

Les magnétomètres (détecteurs d'aurores) F4DXU

<http://pagesperso-orange.fr/F4DXU/>

Le 20 novembre 2003, j'ai eu la chance de pouvoir faire un QSO via aurore boréale (pôle Nord) en VHF, ce phénomène est rare sous nos latitudes et j'en ai pour preuve les récits de certains OM qui n'ont constaté la chose que 2 ou 3 fois tous au long de leur longue carrière de radioamateur.

- Les effets du soleil sur le champ magnétique terrestre :

Pour faire simple, lorsque le soleil a des « bouffées de chaleur » il bombarde la terre de son vent de particules solaires ; ces particules très énergiques ionisent les couches de la haute atmosphère et s'enroulent autour des lignes du champ magnétique terrestre pour se développer aux pôles Nord et Sud en de magnifiques draperies multicolores (aurores polaires). Le champ magnétique en est très affecté et son vecteur subit des variations d'amplitude ainsi que de petits changements de direction dans les 3 dimensions. Les différents types de magnétomètres que je vais aborder mesurent ces variations et (ou) la valeur relative du champ magnétique terrestre dans ses 3 composantes. La première composante se mesure dans la direction du Nord magnétique et son argument est l'angle qu'elle forme avec la direction du Nord géographique, on l'appelle l'angle de déclinaison. La deuxième composante se mesure dans la direction Est et se nomme composante horizontale. La troisième composante se mesure dans la direction verticale. Sous notre latitude, le vecteur champ magnétique possède un module d'environ 35000nT ou gamma ($1\text{nT}=1.10^{-9}\text{T}=1\text{gamma}$) et une inclinaison d'environ 60° par rapport au plan horizontal de l'observateur.

- Evolution des magnétomètres et théorie:

Au début, il y a la boussole qui, aussi simple quelle puisse paraître, est déjà un instrument de mesure qui indique la direction du Nord. Ce petit aimant qui constitue la boussole s'oriente dans la direction Nord/Sud suivant la direction des lignes du champ magnétique. L'idée fit son chemin et l'on eut l'idée de suspendre ce petit aimant à un fil de quartz en lui adjoignant un miroir mobil et un système de visée optique. En faisant pivoter le sommet du fil on craie un couple de torsion sur l'équipage mobile (miroir et aimant), les forces mises en jeu s'équilibrent. Après étalonnage, on peut convertir l'angle de déviation mesuré en gamma (voir Radio-REF du moi de décembre 2003 pour le principe). Les lois du magnétisme furent découvertes par des hommes tels que Tesla, Lentz, Laplace, Henri etc. En parallèle les techniques évoluèrent et l'électronique commença à émerger et un autre type de magnétomètre apparût, le magnétomètre à induction.

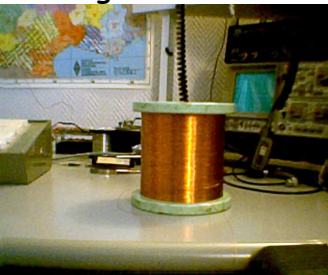
$$e(t) = -\mu_0 \cdot \mu_e \cdot n \cdot A \cdot \frac{dH(t)}{dt}$$

Cette équation, aussi barbare quelle paraisse, nous montre que lorsque l'on crée une variation du champ magnétique par rapport au temps $\frac{dH(t)}{dt}$ devant une bobine à air μ_0 ou comportant un noyau de grande perméabilité μ_e , d'une section A et

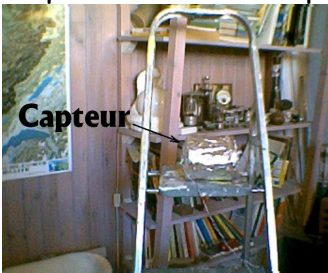
comportant un nombre de spires n , cela induit une différence de potentiel e aux bornes de cette bobine. Le signe - signifie l'opposition que crée la bobine par rapport aux variations de

l'induction (loi de Lenz). La variation du champ magnétique $\frac{dH(t)}{dt}$ est imposée par les conditions locales du champ donc si l'on veut que notre capteur ait une sensibilité importante, il faut que la bobine comporte un grand nombre de spires bobinées sur un morceau de mumétal feuilleté de grosse section $\mu_0 \mu_r n A$ et de grande longueur.

Voici le capteur de fortune sans mumétal (bobine de fils de cuivre de diamètre 3/10 mm) qui présente une bonne sensibilité aux vues du nombre de spires et de la surface du bobinage.



La photo suivante représente le même capteur entouré de son blindage électrostatique.



- Schéma de principe et fonctionnement :

Le modèle électrique du capteur ou de l'antenne magnétique est représenté sur la

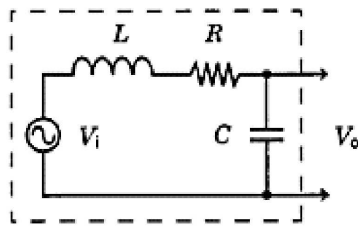


figure ci-dessous,

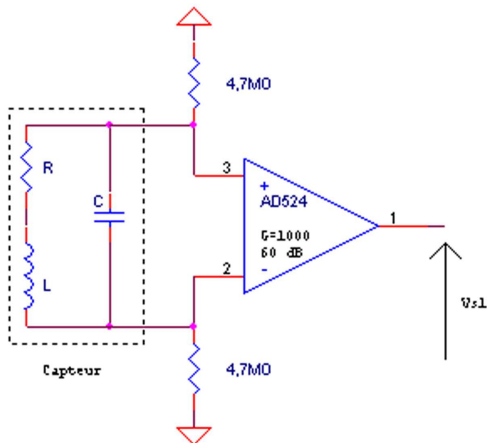
V_i représente le $e(t)$ vu précédemment, L la

valeur de la self en Henri, R la résistance du bobinage et C la capacité parasite inter spires et éventuellement celle du câble de liaison au préamplificateur. C'est un circuit RLC série. La fréquence de résonance du circuit RLC doit être élevée pour ne pas perturber les signaux de basse fréquence issus de V_i donc C devra être de faible valeur.

Dans le cas du capteur décrit précédemment, si le nombre de spires est de 100000 spires pour une surface de 20 cm^2 et pour une variation du champ magnétique de 1 nT/s

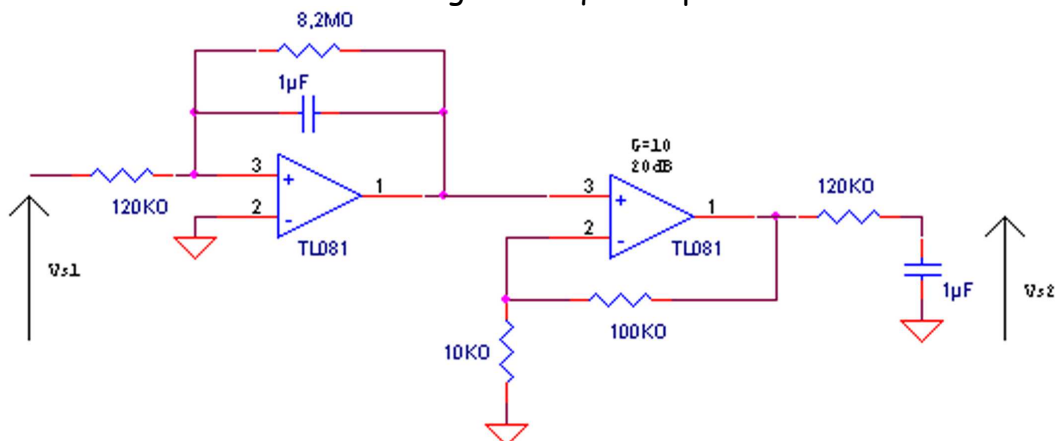
$$e(t) = -\mu_0 \mu_r n A \frac{dH(t)}{dt} \quad \text{devient après simplification} \quad e(t) = -n A \frac{dH(t)}{dt} = -10 \mu V$$

La valeur est relativement faible d'où l'intérêt d'insérer un noyau en mumétal qui peut avoir un μ_e de 1000, voir plus. Le terme $\frac{dH(t)}{dt}$ nous dit aussi que le capteur sera sensible à l'amplitude $dH(t)$ et à la fréquence ($d(t)$) donc sa réponse sera non linéaire et ne représentera que les variations (dérivée en terme mathématique) du champ magnétique. Nous verrons plus loin comment rendre le capteur presque insensible à la fréquence et comment il pourra nous donner l'image des variations du champ magnétique et non pas de sa dérivée ce qui veut dire aussi qu'il ne pourra en aucun cas nous donner la valeur absolue du champ. Commençons d'abord à donner un peu de dynamique à ce faible signal en l'amplifiant.



Les 2 résistances de 4,7 MOhm servent à référencer le capteur par rapport à la masse et à équilibrer les courants d'offset ; elles sont de forte valeur pour ne pas charger le capteur. Le gain de l'amplificateur est de 60dB soit 1000. A la sortie du préamplificateur la sensibilité du magnétomètre passe donc de $10\mu\text{V}/\text{gamma}$ à $10\text{mV}/\text{gamma}$ ce qui commence à devenir acceptable. Pour éviter les charges statiques et les champs électriques variables il sera judicieux d'envelopper le capteur d'un blindage en cuivre ou en papier d'aluminium relié à la masse du montage et surtout de s'éloigner au maximum des sources Echo Delta Fox, dans le cas contraire aucune mesure ne sera possible. Pour la clarté des différents schémas, les réglages d'offset et les alimentations ne sont pas représentés.

La partie suivante du circuit permettra de remonter au signal primitif qui nous intéresse. C'est un circuit intégrateur qui remplira ce rôle.

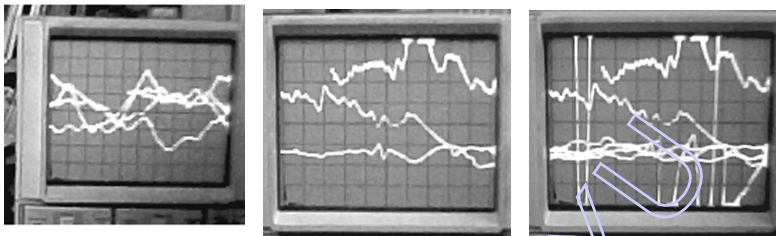


Les circuits intégrateurs actifs ont un défaut, ils dérivent dans le temps notamment à cause des courants d'offset (de décalage), la résistance de 8,2MO a pour rôle de minimiser ce défaut.

Au bout d'un certain temps, qui dépend de la qualité de l'intégrateur, ce type de magnétomètre nécessite un recalage ou une remise à zéro de l'intégrateur. A la suite de ce circuit il suffira d'ajouter un autre amplificateur possédant un gain de 10 (20dB) et un filtre passe-bas du 1^{er} ordre. Le gain global du montage est de 80dB (10000). Pour stabiliser et linéariser le système il suffit de prélever la tension VS2 et de la réinjecter dans une paire de bobines de Helmholtz enveloppant le capteur ; ces bobines créent un volume dans lequel le champ magnétique est uniforme et constant. Ce système de contre-réaction permet de calmer les effets de la résonance, de fonctionner à champ constant dans le capteur pour éviter les effets d'hystérésis dans le mumétal et ainsi rendre la réponse du capteur linéaire.

- Chronogrammes :

Voici plusieurs mesures relatives superposées et effectuées sur un oscilloscope à mémoire analogique (VS2).

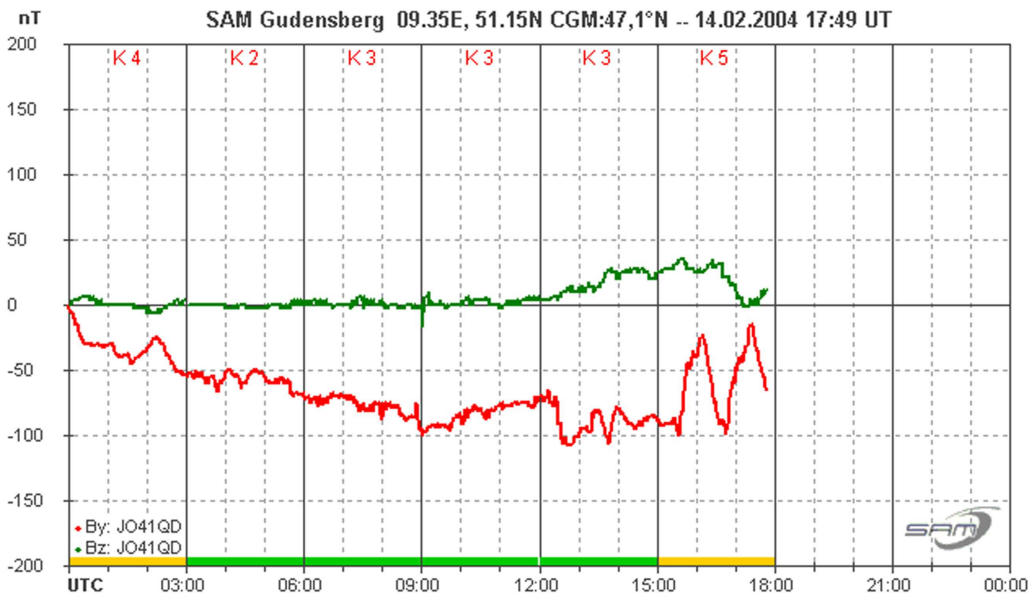


L'échelle horizontale du temps est de 2,5s/carreau alors que l'échelle verticale est de 0,5V/carreau, le système n'étant pas encore étalonné. On peut observer sur ces différents écrans des périodes de calme apparent, des périodes rapides mais de faibles amplitudes et des périodes très mouvementées et de grandes amplitudes.

Au moment où j'écrivais ces lignes, il se produisit une petite tempête magnétique dont voici les derniers relevés.



Sur cette image l'échelle des temps n'a pas changé alors que l'échelle verticale est passée à 5 volts/carreau soit 10 fois plus que pour les images précédentes. Les signaux évoluent entre + et - 10 Volts (saturation des amplificateurs). Ces données relatives ont été comparées à des instants donnés avec celles des magnétomètres DKOCWY et SAM dont voici les liens ainsi qu'un graphe : <http://www.dkOwcy.de/magneto/magnet.htm>
<http://www.lutz-schenk.de/sam/sam.html>



- Interprétation des mesures :

Pour pouvoir éventuellement détecter une aurore il faut d'abord étalonner le magnétomètre, le connecter à un système d'acquisition (PC) et effectuer un petit traitement du signal. Au paravent il faut déterminer 2 coefficients nommés K et A. Pour le coefficient K il suffit de mesurer la valeur crête à crête de la variation du champ magnétique sur une durée de 3 heures et de lire la correspondance dans le tableau ci-dessous pour obtenir la valeur de K.

K=	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
nT	0-5	6-10	11-20	21-40	41-70	71-120	121-200	201-330	331-500	>500

Ceci permet de créer une échelle pour classier l'importance de l'activité magnétique. C'est un peu comme l'échelle de Richter pour les tremblements de terre. Pour déterminer le coefficient A, on utilise aussi un tableau de correspondance (ci-dessous) ce qui permet, à partir de K de déterminer un coefficient intermédiaire noté a_k . Il y aura donc, sur une durée d'une journée 8 K et 8 a_k .

K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a_k	0	3	7	15	27	48	80	140	240	400

En fin de journée il suffit d'appliquer la formule suivante pour déterminer le coefficient A.

$$A = \frac{\sum a_k i}{8} \quad \text{avec } i = 1 \text{ à } 8 \quad \sum \text{ signifie somme}$$

A partir de $K \geq 5$ on peut suspecter une activité magnétique significative voir une aurore qui peut se produire à une latitude supérieure tout en tenant compte de l'évolution de A (pas plus d'info).

-Conclusion : Dans ce domaine, le champ d'expérimentation est vaste. Il existe d'autres variantes de magnétomètres dont voici quelques exemples : le magnétomètre « flux gate » ou « porte de flux », le magnétomètre à résonance magnétique nucléaire, etc. L'adjonction

d'un ordinateur et d'une carte d'acquisition aurait pu compléter le système pour conserver un historique des mesures mais les composants du magnétomètre ont retrouvé leur place dans les tiroirs et sont prêts pour de nouvelles expérimentations.

73, Jean Marc F4DXU

F4DXU