

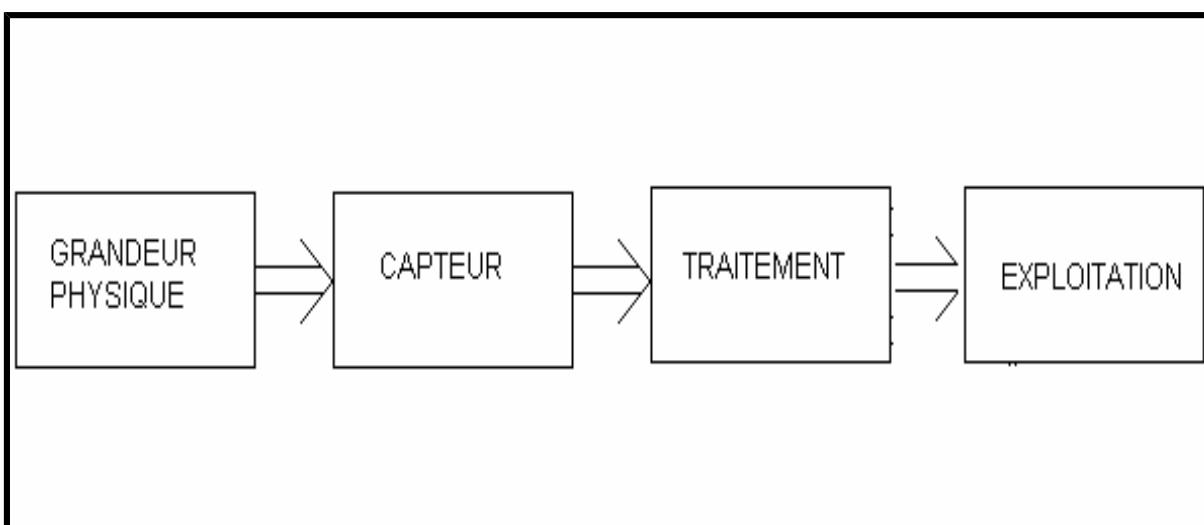
# Introduction

Ce projet met en œuvre un capteur à effet HALL pour détecter l'approche d'un objet magnétique, tel qu'un aimant fixe sur le montant d'une porte

L'utilisation d'un capteur à effet HALL résout les nombreux problèmes qui se posent lorsque l'on souhaite détecter l'ouverture d'une porte, d'une fenêtre ou la détection du champ magnétique par une lampe. Un capteur à effet HALL étant principalement sensible aux champs magnétiques, il est tout à fait possible d'enfouir le capteur ou de le dissimuler derrière des matériaux perméables aux champs magnétiques (planche en bois, plaque de placo-plâtre ; etc.).

L'électronique associée au capteur de notre montage dispose d'une sensibilité suffisante pour permettre à ce dernier de détecter un petit aimant disposé à plus de cinq centimètres du capteur. Dans ces conditions, l'installation du montage n'est pas vraiment une contrainte et devrait nous donner accès à de nombreuses applications domotiques.

De ce fait une chaîne incorporant tous ces éléments peut être conçue comme le montre la figure suivante :



# Chapitre I

## *Camp magnétique et effet HALL*

## I. Le champ magnétique

### 1) Histoire du champ magnétique

Le phénomène du magnétisme est connu depuis l'Antiquité. Les Grecs, les Romains et les Chinois avaient remarqué que l'oxyde de fer magnétique, la magnétite, avait la faculté d'attirer les objets contenant du fer. Ils avaient également constaté qu'un morceau de fer mis en contact avec la magnétite acquérait la même propriété. Au XI<sup>e</sup> siècle, les Arabes appliquèrent le magnétisme à la navigation en inventant la boussole. Mais c'est seulement en 1600 qu'une étude scientifique sur le magnétisme fut réalisée par William Gilbert. Dans son ouvrage intitulé *De magnete magneticisque corporibus et de magno magnete tellure*, il montra que la Terre elle-même se comporte comme un aimant géant, distingua attraction magnétique et attraction électrique, et découvrit que le fer perd son pouvoir d'aimantation lorsqu'il est chauffé au rouge. À la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, Charles Augustin de Coulomb effectua les premières études quantitatives, mesurant les forces qui s'exercent entre deux charges magnétiques. Il établit que ces forces sont inversement proportionnelles au carré de la distance qui sépare les charges.

En 1820, Hans Ørsted observa qu'une aiguille magnétique est déviée par un courant électrique traversant un fil conducteur. Cette découverte, qui reliait électricité et magnétisme, fut à la base de la théorie de l'électromagnétisme, élaborée par André-Marie Ampère puis par James Maxwell. En 1880, le physicien allemand Emil Warburg découvrit le phénomène d'hystéresis, qui correspond à un retard des variations de l'aimantation d'une substance ferromagnétique avec celles du champ magnétique appliqué. En 1895, Pierre Curie montra que les propriétés magnétiques des corps dépendent de leur température, étude qui fut complétée dix ans plus tard par la théorie de Paul Langevin, fondée sur la structure atomique de la matière. Cette théorie fut ensuite parachevée par Pierre Weiss qui introduisit le concept d'un champ magnétique moléculaire, champ fictif situé entre les atomes.

L'étude de la matière à l'échelle atomique permit alors d'explorer plus en détail le phénomène du magnétisme. Niels Bohr expliqua ainsi à l'aide de la classification périodique pourquoi le magnétisme apparaît chez les éléments de transition, tels que le fer et les lanthanides, ou les agrégats contenant ces éléments. En 1925, les

physiciens américains Samuel Abraham Goudsmit et George Eugene Uhlenbeck montrèrent que l'électron lui-même se comporte comme un petit aimant.

## 2) Les sources du champ magnétique

### a) Champ magnétique d'un aimant

Aimant, pièce constituée d'un matériau ferromagnétique, le plus souvent en forme de fer à cheval (aimant en U) ou de barreau droit (aimant droit).

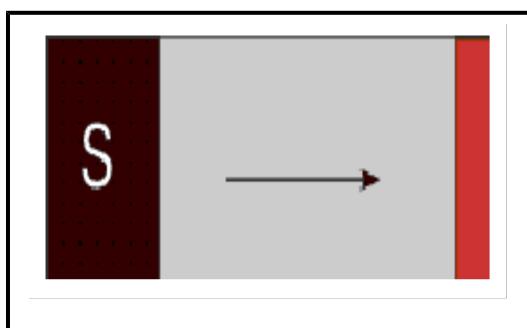


Fig. A.1 : AIMANT DROIT

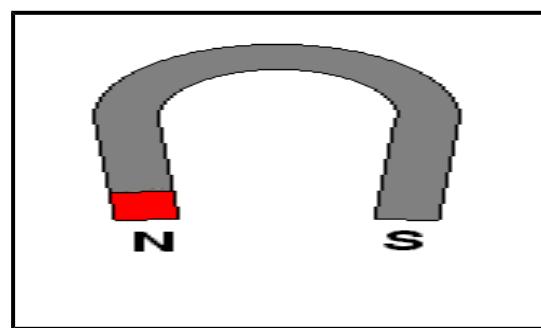


Fig. A.2 : AIMANT EN U

Tout aimant ou corps magnétique (ou magnétisé) produit ce que l'on appelle un champ magnétique. Ce champ magnétique est invisible mais il est cependant possible de le faire ponctuellement apparaître, et par exemple ensuite de le modéliser virtuellement par le grain de limaille de fer. Le champ magnétique est formé d'une multitude de lignes, appelées lignes de champ.

Dans cette expérience, chaque grain de limaille de fer joue le rôle d'un petit aimant qui s'aligne selon ces lignes de force, comme sur l'image ci-dessous.

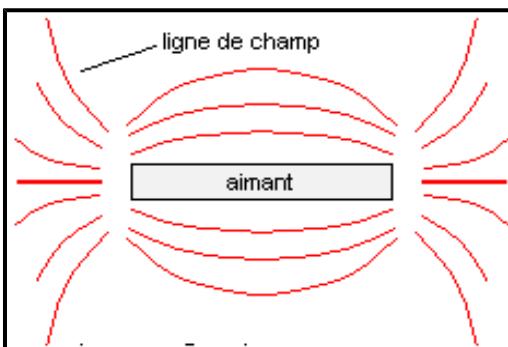
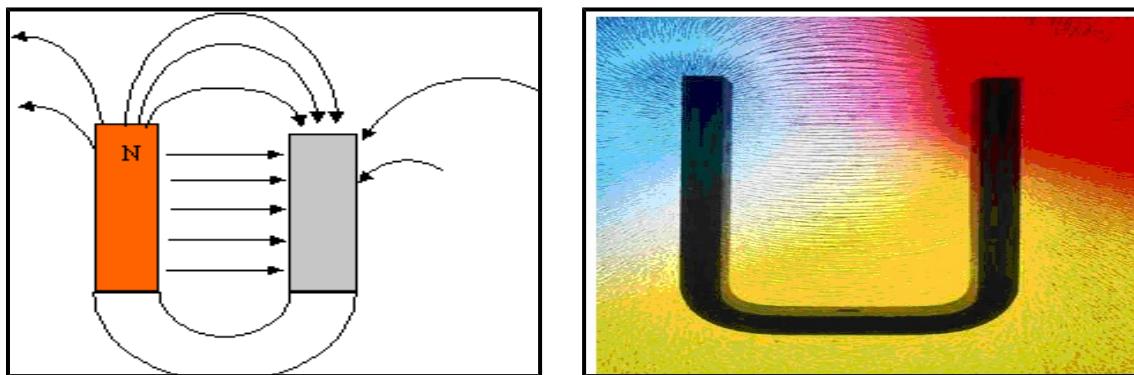


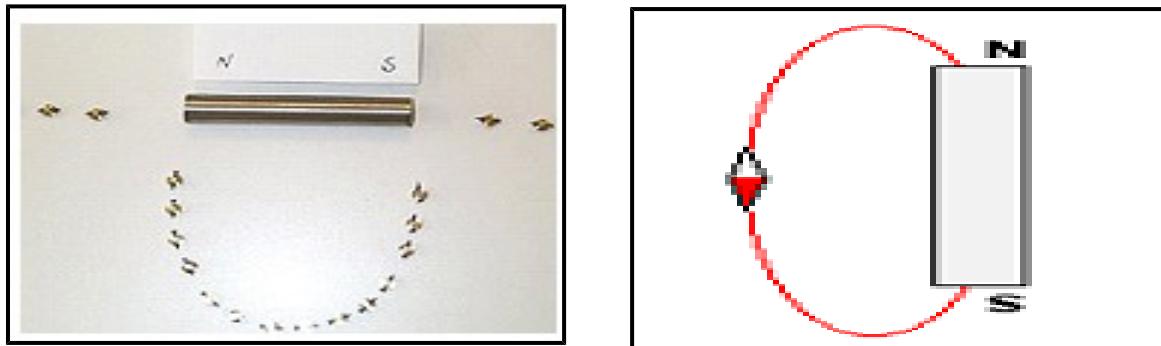
Fig. A.3: LES LIGNES DE CHAMP D'UN AIMANT DROIT



**Fig. A.4: LES LIGNES DE CHAMP D'UN AIMANT EN U**

Si l'on place une aiguille aimantée à proximité d'un aimant, on constate que:

- L'aiguille prend une direction tangente à la ligne de champ (on remarquera que les lignes de champ sont des boucles fermées).
- L'aiguille s'oriente du pôle nord vers le pôle sud de l'aimant.
- L'aiguille est attirée "plus ou moins fort" selon sa position et la nature de l'aimant.



**Fig. A.5: LE SENS DU CHAMP MAGNETIQUE**

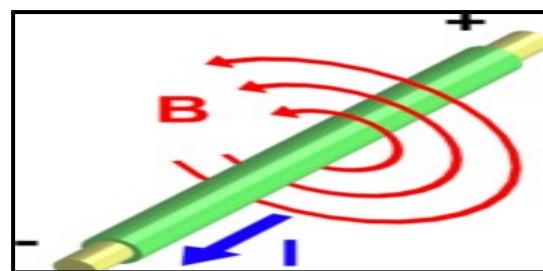
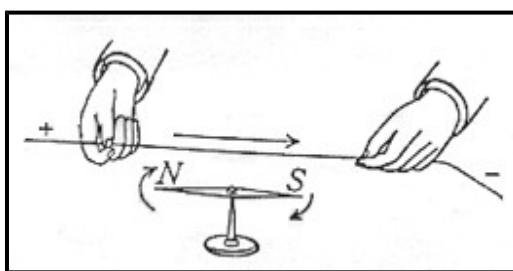
D'après les observations précédentes, il est évident que le champ magnétique possède une direction, un sens et une valeur. Il sera donc possible de le représenter par un vecteur noté  $\vec{B}$ .

- A l'extérieur de l'aimant, les lignes de champ sont orientées du pôle nord vers le pôle sud.

- La valeur du champ magnétique  $\vec{B}$  s'exprime en Tesla (T) et se mesure à l'aide d'un teslamètre, sachant que : 1 Tesla = 10 000 gauss.

**b) Champ magnétique créé par un courant**

**b-1) Fil rectiligne**



**Fig. A.6: LE CHAMP MAGNETIQUE D'UN FIL**

C'est [Christian Oersted](#) qui le premier, en 1819, a observé que le courant avait sa place dans le magnétisme. En plaçant une boussole à côté d'un fil électrique soumis à du courant, il s'est aperçu que la boussole déviait. Un courant crée donc un champ magnétique. Le champ magnétique est d'autant plus fort que l'intensité du courant est importante. L'induction magnétique (en Tesla) est telle que :

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{d}$$

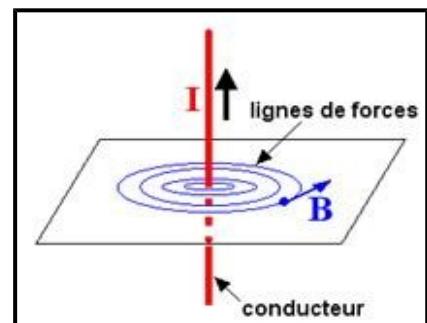
Où :

$\mu_0$  est la perméabilité du vide =  $4\pi \cdot 10^{-7}$

I : intensité du courant en ampère

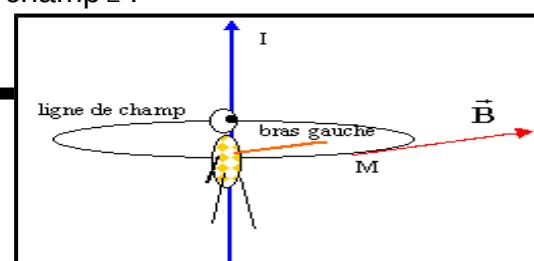
d : distance entre le point considéré et le conducteur.

1 gauss = 1 maxwell / cm<sup>2</sup> =  $10^{-4}$  teslas



**Fig. A.7 : LES LIGNES DU CHAMP MAGNETIQUE**

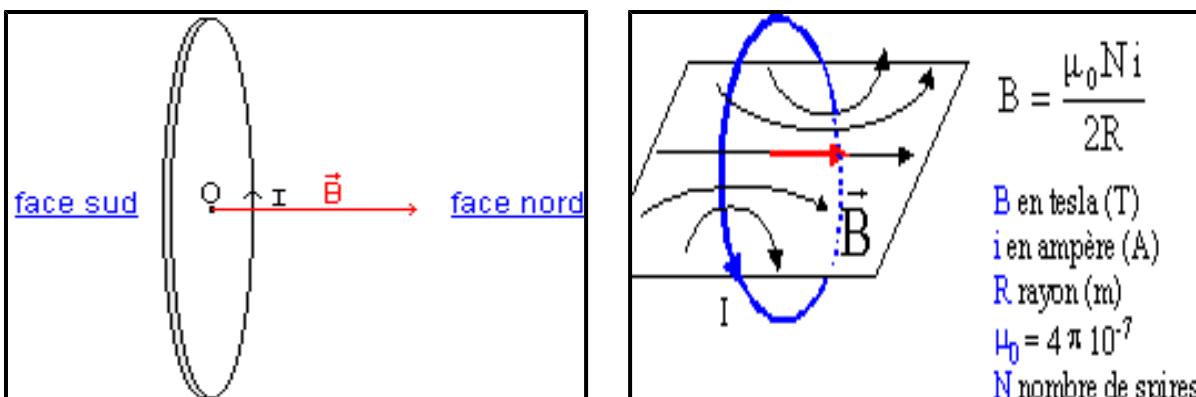
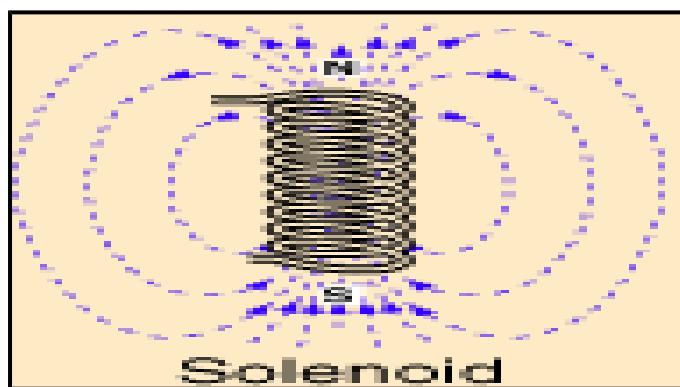
- o **Règle du bonhomme d'Ampère:** Lorsqu'un bonhomme d'Ampère placé sur le fil, le courant entrant par ses pieds et sortant par sa tête, regarde le point M, son bras gauche indique le sens du champ  $\vec{B}$ .



**Fig. A.8: LE SENS DU CHAMP MAGNETIQUE****b-2) Bobine plate**

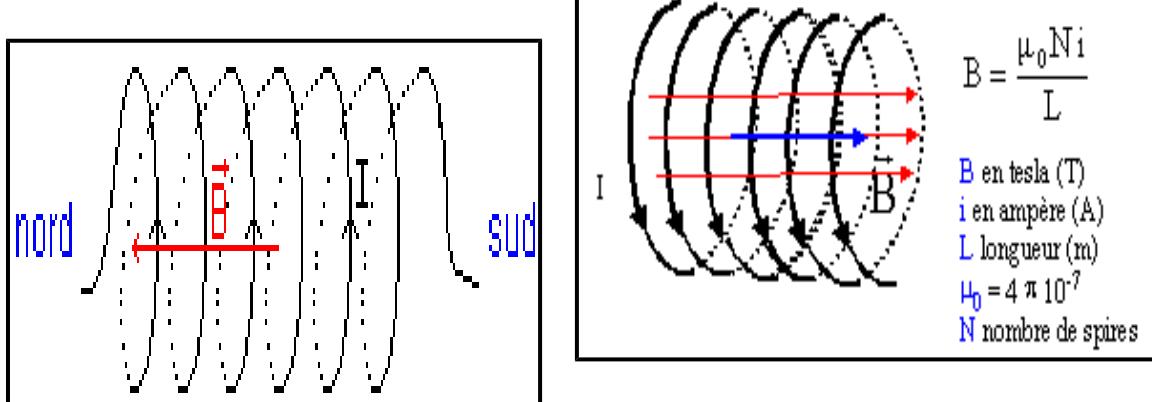
Sur l'axe de la bobine, le champ magnétique  $\vec{B}$  est perpendiculaire au plan de la bobine.

- o **Sens du champ:** Un bonhomme d'Ampère placé sur la bobine, le courant entrant par ses pieds et sortant par sa tête, indique le sens du champ magnétique par son bras gauche lorsqu'il regarde le centre de la bobine.

**Fig. A.9: LE SENS DU CHAMP MAGNETIQUE DANS UNE BOBINE PLATE****b-3) Bobine longue ou solénoïde****Fig. A.10: LE CHAMP MAGNETIQUE DANS UNE SOLENOÏDE**

Un solénoïde est dit "long" si sa longueur L est supérieure à dix fois son rayon r ( $L > 10r$ ).

- o **Sens du champ:** Un bonhomme d'Ampère placé sur les fils du solénoïde, le courant entrant par ses pieds et sortant par sa tête, indique le sens du champ magnétique par son bras gauche lorsqu'il regarde le centre du solénoïde.

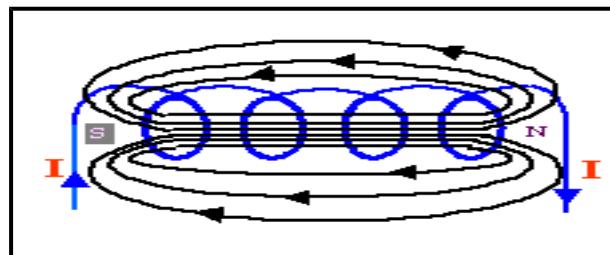


**Fig. A.11: LE SENS DU CHAMP MAGNETIQUE DANS UNE SOLENOÏDE**

A l'intérieur d'un solénoïde long:

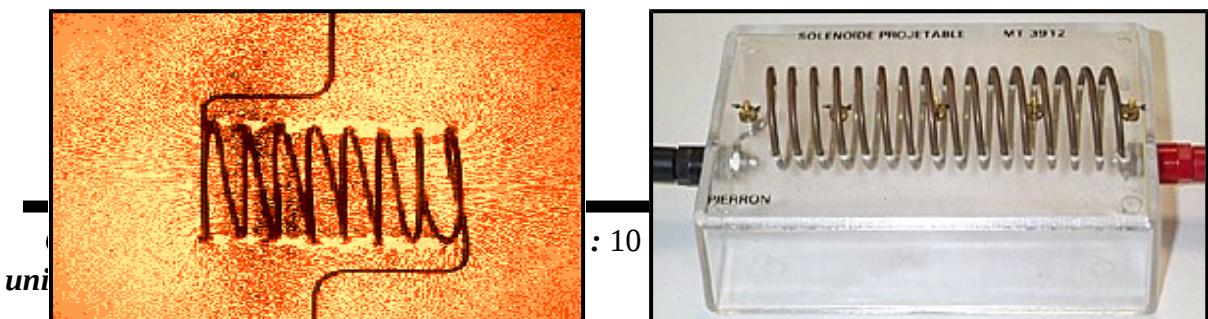
- Les lignes de champ sont parallèles (les vecteurs champs  $\vec{B}$  sont colinéaires et de même sens).
- Le champ magnétique conserve la même valeur.

**Fig. A.12**



L'intérêt de l'électroaimant, par rapport à l'aimant permanent, est de pouvoir contrôler l'activation de l'aimantation. En effet, le champ magnétique est créé uniquement lorsqu'il y a passage de courant dans le solénoïde. De plus, la force magnétique de l'aimant est modifiable grâce à la tension et à l'intensité dans la bobine.

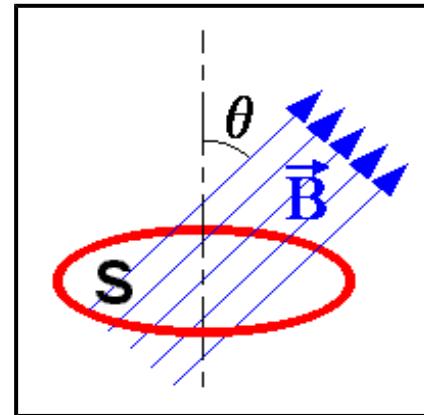
Ci-contre, la représentation du champ magnétique créé autour d'une bobine.



**Fig. A.13: LES LIGNES DU CHAMP MAGNETIQUE AUTOUR D'UNE SOLENOÏDE****3) Les théorèmes fondamentaux du champ magnétique :****a) Le flux du champ magnétique :**

Le flux d'induction magnétique  $\Phi$  qui traverse une surface est égal au nombre de lignes de forces du champ d'[induction magnétique](#)  $\vec{B}$  qui pénètre une surface  $\vec{S}$ . Il correspond au [produit scalaire](#) de ces deux [vecteurs](#).

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = \|\vec{B}\| \cdot \|\vec{S}\| \cdot \cos\theta$$

**Fig. A.15: LE FLUX MAGNETIQUE**

Où  $\theta$  est l'angle entre les lignes du champ d'induction  $\vec{B}$  et le [vecteur normal](#) au plan de la surface  $S$ .

Ainsi, si la surface est perpendiculairement aux lignes du champ  $\vec{B}$ , cet angle est égal à 0 et son cosinus vaut 1, ainsi le flux est maximum.

Si la surface est horizontalement aux lignes du champ  $\vec{B}$ , cet angle est égal à 90 degrés et son cosinus vaut 0, ainsi le flux est nul.

L'unité de la densité de flux est le TESLA [T] et  $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb / m}^2$ .

**b) Force de Laplace**

o La loi de Laplace:

Si un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique ce dernier est soumis à la force de Laplace, qu'a définie par la relation suivant :

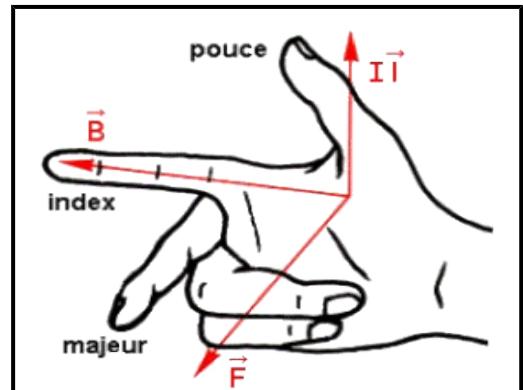
$I$  en [A]

$I$ : longueur du conducteur soumis au champ magnétique  $\vec{B}$  en [m]

$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \wedge \vec{B}$  avec  $I, \vec{l}$ : vecteur orienté dans suivant le sens de  $I$

$\vec{B}$ : vecteur champ magnétique en [T]

$\vec{F}$ : vecteur Force en [N]

o Règle de la main droite:Exemple1 :

Un conducteur en mouvement dans un champ magnétique et parcouru par un courant électrique ascendant subit une force de Laplace dans le sens opposé à son déplacement.

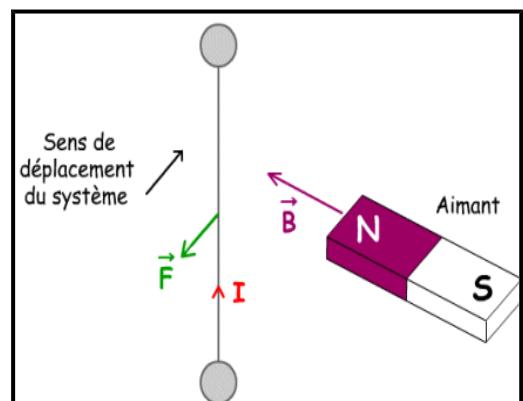


Fig. A.16

Exemple2 :

Un conducteur en mouvement dans un champ magnétique et parcouru par un courant électrique descendant subit une force de Laplace dans le même sens que son déplacement.

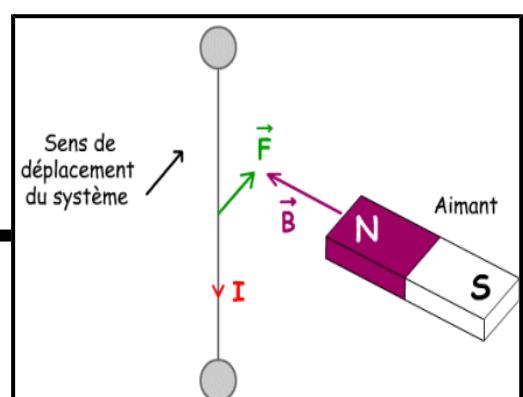
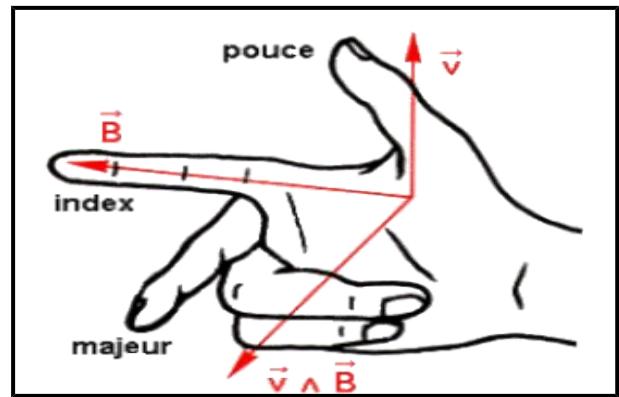


Fig. A.17

c) **Force de Lorentz**o **La force magnétique:**

Une particule chargée, en mouvement dans un champ magnétique, est soumise à la force de LORENTZ, qu'a définie par la relation suivant :

$$\vec{F} = q \vec{V} \wedge \vec{B}$$

o **Règle de la main droite :**d) **Loi de Biot et Savart**

La loi de Biot et Savart (1820) donne le champ magnétique créé par une distribution de courants continus. Elle constitue l'une des lois fondamentales de la magnétostatique, au même titre que la loi de Coulomb pour l'electrostatique.

o **Cas d'un circuit filiforme**

Un circuit filiforme est une modélisation où le fil électrique ne possède qu'une dimension. C'est une idéalisation d'un fil réel dont la longueur serait très supérieure aux dimensions transverses de sa surface de section.

o **Loi de Biot & Savart**

Notons  $\mathcal{C}$  la courbe géométrique représentant le circuit filiforme, et soit  $S$  un point de cette courbe  $\mathcal{C}$ . On note  $d\vec{l}$  le vecteur déplacement élémentaire tangent à la courbe  $\mathcal{C}$  au point  $S$ . Dans le vide, le circuit parcouru par un courant continu d'intensité  $I$  crée en tout point  $M$  de l'espace ( $M \notin \mathcal{C}$ ) le champ magnétique :

$$d\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \wedge \vec{SM}}{\|\vec{SM}\|^3} \longrightarrow \vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{\mathcal{C}} \frac{I d\vec{l} \wedge \vec{SM}}{\|\vec{SM}\|^3}$$

Où  $\mu_0$  est une constante fondamentale, appelée [perméabilité magnétique](#) du vide.

o **-Autres modélisations**• **Densité surfacique de courant**

Dans le cas d'une densité surfacique de courant  $\vec{j}_s$  existant sur la surface  $\Sigma$ , le champ magnétique créé est :

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_{S \in \Sigma} \frac{\vec{j}_s(S) \wedge \vec{SM}}{\|\vec{SM}\|^3} d\Sigma$$

• **Densité volumique de courant**

Dans le cas d'une densité volumique de courant  $\vec{j}$  existant dans le volume  $\mathcal{V}$ , le champ magnétique créé est :

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_{S \in \mathcal{V}} \frac{\vec{j}(S) \wedge \vec{SM}}{\|\vec{SM}\|^3} dV$$

o **Théorème d'Ampère**

En intégrant la loi de Biot et Savart sur une boucle fermée  $\Gamma$  quelconque (qui a priori n'est pas un circuit électrique), on démontre le [théorème d'Ampère](#) :

GE2  
universitaire 2007/2008

$$\oint_{M \in \Gamma} \vec{B}(M) \cdot d\vec{M} = \mu_0 I_{\text{interieur}}$$

Année

Où  $I_{\text{intérieur}}$  est l'intensité algébrique enlacée par la courbe  $\Gamma$ .

## II. Effet HALL

### 1) Présentation

Effet Hall, phénomène électromagnétique se traduisant par l'apparition d'une charge électrique sur les surfaces d'un conducteur placé dans un champ magnétique.

Lorsqu'un courant électrique parcourt un conducteur ou un semi-conducteur, et qu'un champ magnétique est appliqué perpendiculairement au courant électrique, il en résulte une tension dans le matériau, dans une direction perpendiculaire au courant électrique et au champ magnétique. Cette tension est connue sous le nom de tension de Hall.

Cet effet a été découvert par EDWIN Herbert HALL en 1879, sur des feuilles métalliques, HALL observa sur des bandes de cuivre parcourues par un courant l'apparition d'une différence de potentiel lorsqu'un champ magnétique était appliqué à ces bandes. Si un ruban conducteur est parcouru par un courant électrique et si un champ d'induction magnétique est perpendiculaire au plan du ruban il apparaît une différence de potentiel entre les bords du ruban.

- I représente le courant dans le conducteur ou dans le semi-conducteur; en Ampère (A)
- B représente l'intensité du champ magnétique en Tesla (T)
- H représente le voltage de Hall en Volt (V)

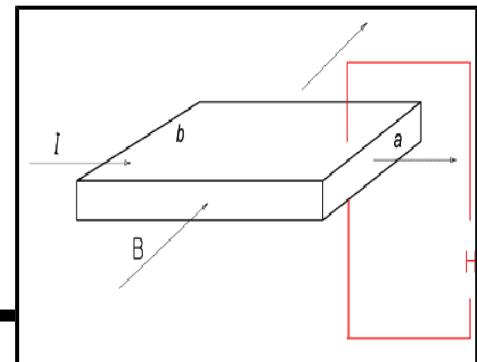


Fig.A.18: DIAGRAMME DE L'EFFET HALL**2) Phénomène de HALL**

L'effet HALL a été mis en évidence par Edwin Hall (1855-1938) en 1879 (d'où son nom) : il a démontré que si on applique une tension au borne d'un conducteur ou semi-conducteur et qu'un champ magnétique est appliqué perpendiculairement au courant électrique, d'où l'apparition d'une tension appelée tension de HALL qui est proportionnelle au champ magnétique et le courant qui traverse le conducteur ou semi-conducteur, cette tension définie par la relation suivant :

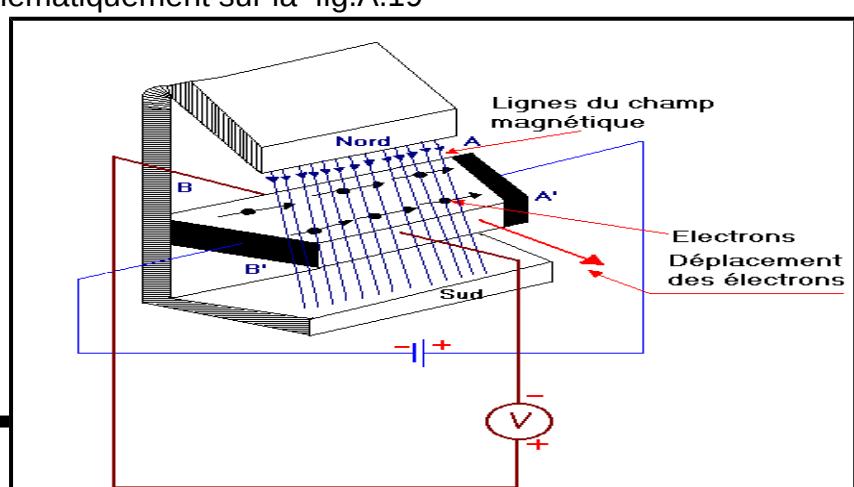
$$V_h = K_h * B * I_o$$

Avec  $K_h$ : constante de Hall, qui dépend du matériau utilisé.

La Constante de HALL étant inversement proportionnelle à la densité des porteurs, la tension de HALL est beaucoup plus importante dans les semi-conducteurs que dans les métaux.

L'explication sur la circulation du courant dans un semi-conducteur du type P peut sembler complexe, du fait qu'elle suppose une conduction due à des charges positives. Cependant, le phénomène est justifié par les mesures relatives à l'effet Hall qui mettent en évidence le déplacement de charges positives (trous) dans un semi-conducteur du type P.

L'effet HALL (du nom du savant qui le découvrit), peut être mis en valeur par l'expérience montrée schématiquement sur la fig.A.19

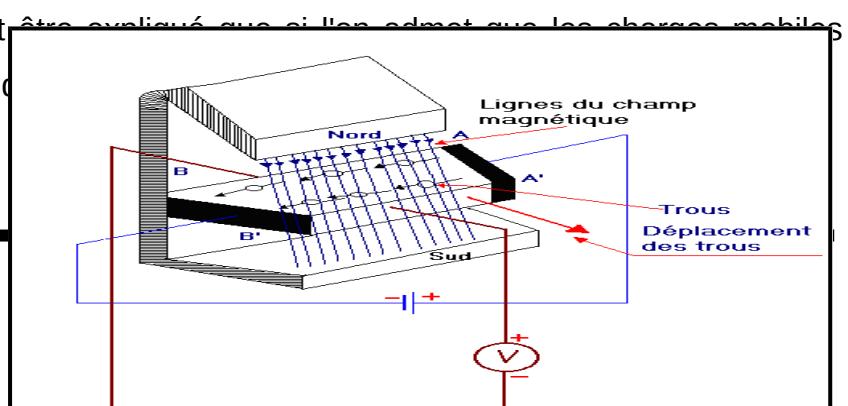
Fig. A.19

Supposons d'abord qu'une tension continue soit appliquée à un bloc conducteur en matière ordinaire à l'aide de deux plaques AA' et BB'. Dans ce cas, le courant traversant ce bloc est formé d'électrons circulant de BB' vers AA'. Plaçons ensuite le bloc dans un champ magnétique uniforme, créé par un aimant, de façon que les lignes de flux soient perpendiculaires au bloc. Les électrons circulant dans le bloc sont influencés par le champ magnétique et tendent à se déplacer dans une direction perpendiculaire à celle de leur propre mouvement et des lignes du champ magnétique. Dans le cas illustré (fig.A.19) où les électrons se dirigent de BB' vers AA' alors que les lignes de force vont du haut (pôle nord) vers le bas (pôle sud), les charges tendent à se déplacer sur la droite de leur mouvement initial. Il en résulte que ces charges (électrons) ne sont plus uniformément réparties dans le bloc, mais se concentrent sur le côté A'B'.

Cette accumulation des électrons produit un effet qui peut être mis en évidence par un voltmètre très sensible. En effet, en branchant l'appareil comme indiqué **fig.A.19**, on mesure une différence de potentiel électrique : le côté A'B' est négatif par rapport au côté AB. Cette différence de potentiel provient évidemment de la concentration des électrons du côté A'B'.

L'effet HALL consiste précisément en cette déformation des lignes de courant (flux d'électrons), dans une plaque conductrice sous l'effet d'un champ magnétique perpendiculaire à cette plaque. Cet effet se vérifie encore dans le cas d'un bloc semi-conducteur N, du fait que ce sont les électrons qui forment le flux de courant le plus important. Par contre, avec un bloc semi-conducteur du type P (fig.A.20), la tension indiquée par le voltmètre est de polarité opposée à celle que l'on avait avec le bloc conducteur ordinaire ou le semi-conducteur N.

Ce résultat ne peut être appliqué que si l'on admet que les charges mobiles sont positives dans le cas de



**Fig. A.20**

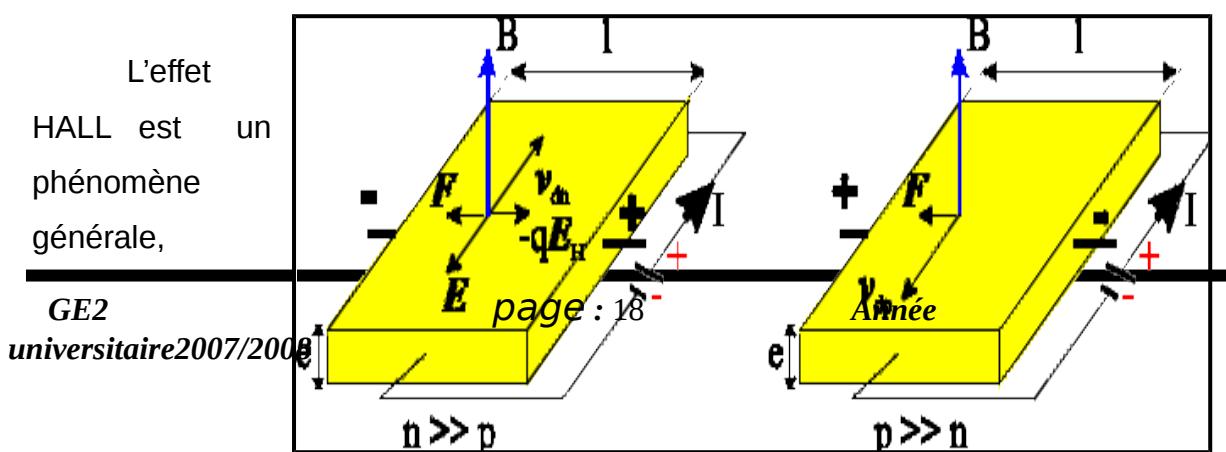
Elles seront décalées, sous l'action du champ magnétique, vers la gauche du sens de leur défilement qui est contraire à celui des électrons de la fig.A.19. Cette concentration de trous sur la face A'B' entraîne, elle aussi, une polarité inverse de celle qui était présente dans le cas d'un conducteur ordinaire ou d'un semi-conducteur. Ainsi, on confirme expérimentalement que les trous (charges positives) forment le courant circulant dans les semi-conducteurs du type P.

A l'aide de l'effet HALL, on a également pu mesurer la mobilité des charges dans les deux types de semi-conducteur.

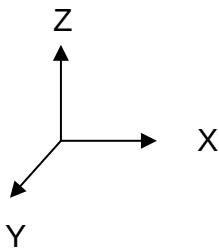
La mobilité exprime, en centimètre par seconde (cm / s), la vitesse des charges qui se déplacent dans un cube de semi-conducteur de 1 cm d'arête lorsque la tension appliquée sur deux faces opposées est de 1 volt. Cette mesure a permis de déterminer que les électrons ont une mobilité supérieure à celle des trous (encore appelés cavité ou lacune). La moyenne de vie des trous et des électrons libres est un paramètre important à ne pas négliger ; elle correspond à l'intervalle de temps qui s'écoule entre le moment où dans le semi-conducteur la concentration des trous et des électrons libres subit une variation, et celui où elle revient à la conduction d'équilibre.

### 3) Théorie de HALL sur un semi-conducteur (cristal)

On sait que dans un cristal semi-conducteur la conduction est assuré soit par les trous(P) lorsqu'ils sont majoritaires ( $p \gg n$ ) ou par les électrons ( $n \gg p$ ).



cependant c'est dans les semi-conducteurs que son amplitude est la plus marquée. Considérons un cristal semi-conducteur homogène de type p (figure de droite) de forme parallélépipédique orienté selon le système d'axe trirectangle classique, traverse par un courant de trous selon  $Oy$ , d'intensité  $i$  provoquant un champ interne  $E_y$  et plongé dans un champ magnétique d'induction  $B_z$  orienté selon  $Oz$ .



**Fig. A.21**

Selon la théorie élémentaire de la conductivité, les trous acquièrent une vitesse moyenne d'entrainement parallèle à  $E_y$  de valeur :

$$V_m = \mu_p * E_y \quad , \text{Avec } \mu_p \text{ la mobilité}$$

On sait que la force de Lorenz est donné par :

$$\vec{F} = qv \wedge \vec{B}$$

$V$  est suivant  $Oy$  et  $B$  suivant  $Oz$  donc leur produit vectoriel nous donne  $Ox$  avec le signe moins d'où la relation suivante :

$$\vec{F} = -q * V_m * B * \vec{O}_x$$

Cette force est dirigée vers la gauche. Il en résulte une tendance à l'accumulation de charges positives sur la face gauche, et symétriquement l'apparition des charges négatives sur la face droite pour équilibrer le cristal ce qui se traduit par un champ électrique transversal  $E_h$ , et puisque le champ dérive d'un potentiel on a:

$$V_h = E_h * d_x = L_x * E_h \quad , V_h \text{ est dite tension de Hall}$$

L'équation de l'équilibre est traduit par :

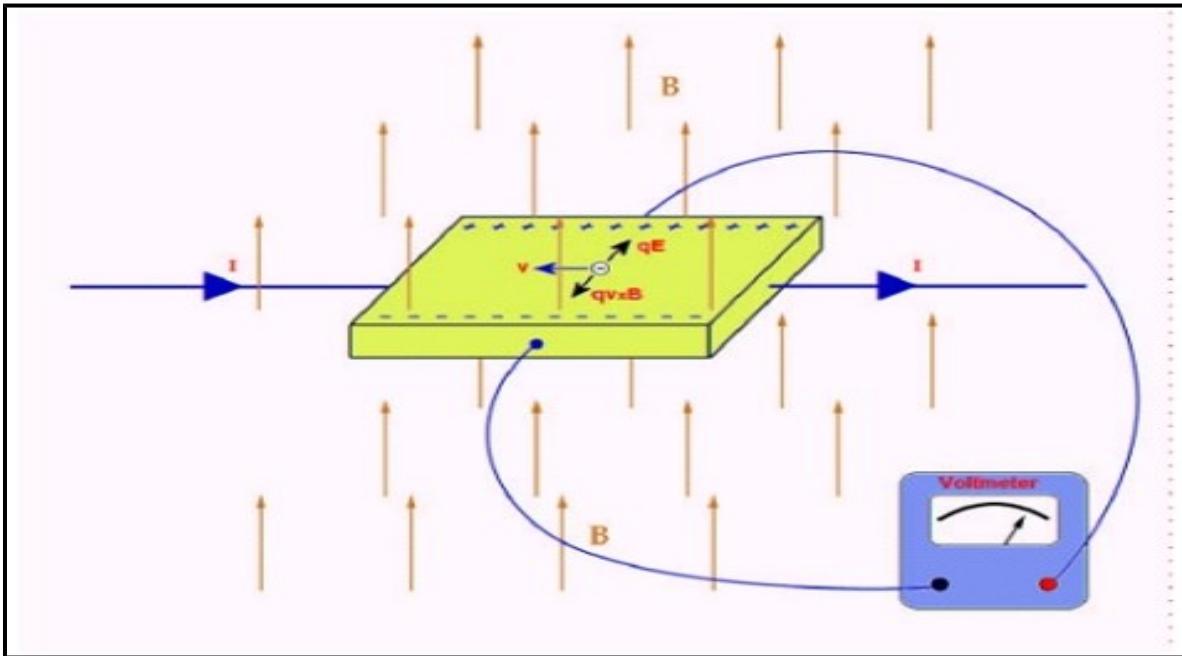


Fig. A.22

$$\vec{F} + \vec{F}_h = 0 \longrightarrow -q*V_m*B + q*E_h = 0 \longrightarrow V_m * B = E_h$$

Or on a :  $V_m = \mu_p * E_y$  et  $V_h = L_x * E_h$ , on remplace dans l'équation précédente on trouve :

$$V_h = L_x * \mu_p * E_y * B$$

D'une part on sait que la définition que la densité du courant s'exprime par :

$$\vec{j} * \vec{ds} = di$$

Avec :  $\vec{j} = \sum n_k * q_k * v_k$

Si  $L_x$ ,  $L_y$  et  $L_z$  sont les dimensions du barreau et  $p$  la concentration du trous on déduit que le courant est égal :

$$i = \int \int \vec{j} * \vec{ds} = \int \int j * d_x * d_z = j * L_x * L_z = p * q * V_m * L_x * L_z$$

On remplace  $L_x$  par :  $i / p * q * V_m * L_z$  dans l'expression dans on trouve

$$V_h = (1 / qp) * (i / L_z) * B \quad L_z = e \text{ (avec } e \text{ est l'épaisseur de cristal)}$$

On appelle la quantité  $R_h = 1/pq$  constante de Hall pour les trous. on aura finalement :

$$V_h = R_h * B * (i/L_z)$$

Et par analogie si le courant était du à des électrons ( fig. de gauche ) le résultat serait semblable à condition de changer q en  $-q$  et p en  $n$  .

Il en résulte que la tension de HALL est :

-proportionnelle à intensité du courant  $i$  et à l'induction magnétique  $B$

-et inversement proportionnelle à l'épaisseur  $L_z$  du barreau et la concentration en porteurs  $n$  ou  $p$ .

Mais la température est ainsi un élément ayant une grande influence sur la mobilité, ce qui sera le plus souvent un inconvénient. Il faudra donc choisir le matériau le moins sensible à la température des lors qu'on souhaitera un capteur utilisable sur un intervalle étendu de température

Si les porteurs positifs et négatifs ont des densités équivalentes  $n \approx p$ , la détermination de la constante de HALL devient plus délicate:

$$R_h = \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{q(p\mu_p + n\mu_n)^2}$$

#### 4) Les capteurs à effet HALL

Un capteur à effet Hall est constitué d'une plaquette de semi-conducteur traversée par un courant. Cette plaquette, lorsque soumise à un champ magnétique permanent placé perpendiculairement, génère à des extrémités perpendiculaires, une différence de tension.

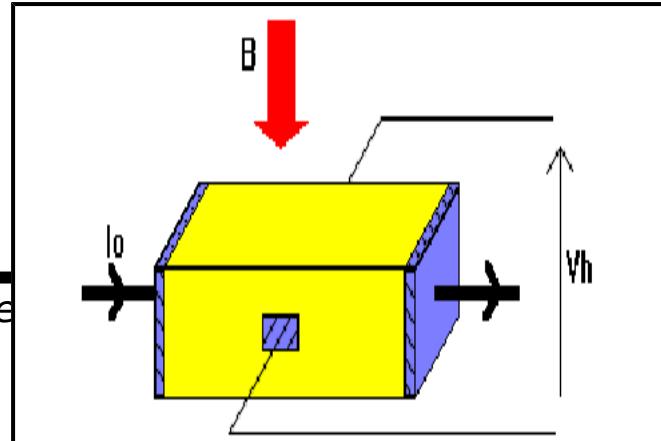
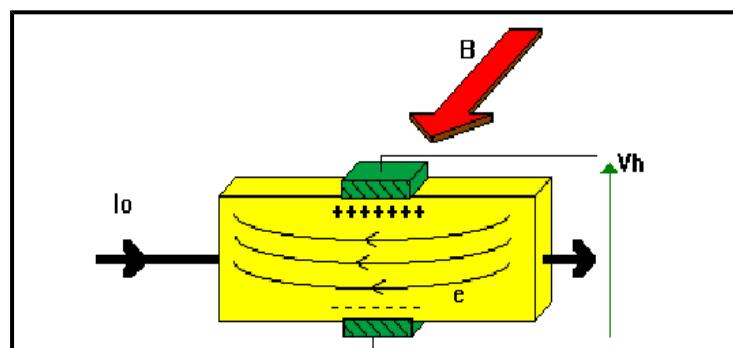


Fig. A.23

Si un courant  $I_0$  traverse un barreau en matériau conducteur ou semi-conducteur, et si un champ magnétique d'induction  $B$  est appliqué perpendiculairement au sens de passage du courant, une tension  $V_h$ , proportionnelle au champ magnétique et au courant  $I_0$ , apparaît sur les faces latérales du barreau. C'est la tension de Hall (du nom de celui qui remarqua le phénomène en 1879).

Les applications les plus courantes sont la détection (absence ou présence) d'un champ magnétique par commutation de la sortie ou pour la détection de fin de course. La détection du déplacement ou de la position d'un élément ferromagnétique résulte en commutation de sortie.

**Fig. A.24**



Les électrons sont déviés par le champ magnétique (Fig. A.24), créant une différence de potentiel appelée tension de Hall .Le champ magnétique déforme la trajectoire des électrons car il engendre une force de LORENTZ ( e )

$$V_h = K_h * B * I_0 \quad \text{Avec } K_h : \text{constante de Hall, qui dépend du matériau utilisé.}$$

La Constante de HALL étant inversement proportionnelle à la densité des porteurs, la tension de HALL est beaucoup plus importante dans les semi-conducteurs que dans les métaux. Pour notre cas le capteur à effet de HALL

(UGN3503U) a une sortie proportionnelle au champ magnétique par la relation suivante  $V_h = \beta B$  avec  $\beta = K_h * I_0 = 1,3 \text{mV/Gauss} = 13 \text{ SI}$

Donc  $K_h = 13 / I_0$  avec  $I_0 = 9 \text{ mA} = 0.009 \text{ A}$  ce qui donne  $K_h = 1444,44$

On peut trouver aussi des capteurs à effet Hall dont la fonction de transfert de tension de sortie est proportionnelle au champ magnétique détecté.

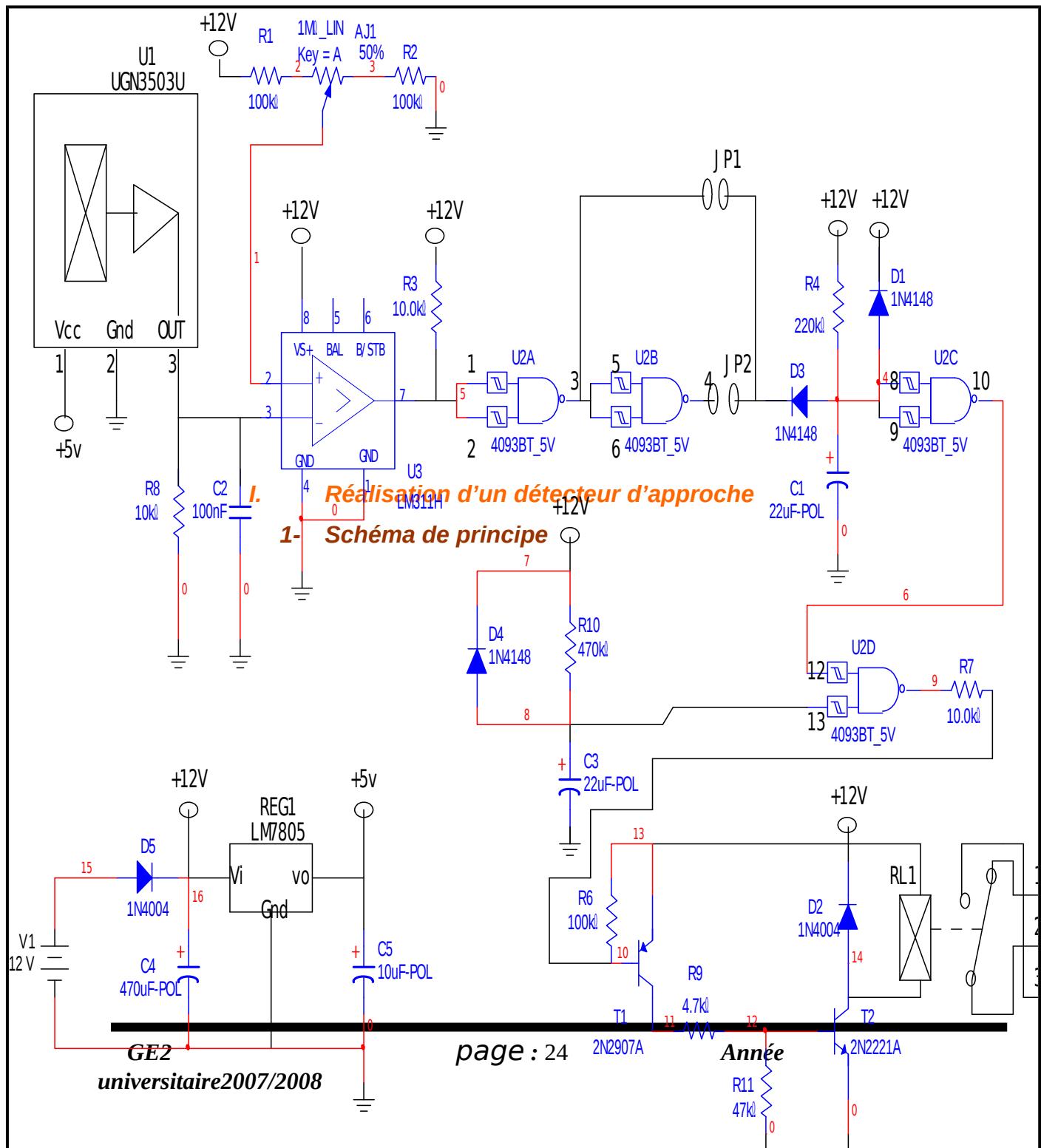
Les avantages des détecteurs à effet Hall sont les suivants:

- grande vitesse de commutation (jusqu'à 100kHz);
- pas de rebondissement mécanique;
- pas de détérioration des contacts;
- résistant à la corrosion;

La sensibilité est assez grande, un faible champ magnétique (moins de 10mTesla) peut les actionner

# Chapitre II

# Partie Réalisation



**Fig.B.1 : DETECTEUR DU CHAMP MAGNETIQUE PAR CAPTEUR à EFFET HALL**

**2- Liste des composants**



Divers :

- AJ1 : Potentiomètre 1M
- CN1 : Bornier de connexion à vis, 2 plots
- RL1 : Relais FBR611 ou équivalent (bobine 12v, 1contact repos travail)



Condensateurs

- C1, C3 : 22uF/25v
- C2 : 100nF
- C4 : 470uF/25v

- C5 : 10uF/25v

⊕ Resistances 1/4 w/5%

- R1, R2, R6 :100K
- R3, R7, R8 :10K
- R4 :220K
- R10 : 470K
- R9 : 4.7K
- R11 : 47K

⊕ Semi-conducteurs

- T1 : 2N2907A
- T2 : 2N2222A
- U1 : UGN3503U (capteur à effet HALL à sortie linéaire)
- U2 : CMOS 4093
- U3 : LM311
- D1, D3, D4 :1N4148
- D2, D5 : 1N4004
- REG1 : Régulateur 78L05(5v) en boitier TO92

## II. Analyse de fonctionnement des différents éléments du montage

### 1. Régulateur de tension

#### a) Description

Un régulateur de tension (fig.2) est un élément qui permet de stabiliser une tension à une valeur fixe ; il est donc indispensable pour les montages électroniques qui nécessitent une tension qui ne fluctue pas. Un régulateur de tension peut être composé d'un ensemble de composants classiques (résistances, diodes zener et transistor par exemple), mais il peut aussi être de type "intégré" et contenir tout ce qu'il faut dans un seul et même boitier, pour faciliter son usage.

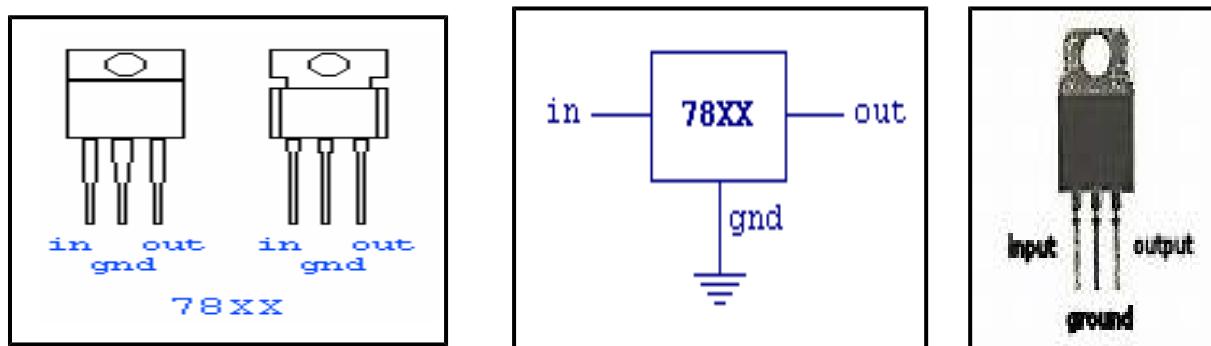


Fig.B.2

## b) Schéma de principe

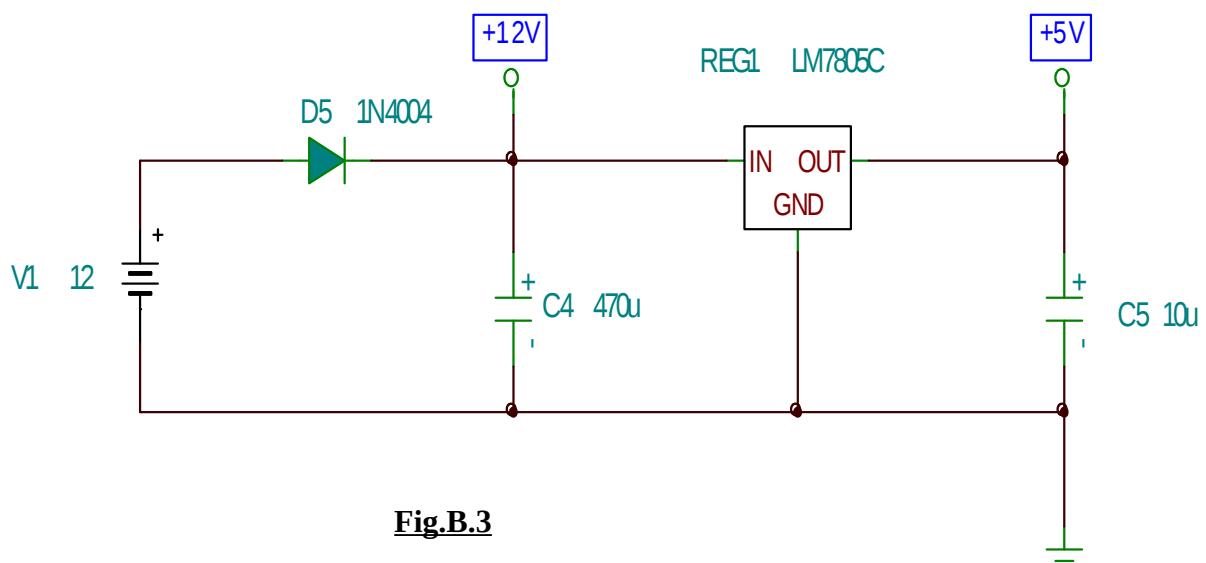
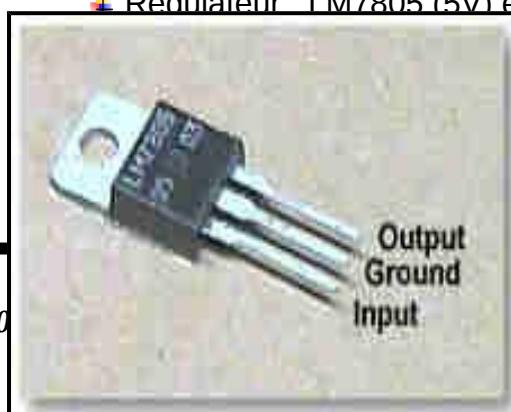


Fig.B.3

## c) Liste des composants

- Alimentation continu : 12V
- Diode : 1N4004
- Condensateur : C4=470 $\mu$ F, C5=10 $\mu$ F
- Réglateur : LM7805 (5V) en boîtier TO92



**Fig.B.4**

Les régulateurs fixes sont appelés ainsi parce qu'ils ont été conçus pour délivrer une tension continue d'une valeur donnée, qui ne peut pas être modifiée. Il en existe de multiples sortes, mais les plus courants sont sans aucun doute ceux de la série LM78xx (ou uA78xx) et LM79xx (ou uA79xx) ; ils sont très faciles à mettre en œuvre, et il suffit de peu de connaissances pour savoir lequel utiliser :

LM = préfixe utilisé par le fabricant, il peut aussi s'agir de uA, ou MC.

78 = signifie qu'il s'agit d'un régulateur positif

79 = signifie qu'il s'agit d'un régulateur négatif

xx = tension de sortie fixe (valeur entière)

Valeurs courantes disponibles : 5V, 6V, 9V, 10V, 12V, 15V, 18V, 24V.

Ce type de régulateur dispose d'une entrée (sur deux fils), et une sortie (aussi sur deux fils). (Fig.B.5) Comme l'un des deux fils de l'entrée est commun à l'un des deux fils de sortie (la masse), on ne retrouve que trois pattes sur le composant : l'entrée, la masse et la sortie. On applique la tension à réguler entre la patte d'entrée et la patte de masse, et on récupère la tension régulée entre la patte de sortie et la patte de masse.

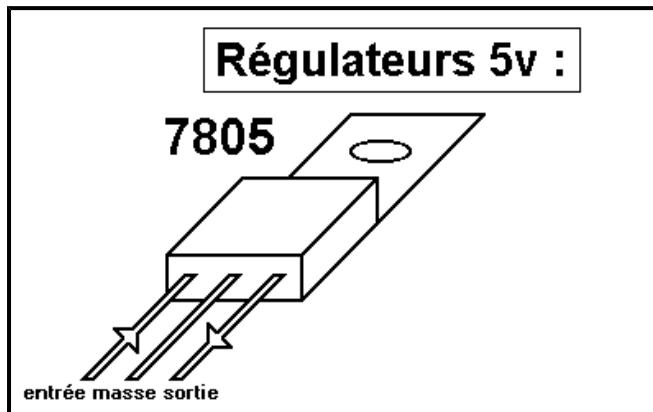


Fig.B.5

## 2. Comparateur de tension

## a) Brochage du LM311

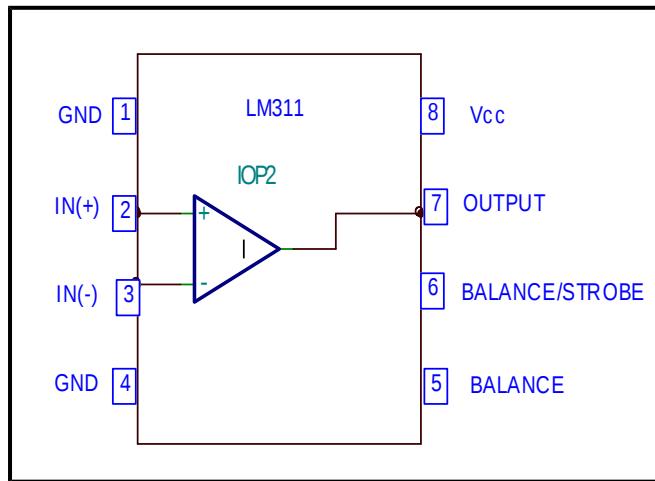
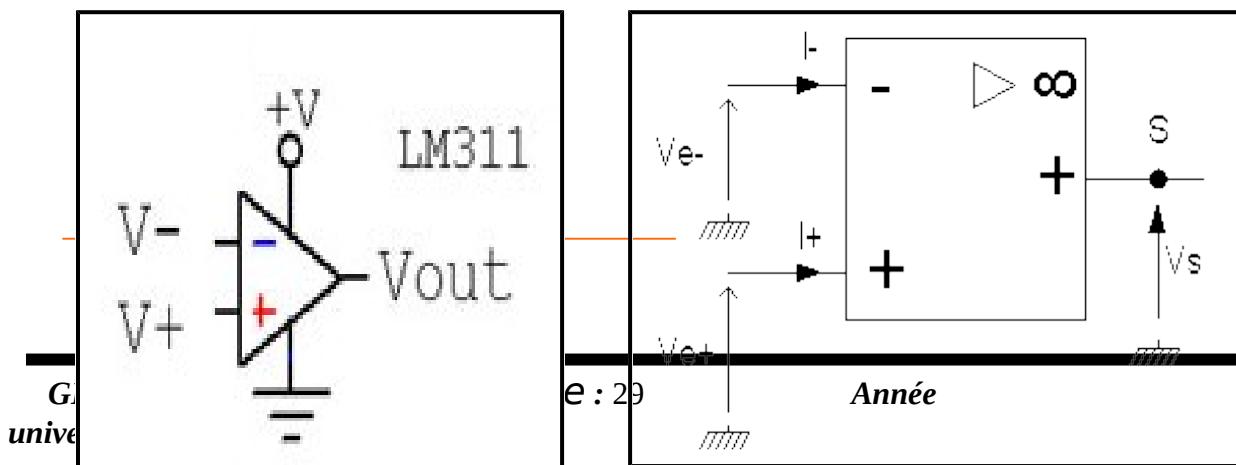


FIG.B.6 : SCHEMA DE LM311

Le comparateur est un dispositif permettant de comparer une tension par rapport à une référence donnée. Son niveau de sortie est soit positif (représenté par un état) soit négatif (au potentiel de la tension d'alimentation).

Le montage du comparateur se fait sans contre-réaction (boucle ouverte). Une tension référence donne le point de basculement de l'amplificateur opérationnel, donc dès que la tension d'entrée du montage est supérieure de quelque mV, le circuit se met en fonction et nous trouvons en sortie un niveau haut, la tension d'alimentation positive (pour le cas du comparateur non inverseur). Au contraire, si la tension d'entrée du montage est inférieure à la référence (masse) de quelque mV, le circuit se met en fonction et nous trouvons en sortie un niveau bas (tension d'alimentation négative).

## b) Fonctionnement



**FIG.B.7 :**

Le comparateur de tension compare la tension  $V_{e+}$  sur l'entrée positive (+) à la tension  $V_{e-}$  sur l'entrée négative (-) et commande sa sortie  $S$  de la façon suivante:

Si  $V_{e+} > V_{e-}$   $\Rightarrow$  la sortie  $S$  est au niveau logique 1

Si  $V_{e+} < V_{e-}$   $\Rightarrow$  la sortie  $S$  est au niveau logique 0

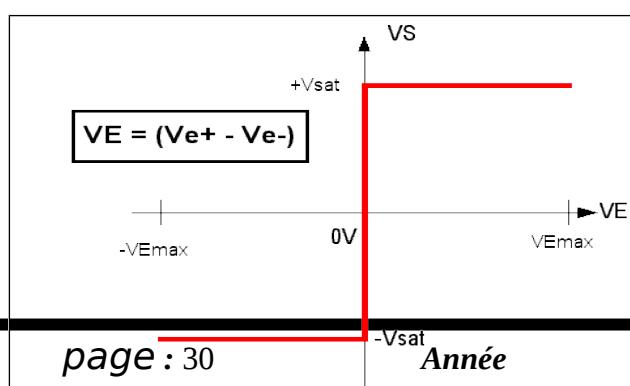
En fait le niveau logique 1 est défini par une tension appelée  $+V_{sat}$  et le niveau logique 0 par une tension appelée  $-V_{sat}$ . Ces tensions  $+V_{sat}$  et  $-V_{sat}$  dépendent de l'alimentation du comparateur, en effet si le comparateur est alimenté entre  $+V_{cc}$  et  $-V_{cc}$  alors :

$$+V_{sat} = +V_{cc} - V_{dh}.$$

$$-V_{sat} = -V_{cc} + V_{db}.$$

**$V_{dh}$  et  $V_{db}$**  sont appelées tensions de déchet. Elles dépendent de la technologie du comparateur, elles peuvent prendre des valeurs de quelques millivolts à quelques volts suivant la qualité du comparateur.

Pour le **LM311** qui est un amplificateur intégré utilisé en comparateur dans la fonction étudiée est alimenté entre  $+12V$  et  $0V$  ( $+V_{cc} = 12V$  ;  $-V_{cc} = 0V$ ). La documentation du constructeur donne:

***Caractéristique idéalisée*****FIG.B.8 :**

Cette caractéristique permet bien de vérifier que :

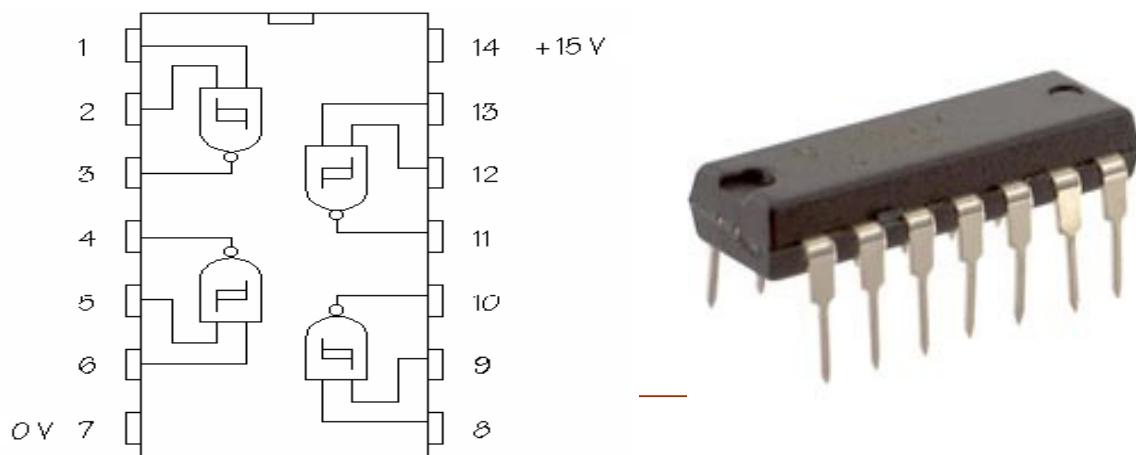
Si  $VE > 0$  alors  $VS = +Vsat$ .

Avec  $VE = (Ve+ - Ve-)$ .

Si  $VE < 0$  alors  $VS = -Vsat$ .

### 3. Portes NAND

#### a) Brochage CMOS CD4093B



**FIG.B.9**

CMOS CD4093B joue le rôle d'un inverseur parce qu'il nous permet de faire la multiplication de deux signaux numériques (bas ou hauts), et en même temps il réalise l'inversion, c'est comme la porte NAND en TTL :



### 4. Relais FBR611

#### a) Présentation

Un relais est un appareil électrique dans lequel un phénomène électrique (courant ou tension) contrôle la commutation (On/Off) d'un élément mécanique (relais électromécanique) ou d'un élément électronique (relais statique). C'est en quelque

sorte un interrupteur que l'on peut actionner à distance, et où la fonction de coupure est dissociée de la fonction de commande. La tension et le courant de commande (partie "Commande"), ainsi que le pouvoir de commutation (partie "Puissance") dépendent du relais, il faut choisir ces paramètres en fonction de l'application désirée. Ainsi, il faut choisir des relais différents selon qu'il faut commuter des signaux audio ou des tensions ou courants importants. Comme la Commande peut être réalisée sous faible puissance (faible tension, faible courant), et que la partie coupure peut commuter des puissances importantes, on peut dire que ce composant est un amplificateur de courant.

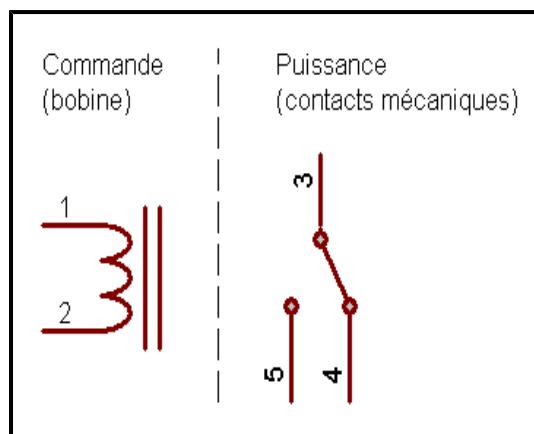
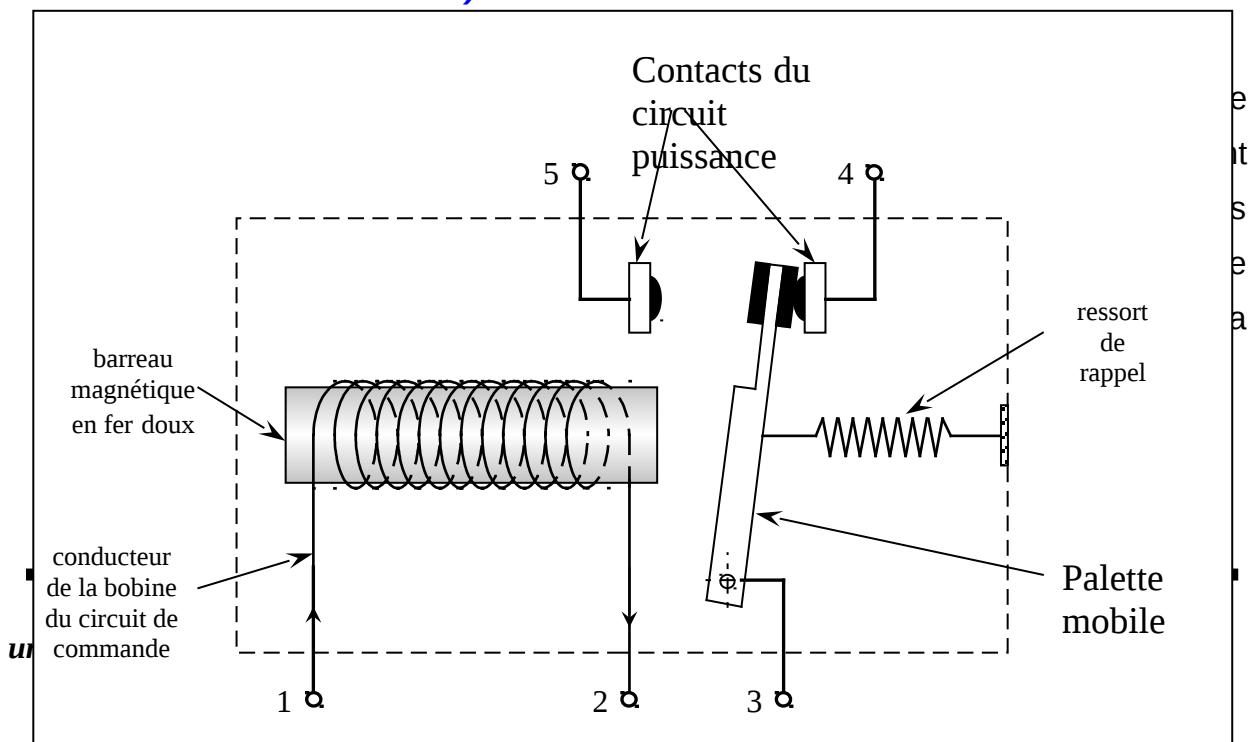


Fig.B.10

### b) Fonctionnement



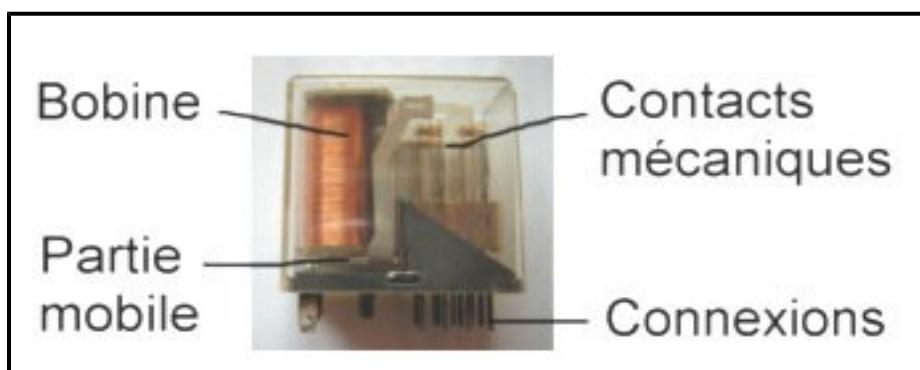
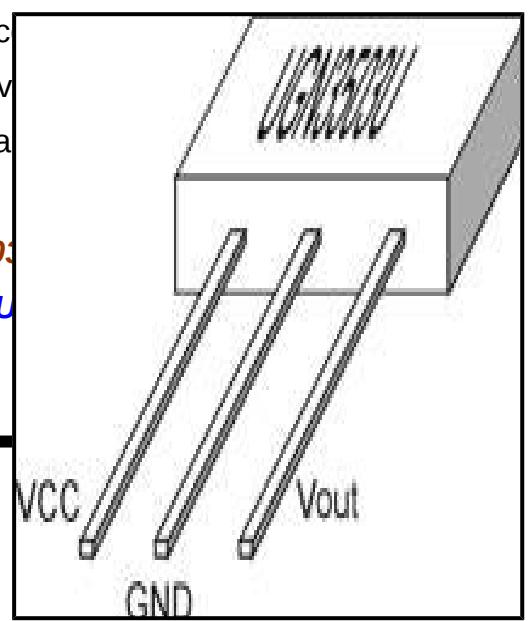


FIG.B.11

Sur la photo ci-dessus, on voit nettement la bobine, constituée d'un très grand nombre de spires d'un fil de cuivre très fin. Quand cette bobine est parcourue par un courant suffisant, un champs magnétique attire la partie mobile vers lui (sur la photo, l'élément marqué partie mobile se soulève), et déplace par le biais d'un axe, les contacts mécaniques situés à côté (sur la photo, les contacts mécaniques se déplacent vers la droite). Quand plus aucun courant ne circule dans la bobine, les contacts reprennent leur position de repos grâce à un ressort. C'est simplement d'avoir une bobine et des parties mécaniques.

**HALL UGN3501**  
Schéma de principe du capteur UGN3501

Page : 33



Brochage :

1 Vcc (+5V)

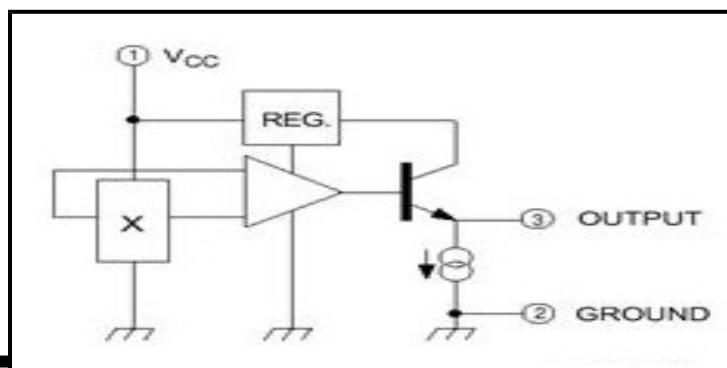
2 GND

3 Vout

**FIG.B.12****FIG.B.13**

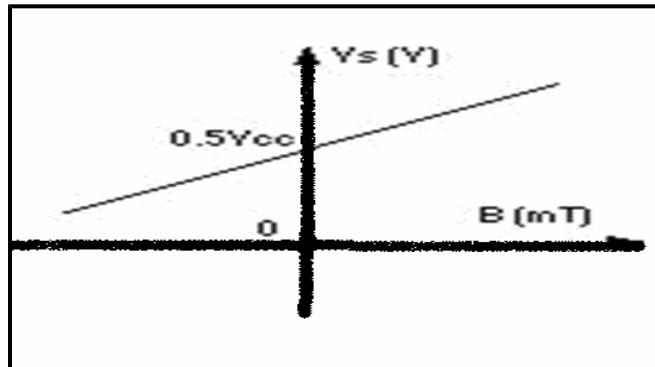
Spécifications techniques :

- Tension d'alimentation : 5 V (4,5 à 6 V).
- Densité du flux magnétique : sans limite.
- Sensibilité à 5V - min : 0,75 mV/gauss - max 1,72 mV/gauss.
- Courant d'alimentation : 9 mA.
- Résistance de sortie : 50 ohms.
- Température d'utilisation : - 20°C à + 85°C.
- Capteur très sensible
- Haute résistance mécanique
- Sortie sur amplificateur linéaire
- Sortie émetteur suiveur

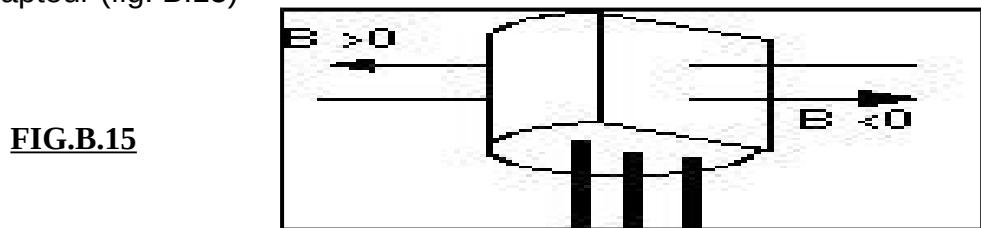
***b) Fonctionnement du capteur UGN3503U***

**FIG.B.14**

Les capteurs de champ magnétique sont conçus en interne autour d'une sonde à effet Hall, d'un régulateur de courant et d'un amplificateur. La caractéristique de sortie est de la forme  $V_s = 0.5V_{cc} + k \cdot B$  avec  $V_{cc}$  est la tension d'alimentation. La pente et l'ordonnée à l'origine dépendent toutes les deux de la tension d'alimentation.

**FIG.B.14**

Ces sondes sont en outre sensibles au sens du champ magnétique mesuré et à sa direction. Il est donc possible de déterminer les caractéristiques complètes d'un champ magnétique. La tension de sortie est maximale lorsque le champ est orthogonal au capteur (fig. B.15)

**FIG.B.15**

L'UGN3503 est un capteur de cette famille qui pour une tension d'alimentation de 5V possède une pente de 10 mV/mT. Les conditions à remplir pour son utilisation sont donc de disposer d'une tension stabilisée de 5 V et de décaler le potentiel de référence de mesure de 2.5 V pour lire directement (à un facteur 10 près) l'intensité du champ magnétique sur un voltmètre numérique.

### III. Le fonctionnement du montage

#### 1. Description globale du montage

Le schéma électronique de notre montage est représenté par la Fig.B.1. Nous avons choisi d'utiliser un capteur à effet HALL disposant d'une sortie linéaire, afin de pouvoir régler nous-mêmes le point de fonctionnement du montage. Notre choix s'est donc porté tout naturellement sur le capteur UGN3503, en raison de sa grande diffusion.

En l'absence de champ magnétique, la tension de sortie du capteur U1 vaut environ  $V_{cc}/2$ . Lorsque le capteur est soumis à un champ magnétique, sa tension de sortie s'écarte de  $V_{cc}/2$  avec une amplitude proportionnelle au champ magnétique (environ 1.30 mV/Gauss). Grâce à l'utilisation d'un comparateur monté en trigger de Schmitt, l'emploi d'un tel capteur est très simple.

La résistance R8 permet de charger modestement le capteur et fournit le signal à la borne (-) du comparateur U3. Le potentiomètre Aj1 permet de régler le point de référence du comparateur

La sortie de U3 est mise en forme une seconde fois par les portes U2A et U2B qui permettent de choisir la polarité du montage à l'aide de JP1 ou JP2. En effet, selon le sens du champ magnétique imposé au capteur, la tension de sortie de U3 basculera à l'état <<haut >> ou <<bas>> à l'approche de l'aimant. Pour inverser facilement le sens de détection du champ magnétique, nous avons utilisé les portes U2A et U2B. Les straps JP1 et JP2 vous permettront de choisir le sens de détection voulu (ce qui est parfois plus facile que d'inverser le sens du champ magnétique).

Chaque fois que le champ magnétique dépasse le seuil fixe par Aj1, le condensateur C1 est décharge via D3. La diode D3 permet au condensateur C1 de se recharger par la suite au travers de R4, ce qui produit une constante de temps bien définie. Lorsque le condensateur C1 est décharge (champ magnétique fort), la sortie de U2C passe à l'état <<haut >> pour une durée approximative de  $T=0.7 \cdot R4 \cdot C1$ . Tant que le champ magnétique est suffisant, la sortie de U2B (ou U2A selon le strap) maintient décharge le condensateur C1.

La temporisation introduite par R4/C1 débute lorsque le champ magnétique est devenu trop faible. La diode D1 permet de protéger l'entrée du circuit U2C lors des coupures d'alimentation, en déchargeant rapidement C1. Le signal issu de U2C est ensuite inversé par U2D afin de piloter le relais au travers de l'étage de commande formé par T1 et T2. Cet étage de commande est composé de deux transistors pour permettre au réseau R10/C3 d'inhiber la commande du relais à la mise sous tension

du montage via U2D. Le réseau R10/C3 possède une constante de temps double de celle de la cellule R4/C1, pour couvrir le temps de chargement de C1 à la mise sous tension. Celle permet de garantir que le relais ne sera pas piloté pendant ce laps de temps. La commande du relais est un classique du genre, aussi nous ne nous attarderons pas sur ce sujet.

Rappelons simplement, que la bobine d'un relais étant inductive, la diode D2 est nécessaire pour démagnétiser celle-ci lors de la coupure de la commande et protéger le transistor T2.

Le montage est alimenté en partie par une tension de 12Vdc qui n'a pas besoin d'être stabilisé. Une tension correctement filtrée fera très bien l'affaire à condition de pouvoir fournir un courant de 150 ma (lorsque le relais est actif). La diode D5 permet de protéger le montage en cas d'inversion du connecteur d'alimentation, ce qui permet de l'installation de l'appareil. Le régulateur REG1 permet de disposer d'une tension de +5V nécessaire au fonctionnement du circuit intégré U1/UGN3503.

## 2. Analyse pratique

**-1er cas l'absence du champ magnétique** : on sait que la sortie du capteur obéit à la relation  $V_s(B) = 0.5V_{cc}+k.B$  ; si  $B=0$  on a  $V_s=V_{cc}/2=2,5V$ .

Donc, l'entrée 3 du comparateur LM311 vaut 2.5V, on règle le potentiomètre (Aj1) de tel sorte à obtenir une tension supérieure à  $V_s$  (par exemple 2,8V à l'entrée 2). La sortie du comparateur passe à l'état haut ( $V_{cc}=12V$ ), la porte U2A permet d'inverser le signal, c'est à dire la sortie 3 du CD4093B passe à l'état bas (0V), et si on utilise le jumper JP1, la tension de la cathode de D3 vaut 0V ce qui permet de décharger le condensateur C1 instantanément. L'entrée de la porte U2C est égale à 0V alors que sa sortie(10) est à 12V. L'entrée (13) de la U2D est toujours à 12V car le condensateur C3 charge selon l'équation  $U_{c3}=V_{cc} [1-exp (-t/R_{10}C_3)]$  avec une constante de temps  $t_1= R_{10} \cdot C_3 = 10,34s$ . La sortie de l'U2D passe à l'état bas, cette sortie permet de piloter le relais par simple montage de commande à base de deux transistors qui fonctionnent en régime de commutation. La sortie 11 de la U2D permet de bloquer T1, ce dernier sature T2 c'est-à-dire l'émetteur lié à la masse,

ainsi une différence de potentiel de 12 V apparaît aux bornes du relais, ce qui permet de l'exciter.

**-2<sup>ème</sup> cas présence du champ magnétique** : la tension de sortie du capteur s'écarte de  $V_{cc}/2=2.5$  avec une amplitude proportionnelle au champ magnétique (environ 1.30 mV/Gauss = 13 V/Tesla taux de proportionnalité). Donc l'entrée 3 du comparateur LM311 dépasse 2.5V jusqu'au 3,2V or le potentiomètre (Aj1) est réglé à 2,8V, le LM311 bascule à l'état bas ( $V_{cc}=0V$ ). La porte U2A permet d'inverser le signal c'est-à-dire la sortie 3 du CD4093B passe à l'état haut (12V) alors la tension de la cathode de D3 vaut 12V, donc elle se comporte comme interrupteur ouvert ; ce qui permet de charger le condensateur C1 via la résistance R4 d'après l'équation de charge  $U_{c1}=V_{cc}[1-exp(-t/R_4C_1)]$  avec une constante de temps  $t_2= R_4*C_1 = 4,84s$ . L'entrée de la porte U2C passe à l'état haut après un temps  $t_2$  alors que sa sortie(10) est à 0V. L'entrée (13) de la U2D est toujours à 12V car le condensateur C3 charge selon l'équation  $U_{c3}=V_{cc} [1-exp (-t/R_{10}C_3)]$  avec une constante de temps  $t_1= R_{10}*C_3= 10,34s$ . La sortie de la U2D passe à l'état haut cette sortie permet de le désexciter et ainsi de suite.

# Conclusion

Ce projet a été pour nous enrichissant et nous a permis d'exploiter nos connaissances en physique et en électronique et d'acquérir de nouvelles connaissances dans notre spécialité.

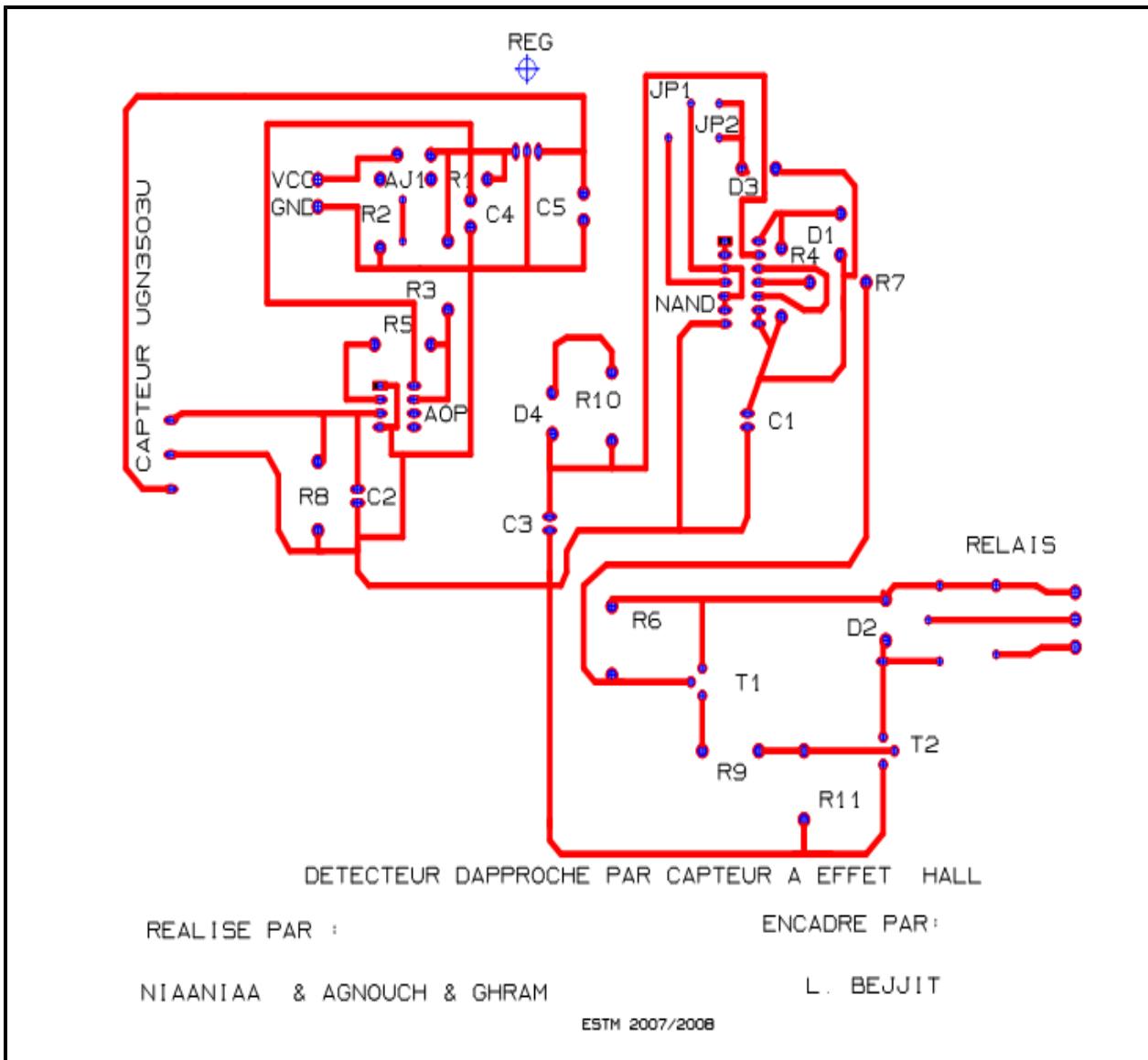
Au Niveau du magnétisme, nous avons compris le fonctionnement du capteur à effet HALL en faisant appel à nos connaissances sur le champ et les forces magnétiques. En électronique, la réalisation a nécessité un grand nombre de composants électroniques dont il a fallu comprendre le fonctionnement.

Les capteurs à [effet Hall](#) permettent de mesurer :

- Le champ magnétique (Teslamètre),
- L'intensité des courants électriques : capteurs de courant à Effet Hall.

Ils sont parfois utilisés comme [détecteur](#) de position : dans les [moteurs](#) électriques de type brushless, par exemple, ils détectent la variation de [champ magnétique](#) lors du passage d'un pôle du rotor.

# Dossier technique

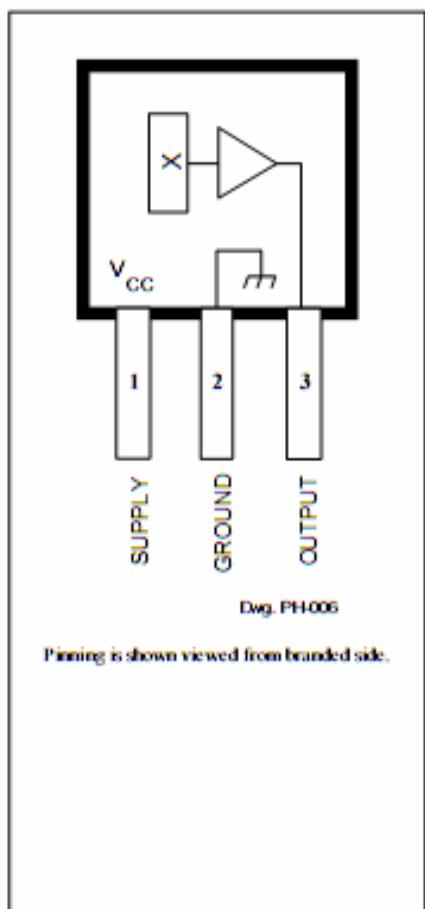
Le circuit imprimé :

# Annexas

## 3503

27507  
Data Sheet

### RATIOMETRIC, LINEAR HALL-EFFECT SENSORS



Pinning is shown viewed from braided side.

The UGN3503LT, UGN3503U, and UGN3503UA Hall-effect sensors accurately track extremely small changes in magnetic flux density—changes generally too small to operate Hall-effect switches.

As motion detectors, gear tooth sensors, and proximity detectors, they are magnetically driven monitors of mechanical events. As sensitive monitors of electromagnets, they can effectively measure a system's performance with negligible system loading while providing isolation from contaminated and electrically noisy environments.

Each Hall-effect integrated circuit includes a Hall sensing element, linear amplifier, and emitter-follower output stage. Problems associated with handling tiny analog signals are minimized by having the Hall cell and amplifier on a single chip.

Three package styles provide a magnetically optimized package for most applications. Package suffix 'LT' is a miniature SOT-89/TO-243AA transistor package for surface-mount applications; suffix 'U' is a miniature three-lead plastic SIP, while 'UA' is a three-lead ultra-mini-SIP. All devices are rated for continuous operation over the temperature range of -20°C to +85°C.

#### FEATURES

- Extremely Sensitive
- Flat Response to 23 kHz
- Low-Noise Output
- 4.5 V to 6 V Operation
- Magnetically Optimized Package

#### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage, V<sub>CC</sub> ..... 8 V

Magnetic Flux Density, B ..... Unlimited

Operating Temperature Range,

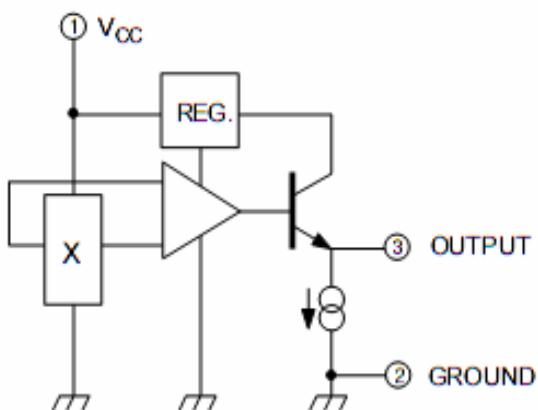
    T<sub>A</sub> ..... -20°C to +85°C

Storage Temperature Range,

    T<sub>S</sub> ..... -45°C to +150°C

**3503**  
**RATIOMETRIC,**  
**LINEAR**  
**HALL-EFFECT SENSORS**

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



Dwg. FH-007

ELECTRICAL CHARACTERISTICS at  $T_A = +25^\circ\text{C}$ ,  $V_{CC} = 5\text{ V}$ 

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Limits			
			Min.	Typ.	Max.	
Operating Voltage	$V_{CC}$		4.5	—	6.0	V
Supply Current	$I_{CC}$		—	9.0	13	mA
Quiescent Output Voltage	$V_{OUT}$	$B = 0\text{ G}$	2.25	2.50	2.75	V
Sensitivity	$\Delta V_{OUT}$	$B = 0\text{ G}$ to $\pm 900\text{ G}$	0.75	1.30	1.75	mV/G
Bandwidth (-3 dB)	BW		—	23	—	kHz
Broadband Output Noise	$V_{OUT}$	BW = 10 Hz to 10 kHz	—	90	—	$\mu\text{V}$
Output Resistance	$R_{OUT}$		—	50	220	$\Omega$

All output-voltage measurements are made with a voltmeter having an input impedance of at least 10 k $\Omega$ .

- U** Magnetic flux density is measured at most sensitive area of device located 0.0165\* (0.42 mm) below the branded face of the 'U' package, 0.0195\* (0.50 mm) below the branded face of the 'UA' package, and 0.0305\* (0.775 mm) below the branded face of the 'LT' package.

[www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com)

## LM311

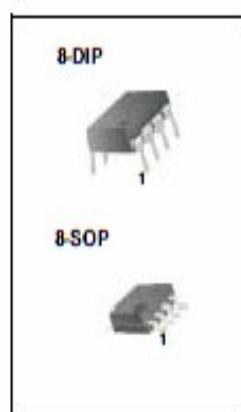
### Single Comparator

#### Features

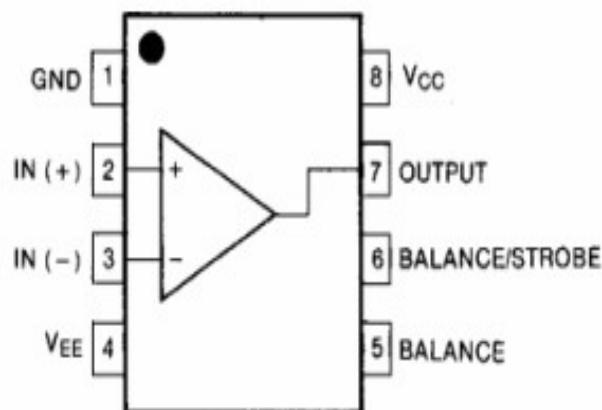
- Low input bias current : 250nA (Max)
- Low input offset current : 50nA (Max)
- Differential Input Voltage :  $\pm 30V$
- Power supply voltage : single 5.0V supply to  $\pm 15V$ .
- Offset voltage null capability.
- Strobe capability.

#### Description

The LM311 series is a monolithic, low input current voltage comparator. The device is also designed to operate from dual or single supply voltage.

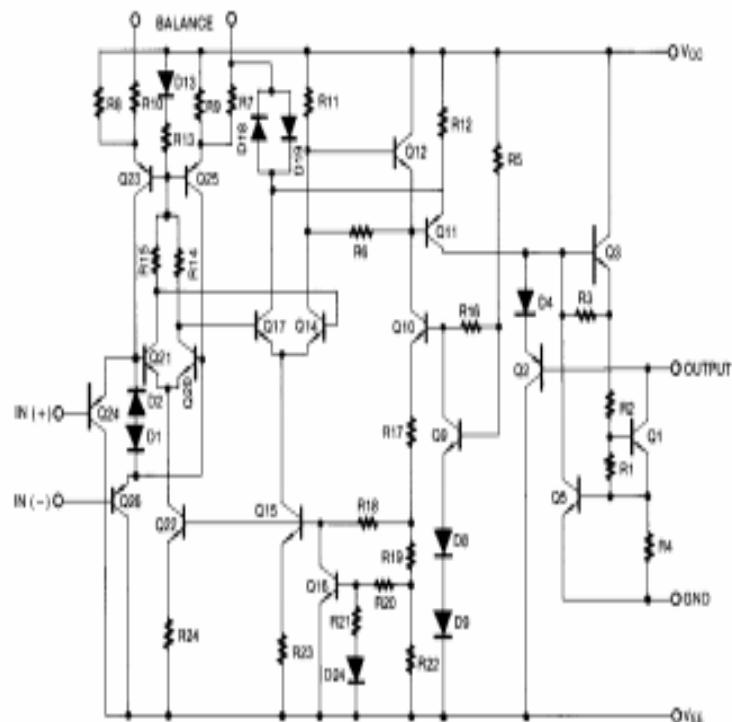


#### Internal Block Diagram



LM311

## Schematic Diagram



## Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Total Supply Voltage	Vcc	36	V
Output to Negative Supply Voltage LM311	VO - VEE	40	V
Ground to Negative voltage	VEE	-30	V
Differential Input Voltage	Vi(DIFF)	30	V
Input Voltage	Vi	$\pm 15$	V
Output Short Circuit Duration	-	10	sec
Power Dissipation	Pd	500	mW
Operating Temperature Range	T <sub>OPR</sub>	0 ~ +70	°C
Storage Temperature Range	T <sub>STG</sub>	-65 ~ +150	°C



# Références

## Bibliographie :

- Les capteurs en instrumentation industrielle ; GEORGES ASCH et collaborateurs (DUNOD)
- Electromagnétisme ; FREDERIC MASSET ; 1778-1855(ellipses)