon à pouvoir transmettre cette chaleur au milieu ambiant (l'air) sans brûler.

Une résistance est un élément quasi-parfait si l'on considère son rôle de transformateur d'énergie en calories.

Il est intéressant ici de noter qu'en électricité, le seul élément capable de dissiper de la puissance est la résistance. Nous verrons ci-dessous des cas où il ne semble pas qu'une résistance seule intervienne, et même dans ces cas, on finira par ne trouver qu'une résistance pour dissiper la puissance.

3 PUISSANCE EN COURANT ALTERNATIF

En courant alternatif, le cas de la puissance se complique un peu, il faut maintenant tenir compte d'un éventuel déphasage entre la tension et le courant. Un tel déphasage est nécessairement dû à un (ou des) élément réactif, telle une bobine ou un condensateur.

Tant que le circuit considéré est uniquement résistif, le courant est toujours proportionnel à la tension et suit fidèlement cette dernière dans ses variations périodiques.

Un circuit résistif tel que décrit ci-dessus est un circuit qui ne contient que des résistances ou dans lequel les autres éléments (bobines ou condensateurs) peuvent être ignorés (nous en reparlerons ci-dessous).

3.1 Circuit purement réactif

Un tel circuit qui ne comporte que des éléments réactifs ne peut bien entendu pas réellement exister, car tout élément impose des pertes dans un circuit qui peuvent être assimilées à une résistance ; c'est cependant un cas théorique intéressant.

Trois cas peuvent se présenter, soit le circuit ne comporte qu'une seule inductance, et le courant est déphasé de 90° en retard sur la tension ; soit le circuit ne comporte qu'un condensateur et le courant est en avance de 90° sur la tension ; soit le circuit comporte un certain nombre de condensateurs et d'inductances et il se comporte comme l'un ou l'autre de ces éléments. Dans le cas d'un circuit série, l'élément avec la plus forte impédance prime, alors que dans le cas d'un circuit parallèle, celui qui a la plus faible impédance l'emporte (plus forte admittance). Voyons à titre d'illustration un exemple de ce dernier cas.

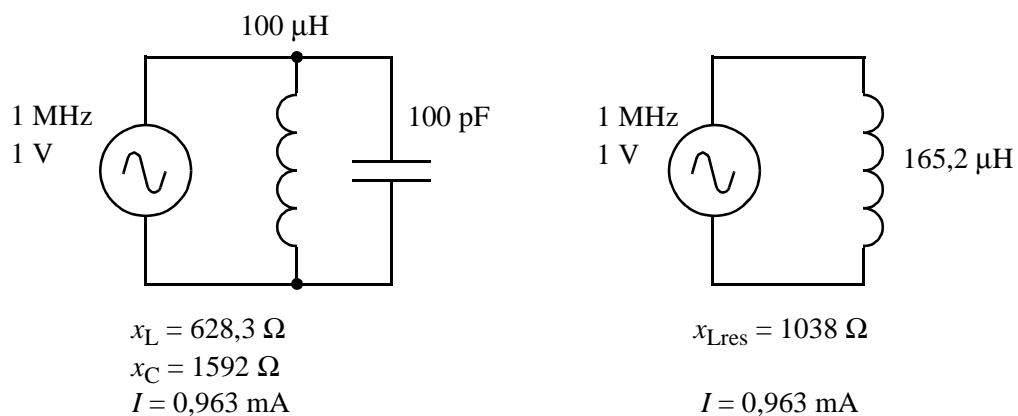


Figure 1 Un circuit parallèle LC peut (sauf à la résonance) se réduire à une simple réactance, ici une inductance, sans modifier le comportement du circuit (à la fréquence considérée).

Et ce troisième cas se réduit donc à l'un des deux premiers.

3.2 Les 3 sortes de puissance dans un circuit purement réactif

En alternatif, 3 'sortes' de puissance peuvent être calculées :

$$\text{La puissance apparente : } P_{\text{app}} = U \cdot I$$

$$\text{La puissance réelle : } P_{\text{réelle}} = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

$$\text{La puissance réactive : } P_{\text{réact}} = U \cdot I \cdot \sin(\varphi)$$

où φ représente l'angle de déphasage entre la tension et le courant.

Dans les circuits purement réactifs, le déphasage est de 90° et le cosinus de 90° vaut zéro alors que le sinus de 90° vaut 1.

Nous voyons alors que dans les trois formules ci-dessus, la puissance réelle est nulle, et que la puissance réactive est égale à la puissance apparente. Cela implique que toute la puissance qui est consommée par le circuit durant l'une des alternances est rendue à la source lors de l'alternance suivante. Le circuit ne consomme donc aucune puissance réelle. En fait, dans la section suivante, nous pourrions généraliser ce résultat, et nous verrons que quel que soit le circuit, seule une résistance est à même de dissiper de la puissance. Voici une illustration de ce phénomène (Figure 2), en considérant un circuit capacitif (un simple condensateur aux bornes d'une source de tension), siège d'un courant de 1 A, avec une source de tension de 1 V (valeurs de crête). Les parties hachurées représentent le produit des valeurs instantanées du courant et de la tension.

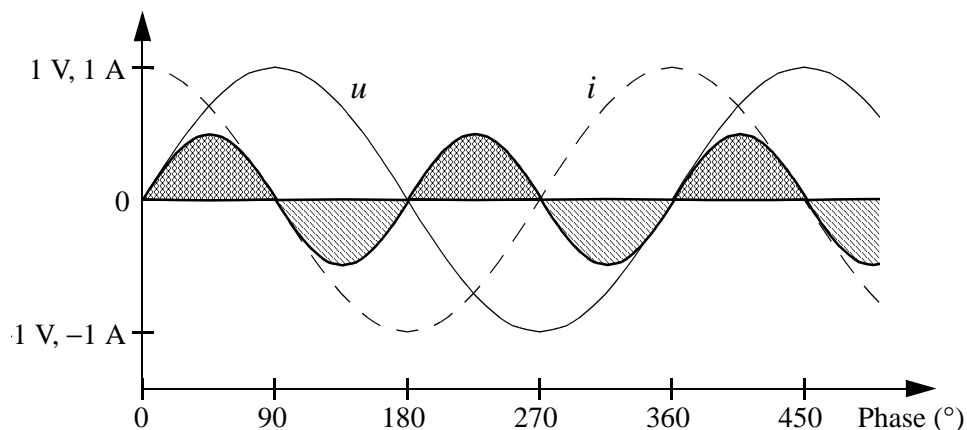


Figure 2 Ce diagramme illustre la puissance dans un circuit purement capacitif.

Nous constatons que cette courbe est une sinusoïde de fréquence double dont certaines parties sont positives et d'autres négatives. Quand la courbe est positive (zone hachurée croisée), il est aisé de concevoir que le condensateur absorbe une certaine puissance, mais quand la courbe est négative (zone hachurée simple), nous devons admettre que le condensateur rend cette puissance au circuit.

En fait, pendant une partie du cycle le condensateur se charge, accumulant ainsi de l'énergie et pendant l'autre partie du cycle cette énergie est restituée à la source. Comme de plus la surface au-dessus de la courbe est la même que la surface au-dessous de la courbe, la puissance absorbée est identique à la puissance restituée. Le circuit ne consomme aucune puissance.

C'est de là que vient le mot réactif qui signifie 'agir de nouveau' puisque toute la puissance absorbée est renvoyée à la source de façon à ce qu'elle puisse agir à nouveau.

Pour résumer, notons qu'un circuit purement réactif ne consomme aucune puissance réelle mais qu'il est le siège d'une puissance apparente qui est la puissance absorbée par le circuit et d'une puissance réactive qui est la puissance rendue par le circuit.

4 CIRCUITS COMPORTANT UN ÉLÉMENT RÉSISTIF

Deux cas peuvent être distingués, soit le circuit réactif comporte une (ou des) résistances en plus de ses éléments réactifs, soit le circuit est purement réactif. Nous avons déjà examiné le cas d'un circuit purement réactif, voyons maintenant le cas d'un circuit comportant une ou des résistances.

4.1 Circuits réactifs comportant une résistance.

Un tel circuit peut contenir un certain nombre d'éléments réactifs et de résistances, mais peut généralement être simplifié sous forme d'un circuit composé d'une seule résistance et d'un seul élément réactif. Un exemple chiffré serait très similaire à celui de la Figure 1, et pour les sceptiques, il suffit de se référer à la loi de Thévenin qui permet de simplifier tout circuit comportant un nombre arbitraire d'éléments en un circuit simple comportant une source et une charge (complexe).

Dans un tel circuit, le déphasage doit nécessairement être inférieur à 90° qui est le déphasage maximum possible sans résistance : dans une résistance le déphasage est de 0° , dans un élément réactif il est de 90° , dans un circuit composé, comme celui qui nous intéresse ici, nous sommes dans un cas intermédiaire, et selon la valeur des composants en jeu, le déphasage peut varier de presque 0° à pas loin de 90° (à l'exception de certains circuits comportant plusieurs boucles).

Dans un tel circuit on peut mettre en évidence les trois sortes de puissance mentionnées au Paragraphe 3.2 ci-dessus, mais maintenant, le déphasage n'est plus de 90° et la puissance réelle n'est plus nulle.

La Figure 3 illustre ce point de façon similaire au cas du Paragraphe 3.2.

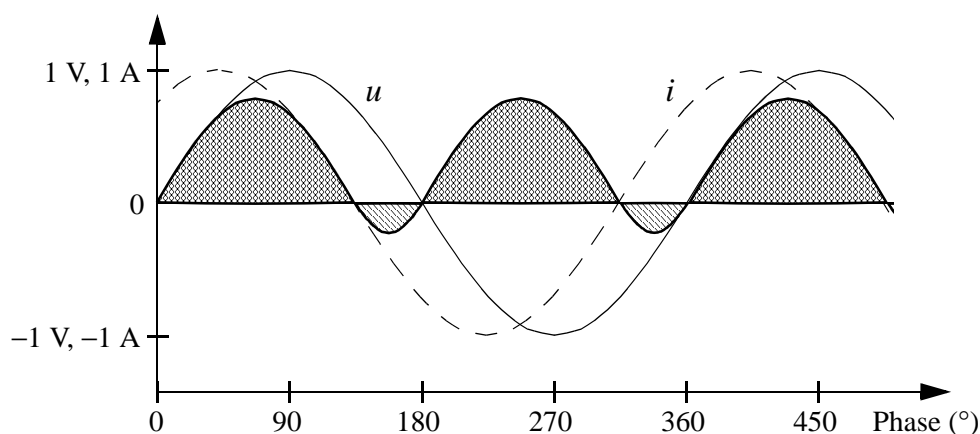


Figure 3 Illustration de la puissance réelle dans le cas d'un circuit RC. Ici le déphasage est de 45° . Notons que la tension efficace est de 0,707 V et le courant efficace de 0,707 A.

Ici encore, la puissance réelle est la différence des 2 zones hachurées. On voit maintenant qu'une puissance réelle existe. Voici le calcul pour les 3 types de puissance, avec un déphasage de 45° ce qui implique que dans le cas d'un circuit RC, l'impédance du condensateur à la fréquence considérée est identique à la résistance :

$$\text{La puissance apparente : } P_{\text{app}} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} = 0,5 \text{ W}$$

$$\text{La puissance réelle : } P_{\text{réelle}} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos(45^\circ) = 0,354 \text{ W}$$

$$\text{La puissance réactive : } P_{\text{réact}} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \sin(45^\circ) = 0,354 \text{ W}$$

Ces 3 puissances sont liées par le théorème de Pythagore, et l'on voit que :

$$P_{\text{app}} = \sqrt{P_{\text{réelle}} + P_{\text{réact}}}$$

Note : la mention de puissance instantanée, rencontrée quelquefois, est une notion vide de sens ; en effet, il faut appliquer une puissance pendant un certain temps pour effectuer un travail. Nous verrons cependant ci-dessous que l'on peut considérer une puissance de pointe, mais nous serons obligés de considérer une période complète d'un signal alternatif.

Encore une note, concernant le vocabulaire. On rencontre fréquemment dans la littérature technique anglo-saxonne le sigle *RMS* pour exprimer une tension efficace ou une puissance réelle. Ces trois lettres signifient *Root Mean Square* (Racine, Moyenne, Carré), ce qui est en quelque sorte la définition de la tension efficace :

$$U_{eff} = U_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (u(t))^2 dt \right)}$$

Pour évaluer cette expression, on considère un certain nombre (ici infini) d'échantillons de tension u pendant un intervalle représentatif (ici une période T). On effectue la somme des carrés de ces valeurs, puis on prend la racine du tout. Cette opération compliquée revient, dans le cas particulier d'une sinusoïde, à multiplier la valeur de crête de la tension par $1/\sqrt{2} = 0,707$, ce qui est la définition de la tension efficace.

Il n'est toutefois pas correct d'appeler puissance *RMS* la puissance efficace puisque la multiplication de cette puissance par $\sqrt{2} = 1,414$ ne donne pas la puissance de crête.

4.2 Cas de la résonance

Il existe un cas particulier de circuit réactif, celui de la résonance. En effet, nous savons que l'impédance d'une bobine augmente en fonction de la fréquence, alors que celle d'un condensateur diminue dans les mêmes conditions ; il doit donc, pour chaque combinaison d'inductance et de capacitance exister une fréquence à laquelle les impédances du condensateur et de la bobine sont identiques. Cette fréquence est bien entendu la fréquence de résonance du circuit.

Qu'y a-t-il de si particulier lorsque les impédances des deux éléments réactifs sont identiques ? La réponse se trouve dans le déphasage. En effet dans les 2 sortes d'éléments le déphasage est de 90° , mais de signe opposé, ce qui revient à dire que suivant les cas, la tension ou le courant peuvent tout simplement s'annuler ! Examinons brièvement chacun des 2 cas possibles, soit pour le circuit série et pour le circuit parallèle.

a) circuit série : dans un circuit série, le courant est nécessairement le même dans les deux composants réactifs. La tension dans la bobine est en avance de 90° sur ce courant alors que dans le condensateur, la tension est en retard de 90° sur ce même courant. Ces deux tensions sont donc en opposition et s'annulent.

b) circuit parallèle : dans un circuit parallèle, la tension est nécessairement la même aux bornes des deux composants réactifs. Le courant dans la bobine est en retard de 90° sur cette tension alors que dans le condensateur, le courant est en avance de 90° sur cette même tension. Ces deux courants sont donc en opposition et s'annulent.

Notons qu'à la résonance, il est ainsi possible d'annuler la tension aux bornes d'une bobine au moyen d'un condensateur placé en série avec cette dernière et réciproquement. Il en va de même du courant dans un composant réactif qui peut être annulé par l'utilisation appropriée de l'autre type de composant réactif monté en parallèle.

Pour revenir à la puissance dans un circuit à la résonance, considérons le circuit RLC série suivant, et voyons quelle est la puissance qu'il dissipe.

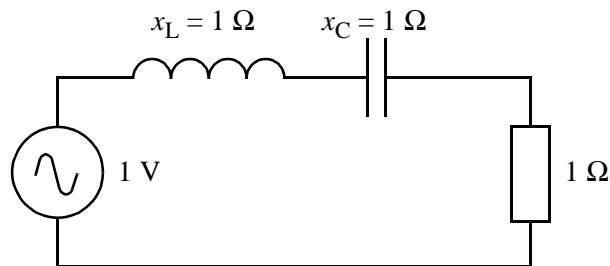


Figure 4 Le courant dans ce circuit vaut 1 A puisque, comme nous sommes à la résonance, $x_L = -x_C$ et qu'ainsi la seule impédance dans le circuit est la résistance de 1Ω

Première approche : la puissance dans la bobine est nulle, puisque comme vu ci-dessus, la puissance apparente et la puissance réactive y sont identiques. Dans le cas du condensateur, la situation est exactement la même. Finalement pour la résistance, une certaine puissance est dissipée qui correspond au produit du courant dans la résistance et de la tension à ses bornes.

Conclusion, seule la résistance dissipe de la puissance.

Seconde approche : puisque les tensions aux bornes de la bobine et du condensateur s'annulent, la puissance dissipée dans ces deux composants considérés ensemble est forcément nulle (multiplication par zéro). Seule la résistance, parcourue par le même courant, voit une tension 'non-annulée' à ses bornes ; ainsi seule la résistance est à même de dissiper de la puissance.

Conclusion, seule la résistance dissipe de la puissance.

Le cas de la résonance n'est donc pas différent du cas hors résonance : seule la résistance dissipe de la puissance. En fait, dans toutes les catégories de circuits, pour qu'une puissance soit dissipée, il est nécessaire qu'il y ait au moins une résistance, seul élément à même de dissiper de la puissance.

5 PUISSANCE ET IMPÉDANCE, TRANSFERT DE PUISSANCE.

La puissance doit en général être utilisée, et pour ce faire, elle doit être transmise d'un appareil à un autre (par exemple d'un émetteur à une antenne). Comme nous le savons ce transfert ne se fait de façon appropriée que dans des conditions bien déterminées. On parle alors de transfert optimal de puissance. Le transfert optimal de puissance c'est cependant pas toujours la règle, comme nous le verrons plus loin.

5.1 Transfert optimal de puissance

Voyons pour commencer un petit exemple simple permettant de mettre en évidence les principes de base.

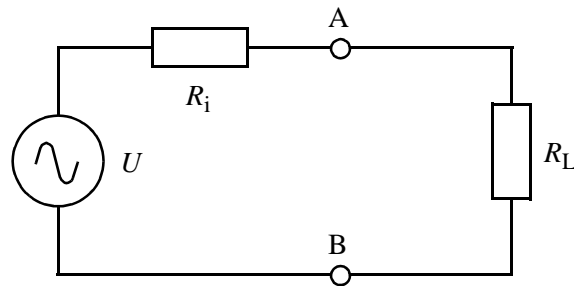


Figure 5 Circuit composé d'une source réelle (avec résistance interne) et d'un charge.

Considérons le circuit de la Figure 5. La source réelle est composée de la source idéale U et de la résistance interne R_i . La puissance dans la charge R_L est donnée par :

$$P_{R_L} = U_{R_L} \cdot I_{R_L} = \frac{U \cdot R_L}{R_i + R_L} \cdot \frac{U}{R_i + R_L} = \frac{U^2 \cdot R_L}{(R_i + R_L)^2}$$

U et R_i sont des constantes et nous voulons déterminer pour quelle valeur de R_L la puissance consommée (dissipée dans R_L) est maximale. Pour cela nous pouvons prendre la dérivée par rapport à R_L de l'expression ci-dessus et l'égaliser à zéro. Après quelques lignes de maths, on obtient :

$$U^2 \cdot (R_L^2 - R_i^2) = 0$$

Ce qui a pour solutions $U = 0$ qui ne nous intéresse pas et $R_L = R_i$ qui est la réponse cherchée. Le transfert maximal de puissance se fait donc lorsque la charge est égale à la résistance de la source.

En courant alternatif, le problème se complique quelque peu. En effet, si l'un des circuits 'producteur' ou consommateur de puissance comporte une réactance, cette dernière va 'ajouter de l'impédance' dans le circuit et ainsi empêcher un transfert optimal de puissance. Si dans la Figure 5 ci-dessus, une inductance faisait partie du circuit interne de la source, elle se trouverait effectivement en série dans le circuit.

Intuitivement, on réalise que sans dissiper de puissance elle-même, cette inductance aurait pour effet de diminuer le courant total, diminuant de ce fait la puissance disponible dans la charge. Il n'y a là rien pour nous étonner puisque nous avons violé le principe qui demande que pour un transfert maximal de puissance, la charge et la source soient de valeurs égales.

Là cependant, quelque chose devrait attirer notre attention, si la charge était identique à la source, il est impossible que cela améliore la situation ; une seconde inductance en série avec la charge ne ferait qu'aggraver le problème ; mais le petit commentaire fait dans la section sur la résonance prend ici toute sa signification, en effet, par une impédance de type opposé, il est possible 'd'annuler' la partie réactive de l'impédance de la source.

Passons encore par un exemple chiffré pour démontrer ceci, et calculons la valeur de la capacité à même d'annuler l'effet d'une inductance de 100 nH à 14 MHz.

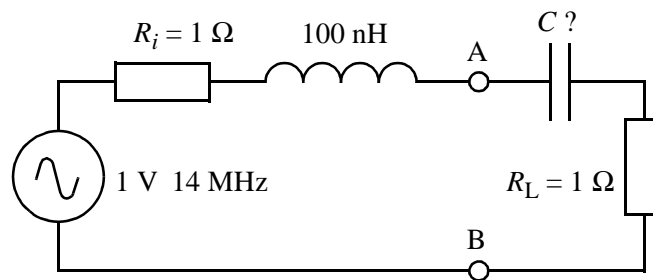


Figure 6 Ici encore, ce circuit est composé d'une source de tension réelle, ayant une impédance interne équivalente à une résistance de 1Ω en série avec une inductance de 100 nH , et d'une charge de 1Ω . La capacité C est destinée à compenser la partie inductive de la source.

À 14 MHz , l'inductance présente une impédance de $x_L = 8,80 \Omega$

À cette même fréquence, un condensateur ayant cette impédance a une capacité de $1,29 \text{ nF}$. Notons en passant que puisque ces deux éléments ont une impédance égale (mais opposée) ils ont ensemble une fréquence de résonance de 14 MHz . Avec ces valeurs, l'impédance totale dans le circuit est donnée par :

$$Z_{tot} = \sqrt{(R_i + R_L)^2 + (x_L - x_C)^2}$$

Puisque x_L et x_C sont égaux, l'impédance se réduit à : $R_i + R_L$.

Nous nous retrouvons dans le cas idéal d'une source et d'une charge uniquement résistives. Un tel calcul est superflu puisqu'il serait identique à ceux que nous avons déjà effectués ci-dessus, dans la section sur la résonance.

Il importe maintenant de légèrement modifier notre conclusion précédente qui voulait que la charge et la source soient égales pour un transfert optimal de puissance. Ceci est effectivement valable en courant continu, mais une meilleure formulation de cette règle existe, qui est valable dans tous les cas, mais qui fait appel à des notions mathématiques complexes :

Pour un transfert optimal de puissance, il faut que la charge soit le **conjugué complexe** de l'impédance de la source.

En clair cela signifie que la partie résistive de la charge doit être identique à la partie résistive de la source, et que la partie réactive de la charge doit être égale mais de signe contraire à la partie réactive de la source (la réactance doit être du type opposé).

5.2 Transfert non-optimal de puissance

Il n'est souvent pas acceptable de perdre la moitié de la puissance disponible dans la source, et l'on peut alors se contenter d'un arrangement non-optimal du point de vue de la puissance, mais favorisant le transfert de tension ou de courant.

Si l'impédance de la source est faible par rapport à la charge, on obtiendra une tension maximale aux bornes de la charge (cas de la porte d'un FET par exemple). Si au contraire, la charge est de faible valeur par rapport à l'impédance de la source, on se trouvera en présence d'un transfert de courant, développant une faible tension aux bornes de la charge (cas de la base d'un transistor par exemple).

Dans ces deux cas, la puissance dissipée dans la source est faible.

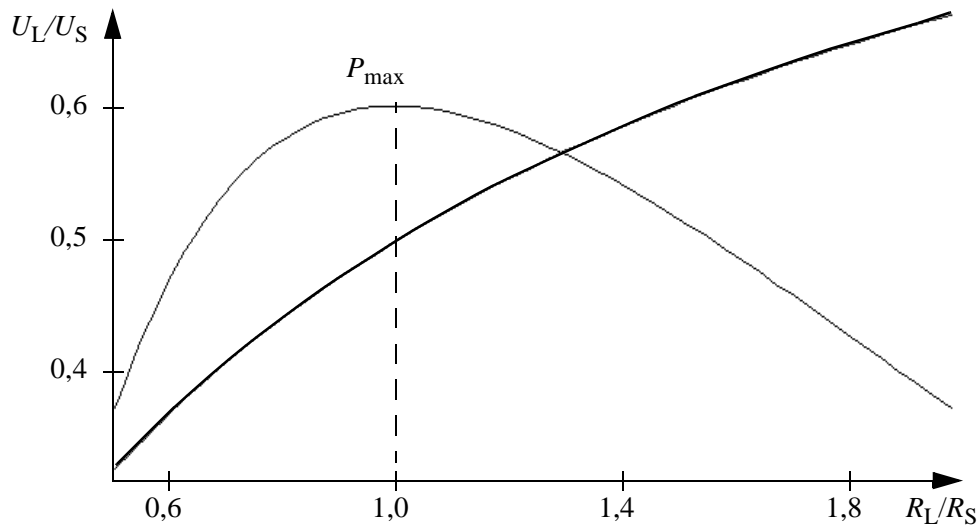


Figure 7 Puissance dissipée en fonction de la résistance de charge. L'axe horizontal représente le rapport de la charge par la source ; quand ce rapport vaut 1, ces deux valeurs sont identiques et la puissance dans la charge est maximale (courbe mince). L'échelle de gauche, se rapportant à la courbe grasse, indique la part de la tension disponible aux bornes de la charge.

À titre d'illustration, la Figure 7 montre la puissance dissipée dans une résistance de charge (courbe mince) en fonction de la valeur de cette charge par rapport à l'impédance de la source (R_L/R_S). On constate que cette puissance est maximale lorsque le rapport des résistances vaut 1 (elles sont égales). La seconde courbe (épaisse) donne la tension aux bornes de la résistance de charge en fonction du même rapport. On constate vers la droite du graphe que la tension dans la charge peut être relativement élevée, alors que la puissance dissipée est faible.

6 RENDEMENT (PUISSANCE UTILE, DISSIPÉE, CONSOMMÉE)

Dans la pratique, nous n'avons pas toujours pour but de chauffer des résistances, en fait, à l'exception du radiateur (de chauffage) nous préférons utiliser la puissance à d'autres fins : actionner la membrane d'un haut-parleur pour entendre de la musique, faire avancer une voiture ou émettre un signal par notre antenne, pour ne citer que quelques cas.

Cependant, nous avons constaté que la plupart des appareils que nous utilisons produisent une puissance utile mais aussi de la chaleur inutile.

Ce phénomène est souvent dû à la résistance interne de l'appareil ; résistance qui dissipe une certaine puissance, proportionnellement à la puissance fournie à la charge.

À ce stade, une petite remarque s'impose concernant la résistance interne : ne peut-on pas la supprimer ? pourquoi inclure cette résistance dans les circuits ?

En réalité, cette résistance est rarement incluse volontairement et rien ne peut être fait pour la supprimer totalement. Elle est due aux imperfections des composants, ou dans d'autres cas elle est simplement nécessaire, par exemple pour l'adaptation à une ligne de transmission. Lorsqu'elle a pour cause les imperfections du circuit, cette résistance est symbolique et regroupe en un élément toutes les contributions des divers composants du

circuit. Quand elle est nécessaire, on tient compte des contraintes du circuit et l'on n'ajoute que la part qui manque pour atteindre l'impédance requise.

Notons que lorsque l'on parle des imperfections du circuit, il n'est pas seulement question des résistances parasites, telle celle d'un conducteur, mais aussi des résistances utiles et indispensables à la polarisation du circuit.

Cette résistance interne, qui symbolise en un élément l'ensemble des pertes du circuit dissipe une partie de la puissance totale disponible, et provoque un échauffement de la source (l'appareil qui fournit la puissance).

Revenons encore au cas ci-dessus (Figure 5), que se passe-t-il lorsque l'impédance de la source est le plus faible possible, et en tous cas faible par rapport à la charge.

La puissance perdue en chaleur dans la source est ainsi minimale, et une certaine puissance utile est aussi disponible et dissipée dans la charge. Cependant, comme vu ci-dessus (Figure 7), cette puissance, n'est pas la puissance maximale que pourrait fournir ce circuit en théorie.

En pratique, le dimensionnement des composants du circuit 'source' ne permettra peut-être pas de fournir une puissance supérieure sans dommage, dans ce cas le circuit ne pourra pas prétendre fournir la puissance maximale théorique.

Il y a donc 3 sortes de puissances pour caractériser un appareil consommateur de puissance, soit : la puissance fournie à la charge (antenne, haut-parleur), la puissance perdue en chaleur dans l'appareil fournisseur de puissance, et la somme de ces deux puissances, qui est la puissance totale consommée par l'appareil.

C'est là qu'intervient la notion de rendement, puisqu'en minimisant la puissance perdue en chaleur, une plus grande partie de la puissance absorbée se retrouvera dans la charge, ou inversement, en minimisant la puissance perdue en chaleur, pour une puissance donnée dans la charge, on diminuera la puissance consommée.

Le rendement s'exprime en % ou sous forme d'un chiffre sans unités inférieur à 1. Si d'aventure, vous vous trouvez en présence d'un rendement supérieur à 1, revoyez vos calculs ou déposez d'urgence un brevet et devenez le maître du monde ! vous venez d'inventer une machine qui fournit plus d'énergie que ce qu'elle absorbe.

7 CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE

Cette première section a permis de voir et de mettre en évidence les aspects de base de la puissance, d'une part en courant continu et d'autre part en courant alternatif, en se limitant pourtant à des cas simples. La seconde partie de cet article mettra en évidence les aspects HF de la puissance, en usage dans le monde des transmissions radio.

Tutorial : Aspects de la puissance

Seconde Partie

La première partie de ce tutorial a examiné les aspects élémentaires de la puissance, soit ses unités, les puissances en courant continu et alternatif, les problèmes de transfert de puissance et les notions de rendement. Cette seconde partie traite de la puissance en haute fréquence, et plus généralement de ses applications en rapport avec le radio-amateurisme.

8 PUISSANCE D'UN SIGNAL VARIABLE

Tant que nous nous intéressons à une puissance qui ne varie pas ou qui ne varie que lentement, les concepts vus jusqu'à maintenant sont entièrement suffisants. Cependant si nous considérons une puissance qui varie rapidement, par exemple la sortie d'un émetteur modulé en AM, alors nous devons nous intéresser à la puissance moyenne, à la puissance PEP, et au rapport cyclique du signal (le terme anglais *duty cycle* est souvent utilisé).

8.1 Puissance PEP

PEP pourrait signifier Puissance Efficace de Pointe, mais ce sigle est dérivé de l'anglais *Peak Envelope Power*, ce qui signifie Puissance de Pointe de l'Enveloppe. Par enveloppe, il faut entendre la forme externe du signal modulé, telle qu'observée sur un oscilloscope.

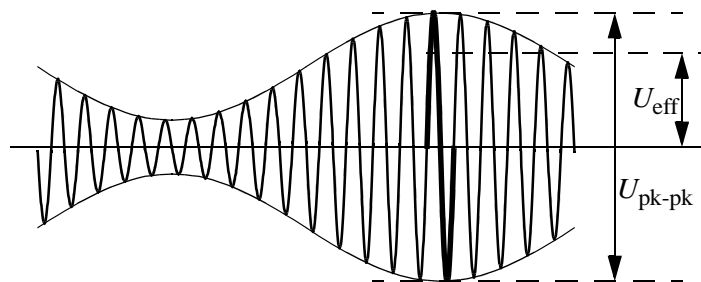


Figure 8 Cycle de plus grande amplitude dans le cas d'un signal modulé en AM. Comme toutes les tensions sinusoïdales, il est caractérisé par une valeur **crête à crête** ($U_{\text{pk-pk}}$) et une valeur efficace (U_{eff}).

Les signaux modulés ayant une amplitude variable, en fonction du signal de modulation (à l'exception de la FM), il est utile de déterminer la puissance maximale de sortie qu'ils occasionnent ; en effet, la puissance momentanée lors des crêtes de modulation peut être très élevée, particulièrement en BLU. A cet effet, les prescriptions et règlements concernant la puissance d'émission autorisée font fréquemment appel au concept de **puissance PEP**.

La puissance PEP est calculée comme n'importe quelle puissance réelle, seule puissance utile, mais pour **le cycle de plus grande amplitude** du signal considéré. La puissance PEP est alors donnée par :

$$P_{\text{PEP}} = \frac{U_{\text{eff}}^2}{R}$$

Cette formule est identique à celle du Paragraphe 1.3 de la première partie.

Ainsi dans le cas du signal de la Figure 8 si l'on mesure $160 \text{ V}_{\text{pk-pk}}$ lors du cycle de plus grande amplitude, cela correspond à une puissance PEP dans une résistance de 50Ω de :

$$P_{\text{PEP}} = \frac{\left(\frac{U_{\text{pk-pk}}}{2 \cdot \sqrt{2}}\right)^2}{R} = \frac{56,568^2}{50} = 64 \text{ W}$$

8.2 Puissance moyenne et rapport cyclique

Lors des creux de modulation, la puissance calculée sur un cycle est bien moindre, voire nulle si la modulation tombe à zéro. On peut alors s'intéresser à la puissance moyenne du signal, en considérant la moyenne des puissances de chaque cycle pendant un temps suffisamment long pour tenir compte de ces cas extrêmes (quelques secondes à une minute). Cette valeur moyenne de puissance dépendra ainsi de plusieurs facteurs tels que, dans le cas de la transmission de parole, l'utilisation éventuelle d'un compresseur de modulation et son réglage (taux de compression), de la façon de parler de l'opérateur (éclats de voix, débit lent ou rapide) et dans une moindre mesure du contenu de la transmission (prononciation de certaines syllabes). Un autre exemple de signal hautement variable en amplitude est un signal de télégraphie. Ici encore la puissance moyenne peut varier en fonction des espaces entre les éléments, mais surtout en fonction des temps de pause entre chaque 'tirade'.

Le concept de rapport cyclique permet d'obtenir une relation entre ces deux puissances, et considérant le temps pendant lequel l'émetteur est à pleine puissance par rapport à une période de temps de référence. La Figure 9 illustre ce point.

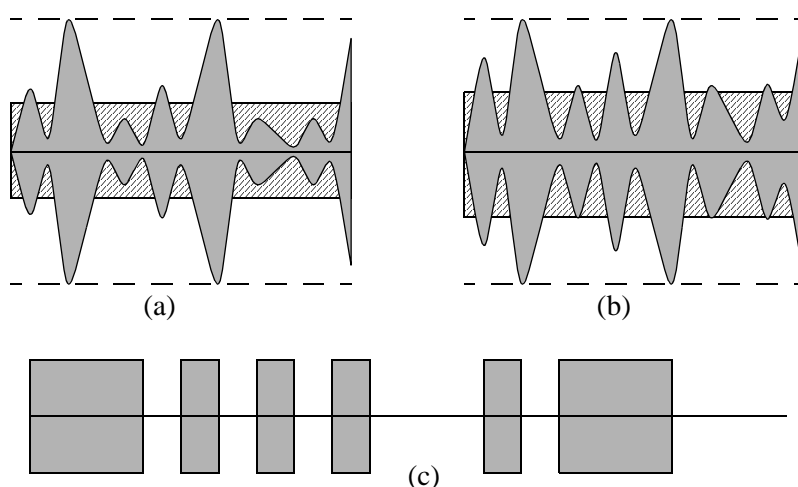


Figure 9 (a) signal modulé en AM, (b) signal modulé en AM après compression, (c) les lettres BA en morse. Les traits pointillés indiquent l'amplitude de crête et les rectangles hachurés la puissance moyenne. Cette puissance moyenne est obtenue en considérant que la partie du signal qui dépasse de ce rectangle contient juste ce qu'il faut de puissance pour combler les creux à l'intérieur du rectangle.

On voit en (a) que le signal (gris foncé), est identique au signal (b), mais ce dernier ayant passé au travers d'un compresseur de modulation a une amplitude moyenne supérieure, représentée par les zones hachurées. En (a), la puissance moyenne est de l'ordre de 35%, alors qu'en (b) elle atteint 50%. Cela signifie qu'un tel signal est assimilable du point de vue du rapport cyclique à une émission à 100% pendant 35%, respectivement 50% du temps.

Le signal de télégraphie en (c) est un cas simple, puisque l'on sait qu'un trait vaut 3 points, qu'un espace entre éléments vaut 1 point et qu'un espace entre lettres vaut 3 points. On compte ici 10 éléments de temps en émission à 100% et 10 éléments de pause, ce qui donne un rapport cyclique de 50%.

Ces variations rapides de puissance et la puissance moyenne ne sont pas sans effet sur le dimensionnement du circuit d'alimentation pour un émetteur supposé transmettre de tels signaux. On s'assurera en tous cas que l'alimentation est à même de fournir la puissance moyenne nécessaire, en continu. Notons que si l'on suppose un rapport cyclique faible (longues pauses entre les phrases - par exemple) cette puissance peut être relativement faible. Ce dimensionnement affectera essentiellement les capacités de dissipation thermique de l'alimentation. Cependant cette dernière devra aussi être capable de fournir la puissance de pointe nécessaire en cas de besoin, mais pas de façon soutenue.

Concernant la puissance de pointe, deux cas peuvent se présenter. Si cette puissance n'est requise que par pointes, sans qu'une puissance soutenue ne soit demandée, les pointes de courant nécessaires peuvent être fournies par un (gros) condensateur, en parallèle sur la tension d'alimentation, qui aura le temps de se recharger entre chaque demande. Si on contraire, les demandes de puissance peuvent être répétitives rapidement ou soutenues, il faudra alors que l'alimentation puisse fournir ce courant sur demande. La seule économie possible sera sur les capacités de dissipation thermique des circuits (la chaleur est un phénomène qui se propage relativement lentement).

Finalement, si le circuit est amené à fonctionner avec un rapport cyclique de 100% ou proche (FM, RTTY), il faudra que l'alimentation soit dimensionnée en conséquence, pour fournir la puissance nécessaire en continu.

Il est évident que ces considérations sur le dimensionnement thermique des circuits d'alimentation sont également applicables à l'étage final qui, n'ayant pas un rendement de 100%, s'échauffera aussi en fonction des demandes de puissance auxquelles il est soumis.

8.3 Puissances fantaisistes

On rencontre quelquefois le terme de 'puissance musicale' sur les notices des amplificateurs hi-fi. Ce terme, plutôt fantaisiste, a certainement pour principale utilité d'aider à la vente de ces appareils. Rappelons que la seule puissance à même de fournir un travail (ici déplacer la membrane du haut-parleur) est la puissance réelle.

Le terme de 'puissance de crête' que l'on rencontre aussi sur les notices de certains amplificateurs hi-fi est probablement identique à la puissance PEP. Il s'agit alors de la puissance que l'amplificateur peut fournir pendant un bref instant, lors par exemple d'un coup de cymbale, mais qu'il ne peut pas soutenir pendant une plus longue période en raison du dimensionnement de l'alimentation et/ou de l'étage de puissance.

Le terme de ‘puissance efficace’ est probablement un terme équivalent à la puissance réelle. Il ne fait pas de doute que ce terme aussi a pour principale utilité d’aider à la vente d’amplificateurs hi-fi.

9 RAPPORTS DE PUISSANCE

Il est fréquent, dans le domaine des hautes fréquences que nous devons effectuer des comparaisons entre des signaux d’amplitudes très différentes, par exemple le rapport entre un signal utile de sortie d’un émetteur et les rayonnements non-essentiels qui lui sont associés.

C’est d’une pratique courante dans ce cas de passer par l’usage des décibels (dB). Ces derniers sont aussi d’une grande utilité pour le calcul de gains ou de pertes cascadées, car ils réduisent ces derniers en une suite d’additions.

9.1 Introduction aux dB

Les dB représentent toujours un rapport entre deux puissances (même lorsque l’on compare des tensions - nous y reviendrons). La grandeur de base de cette comparaison est le Bel (B), mais cette grandeur étant relativement importante, on utilise universellement le dixième de Bel, soit le décibel. À cette fin, les calculs permettant de déterminer un rapport en décibel contiendront donc un facteur 10.

Le second aspect important des décibels réside dans leur nature logarithmique. Les logarithmes - logs en langage courant - effectuent un changement de domaine, qui transforme les multiplications en additions, tout en simplifiant les nombres en jeu. Si l’on désire finalement revenir dans le domaine de départ, pour exprimer des puissances ou tensions, le passage par l’opération inverse (antilog) est alors nécessaire.

9.2 Rapports de puissance, rapports de tension

Considérons un amplificateur d’impédance d’entrée et de sortie de 50Ω , qui fournit 8 V en sortie pour un signal d’entrée de 2 V. La puissance à l’entrée est alors de 80 mW et celle à la sortie de 1,28 W. Puisque nous nous intéressons à l’augmentation de puissance apportée par cet amplificateur, en d’autres termes, combien de fois le signal de sortie est amplifié par rapport au signal d’entrée, effectuons le rapport de ces puissances, pour trouver 16. Puis, afin d’effectuer le changement de domaine mentionné plus haut, prenons le log de cette valeur pour obtenir 1,204. Finalement, puisque nous voulons des décibels, dixième partie du bel, multiplions ce chiffre par 10, ce qui donne 12 dB. Ces étapes se retrouvent dans la formule suivante permettant de calculer le rapport en dB entre deux puissances.

$$G[\text{dB}] = 10 \cdot \log\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

Mathématiquement, si nous divisons les deux termes d’un rapport par un même nombre, le rapport ne change pas. Ici, par exemple, si nous divisons les 2 termes par 50, le rapport reste le même :

$$\frac{1,28}{0,08} = \frac{1,28/50}{0,08/50} = 16$$

Gardons cette remarque à l'esprit pour examiner le cas de la comparaison de deux tensions, par exemple 8 V et 2 V. Puisque ce sont les valeurs mesurables sur notre amplificateur ayant un gain de 12 dB, nous devons retrouver ce même gain, en utilisant ces tensions. Cependant nous avons affirmé que les dB ne pouvaient comparer que des puissances, il nous faut donc convertir les tensions en puissances. Ceci peut être fait de façon très simple et même implicite. A titre d'exemple, commençons par calculer les puissances d'entrée et de sortie :

$$P_{in} = U \cdot I = U \cdot \frac{U}{Z} = 2 \cdot \frac{2}{50} = 0,08 \text{ W}$$

$$P_{out} = U \cdot I = U \cdot \frac{U}{Z} = 8 \cdot \frac{8}{50} = 1,28 \text{ W}$$

Nous pourrions à ce stade calculer le rapport de ces deux puissances, comme ci-dessus, mais nous remarquons que nous pourrions aussi bien supprimer le terme Z des équations ci-dessus sans modifier le rapport de ces deux puissances. En appliquant ces conclusions au calcul d'un rapport de puissances en dB, nous obtenons :

$$G[\text{dB}] = 10 \cdot \log\left(\frac{U_{out}^2}{U_{in}^2}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{U_{out}}{U_{in}}\right)^2$$

Or il se trouve que le changement de domaine dû au passage par les logs transforme une élévation à une puissance en simple multiplication, ici une élévation au carré peut se muer en une multiplication par 2 à condition de le faire en dehors de la fonction log :

$$G[\text{dB}] = 10 \cdot 2 \cdot \log\left(\frac{U_{out}}{U_{in}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{out}}{U_{in}}\right)$$

Voilà donc les deux façons de calculer un rapport en dB, Comme nous venons de le voir, il est important que dans le cas de tensions, les impédances soient identiques du côté de la source et de la charge pour que le rapport des 2 tensions reste correct.

9.3 Valeurs importantes

Il serait dommage de continuer sur ce sujet sans s'arrêter un moment sur les énormes simplifications possibles par l'usage de certaines valeurs importantes de dB. Le tableau suivant sert de référence.

Tableau 2 Équivalence entre des rapports de tensions et de puissances et leur expression en dB

Rapport (dB)	Rapport de puissances	Rapport de tensions
3	2	1,414
6	4	2
10	10	
20	100	10
30	1000	
40	10 000	100
+	×	×

Nous voyons ainsi immédiatement que dans l'exemple ci-dessus, un rapport de puissances de 16, soit $2 \times 2 \times 2 \times 2$ correspond à 4 fois 3 dB, c'est-à-dire 12 dB. De même, pour un rapport de tensions de 4 (2×2), soit de 2 à 8 V, nous avons 2 fois 6 dB pour obtenir également 12 dB.

Inversement, un signal qui se trouve 66 dB en-dessous d'une tension de 100 V a une amplitude de :

3×20 dB soit 10^3 et 6 dB, soit 2 fois pour un facteur d'atténuation de $2 \cdot 10^3$. L'amplitude de notre signal est alors de :

$$100 / 2 \cdot 10^3 = 50 \text{ mV}$$

Ceci est un véritable exemple des simplifications apportées par l'usage de dB, qui trouvent encore de nombreuses applications lorsque l'on a affaire à des gains (ou pertes) cascades.

9.4 dB relatifs et absolus

Notre sujet est la puissance, et nous allons voir comment il est possible d'exprimer des puissances, pas seulement des changements de puissance, à l'aide des dB.

En utilisant une référence connue, un niveau de puissance standard, nous pouvons en effet représenter des puissances à l'aide de dB, tout en conservant leur nature logarithmique, permettant de simplifier les calculs.

Les références utilisées sont variées et dépendent de la grandeur à représenter. Dans le domaine des faibles signaux, on peut utiliser le milliwatt (mW), en ajoutant la lettre m au symbole dB. Ainsi une puissance de 1 mW équivaut à 0 dBm ; une puissance de 1 W, soit 1000 mW s'exprime par 30 dBm.

Pour des signaux plus puissants, on peut utiliser le watt (W) comme référence. Une puissance de 20 dBW correspond alors à 100 W.

Finalement, considérons encore qu'une valeur exprimée par rapport à une référence de tension, par exemple 20 dB μ V représente encore une puissance, si l'on connaît l'impédance aux bornes de laquelle cette tension est développée. Ici, si l'impédance est de 50 Ω , la puissance correspondant à 20 dB μ V est de : 2 pW, soit -87 dBm ou -57 dB μ W.

9.5 Puissance ERP, EIRP

D'autres références pour exprimer un gain en puissance sont utilisées en transmission radio, c'est notamment le cas lorsque l'on s'intéresse aux antennes. Une antenne présentant un gain de 3 dB offre un doublement de la puissance (dans une ou des directions préférentielles).

Ici deux références sont en usage courant, soit le gain d'un dipôle dont le gain est bien entendu de 0 dBd (d comme dipôle) et le gain d'une antenne isotropique qui est de 0 dBi (l'antenne isotropique est une antenne qui rayonnerait de façon identique dans toutes les directions). Mentionnons en passant qu'un dipôle a un gain de 2,14 dBi.

Remarquons que nous n'avons ainsi défini que des références de gain, puisqu'aucune puissance de référence n'entre encore en jeu.

Examinons ce qui se passe maintenant si l'une ou l'autre de ces antenne est alimentée par un signal de 1 W, par exemple, afin que nous ayons une référence pour déterminer la puissance rayonnée par l'antenne.

Dans la cas du dipôle nous aurons une puissance de 1 W plus 0 dBd, soit une puissance de 1 W ERP. Le terme ERP (de l'anglais *Effective Radiated Power*) est réservé pour indiquer que la référence est le dipôle.

Exemple une antenne ayant un gain de 6 dBd alimentée par notre signal de 1 W fournit une puissance de 4 W ERP.

Dans le cas de l'antenne isotropique, nous aurons une puissance de 1 W plus 0 dBi, soit 1 W EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*). Ce terme est bien entendu réservé pour indiquer que l'antenne de référence est l'antenne isotropique.

Les radio-amateurs utilisent presque exclusivement le terme ERP qui exprime la puissance rayonnée par rapport à celle obtenue d'un dipôle. Il serait cependant plus rigoureux de n'utiliser que la puissance EIRP, puisqu'un dipôle a déjà un gain de 2,14 dBi.

Un dipôle alimenté par une puissance de 1 W rayonne donc une puissance de 1 W ERP ou 1,637 W EIRP. Remarquons cependant que l'erreur introduite en négligeant ce détail est faible, un point S correspondant à 6 dB, cette erreur est de l'ordre de 1/3 de point S.

10 RÉPARTITION DE LA PUISSANCE DANS UN SIGNAL AM

Les radio-amateurs n'utilisent plus qu'une sorte de modulation d'amplitude, c'est l'émission en bande latérale unique. En BLU, toute la puissance de l'émetteur est consacrée à la transmission du signal utile. Il est cependant intéressant d'examiner toute la signification de cette phrase en considérant ce que l'on gagne en utilisant la BLU.

Un signal modulé en AM par un signal sinusoïdal peut être représenté par l'équation suivante :

$$U_{AM}(t) = U_{port} \cdot \cos(\omega_{port}t) \cdot (1 + U_{mod} \cdot \cos(\omega_{mod}t))$$

Cette formule permet de calculer la tension U_{AM} du signal modulé en fonction du temps (t). U_{port} est la tension de crête de la porteuse, U_{mod} est la tension de crête du signal de modulation, ω_{port} est la pulsation de la porteuse ($2\pi \cdot f$) et ω_{mod} , celle du signal de modulation. Le facteur 1 dans la seconde partie de l'équation représente la transmission de la porteuse.

On peut simplifier cette expression, en normalisant U_{port} et U_{mod} à 1, ce qui implique aussi un taux de modulation de 100%. Finalement, après quelques lignes de maths qui n'intéressent personne, nous pouvons 'simplifier' cette expression comme suit :

$$U_{AM}(t) = \cos(\omega_{port}t) + \frac{1}{2}(\cos(\omega_{port}t - \omega_{mod}t)) + \frac{1}{2}(\cos(\omega_{port}t + \omega_{mod}t))$$

Les 3 composants d'un signal modulé en AM apparaissent clairement. Premièrement la porteuse $\cos(\omega_{port}t)$, puis les deux bandes latérales avec une tension chacune de la moitié de la tension dans la porteuse, et des fréquences situées de part et d'autre de la porteuse à une distance égale à la fréquence de modulation.

Mais notre sujet est la puissance. Nous savons qu'une puissance, pour une impédance donnée, se calcule en passant par la tension au carré. Ici la résistance n'a pas d'importance, puisque nous essayons de comparer la puissance dans les bandes latérales et dans la porteuse (dans les deux cas cette résistance est identique).

La puissance dans la porteuse est de 1^2 soit 1, alors que la puissance dans chaque bande latérale est de $(1/2)^2$ soit $1/4$. Nous pouvons maintenant pleinement réaliser la supériorité de la BLU qui consacre toute la puissance de l'émetteur à l'émission du signal utile, alors que l'AM nécessite que la moitié de la puissance de l'émetteur serve à la transmission de porteuse, et que la moitié qui reste, serve à transmettre deux fois le même signal, soit chacune des bandes latérales.

Ce qu'il faut encore noter, sur ce sujet, est la relation de carré (puissance 2) entre la tension et la puissance correspondante. Nous en avons déjà parlé lors de la section sur les dB, et nous allons encore en voir un exemple vers la fin de la section suivante.

11 PUISSANCE DE BRUIT

Le bruit, en radiocommunications, se représente généralement au moyen d'une puissance, normalement faible, mais toujours trop importante. Il existe essentiellement 2 sortes de bruits, celui dit $1/f$, dont l'amplitude augmente vers les très basses fréquences ; ce dernier n'est présent qu'en-dessous de 10 kHz (à peu près) et ne faisant pas partie du spectre HF, ne fait pas l'objet de ce paragraphe. La seconde composante de bruit, affecte toutes les fréquences de manière identique et par conséquent également celles utilisées pour les radiocommunications. Ce bruit qui contient la même puissance quelle que soit la fréquence considérée est qualifié de bruit blanc.

La différence fondamentale qui existe entre la puissance contenue dans un signal et celle du bruit tient en ce que le signal a une certaine largeur spectrale, au delà de laquelle il n'y a plus de signal, alors que le bruit occupe toute la largeur de bande à disposition. Ainsi, connaissant le contenu d'un signal utile, par exemple un signal AM, il est aisé, comme ci-dessus au Paragraphe 10 de déterminer sa puissance, et la puissance de chacun de ses composantes ; mais comme le bruit est d'égale puissance sur tout le spectre, il n'est limité que par la largeur de bande sur laquelle il est observé.

Nous voyons donc que le bruit sera spécifié en termes de puissance par largeur de bande, et pour rendre les choses plus aisément comparables, la largeur de référence est normalement le hertz. Le bruit se mesure donc en W/Hz ou au moyen d'unités logarithmiques en dBm/Hz (ici, la référence est le milliwatt). On parle alors de **densité spectrale de bruit**.

L'implication principale de tout ceci, est que la puissance de bruit est directement proportionnelle à la largeur de bande considérée, c'est pourquoi il est utile, pour avoir le meilleur rapport signal/bruit dans un récepteur, d'utiliser un filtre aussi étroit que possible, mais juste assez large pour ne pas affecter le signal utile.

Terminons cette section par une petite digression de notre sujet principal, la puissance, pour considérer la tension en rapport avec une certaine puissance de bruit. Nous avons mis en évidence qu'il y a un rapport quadratique (puissance deux) entre la puissance et la tension ou le courant. Si nous considérons donc une tension équivalente à une certaine puissance de bruit, nous devons affecter la largeur de bande de la même façon, ce qui nous donne une tension par racine de Herz : $V/\sqrt{\text{Hz}}$ ou $\text{dBV}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Ainsi un certain niveau de bruit peut s'exprimer comme suit pour représenter le même niveau :

$$-63 \text{ dBm}/100\text{Hz} \text{ ou } -83 \text{ dBm}/\text{Hz} \text{ ou } -15,83 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} \text{ (sur } 50 \Omega)$$

Comme nous le voyons, cette unité un peu intimidante, que l'on rencontre quelquefois dans la littérature technique, n'est en fait que la conséquence de phénomènes relativement aisés à appréhender.

12 PUISSANCE DANS LES LIGNES DE TRANSMISSION

Dans le cas le plus simple, une ligne de transmission reçoit une certaine puissance, la transporte et la délivre à une charge résistive, le tout étant parfaitement adapté ... mais la vie n'est pas si simple car une bonne adaptation est l'exception plus que la règle.

On fait alors appel au concept de puissance directe et de puissance réfléchie. En fait de puissance, la ligne est le siège d'une tension et d'un courant, qui sont les sommes vectorielles des tensions et courants instantanés, en fonction de la position le long de la ligne. La puissance n'existe que lorsqu'il y a une résistance, c'est-à-dire aux deux extrémités de la ligne : la résistance interne de la source et la résistance de charge.

Il y a aussi une certaine puissance dissipée dans la ligne, mais seulement dans les résistances de perte, soit principalement la résistance série due aux conducteurs (encore plus importante en UHF en raison de l'effet pelliculaire) et la résistance parallèle due aux pertes de l'isolant.

Il est pourtant utile et grandement simplificateur de raisonner en termes de puissances, l'une directe et l'autre réfléchie se propageant en sens inverses le long de la ligne. Il est cependant impératif de réaliser qu'en réalité il s'établit dans la ligne un régime permanent (*steady state*) résultant de l'interaction de ces différentes puissances, et que de ne considérer que les composantes de ce régime ne permet pas forcément une bonne vue d'ensemble de la situation dans la ligne.

Il y a ainsi plusieurs puissances à considérer dans la ligne, d'abord la puissance livrée à la ligne par l'émetteur, qui se déplace vers l'antenne. Selon l'adaptation de l'antenne à la ligne, une partie de cette puissance est absorbée et émise par l'antenne. Chemin faisant, une partie de cette puissance est dissipée dans les résistances de perte de la ligne.

La partie de la puissance non livrée à l'antenne est réfléchie dans la ligne et voyage en sens inverse vers l'émetteur. Cette puissance subit également en chemin les pertes dans la ligne.

Du côté de l'émetteur, selon l'adaptation, une partie de cette puissance est absorbée dans la résistance interne de l'émetteur et une partie est re-réfléchie vers l'antenne où elle s'ajoute à la puissance déjà en route vers l'antenne, et subit aussi à nouveau l'effet des pertes dans la ligne.

Ce phénomène se poursuit ainsi jusqu'à ce que toute la puissance fournie par l'émetteur soit dissipée dans l'une des 3 résistances mentionnées ci-dessus.

Examinons maintenant la situation à la jonction entre la ligne et l'antenne, soit du côté de la charge de la ligne. Il y a deux puissances importantes et égales en ce point, celle absorbée par l'antenne et celle que la ligne fournit à l'antenne. Cette dernière est la différence entre la puissance directe et la puissance réfléchie.

Cependant la puissance directe en ce point est la somme de la puissance fournie par l'émetteur et de la partie de la puissance réfléchie renvoyée par la terminaison de la source (puissance re-réfléchie). Ceci explique que la puissance directe lue sur un wattmètre peut être supérieure à la puissance fournie par l'émetteur.

Cependant la puissance absorbée par l'antenne est nécessairement inférieure à la puissance de l'émetteur, la différence étant justement la puissance réfléchie.

13 MESURE DE LA PUISSANCE

La méthode la plus simple pour mesurer la puissance est de mesurer à la fois la tension et le courant et d'en effectuer le produit. Lorsque la tension est connue et relativement invariable (cas du réseau électrique), seule une mesure du courant est nécessaire.

Cependant cette méthode n'est que difficilement applicable en HF. On se sert alors d'un milliwattmètre, pour les faibles puissances, ou de réflectomètres pour les puissances plus importantes.

Le milliwattmètre est le plus précis mais le plus cher de ces deux instruments. Il est simplement composé d'une résistance de précision (par exemple de $50\ \Omega$) et d'un thermocouple pour mesurer son élévation de température. La gamme de puissance mesurable avec un tel appareil est plutôt restreinte, d'un part par le minimum de puissance nécessaire pour obtenir une élévation mesurable de température, et d'autre part par la puissance maximale que peut dissiper la résistance. Cette gamme de mesure est normalement étendue en précédant l'appareil d'un atténuateur calibré.

Le réflectomètre est relativement bon marché, et se trouve chez chaque radio-amateur. Il n'est cependant pas d'une grande précision, car il n'est calibré que pour la mesure de la puissance dans une charge purement résistive, normalement de $50\ \Omega$.

La Figure 10 représente le schéma de base d'un tel appareil, afin d'illustrer son fonctionnement. Notons ici que sa réalisation peut prendre différentes formes. Il est ainsi fréquent de rencontrer des appareils qui possèdent une seule ligne couplée servant à la fois à la mesure des composantes directe et réfléchie du signal.

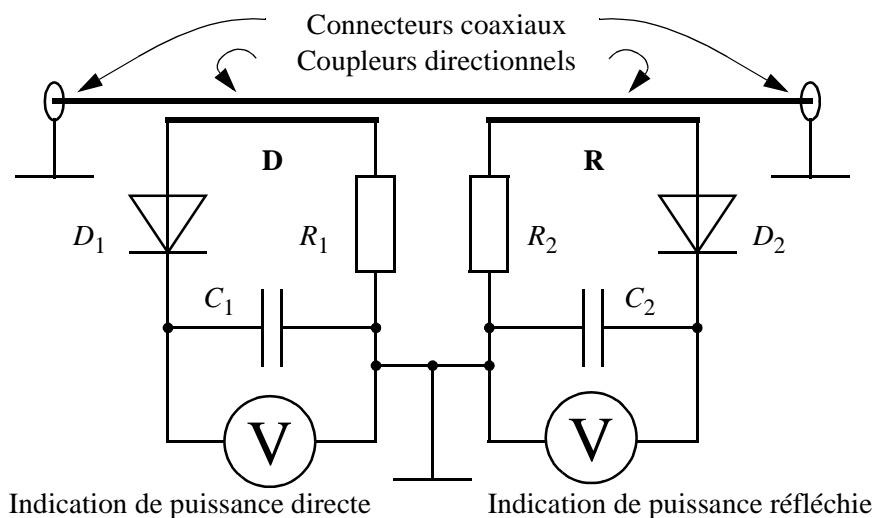


Figure 10 Schéma de principe d'un TOS-mètre. La tension obtenue aux bornes de deux coupleurs directionnels est redressée, puis mesurée. Le coupleur D mesure l'onde directe, le coupleur R mesure l'onde réfléchie

Son principe de fonctionnement est basé sur l'addition de deux tensions issues d'un couplage capacitif et inductif. Sa réalisation peut prendre différentes formes selon la gamme de fréquences sur laquelle il est appelé à fonctionner.

En HF, le couplage capacitif s'effectue par un condensateur ajustable (*trimmer*) et le couplage inductif par un petit transformateur (généralement torique dont le primaire est simplement la ligne à mesurer traversant le tore, l'autre enroulement se trouve bien entendu autour du tore). Pour les fréquences plus élevées (VHF/UHF) on fait appel, comme à la figure ci-dessus à deux lignes (*microstrips*) à proximité l'une de l'autre. L'une transportant le signal à mesurer et l'autre effectuant le prélèvement du signal mesuré.

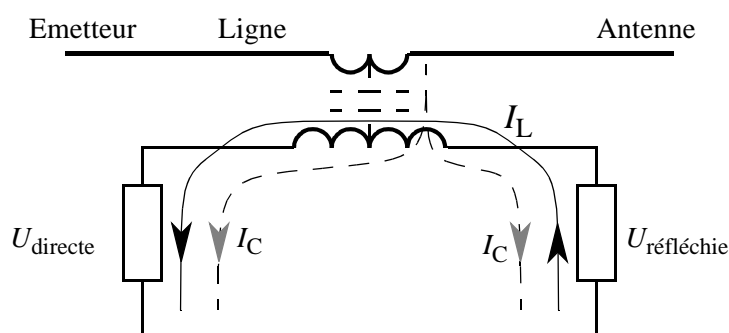


Figure 11 Schéma de principe d'un réflectomètre. La tension induite au secondaire provoque un courant I_L qui circule selon les flèches en noir. Le couplage capacitif entre les enroulements provoque un courant qui se divise en deux parties selon les flèches pointillées. En absence de TOS, $|I_L| = |I_C|$.

Dans les deux cas, il existe un couplage capacitif et un couplage inductif entre les lignes. La Figure 11 illustre ce point, en attribuant des flèches grise au courant issu du couplage capacitif et des flèches noires au courant résultant du couplage inductif. On suppose que pour une terminaison nominale du système, les deux courants sont d'amplitudes égales.

Ainsi, l'une des résistances de charge du 'wattmètre' voit un courant de $2 \cdot I = I_L + I_C$ alors que dans l'autre résistance de charge, les deux courants s'annulent. Si le charge est modifiée, par exemple augmentée, le courant dans la ligne diminue, et la composante inductive des courants de mesure diminue, alors que, la tension sur la ligne étant plus importante, la composante due au couplage capacitif augmente. La situation est exactement le même si la résistance de charge diminue. Il n'y a plus qu'à mesurer les deux tensions résultantes dans les résistances, au moyen d'instruments calibrés en watt.

Lorsque la charge en bout de ligne comporte une composante réactive, la situation reste presque identique, mais il faut alors prendre en compte les déphasages, ce qui complique les explications, mais pas le principe de base.

14 CONCLUSION

La première partie de ce tutorial a passé en revue les bases et unités en rapport avec la puissance, en particulier en courant alternatif. Dans la seconde partie, les notions se rapportant de plus près à la haute fréquence, et en particulier à l'émission d'amateur ont été passés en revue.

J'espère ainsi avoir éclaircis quelques points, en particulier en ce qui concerne l'usage des dB, les différents sortes de puissances, des plus réelles au plus fantaisistes, et introduit avec des explications simples, quelques vastes sujets, tels les lignes de transmission, la mesure de la puissance, et des notions de base sur le bruit.

Olivier PILLOUD - HB9CEM - 1999

Cet article ainsi que d'autres en rapport avec la technique et le radio-amateurisme est disponible sur le site :

<http://hb9cem.pilloud.net/>