

L'amplificateur magnétique (F4DXU)

A l'heure actuelle ce sont les circuits intégrés et les microprocesseurs qui tiennent le haut du pavé en électronique, en remontant dans le temps on trouve les transistors puis encore avant les tubes thermoïoniques mais ces derniers ont de nombreux défauts, ils sont fragiles, consomment à vide, demandent de nombreux composants pour leur fonctionnement, etc. On leur a donc cherché un concurrent plus robuste et plus facile à mettre en œuvre : l'amplificateur magnétique. Ses caractéristiques et son fonctionnement se rapprochent du thyristor, le nom d'amplificateur magnétique est générique et il ne faut pas le voir comme un amplificateur en classe A très linéaire, c'est un commutateur de puissance.

C'est un composant quasiment oublié aujourd'hui mais il y a quelques années on en trouvait tout de même dans quelques applications particulières en télévision couleur. Il était notamment utilisé comme modulateur de correction de coussin Est-Ouest et régulateur de largeur du balayage ligne, dans l'aviation, dans l'industrie, etc. Il présente de nombreux avantages :

Il est robuste, sans organes mobiles, résiste au choc et est d'une durée de vie quasiment illimitée. Son rendement est important, sa consommation à vide est presque nulle et son amplification en puissance peut être très importante puisque quelques microwatts peuvent se transformer en kilowatts. L'amplificateur n'étant pas parfait, il a tout de même quelques défauts et notamment sa constante de temps que l'on ne peut négliger.

Voici un rappel de quelques notions de base en magnétisme mais sans démonstration car le but est simplement d'en comprendre le principe.

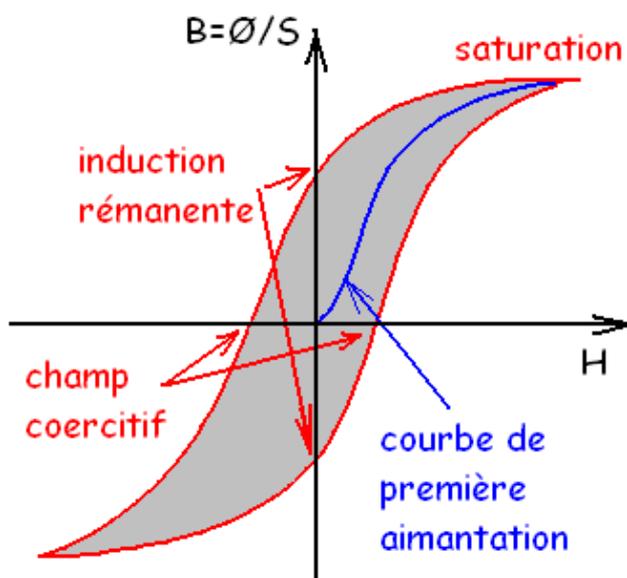


Figure 1

Dans le vide ou dans l'air, l'induction magnétique a pour expression : $B = \mu_0 \cdot H$ avec H : excitation magnétique (A/m) et μ_0 la perméabilité du vide ou de l'air.

Au sein d'un matériaux magnétique il en va de même à ceci près que l'on doit faire intervenir le terme μ_r qui représente la permittivité relative du matériaux qui constitue le noyau du circuit magnétique : $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$. La figure ci-contre bien connue montre le cycle d'hystérésis qui qualifie un matériaux donné utilisé dans la conception d'un circuit magnétique. Il existe une multitude de courbes différentes qui montrent comment le matériaux se sature ou quelle relation il existe entre B et H. La surface grise (figure 1) représente l'image des pertes dans le noyau, ces pertes sont essentiellement dues aux courants de Foucault mais aussi à l'opposition qu'exerce le matériaux aux inversions d'aimantation. Cette opposition provoque un retard aux sollicitations du champ appelée hystérésis.

Le schéma 1 montre le principe utilisé pour le relevé de la courbe d'hystérésis d'un noyau magnétique inconnu. Les valeurs des composants sont déterminées pour une utilisation sur tension secteur à 50Hz avec transfo d'isolation abaisseur ou par l'intermédiaire d'un générateur BF pour d'autres fréquences.

Dans le cas parfait (sans fuite magnétique ni pertes) d'un tore magnétique par exemple :

$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{2\pi R}$ avec NI les ampères-tours, R le rayon moyen mais aussi $B = \frac{\phi}{S}$ avec ϕ le flux magnétique et S la section du noyau magnétique.

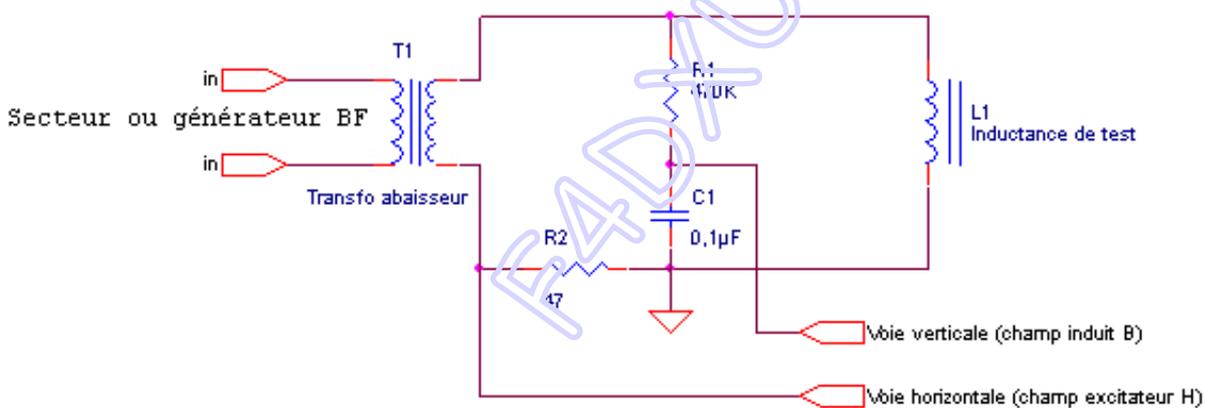


Schéma 1

Tout ceci nous emmène à l'expression de la force électromotrice ou f.e.m. d'induction qui a

pour expression $e = -\frac{d\phi}{dt} = -L \cdot \frac{dI}{dt}$ la dernière formule étant la plus connue. Cette f.e.m.

est presque l'image du champ induit B car elle est proportionnelle à la dérivée du flux magnétique par rapport au temps. C'est ce qui explique la présence d'un intégrateur (R1-C1) pour obtenir la représentation du flux magnétique et non de sa dérivée. La figure de l'hystérésis peut s'observer sur l'écran d'un oscilloscope pour peu qu'il soit configuré en mode x-y (schéma 1, image 1, image 2). La présence d'un transformateur est obligatoire dans le cas où le montage est connecté au réseau pour ne pas retrouver des potentiels dangereux sur l'oscilloscope ou ne pas faire disjoncter les protections (le meilleur des deux cas). Le transformateur utilisé est un 220V-20V-3VA.

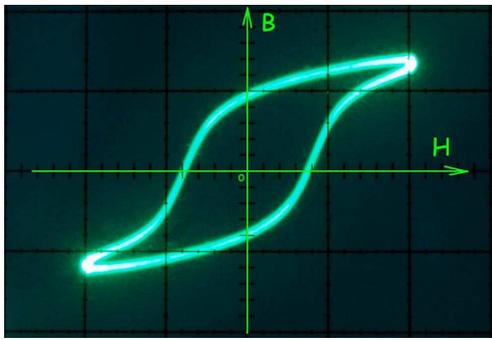


Image 1

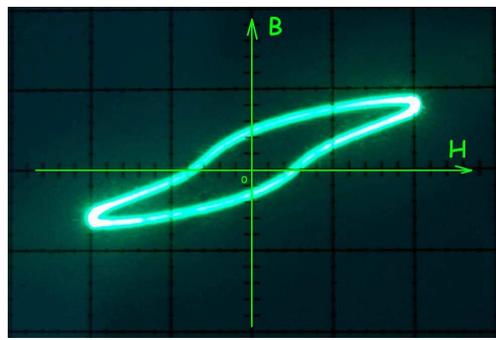
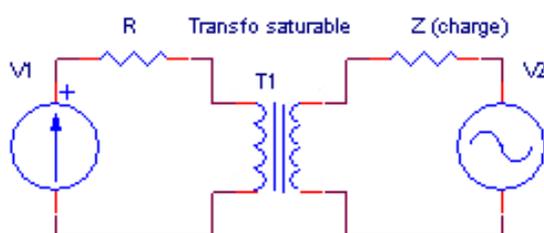


Image 2

L'image 1 représente la courbe d'hystérésis obtenue pour un tore ferrite inconnu sur lequel a été bobiné 10 spires de fil de cuivre de 5/10. L'image 2 quant-à elle représente le même tore mais un peu plus saturé par un aimant. On constate que la pente moyenne diminue, la surface diminue mais aussi le champ induit B et donc l'inductance. Si le noyau avait été complètement saturé, les deux parties de la courbe se seraient rejointes pour ne former qu'une seule ligne oblique. La valeur de la self en Henri diminuerait jusqu'à atteindre la valeur de cette self bobinée de la même manière, mais sans le noyau (aux pertes près). Le système de test (schéma 1) peut être amélioré en remplaçant le transformateur par un amplificateur BF dont le volume peut être réglé (ampères-tours). L'amplificateur recevrait le signal d'un oscillateur sinusoïdal ce qui garantirait une commande propre. En effet, le transformateur apporte ses propres imperfections et déformations (courant magnétisant) ainsi que le signal du secteur qui n'est pas toujours sinusoïdal. Ce noyau n'est pas très adapté à la réalisation d'un transducteur, la saturation n'est pas assez franche, la surface est trop large et la zone linéaire est petite. Une amélioration supplémentaire consisterait à remplacer le circuit R1-C1 par un vrai circuit intégrateur à amplificateur opérationnel suivi d'un amplificateur à gain réglable. Pour que le circuit restitue le mieux possible la représentation du champ induit B il faut que la constante d'intégration soit au grand minimum 2 fois supérieur à la période du signal de commande : $2 \times T < R1 \times C1 < 25 \times T$. Il ne faut pas non plus que cette constante soit trop grande car l'amplitude du signal de sortie diminuerait d'autant ce qui nécessiterait une forte amplification. Ce montage n'est pas étalonné et ne peut donc effectuer que des mesures relatives ou des comparatifs. Il suffit de disposer d'une inductance bobinée sur un tore dont on connaît les caractéristiques et que l'on considèrera comme référence, le nombre d'ampères-tours devra rester constant. Il ne restera plus qu'à la comparer avec des inductances bobinées sur des circuits magnétiques inconnus pour avoir une bonne idée de leurs performances d'autant que l'on connaît le courant d'excitation ($I=U/R2$), donc les ampères-tours et par là même le champ exciteur. Ce « set up » nous servira à sélectionner des ferrites pour la conception d'amplificateurs magnétiques.

L'amplificateur magnétique :



Source de tension
continue variable

Source de tension
alternative

Schéma 2

Le schéma 2 représente le principe de base de l'amplificateur magnétique qui nécessite l'utilisation de transfo saturable à cycle d'hystérésis étroit. En effet, un faible courant traversant le primaire (circuit de commande) de T2 réalisé avec un grand nombre de tours de fil par rapport au secondaire de T2 et sur un noyau très perméable garantira la saturation de celui-ci. Le secondaire de T2 quant-à lui devra présenter une impédance grande ($2.\pi.F.L$) devant Z lorsque le circuit magnétique n'est pas saturé (faible courant de magnétisation) et une très faible impédance quand-il est saturé. De cette manière une petite puissance de commande permettra de commander une grande puissance au secondaire.

En réalité, le modèle d'amplificateur magnétique de base présente un grave défaut car une tension élevée est induite dans l'enroulement de contrôle (primaire) et les circuits associés. Un moyen simple, pour annuler cette tension, consiste à fractionner le circuit de commande (schéma 3, Nc1-Nc2) en deux moitiés égales (T1-T2) et à les connectée en opposition,

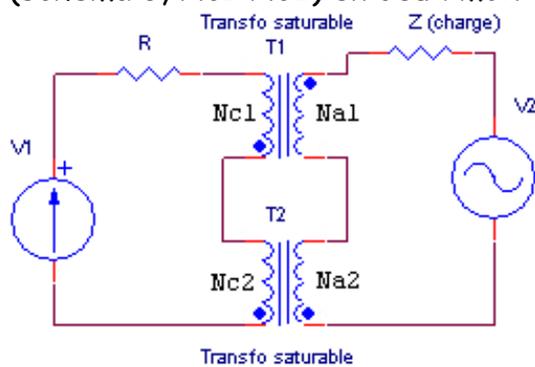


Schéma 3

en série soustractive (notez les points de repère sur les transformateurs). Les 2 enroulements du secondaire (Na1-Na2) sont quant-à eux connectés en série ou parallèle additive. Le contraire est aussi possible, si on met en opposition les enroulements du secondaire, les enroulements primaires sont connectés en série additive. Ce qui compte pour saturer un noyau ce n'est pas le sens du champ magnétique mais sa valeur, un courant de contrôle positif aura le même effet qu'un courant de contrôle négatif sur sa saturation. Un bon transducteur ou amplificateur magnétique doit avoir de faibles pertes donc ne doit nécessiter qu'un très faible courant magnétisant. La courbe d'hystérésis de son noyau doit être très étroite, à la limite nul et la saturation doit être très brusque pour que la zone linéaire soit la plus grande possible et offrir une dynamique importante.

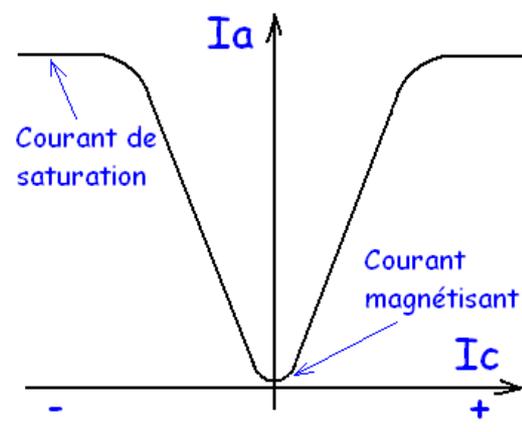


Figure 2

La figure 2 représente la fonction de transfert d'un transducteur simple soit les ampères-tours du courant alternatif (I_a) en fonction des ampères-tours du courant continu de commande (I_c). La figure est symétrique par rapport à l'axe des ordonnées ce qui montre bien dans ce cas que le sens du courant de commande n'a pas d'importance. Ces transducteurs peuvent être polarisés pour n'utiliser qu'une moitié de la courbe et ainsi avoir un courant qui circule dans la charge en l'absence de courant de commande. Dans ce cas ceci permet alors de discriminer le sens du courant de commande quand il existe.

Constante de temps, facteur de mérite et amplification :

Toute chose étant imparfaite, l'amplificateur magnétique possède une constante de temps que l'on ne peut négliger. L'énergie magnétique ne peut exister, varier et disparaître facilement sans qu'il y ait un coût, c'est une des caractéristiques des circuits magnétiques. La constante de temps à 63% d'un circuit LC simple se détermine de la manière suivante : $\tau = \frac{L}{R}$, dans le cas d'un transducteur c'est un peu plus compliqué car plus nombreux sont les facteurs qui interviennent dans son calcul :

$$\tau = \frac{N_c^2 Z}{4 f N_a^2 R} \text{ (dixit M. R. Crespin)}$$

Un bon amplificateur magnétique doit réagir vite et amplifier beaucoup mais ces deux caractéristiques sont antinomiques. Les ampères-tours primaires et secondaires sont égaux et l'expression du gain en puissance en est déduite :

$$G = K^2 \frac{N_c Z}{N_a R} \text{ et le facteur de forme } K = \frac{I_{eff}}{I_{moyen}} \text{ (dixit M. R. Crespin).}$$

Ce facteur de forme vaut 1,1 lorsque le signal qui parcourt la charge est sinusoïdale, il augmente quand il est accompagné d'harmonique et des harmoniques il n'en manque pas dans les circuits magnétiques partiellement ou complètement saturés. Il ne faut surtout pas les empêcher d'exister. Pour ce type de transducteur le gain peut atteindre environ 40 à 50Hz et environ 100 à 400Hz. Lorsqu'ils sont montés en cascade, les gains se multiplient alors que les constantes de temps s'ajoutent.

Ils sont utilisés en configuration push-pull, relais (Logimag), gradateur de lumière pour « fondu enchaîné », régulateur dans les alimentations à découpage modernes, commande de vitesse par variation de l'excitation d'un moteur, ou encore dans les avions du fait de leur grande fiabilité.

La radio n'est pas en reste puisque SAQ, la très vieille station d'émission de Grimeton sur 17,2KHz utilise un modulateur tout ou rien réalisé à partir d'un amplificateur magnétique. Le fer de l'amplificateur magnétique est saturé ou pas, la génératrice HF de puissance est excitée ou pas, au final la HF est commutée au rythme de la clef CW.

Le site consacré à cette station est consultable à l'adresse suivante :

<http://www.alexander.n.se/>

Voici le schéma de principe de la station SAQ (Schéma 4).

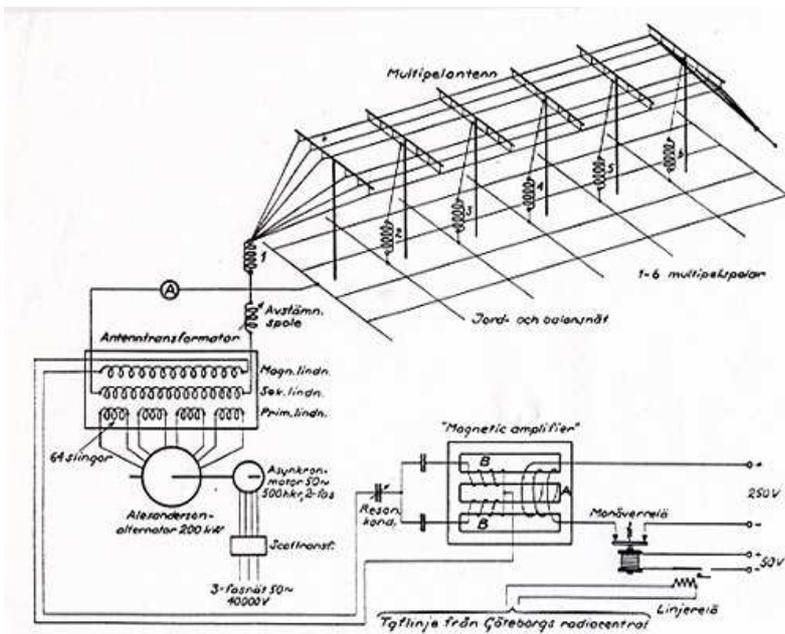
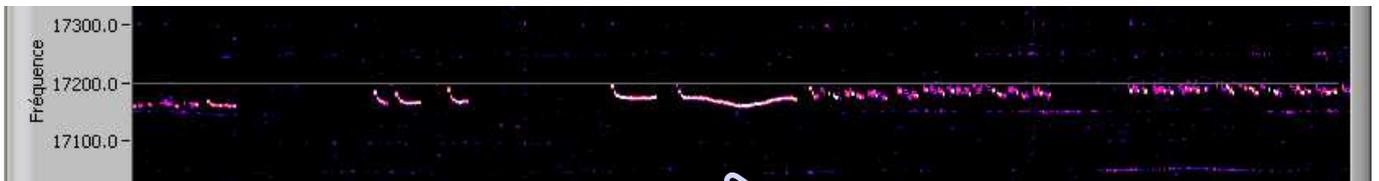
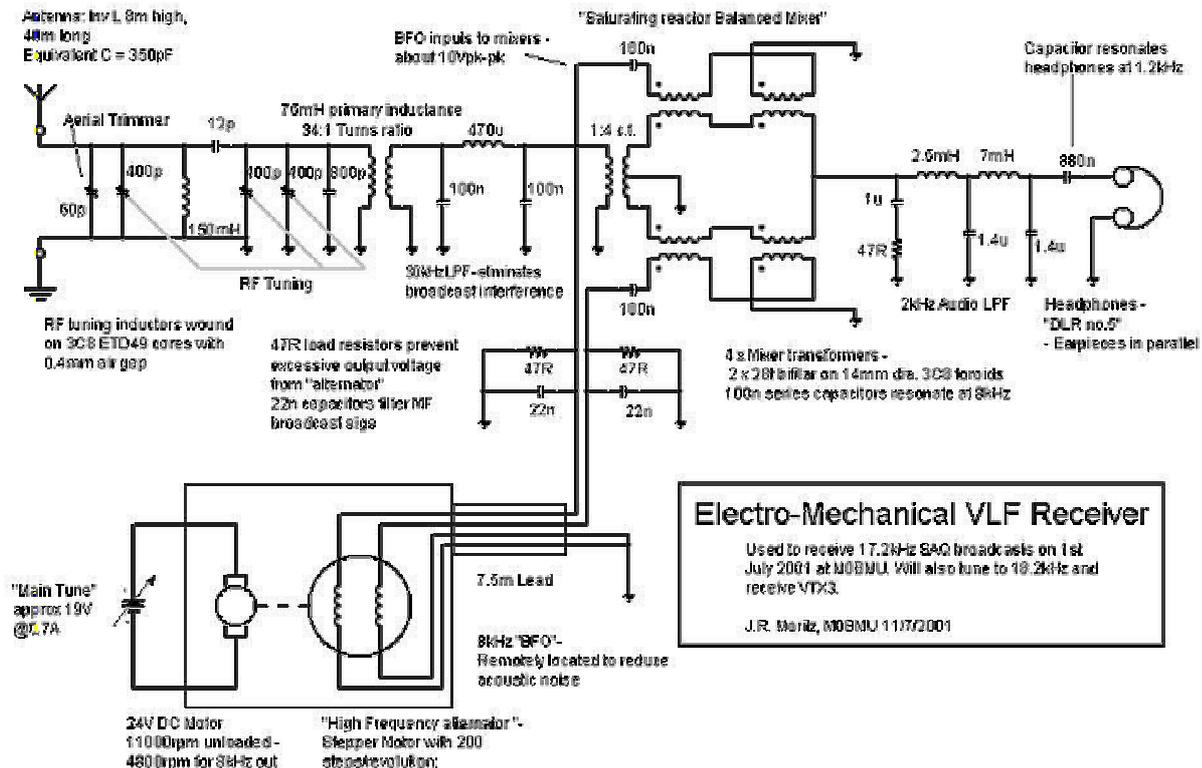


Schéma 4



La copie d'écran représente la réception de SAQ le 29 juin 2014 à 8h43 TU. C'était encore la phase de réglage et de chauffe de la station, la fréquence n'était pas encore stable, l'alternateur haute fréquence n'avait pas atteint sa vitesse de rotation nominale. A droite de l'image la fréquence de 17.2 KHz est presque atteinte et les notes CW piaulent beaucoup moins.

Les ferrites ayant beaucoup progressé dans leurs constitutions et propriétés, il est peut-être envisageable d'expérimenter dans le domaine des mélangeurs pour effectuer des changements de fréquence (schéma 5).



On pourrait aussi utiliser seulement le côté non linéaire des noyaux partiellement saturés. Une autre piste serait peut-être de les utiliser en régulateurs de puissance d'émission dans les amplificateurs en classe E utilisés notamment sur la nouvelle bande 630m.

L'auto excitation externe ou réaction :

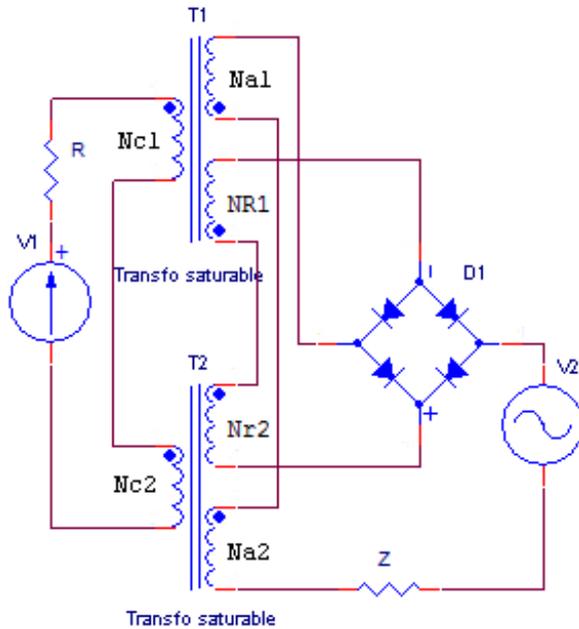


Schéma 5

En radio, il existe un moyen d'augmenter fortement le gain d'un récepteur par la réaction positive. On prélève une partie du signal amplifié de sortie que l'on réinjecte en phase à l'entrée. C'est ce moyen qui sera mis à profit dans l'auto excitation interne (Schéma 5) mais les signaux sont très différents puisque que résultat de l'amplification est un courant alternatif alors que le signal de commande est un courant continu. Il suffit pour cela de redresser le courant alternatif et de le faire passer dans un autre enroulement (Nr1-Nr2) pour renforcer l'action du circuit de commande (Nc1-Nc2). Ce procédé de pré magnétisation permet d'obtenir des gains très importants de l'ordre de 100000 (50 dB !).

Schéma 5

Le gain à pour expression :
$$G = \frac{Z}{R} \left(\frac{Nc}{Na} \cdot \frac{1}{1 - \frac{Nr}{Na}} \right)^2$$
 (dixit M. R. Crespin).

On constate que si $Nr=Na$, le gain tend vers l'infini mais les imperfections du système limiteront ce gain théorique. Ce type de transducteur peut être polarisé, utilisé en push-pull ou dans tous les autres montages vus précédemment. Le sens du courant d'excitation n'est pas indifférent puisque les ampères-tours de réaction sont toujours de même sens et peuvent s'additionner ou se retrancher du courant de commande. Le point de fonctionnement P au repos n'est plus à 0 lorsque le courant de commande est nul mais à une valeur dépendante du rapport $\frac{Nc}{Na}$, le courant de repos n'est donc plus nul (figure 3).

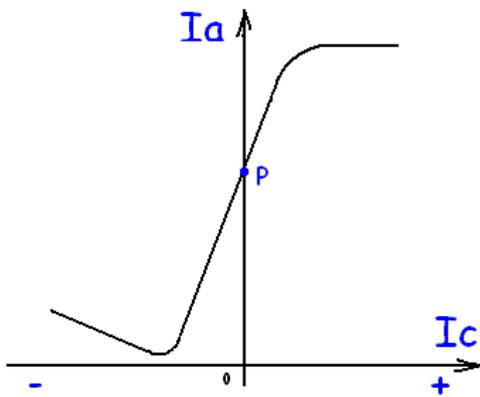


Figure 3

Cet inconvénient, qui n'en est pas toujours un, peut être supprimé en injectant un certain courant négatif superposé au courant de commande ou dans un autre enroulement $N_{c'}$ et en utilisant le montage push-pull.

L'auto excitation interne ou Amplistat :

Un perfectionnement notoire de l'amplificateur magnétique est l'Amplistat qui fonctionne selon le principe de l'auto excitation interne. L'auto excitation externe nécessite une paire de bobinage supplémentaire ce qui constitue un inconvénient important puisqu'il faut augmenter la taille du circuit magnétique pour y loger ces enroulements. L'auto excitation interne pallie ce problème en supprimant les bobinages de réaction et c'est l'enroulement alternatif N_a qui assure la fonction de réaction.

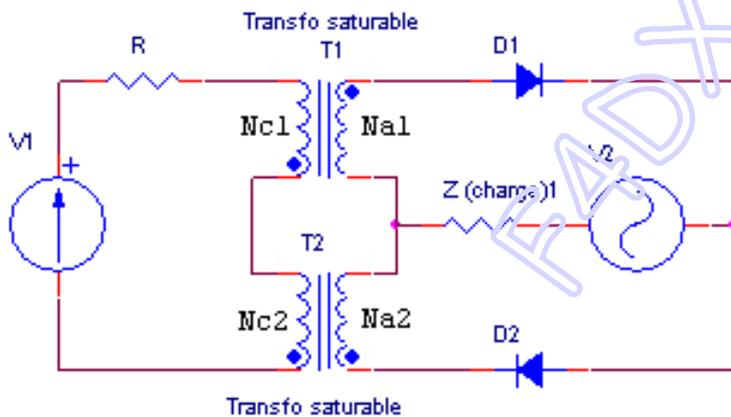


Schéma 6

Pour que cela puisse fonctionner il faut laisser passer le courant alternatif qui produit les ampères-tours et produire en même temps et dans le même enroulement les ampères-tours d'auto excitation à l'aide d'un courant unidirectionnel. Il suffit pour cela que le courant qui traverse N_a soit toujours dans le même sens, ce qui s'obtient facilement en insérant deux diodes de redressement dans le circuit (schéma 6). La charge sera parcourue par un courant alternatif.

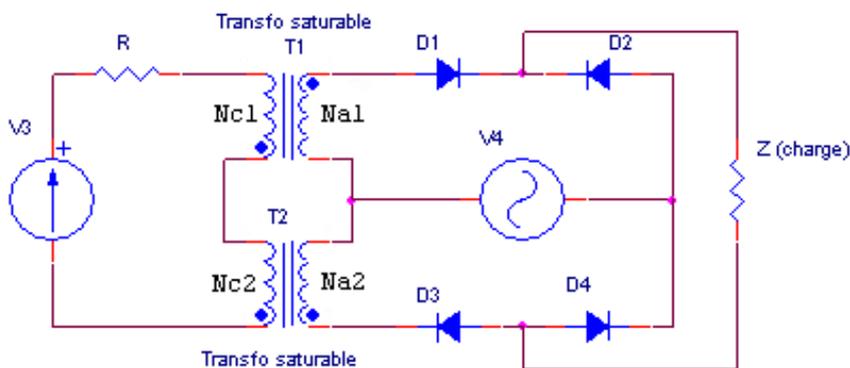


Schéma 7

Si l'on désire que la charge soit traversée par un courant continu il suffit de rajouter 2 diodes supplémentaires câblées selon le schéma 7. On revient à un système très simple et très efficace.

Amplistat demi-onde :

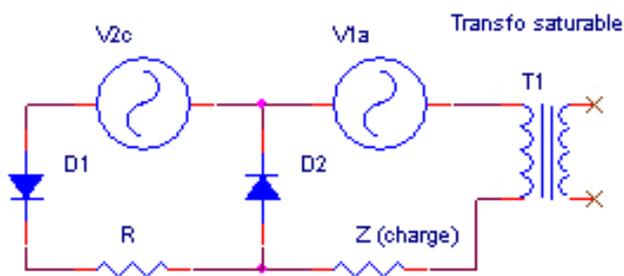


Schéma 8

Voici le dernier perfectionnement (schéma 8) de l'amplistat ou amplistat demi-onde qui présente l'avantage d'une faible constante de temps allée à un fort gain et d'une grande simplicité. Le transformateur est réduit à sa plus simple expression, une bobine qui est successivement parcourue par le courant de charge et celui de commande. Les courants de charge et de commande sont alternatifs et en phase.

Les tensions V_{1a} et V_{2c} peuvent être issues d'un transformateur garantissant la mise en phase des signaux, la commande se résumera à la variation de R qui peut être remplacée par un capteur dont sa résistance varie en fonction d'un processus physique. Enfin, l'amplificateur magnétique convient tout à fait pour des applications triphasées ou polyphasées, commande de moteur asynchrone, variateur de vitesse, doubleur ou tripleur de fréquence, régulateur d'alimentation pour TV anciennes, etc.

La pratique :

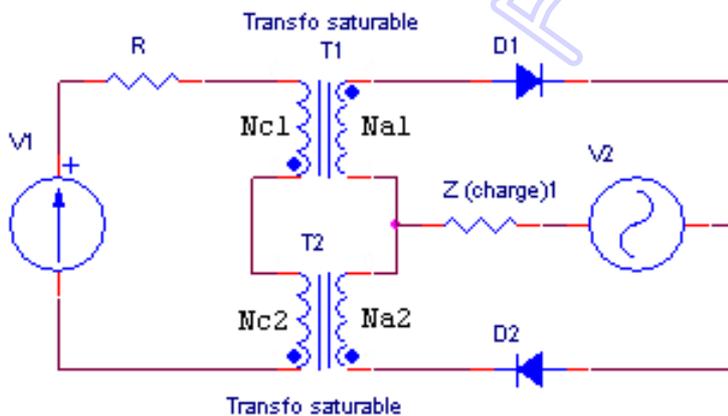


Schéma 9

La configuration choisie (schéma 9) est celle de l'amplistat première version, c'est à dire à deux diodes, les transformateurs utilisés ne sont pas très adaptés à ce fonctionnement puisque ce sont de simples transformateurs 220-12V 3VA. Le circuit de commande est constitué par le primaire 220V (N_{c1} - N_{c2}) alors que les enroulements de charge sont constitués par le secondaire 12V (N_{a1} - N_{a2}). La charge quant-à elle est une résistance de 50 ohms pouvant supporter au moins 1W pour cet essai. La tension alternative sinusoïdale V_2 est issue d'un autre transformateur abaisseur 220-12V (Attention, le secteur 220V-50 Hz est présent au primaire). V_1 est une alimentation stabilisée réglable de 12V maxi (pour cet essai) et dont le courant peut être mesuré par l'insertion en série d'un milliampèremètre.

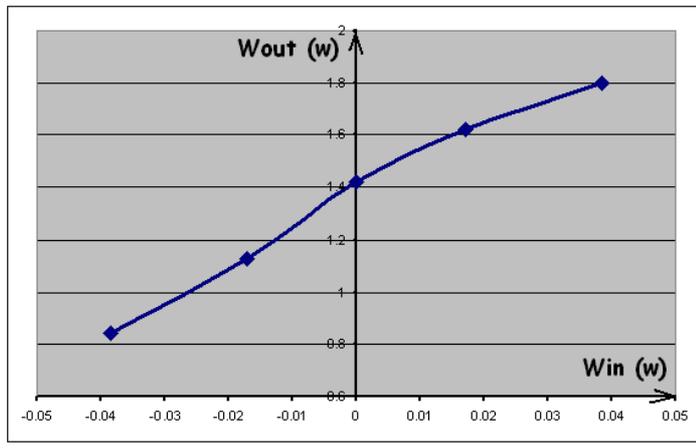


Figure 4

Voici représentée figure 4 la puissance de sortie dans la charge en fonction de la puissance d'entrée. La puissance étant une grandeur toujours positive, le signe moins précise simplement que le courant injecté dans les enroulements de commande a changé de sens. Les mesures n'ont pas été réalisées avec des appareils pouvant mesurer des grandeurs efficaces vraies ce qui conduit à des erreurs mais c'est sans grande importance car ce qui compte ici c'est simplement l'allure de la réponse de cet amplificateur magnétique de qualité médiocre. La partie gauche de la courbe est légèrement incurvée, ceci est dû au facteur de forme qui change régulièrement et aux erreurs de mesure. Le gain en puissance de ce système est d'environ 47 soit presque 17dB. On notera que la puissance de sortie n'est pas nulle lorsque la puissance de commande l'est, ce qui était annoncé par la théorie. La prochaine évolution sera de choisir des circuits magnétiques adaptés pour le fonctionnement en amplificateur magnétique, il suffit pour cela d'utiliser le schéma de la figure 2 et de sélectionner les noyaux présentant une saturation rapide et franche ainsi qu'un cycle d'hystérésis étroit pour limiter les pertes.

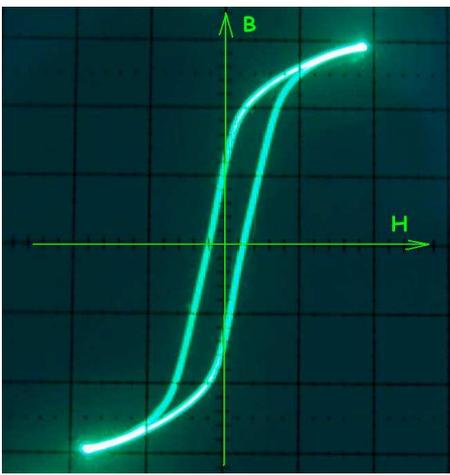


Image 3

Le cycle d'hystérésis de l'image 3 est à comparer avec celui de l'image 1, il est bien plus adapté à la réalisation d'un amplificateur magnétique. Cette mesure a été effectuée sur un transformateur BF de bonne qualité et pouvant passer des fréquences jusqu'à 30 KHz.

Pour conclure, j'ai utilisé le principe de l'amplificateur magnétique pour accorder et adapter une antenne verticale pour la bande 20m lors d'un short skip. Le résultat était excellent pour une puissance ne dépassant pas une quinzaine de watts car le circuit magnétique dont je disposais ne permettait pas plus. Le réglage se faisait en approchant un aimant permanent sur le circuit magnétique de l'inductance. L'histoire ne dit pas si les

harmoniques étaient importantes ! Les deux stations du 73 et 74 que j'ai contactées ce jour là s'en souviendront peut-être ! C'était aux alentours de 2005-2006.

Jean-Marc F4DXU

Bibliographie, webographie :

- **L'électronique au travail II** de Roger Crespin, mémento 6 (1960), édition Crespin
- **Magnetic Amplifiers another lost technology** by the US Navy (1951) :
<http://www.themeasuringsystemofthegods.com/magnetic%20amplifiers.pdf>
- **Magnetic audio frequency fundamental** by A.M. Vincent (1952) :
http://www.aes.org/aeshc/pdf/how.the.aes.began/vincent_magnetic-audio-fundamentals.pdf

F4DXU