

Ne perdez plus le nord :



0 Sommaire

I Préambule	P 2
II Un peu de technologie	P 3
2.1 Quelques définitions controversées	P 3
2.2 Quelques exemples simples	P 4
2.3 Les caractéristiques des capteurs	P 5
III Les capteurs magnétiques	P 8
3.1 Capteur utilisant la magnétorésistance	P 8
3.2 Sonde à effet Hall :	P 9
3.3 Interrupteurs à lame souples (ILS) :	P 11
3.4 Détecteur de proximité inductif :	P 12
3.5 Détecteurs de champ magnétique par génération de flux :	P 14
IV : Création d'une boussole à l'aide de un détecteurs champ.	P 15
4.1 Qu'est le champ magnétique terrestre :	P 15
4.2 Quel capteur choisir :	P 16
4.3 Comment utiliser ces capteurs	P 18
4.3.1 Hypothèse simpliste	P 18
4.3.2 Hypothèse réaliste	P 19
4.3.3 Hypothèse farfelue	P 22
4.4 Réalisation pratique	P 22
4.4.1 Le matériel employé	P 22
4.4.2 Les bibliothèques	P 23
4.4.3 Le montage et programme	P 23
4.4.4 Le résultat sur la console	P 24
4.4.5 A vous de continuer !!	P 24

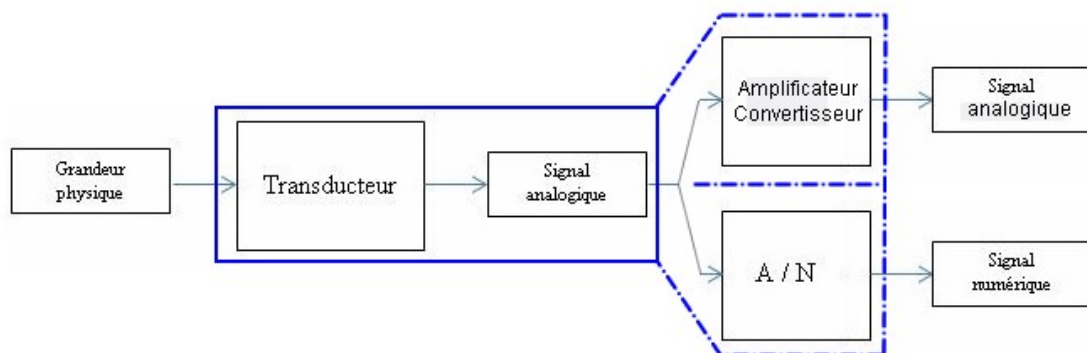
I Préambule :

L'homme ainsi que la grande majorité des animaux sont naturellement équipé de fonctions sensorielles (au nombre de 5, la vue, l'odorat, le toucher, l'ouïe et le goût). Ces sens, correspondent à divers phénomènes physiques que notre cerveau quantifie à l'aide de récepteurs adaptés qui renvoient à notre cortex des informations de type électrique. Il s'agit là de capteurs naturels qui sont les interfaces entre un phénomène physique et l'outil de traitement de l'information de ces phénomènes. Les 'machines' que nous avons créées, à notre image, voient 'le monde' de la physique à travers des capteurs. Ces capteurs permettent d'appréhender l'intensité de tel ou tel grandeur plus ou moins complexe. Il me semble que le domaine des champs magnétiques est celui dans lequel les capteurs sont le plus mal connu. Nous allons dans les lignes qui suivent essayer de dresser un inventaire des moyens de détection du champ magnétique ou de ses variations.

Nota : l'ordre dans lequel sont présentés ces capteurs est purement du hasard. N'y cherchez pas une interprétation métaphysique des pensées l'auteur (enfin je pense !).

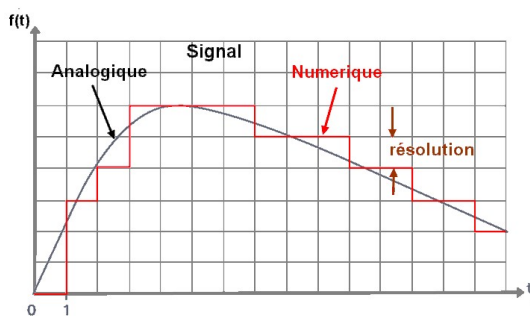
II Un peu de technologie

Nos moyens natifs de visualisation d'une grandeur physique sont plus que limité. Nous devons donc employer un élément que l'on appelle capteur dont le rôle est de transformer l'information contenue dans la grandeur physique à mesurer en une autre grandeur physique que nous pouvons appréhender par nos sens ou tout assistant technologique.



2.1 Quelques définitions controversées :

Il est de mise d'opposer deux types de caractéristiques dans le rendu d'une observation d'un phénomène physique : une « valeur » analogique et une valeur numérique.



En théorie (du moins dans la physique classique) la majorité des valeurs mesurables sont du type dit analogique. Pour les mathématiciens, la valeur pouvant représenter la quantité appartient à l'ensemble des réels.

En fait, peu de phénomènes sont de type analogique mais la résolution du phénomène au regard de la valeur mesurée fait que la variation du phénomène peut être négligeable devant l'étendue de la valeur de celui-ci. On se rapproche donc d'une fonction continue (au sens des mathématiques) et donc d'une valeur analogique.




Lorsque l'on se rapproche de l'infiniment petit et donc de la physique quantique, les évolutions se font par incréments. Au vu des utilisations et connaissances actuelles de ce domaine, nous laisserons le domaine quantique frontières de cet article et laisserons aux aux générations futures le soins de l'intégrer dans notre champ des capteurs.

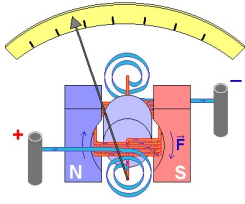

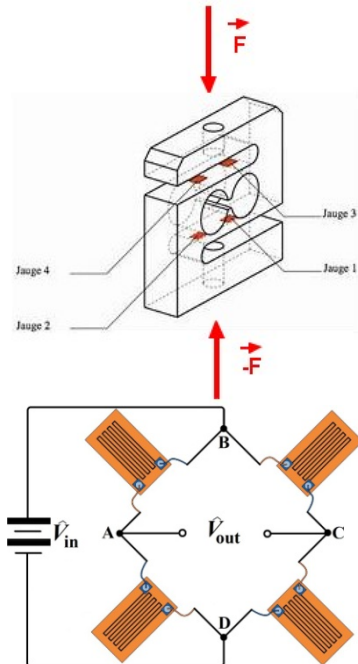
Pour exemple, la mesure de masse de fer de 1g possède au minimum la résolution de la masse d'un atome soit donc de $26 \times \frac{1}{6.02 \times 10^{23}} \text{ g} = 4.3 \times 10^{-23} \text{ g}$. Cette quantité est négligeable devant la valeur de la masse mesurée. En physique atomique, il en est de même des valeurs de l'Energie, des charges électriques (multiples de $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$).

En fait, au bout du compte, même en considérant le phénomène étudié comme analogique, toutes transcriptions nos observations sont chiffrées avec un certain nombre de chiffres non extensibles après la virgule (voire aucuns) et donc sont de nature plus numérique qu'analogique (même dans la vie courante les simples questions de quel heure est-il ? combien sont-ils, quel age as tu ? .. induisent des réponsées basées sur une notion de quantité évaluée par un nombre dans une base mathématique donnée ...).

Nous parlerons par la suite donc de valeurs analogiques lorsque la résolution du processus de mesure est négligeable devant l'étendue de la valeur de la mesure de ce processus.

2.2 Quelques exemples simples

Grandeur à mesurer	Moyen de visualisation	Echelle de mesure « visible »
Vitesse du vent (analogique)	 Manche à air	 5 nœuds 9.25 km/h 2.5 m/s  10 nœuds 18.5 km/h 5.1 m/s  15 nœuds 27.8 km/h 7.7 m/s  20 nœuds 37 km/h 10.3 m/s  25 nœuds 46 km/h 12.9 m/s

Tension électrique (analogique)	 <p>galvanomètre</p>	
Force (analogique)		Tension de sortie

2.3 Les caractéristiques des capteurs :

Sur ces exemples simples de capteurs passifs (qui n'ont pas besoin d'énergie extérieure pour fonctionner) ou actifs (que l'on doit alimenter par une source d'énergie extérieure pour assurer le fonctionnement), nous pouvons qualifier diverses caractéristiques :

Le type de sortie : L'affichage final est-il continu ou s'apprécie-t-il par intervalles (type numérique). Pour la manche à air : contre toute attente, cet affichage est numérique (1 anneau déployé, 2 anneaux ...) ; pour le voltmètre c'est identique on apprécie graduation par graduation (au mieux une demi), cet affichage est donc numérique (n'oublions pas que notre œil à qui s'adresse le vue-mètre est en fait un capteur numérique doté de pixels de taille fini !) ; le capteur de force par déformation permet de produire une tension électrique continue image de l'intensité de la force il est donc qualifié d'analogique (mais les moyens de visualiser cette tension sont souvent de type numérique). On constatera le plus souvent que le résultat final de la chaîne d'acquisition-visualisation d'une grandeur est de type numérique ou pseudo-numérique.

La résolution : Au final, l'intervalle de grandeur physique créant une modification décelable de l'affichage du capteur. Pour la manche à air : 5 nœuds ; pour le voltmètre 10v.

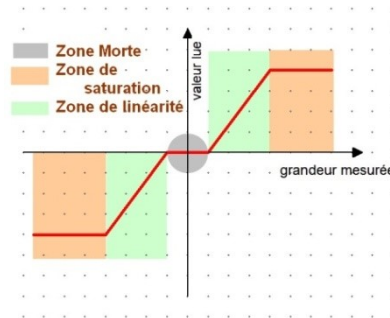
Ne perdez plus le nord : Adoptez un capteur magnétique !	Cordier Yves Le 22/06/2024	P 5/24
---	-------------------------------	--------

Pour l'élément déformable instrumenté, la résolution dépend de l'hystérésis mécanique de l'élément déformable, du collage des jauges propre à transmettre la déformation de surface du capteur aux jauges.

La plage de mesure : La plage de la grandeur physique décelable. Pour la manche à air : 5 à 25 nœuds ; pour le voltmètre : 50 à 300V. Pour la mesure de force, ici nous pouvons définir le maximum avant destruction et donc la plage de mesure est de $[-\max, +\max]$ pour un capteur symétrique et de $[\min, +\max]$ \min pouvant être négatif ou positif.

Linéarité, saturation, plage morte et offset :

Les trois premières notions sont plus facile à expliquer à l'aide du graphique ci-dessous :



On idéalise souvent la réponse d'un capteur (à réponse symétrique) par la courbe ci-contre avec les trois zones distinctes :

- Zone morte
- Zone de linéarité
- -Zone de saturation

La zone morte dans laquelle souvent le bruit de fond est supérieur à la valeur de sortie et donc la valeur peut être considérée comme nulle.

La zone de saturation partie où le signal de sortie est souvent limité par la tension d'alimentation du capteur (la transition réelle entre la zone de linéarité et la zone de saturation n'est pas si nette, elle est plus ou moins courbe. De même pour la transition entre la zone morte et la zone de linéarité).

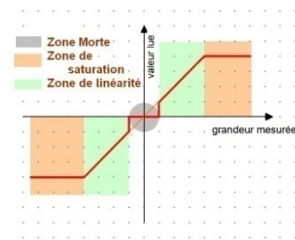
La zone de linéarité où la dérivée du signal de sortie en fonction de la grandeur est constante

$$\begin{cases} V_{lue} = 0 \text{ si } |grandeur| < zoneMorte / 2 \\ V_{lue} = \alpha (grandeur - zoneMorte / 2) \text{ si } grandeur > 0 \\ V_{lue} = \alpha (grandeur + zoneMorte / 2) \text{ si } grandeur < 0 \end{cases}$$

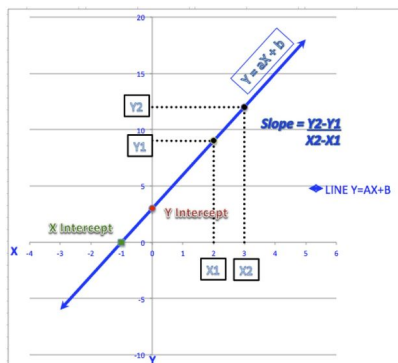
ou bien

$$\begin{cases} V_{lue} = 0 \text{ si } |grandeur| < zoneMorte / 2 \\ V_{lue} = \alpha (grandeur) \end{cases}$$

La deuxième caractérisation correspond au modèle ci-dessous :



L'offset ou le décalage à l'origine :



La courbe (souvent linéaire) possède une valeur non nulle à l'origine (son passage par zéro ne correspond pas au zéro du stimuli)

Très souvent les capteurs de mesure possèdent les deux notions exposées ci-dessus. Lors du traitement numérique de celui-ci, on ne garde souvent que les caractéristiques de saturation et celles d'offset. Il en découle une plage de mesure non symétrique au regard du phénomène.

Il faut bien avoir à l'esprit que le modèle que l'on calque sur capteur n'est qu'un modèle mathématique qui nous permet d'apprécier (avec une précision relative) l'intensité du phénomène mesuré. Il est illusoire de croire ici que le monde des capteurs est un « monde mathématique », seul nos moyens de calcul visualisation ... se raccrochent à une vision simpliste d'un degré de précision suffisante pour apprécier et agir au vu du phénomène physique observé.

On notera que ici, l'association d'un capteur de force à un galvanomètre (adapté) fourni contre toute attente un capteur à affichage numérique des forces dont la plage de mesure sera de [min,max], le min étant défini par le galvanomètre et le max certainement par l'élément de déformation.

Actuellement, l'introduction de calculateur numérique dans les processus de contrôle nous à amené à développer de plus en plus de capteurs dont la grandeur de sortie est une tension électrique (analogique) que nous transformons en une valeur numérique binaire via un Convertisseur Analogique Numérique (mais cela est une autre histoire). Il est bien entendu illusoire de vouloir augmenter la résolution de la mesure en augmentant à outrance la taille du mot (8 bits, 10 bits ...) de sortie au delà de résolution propre de l'élément de mesure qui transforme la grandeur physique en grandeur électrique.

III Les capteurs magnétiques

Depuis le barreau aimanté de la boussole utilisé par nos très lointains ancêtres dans la navigation, les techniques de détection des champs magnétiques ont beaucoup évoluées à l'aide de l'électronique et du numérique.

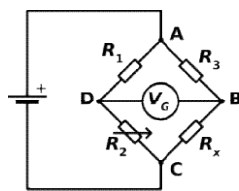
Sans vouloir être exhaustif, vous trouverez dans les descriptions suivantes, l'état de l'art en matière de détection des champs magnétiques.

3.1 Capteur utilisant la magnétorésistance :

Histoire : Ces capteurs s'appuient sur un phénomène physique découvert par William Thomson en 1857. Les technologies de l'époque n'ont pas permis de développer de manière correctes des capteurs basés sur ce principe. Ce n'est que dans les années 1980-1990 que Albert Fert et Peter Grünberg (lauréat du prix nobel en 2007) ont pu comprendre et réaliser (en utilisant les technologies utilisées dans la réalisation des semi-conducteurs) de véritables résistances variables sensibles aux champs magnétiques faibles. Cette technologie est depuis les années 2000 à la base de la miniaturisation des disques durs informatiques par la création de têtes de lectures de petites tailles basées sur ces principes.

Principe : Nous n'allons pas ici développer les principes physiques de ces résistances variables (qui dépassent de loin les propos de cet article) mais nous allons en rappeler brièvement les caractéristiques. Ces résistances sont créées par un empilement de couches nanométriques (3nm) de fer et Chrome qui possèdent la particularité d'avoir la résistance maximum lorsque le champ magnétique est parallèle à ces couches et qui décroît lorsque celui-ci tourne pour se rapprocher de la perpendiculaire à ces couches.

IL nous reste alors juste à mesurer habilement cette variation de résistance par une astuce datant de 1843 le pont de Wheatstone auquel on ajoute de la technologie « moderne ».



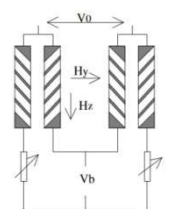
$$V_{AC} = V_0$$

$$V_G = V_0 \frac{R_2 R_3 - R_1 R_x}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_x)}$$

A l'équilibre $V_G = 0$ et

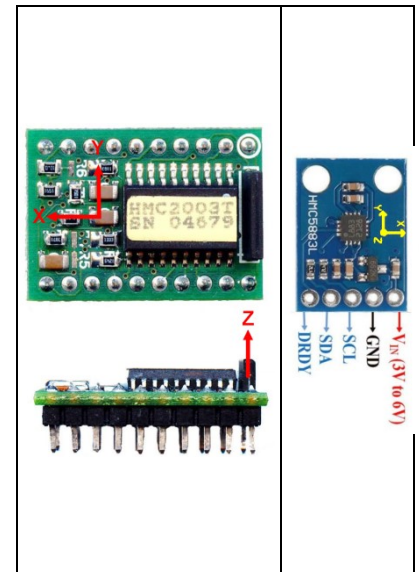
$$R_1 R_x = R_2 R_3.$$

En organisant spatialement les magnétorésistances et les couches qui les composent, on obtient un capteur magnétique qui délivre une tension V_b dépendant de l'intensité du champ magnétique qui traverse le pont. La relation entre V_b et l'intensité du champ n'est malheureusement pas linéaire, Il ne reste alors qu'à installer un module de linéarisation numérique ou analogique du signal V_b pour avoir une sortie proportionnelle à l'intensité de ce champ.



Miniaturisation

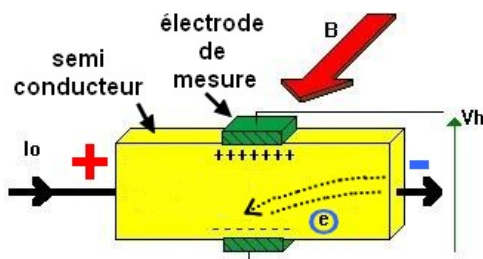
Industrialisation : Nous trouvons actuellement des capteurs hybrides fournissant les trois composantes du champ magnétique qui le traverse comme le HMC2003 (association d'un HMC2001 et d'un HMC2002) de chez Honeywell qui donnent en sortie trois tensions correspondant aux trois composantes du vecteur champ, où, plus récemment le HMC5883L plus compact qui combine l'équivalent d'un HMC2003 et d'une interface numérique i2c pour dialoguer avec un microcontrôleur. Attention ce dernier a fait les frais d'une copie chinoise qui bien que fonctionnant soit disant avec les mêmes caractéristiques se révèle beaucoup moins stable (répétabilité moindre, bruit accrue ...) l'adresse i2c du HMC5883L est 0x1E celle de la copie le QMC5883L est 0x0D.



3.2 Sonde à effet Hall :

Histoire : Ces capteurs s'appuient sur un phénomène physique découvert par Edwin Herbert Hall en 1879. Ce phénomène permet de « mesurer » l'intensité d'un champ magnétique perpendiculaire à un élément conducteur sous forme d'une tension.

Principe : Si les essais de M. Hall ont été initialement fait sur des feuilles d'or, actuellement la technologie des semi-conducteur nous permet d'avoir miniaturisé ces sondes et d'utiliser des matériaux moins « nobles » tel les semi-conducteurs. Sans rentrer dans les calculs nous allons ici simplement présenter le principe physique. Il s'agit ici du même principe de déviation des charges électriques soumises à un champ magnétique utilisé dans les accélérateurs de particule (ou dans les écrans cathodiques ancestraux). A l'inverse de ceux-ci, dans lesquels on module le champ magnétique pour courber comme il faut la trajectoire des particules afin de les faire suivre le chemin de l'accélérateur, ici, on cherche à faire sortir les particules du chemin afin de les récupérer sur les bords.

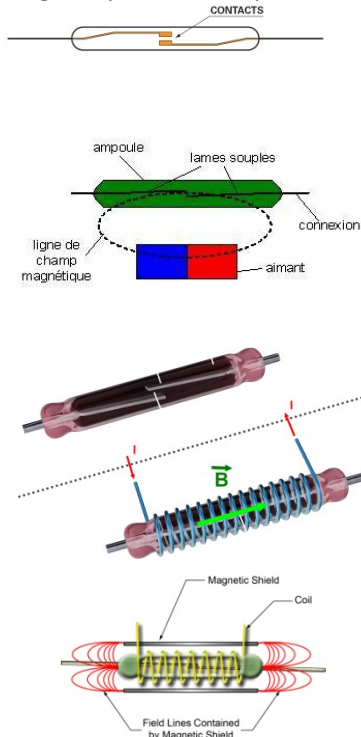


Les électrons qui constituent le courant I_0 traversant de gauche à droite (les électrons vont de droite à gauche) se trouvent déviés suivant une trajectoire circulaire par l'action du champ magnétique et vont s'accumuler sur la paroi inférieure du substrat. Il en découle la création d'une tension V_h entre la paroi supérieure et la paroi inférieure.

3.3 Interrupteurs à Lame souples (ILS) :

Histoire : Ces capteurs ont été inventés par Valentin Kovalenkov en 1922.

Principe : dans une ampoule sous vide ou sous atmosphère neutre, deux lames de matériau magnétique et élastiques sont montées quasi parallèles mais ne se touchent pas..



Dans un champ magnétique, les lignes de champs sont plus facilement conduites par ces matériaux que par le vide environnant et donc, il se crée une force qui ramène les deux lames l'une sur l'autre de manière à fermer le circuit magnétique. Un contact électrique s'établi alors entre les deux électrodes.

En adjoignant un enroulement de fils autour de l'ampoule, on crée à peu de frais un détecteur de courant à seuil. En effet le passage du courant dans la bobine crée un champ magnétique axial dans l'ampoule et permet la fermeture électrique du circuit.

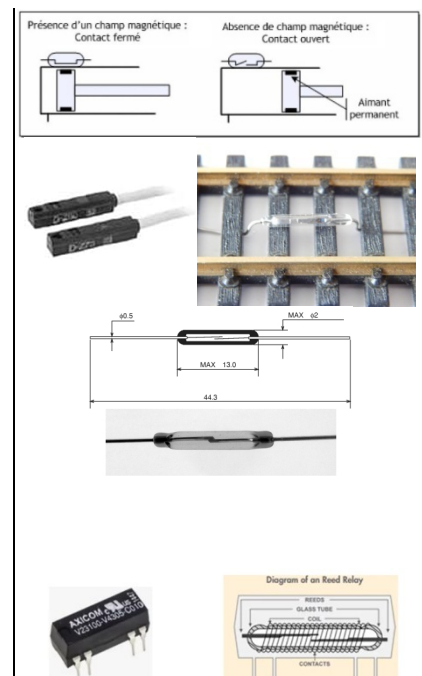
Ce faisant, en rajoutant un blindage magnétique, vous venez de créer ce que l'on appelle le relais *reed* qui fonctionne par la création d'un champ magnétique en injectant du courant dans la bobine.

Miniaturisation

Industrialisation: Les détecteurs ILS actuels ont des caractéristiques de longévité très importantes (de l'ordre de 10 millions de cycles ouverture/fermeture avec une intensité de commutation de l'ordre de 500 mA et 200 V).

Ces caractéristiques de longévité se retrouvent dans les relais *reed* doublées de fréquences de commutations beaucoup plus importantes que les relais électromécaniques classiques (mais moindre que les relais statiques à base de semi-conducteurs).

Ils sont de taille réduite et peuvent s'intégrer facilement sur des circuits imprimés où à l'intérieur



3.4 Détecteur de proximité inductif :

En fait ces capteurs ne détectent pas un champ magnétique mais utilise la modification de ce champ au voisinage de parties métalliques (du moins de matières magnétiques).

Comme ces capteurs sont en fait des cousins de ceux déjà présentés, je ne peux m'empêcher de vous les décrire comme les précédents.

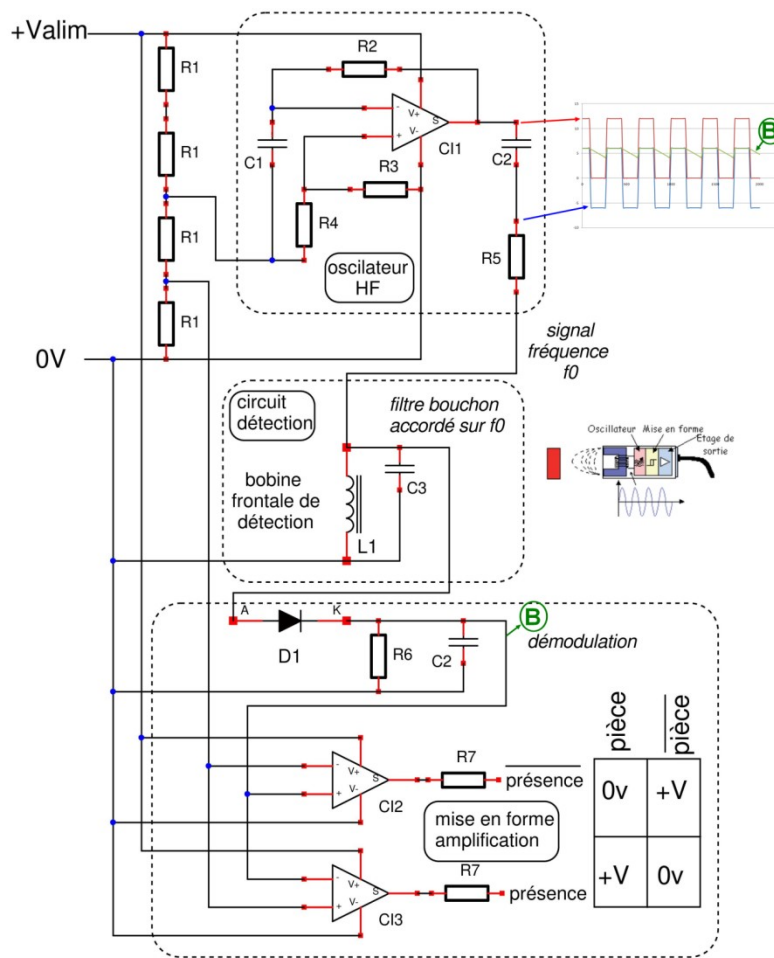
Histoire : En un sens, les capteurs inductifs utilisés dans les machines découlent des détecteurs de métaux utilisés par les démineurs dès les années 20-30 (1900 !). Il était en effet nécessaire de pouvoir créer des systèmes électriques oscillants afin d'en détecter les variations d'amplitude ou de fréquence en présence de métal. Ces systèmes électroniques n'ont pu voir le jour avant la première lampe électronique (Transmission Militaire n°1 : TM1 du général Ferrié en 1915) qui a permis de créer des émetteurs récepteurs radio à l'aide de circuits oscillants à des fréquences précises. L'apparition de capteurs de petite taille utilisant une partie de cette technologie n'a pu voir le jour avant la découverte du transistor (Le transistor a été inventé en 1947 par trois ingénieurs américains des laboratoires Bell : John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley) et surtout de sa miniaturisation dans les circuits intégrés en 1958. Ces capteurs intégrant une électronique complexe ne sont apparus qu'au début des années 70 (1900) et se sont démocratisés dans la décennie suivante.

Principe : Ces capteurs possèdent trois parties distinctes :

- La génération d'un courant électrique oscillant
- La partie détection de modification des caractéristiques d'un circuit électrique en présence de métal magnétique.
- La mise en forme et l'amplification du signal pour le rendre conforme à l'attente des ordinateurs de contrôle des processus industriels.

Voici un schéma simplifié de principe de ce que nous pourrions trouver dans le corps de taille réduite (10 à 20 mm de diamètre) d'un capteur inductif.

Ne perdez plus le nord : Adoptez un capteur magnétique !	Cordier Yves Le 22/06/2024	P 12/24
---	-------------------------------	---------

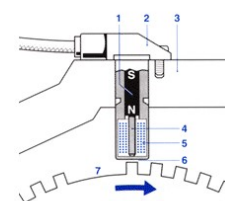


Au point B, la variation de la valeur de l'inductance L en présence ou non de métal à proximité provoque une variation de la tension. Elle est maximum lorsque rien n'est en face du capteur et minimale lorsque celui-ci est face à un élément métallique (attention certains inox sont amagnétique).

On notera la similitude de la détection avec la technologie des postes radio AM (amplitude modulée) comme les antiques postes à galène. Et oui le progrès se sert des technologies plus anciennes même celles de grand papa !.

Une variante plus simple de ce type de capteur est présente dans la technologie automobile tant dans les moteurs (capteur de PMH, arbre à came) que sur les organes de freinage (capteur ABS). Les modules de traitements sont externalisés sur l'ECU (Engine Control Unit):

Ce capteur ultra simple (sans électronique intégrée) est du type passif. Le passage des dents métalliques devant la tige polaire modifie le champ magnétique traversant la bobine. Il s'en suit la génération d'un courant alternatif aux bornes de ce capteur (2 fils) dont les 'pics' sont l'image de la roue dentée. L'absence d'une dent sur cette roue provoque une modification de la régularité du signal que l'on détecte dans le calculateur.



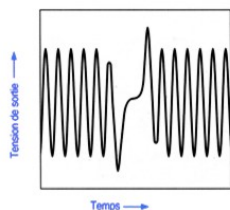
1. aimant permanent
2. boîtier du capteur
3. carter moteur
4. tige polaire
5. enroulement
6. entrefer
7. disque-cible avec repère de référence.

On repère ces capteurs par leur connexion à 2 fils à contrario des

Ne perdez plus le nord :
Adoptez un capteur magnétique !

Cordier Yves
Le 22/06/2024

P 13/24

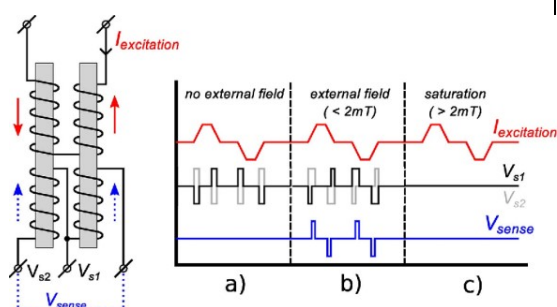


capteurs actifs à effet hall (pour les mêmes fonctions) qui possèdent 3 fils.

3.5 Détecteurs de champ magnétique par génération de flux :

Histoire : Ce type de capteur de mesure du champ magnétique par perturbation d'un champ alternatif connu (créé pour l'occasion), a nécessité l'utilisation de composants électroniques de type amplificateur et générateur de signal stable. Les compas d'avionique ou de marine utilisant cette technologie on vu le jour un peu avant la deuxième guerre mondiale grâce à l'avancée des tubes à vide (triodes et autre lampes à grilles multiples).

Principe : On crée un champ magnétique alternatif dans un double barreau ferromagnétique à l'aide d'un courant alternatif stable (les deux bobines créatrices créent chacune un champ opposé en absence de perturbations externes). On récupère le champ résultant par une bobine d'analyse.

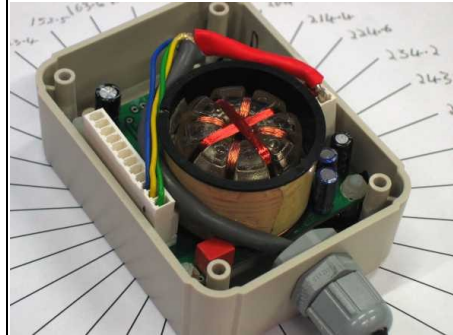


En présence d'un champ magnétique continu dans l'axe des bobines excitatrices, le champ créé résultant se décale de sa valeur moyenne zéro et produit un champ alternatif proportionnel au champ perturbateur. La détection de ce champ à l'aide d'une bobine d'analyse produit une tension alternative dont la valeur crête ou RMS est liée à l'intensité du champ perturbateur.

Le traitement électronique (de la tension V_{sense}) nous permet de connaître par comparaison la valeur du champ magnétique perturbateur. Ce principe somme toute simple se heurte cependant au phénomène de saturation des composants ferromagnétique et donc doit être parfaitement dimensionné pour une valeur de champ magnétique.

Miniaturisation

Industrialisation: En fait, ce qui nous intéresse souvent est la direction de ce même champ. Il suffit alors d'installer deux (trois ou plus) détecteurs analogues dans des directions connues et ainsi d'avoir (plus facile à dire qu'à faire évidemment !) par traitement numérique ou analogique la direction du champ magnétique perturbateur.

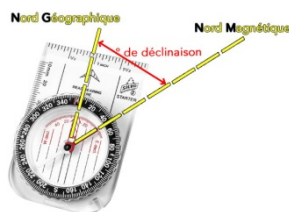
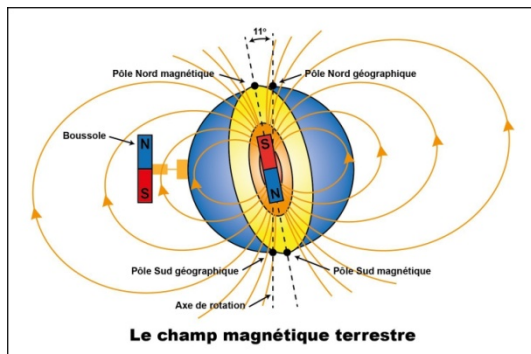


IV : Création d'une boussole à l'aide de un détecteurs champ.

Voici un projet simple (finger in the noze) au premier abord. Mais nous allons voir par la suite qu'il se heurte à pas mal de petits problèmes.

4.1 Qu'est le champ magnétique terrestre :

Nos ancêtres (les Chinois ou Vikings on ne sait qui à découvert l'outil le premier, peut être les deux ?!) lorsqu'ils ont fait flotter une pierre de magnétite sur un bout de bois dans une coupelle d'eau ne savaient pas où ils mettaient les pieds. La terre, comme beaucoup d'autres planètes, due à sa rotation et ses courants telluriques, crée un champ magnétique (que l'on pense à tort dirigé vers un point fixe que l'on nomme Nord).



La terre semble se comporter comme un aimant classique avec 2 pôles (le pôle sud au pôle Nord magnétique et le pôle nord au pôle Sud magnétique oops...).

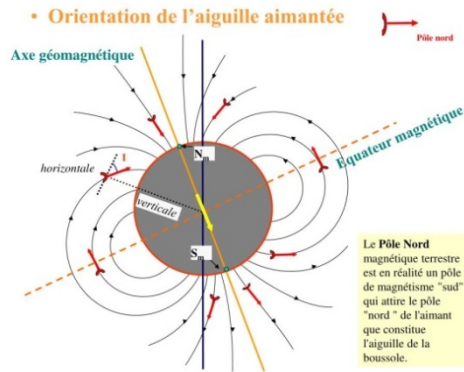
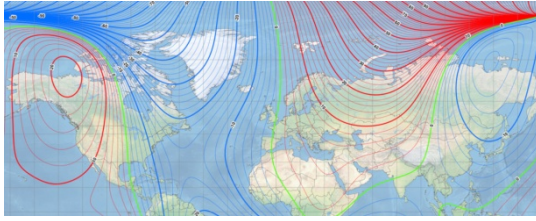
Nous pouvons donc « matérialiser les lignes de champ (lignes où le champ magnétique est « tangent » à la ligne mais n'est pas constant en norme en parcourant cette ligne).

Cette représentation idéale ne prend pas en compte les disparités morphologiques locales de notre bonne vieille terre (couches de roches diverses, présence de minerais, d'eau ...). Il en découle sur la surface de la planète (qui ne correspond pas à une surface de champ) que la projection du vecteur champ magnétique sur un plan tangent à la surface possède une déclinaison magnétique variable par rapport au nord géographique « vrai ». Par chance, en France, la déclinaison magnétique est quasi

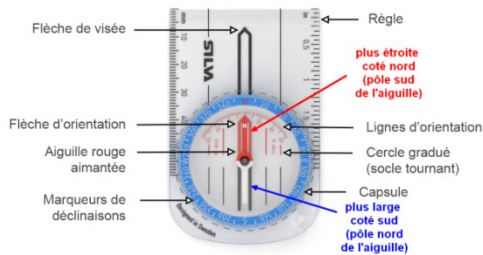
Ne perdez plus le nord :
Adoptez un capteur magnétique !

Cordier Yves
Le 22/06/2024

P 15/24



Une aiguille de boussole qui reste pour nous horizontale n'est pas du point de vue des masses équilibrée entre la partie « pôle nord » et partie « pôle sud » sud pour rester « horizontale ».

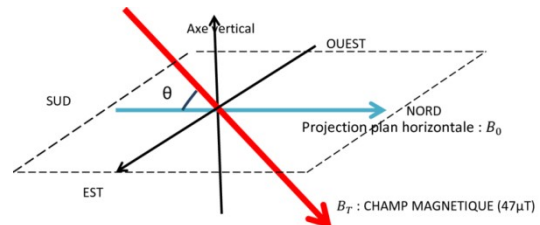


(une boussole *hémisphère nord*)



(un appareil ancien : boussole d'inclinaison)

nulle. De plus, le pôle nord magnétique est de nature voyageuse et se déplace en décrivant une spirale tracé sur notre globe (même que l'on prédit dans pas longtemps – à l'échelle géologique soit plusieurs millénaires — une inversion totale des pôles (le nord passant au sud et le sud .. se retrouvant poussé au nord...)) Ce champ magnétique d'une valeur approximative de 0.5G (Gauss) soit 0.5mT (Tesla) n'est pas vraiment puissant au regard du champ dans un moteur électrique de 0.5 à 10 T. Par rapport à un référentiel (dit horizontal) tangent à la surface terrestre (« le plancher des vaches »), il est incliné vers le sol d'un angle variant en fonction de la latitude. Ci-dessous la position du champ magnétique dans l'hémisphère nord.



Une boussole n'est donc pas universelle (une boussole équateur n'est pas la même qu'une boussole hémisphère nord ou hémisphère sud...). Dans l'hémisphère nord la partie sud de l'aiguille est plus « lourde », tandis que dans l'hémisphère sud pour que l'aiguille garde son horizontalité, c'est la partie nord qui est plus « lourde ».

On comprend donc aisément qu'au voisinage des pôles magnétiques ou lors de voyages dans « le monde de l'envers » (hémisphère sud) , la boussole de grand-papa (dont l'empreinte carbone n'est pas grugée par les voyages lointains en avion) a du mal à indiquer quelque chose de fiable.

4.2 Quel capteur choisir :

Ne perdez plus le nord : Adoptez un capteur magnétique !	Cordier Yves Le 22/06/2024	P 16/24
---	-------------------------------	---------

Compte tenu de la valeur (norme du vecteur $\approx 0.5G = 0.5mT$) du champ magnétique terrestre seul les capteurs cités en 4.1 et 4.5 sont éligibles à cette manipulation. Pour les autres, nous sommes en deçà de la précision du capteur et surtout dans la « zone morte ».

Mon choix s'est porté sur un capteur magnéto-résistif du style HMC5883L. C'est là que les ennuis commencent.

Ce capteur complexe est constitué de trois capteurs montés sur les axes d'un trièdre rectangle (jusque là tout va bien ...). Après essais, il s'avère que ces trois capteurs sont loin d'être des clones :

1. Ils ont chacun un « offset » différent (C.F. chap 3.3). De plus, deux capteurs issus de la même ligne de fabrication n'ont pas les mêmes offsets. Une fois cet offset connu (c'est la un hic entre autre), il faut décaler la valeur lue de l'offset pour avoir une valeur centrée.
2. Ils ont chacun un gain différent (C.F. chap 3.3). Encore une fois petit problème à résoudre (on plonge ici dans les abysses de l'inconnu !). Deux coup de baguette magique mathématique et hop on corrige (comme dans les contes de fée 'Grassmanesques' <<Herman Günter Grassmann 5/04/1809 – 26/09/1877 mathématicien prussien fondateur du calcul tensoriel et de la théorie des espaces vectoriels>>).
3. Le capteur une fois les corrections faites, donne la direction du champ magnétique terrestre relativement à la position du circuit électronique. En fait nous désirons avoir la projection sur le plan horizontal (du repère associé à notre position sur la croûte de la planète) de ce même champ magnétique.

<p>En utilisant le capteur de manière « brut », la réponse à un champ magnétique donné, lors de la rotation en tout sens du capteur, se situe sur un ellipsoïde décentré de centre</p> $A = \begin{pmatrix} offset_x \\ offset_y \\ offset_z \end{pmatrix}$ <p>repère rouge</p> <p>l'aplatissement de l'ellipsoïde sur</p> <p>chaque axe dépend du gain du capteur sur cet axe (a,b,c ne sont pas égaux).</p>	
---	--

Pour résoudre les points 1 et 2, nous devons donc effectuer une procédure de calibrage avant d'utiliser notre boussole. Si nous tournons le capteur dans TOUS les sens, et enregistrons en même temps les maxi et mini relevés, statistiquement, au bout de quelques centaines de valeurs nous pouvons

décemment affirmer que

$$\left. \begin{aligned} offset_x &\approx (\max_x + \min_x) / 2 \\ gain_{x=} &\approx \frac{\max_x - \min_x}{B_{reference}} \end{aligned} \right\} \text{ et donc, lors de l'exploitation des valeurs lues}$$

sur le capteur,

nous avons la valeur du champ magnétique sur l'axe x $B_x = \frac{Vlue_x - offset_x}{gain_x}$. On effectuera la même

opération sur les axes y et z. En fait dans notre désir de ne pas perdre le nord, la valeur réelle du champ nous importe peu (ce ne serait pas la même chose si nous cherchions du pétrole ...). Seul ses directions nous importent. Nous pouvons donc créer un pseudo vecteur champ colinéaire au champ réel

$$\tilde{\vec{B}} = \begin{pmatrix} \tilde{B}_x \\ \tilde{B}_y \\ \tilde{B}_z \end{pmatrix}_{\text{Repère Capteur magnétique}} = \begin{pmatrix} \frac{2 \cdot \text{Vlue}_x - (\max_x + \min_x)}{\max_x - \min_x} \\ \frac{2 \cdot \text{Vlue}_y - (\max_y + \min_y)}{\max_y - \min_y} \\ \frac{2 \cdot \text{Vlue}_z - (\max_z + \min_z)}{\max_z - \min_z} \end{pmatrix}_{\text{Repère Capteur magnétique}}$$

Bon reste à connaître la projection de vecteur sur le plan horizontal soit le point 3 de notre énumération initiale (bien qu'étant le dernier point, ce n'est pas le moindre, je vous laisse en juger par la suite ...).

4.3 Comment utiliser ces capteurs

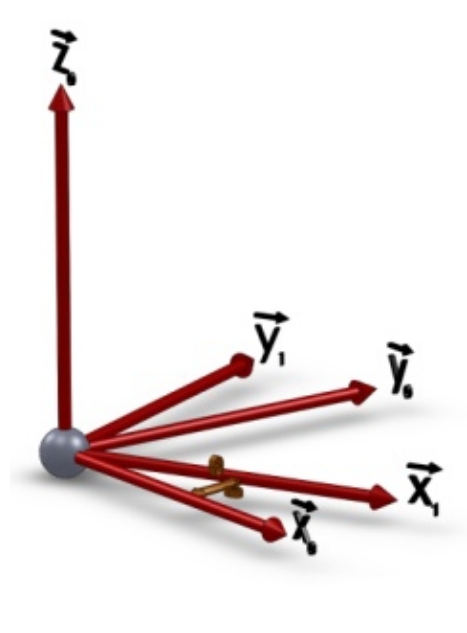
4.3.1 Hypothèse simpliste

Une première hypothèse est que notre navigateur tient correctement son capteur en le gardant « à plat » c'est-à-dire en faisant correspondre l'axe z avec la verticale géographique locale et qu'il vise un point avec l'axe des x de ce capteur.

$R_0 = \{\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0\}$ le repère terrestre horizontale \vec{x}_0 dirigé vers le nord magnétique, \vec{z}_0 dirigé vers le centre de la terre (relisez vos « Jules Vernes » que diantre !!). Par la suite pour simplifier les écritures nous noterons

$$R_0 = \{x_0, y_0, z_0\} \text{ et } \begin{cases} \cos(\theta) \equiv C\theta \\ \sin(\theta) \equiv S\theta \end{cases} \text{ Soit}$$

$$R_1 = \{x_1, y_1, z_1\} \text{ tel que } \begin{cases} x_1 = C\theta \cdot x_0 + S\theta \cdot y_0 \\ y_1 = -S\theta \cdot x_0 + C\theta \cdot y_0 \\ z_1 = z_0 \end{cases}$$

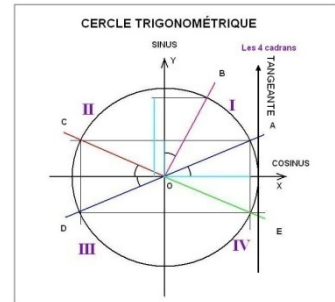


Dans ce cas, nous avons directement la projection sur le plan horizontal par les composantes \tilde{B}_x et \tilde{B}_y .

Attention : Si l'axe z du capteur pointe vers le haut, le repère du capteur est inversé par rapport au repère classique d'une boussole. Dans nos formules, il faut remplacer les valeurs sur les axes y et z par leur opposés.

Et donc l'angle à afficher est $\theta = \arctan\left(\frac{\delta \cdot \tilde{B}_y}{\tilde{B}_x}\right)$ avec $\delta = -1$ si z_{capteur} pointe vers le haut et $\delta = 1$ si z_{capteur} pointe vers le bas.

Ce n'est pas fini ... la fonction arctan est définie modulo Π et renvoi une valeur comprise entre $\frac{\Pi}{2}$ et $-\frac{\Pi}{2}$. L'angle d'une boussole est défini en degré de 0 à 359.9999°. Il faut donc corriger notre valeur affichée θ dans les 4 cadrans comme suit



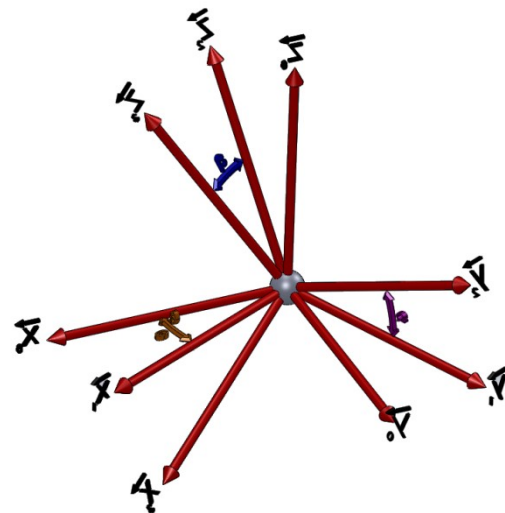
$$\text{Si } \delta \cdot \tilde{B}_y < 0 \text{ alors } \begin{cases} \tilde{B}_x \geq 0 \Rightarrow \theta_{\text{affiché}} = \frac{180}{\Pi} \left(\arctan\left(\frac{\delta \cdot \tilde{B}_y}{\tilde{B}_x}\right) + 2\Pi \right); \text{Quadran N}^\circ 4 \\ \tilde{B}_x < 0 \Rightarrow \theta_{\text{affiché}} = \frac{180}{\Pi} \left(\arctan\left(\frac{\delta \cdot \tilde{B}_y}{\tilde{B}_x}\right) + \Pi \right); \text{Quadran N}^\circ 3 \end{cases}$$

$$\text{Si } \delta \cdot \tilde{B}_y \geq 0 \text{ alors } \begin{cases} \tilde{B}_x \geq 0 \Rightarrow \theta_{\text{affiché}} = \frac{180}{\Pi} \arctan\left(\frac{\delta \cdot \tilde{B}_y}{\tilde{B}_x}\right); \text{Quadran N}^\circ 1 \\ \tilde{B}_x < 0 \Rightarrow \theta_{\text{affiché}} = \frac{180}{\Pi} \left(\arctan\left(\frac{\delta \cdot \tilde{B}_y}{\tilde{B}_x}\right) + \Pi \right); \text{Quadran N}^\circ 2 \end{cases}$$

4.3.2 Hypothèse réaliste

Notre 'informaticien' baroudeur au courant des problèmes complexes d'une simple boussole, se calme après son quatrième maté de coca, et, tient fermement son capteur fétiche dans une position assez proche de l'horizontale. Dans ce cas, la majorité des informations de direction souhaitées du champ magnétique terrestre sont contenues dans les composantes \tilde{B}_x et \tilde{B}_y . Mais \tilde{B}_z viens tout de même jouer les trouble fêtes (par analogie au anciens « flippers » certaines personnes disent gérer le « tilt ». Les adeptes de ces machines d'un autre âge me comprendront.). Les 'méfaits' de \tilde{B}_z se font de plus en plus sentir lorsque l'on s'éloigne de l'équateur.

L'image des divers repères en jeu (ci contre) peut paraître complexe mais nous allons la détailler par la suite.

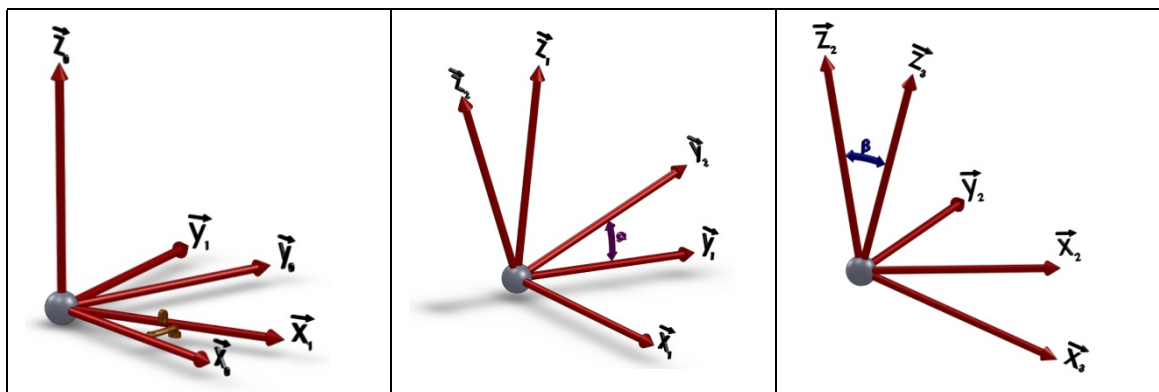


Nous allons avoir besoin d'un assistant de taille : Un accéléromètre (un fil à plomb numérique) qui nous permette de connaître les composantes de la gravitation terrestre par rapport à notre circuit imprimé électronique (si nous sommes immobiles ou évoluons à vitesse constante – Merci Mr Isaac Newton --) et donc la verticale locale.

Nous supposons par la suite que notre circuit contient à plat le capteur de champ (d'après vous, dans une boussole de grand papa, à quoi sert la petite bulle dans le liquide de stabilisation de la boussole : c'est tout simplement un niveau sommaire pour placer votre boussole à l'horizontale et non un défaut de fabrication ...)

Positionnons nos différents repères :

$R_0 = \{x_0, y_0, z_0\}$ le repère terrestre horizontale \vec{x}_0 dirigé vers le nord magnétique, \vec{z}_0 dirigé vers le centre de la terre.



$R_1 = \{x_1, y_1, z_1\}$ le repère de la boussole de l'hypothèse simpliste dans lequel $\vec{z}_1 = \vec{z}_0$ est dirigé vers le centre de la terre.

Maintenant interviennent les n cafés et multiples cocktails ingérés par notre 'Informathématicien'.

$R_2 = \{x_2, y_2, z_2\}$ Repère déduit de R_1 par une rotation de α autour de l'axe x_1

$R_3 = \{x_3, y_3, z_3\}$ Repère déduit de R_2 par une rotation de β autour de l'axe y_2

Le plan de la carte électronique est décalé de petits angles par rapport à l'horizontale. En notant $C\alpha$ la fonction $\cos(\alpha)$ et $S\alpha$ la fonction $\sin(\alpha)$.

$$\text{Nous avons dans l'ordre : } \begin{cases} x_2 = x_1 \\ y_2 = C\alpha \cdot y_1 + S\alpha \cdot z_1 \\ z_2 = -S\alpha \cdot y_1 + C\alpha \cdot z_1 \end{cases} \text{ et } \begin{cases} x_3 = C\beta \cdot x_2 - S\beta \cdot z_2 \\ y_3 = y_2 \\ z_3 = S\beta \cdot x_2 + C\beta \cdot z_2 \end{cases}$$

En fait, nous désirons afficher les valeurs dans R_1 en connaissant les valeurs dans R_3 (faire comme si la dite boussole était positionnée bien à plat) en corrigeant mathématiquement les désordres 'alcolocaféinesques' de notre opérateur.

En prenant comme hypothèse réaliste que $\alpha \ll 1$ et $\beta \ll 1$ nous pouvons linéariser les systèmes au

premier ordre en posant $C\alpha = C\beta = 1$, $\begin{cases} S\alpha = \alpha \\ S\beta = \beta \end{cases}$ et $\alpha \cdot \beta = 0$

Nota : Cette méthode est celle utilisée par les mécaniciens de la métrologie dans la théorie du « torseur des petits déplacements ». Théorie mise au point par Pierre Bourdet et André Clement dans les années 70 (utilisée pour les premières fois entre autre dans la validation des déflecteurs de jets de l'avion supersonique Concorde).

En remplaçant et en simplifiant au premier ordre (ce dont je suis sûr que vous allez adorer à faire et

refaire), (pour faire snob) « in finé » nous obtenons :
$$\begin{cases} x_1 = x_3 + \beta \cdot z_3 \\ y_1 = y_3 - \alpha \cdot z_3 \\ z_1 = z_3 - \beta \cdot x_3 + \alpha \cdot y_3 \end{cases} \quad (1)$$

Mais comment obtenir les valeurs de α et β ? C'est là que nous nous souvenons que notre

accéléromètre est lié au même référentiel que le magnétomètre. Ses composantes $\begin{pmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{pmatrix}$ subissent

donc les mêmes affres mathématiques. Dans le repère N°1, nous avons par définition de l'horizontale

$\begin{cases} G_{x1} = 0 \\ G_{y1} = 0 \end{cases}$ et donc (1) nous indique $\begin{cases} G_{x1} = 0 = G_{x3} + \beta \cdot G_{z3} \\ G_{y1} = 0 = G_{y3} - \alpha \cdot G_{z3} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \beta = -G_{x3}/G_{z3} \\ \alpha = G_{y3}/G_{z3} \end{cases}$. Il suffit donc de

remplacer ces dernières valeurs dans les équations donnant les composantes de \vec{B} dans R_1 en fonction de celles lues dans R_3 .

$\begin{cases} B_{x1} = B_{x3} + \beta \cdot B_{z3} \\ B_{y1} = B_{y3} - \alpha \cdot B_{z3} \end{cases}$ ce qui donne $\begin{cases} B_{x1} = B_{x3} - (G_{x3}/G_{z3}) \cdot B_{z3} \\ B_{y1} = B_{y3} - (G_{y3}/G_{z3}) \cdot B_{z3} \end{cases}$

On applique alors la « recette » de l'hypothèse simpliste en remplaçant \tilde{B}_x par $B_{x3} - (G_{x3}/G_{z3}) \cdot B_{z3}$

et \tilde{B}_y par $B_{y3} - (G_{y3}/G_{z3}) \cdot B_{z3}$. En supposant que les deux repères du magnétomètre et celui du gravimètre sont identiques (ce qui serait un peu malin tout de même !). Ces valeurs sont donc soumises au même coefficient δ cité dans le cas simpliste (pour rappel, il faut prendre les opposés des valeurs des composantes de \vec{G} et \vec{B} sur les axes y et z, dans le cas où le repère du capteur pointe vers le haut)

. Nous obtenons alors : $\theta = \arctan \left(\frac{(\delta \cdot B_{y3} - ((\delta \cdot G_{y3})/(\delta \cdot G_{z3})) \cdot (\delta \cdot B_{z3}))}{B_{x3} - (G_{x3}/(\delta \cdot G_{z3})) \cdot (\delta \cdot B_{z3})} \right)$. En nous

souvenant que dans tous les cas $\delta^2 = 1$, nous obtenons enfin notre cap magnétique

Ne perdez plus le nord : Adoptez un capteur magnétique !	Cordier Yves Le 22/06/2024	P 21/24
---	-------------------------------	---------

$$\theta = \arctan \left(\frac{\delta \cdot (B_{y3} - (G_{y3}/G_{z3}) \cdot B_{z3})}{B_{x3} - (G_{x3}/G_{z3}) \cdot B_{z3}} \right).$$

En ce qui concerne l’affichage de l’angle, nous appliquerons la même méthode qu’au cas ‘simpliste’.

Il est bien évident que toutes ces lignes d’approximations sont valables si les angles α et β sont voisins de 0 (La précision de notre boussole étant de 1 à 2 ° au maxi compte tenu des capteurs utilisés par la suite, on peut considérer une valeur limite de 5° pour ces angles ce qui donne

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha < 0.09 ; S\alpha < 0.087 ; C\alpha > 0.996 \\ \beta < 0.09 ; S\beta < 0.087 ; C\beta > 0.996, \text{valeurs qui justifient à post\u00e9riori les approximations} \\ \alpha.\beta < 0.0081 ; S\alpha \cdot S\beta < 0.0075 \end{array} \right.$$

(lin\u00e9arisation des fonctions trigonom\u00e9triques au premier ordre).

4.3.3 Hypoth\u00e8se farfelue

Notre ‘lformath\u00e9maticien’ tient sa boussole n’importe comment. Les calculs sont possibles mais bon soyons raisonnables, comme de toutes fa\u00e7on notre op\u00e9rateur ne sait m\u00eame pas comment se situe la pseudo horizontalit\u00e9, que voulez-vous qu’il fasse d’une valeur « projet\u00e9e » sur l’horizontalit\u00e9. Nous lui proposons alors un bon verre d’eau \u00e0 boire frais (ce qui lui permettra de retrouver l’horizontal \u00e0 l’aide de la surface liquide de son verre d’eau) et de reprendre sa mesure avec les id\u00e9es plus fra\u00e2ches. En un mot, je vous laisse le soin de d\u00e9velopper les calculs et r\u00e9solutions qui sont loin d’\u00eatre solubles par des \u00e9quations lin\u00e9aires (si un cos ou un sin \u00e9taient lin\u00e9aires, Hyparque de Nic\u00e9 (-190 -120 J-C) n’aurait pas \u00e9t\u00e9 le premier \u00e0 cr\u00e9er les tables de trigonom\u00e9trie que nous connaissons \u00e0 ce jour.)

4.4 R\u00e9alisation pratique

Bon apr\u00e8s toutes ces p\u00e9r\u00e9grinations, je pensait que la suite serait du type ‘finger in the noze’, mais comme le dit si bien le dicton ‘il ne faut pas vendre la peau de l’ours ...’.

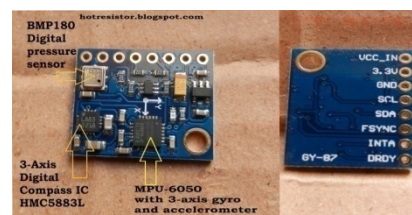
4.4.1 Le mat\u00e9riel employ\u00e9

Un ‘Arduino’ ou \u00e9quivalent (un Uno ou Nano de base font parfaitement l’affaire..).

Par simplification de câblage (et naïvement je pensait de soft ..), j’ai choisi un circuit hybride HW-290 ou son clone chinois (GY-87)

compos\u00e9 d’un acc\u00e9l\u00e9rom\u00e8tre type MPU6050 (qui indique aussi la temp\u00e9rature) d’un magn\u00e9tom\u00e8tre type HMC5383 et d’un autre circuit permettant entre autre de m’indiquer la pression (BMP180).

Na\u00effement, j’ai lanc\u00e9 le scanner i2c sur ce circuit (et les 3 autres du m\u00eame mod\u00e8le que je poss\u00e8de) pour v\u00e9rifier les adresses i2c des chips constituant ce circuit. Seul



Ne perdez plus le nord : Adoptez un capteur magn\u00e9tique !	Cordier Yves Le 22/06/2024	P 22/24
--	-------------------------------	---------

The diagram illustrates the system bus architecture. A central horizontal line represents the **SYSTEM BUS**. Above this bus, a red line is labeled **(RV - VLOGIC)**. Below the bus, a blue line is labeled **VDD**. On the left, the **MPU-6050** module is shown with pins **VDD**, **INT**, **SDA**, **SCL**, **CLKIN**, **FSYNC**, **AUX_DA**, **AUX_CL**, and **AD0**. The **3rd Party Magnetometer** module has pins **VDD_IO**, **CS**, **INT1**, **INT2**, **SDA**, **SCL**, and **SAD**. On the right, the **System Processor IO** module has a **VDD_IO** pin. An orange arrow labeled **ARDUINO** points to the **System Processor IO** module. The **SYSTEM BUS** connects to the **INT** pin of the MPU-6050, the **CS** pin of the Magnetometer, and the **SDA** and **SCL** pins of both the MPU-6050 and the Magnetometer. The **SYSTEM BUS** also connects to the **VDD_IO** pin of the System Processor IO. The **MPU-6050** module is connected to the **VDD** line. The **3rd Party Magnetometer** module is connected to the **VDD_IO** line. The **System Processor IO** module is connected to the **VDD_IO** line. The **SYSTEM BUS** is connected to the **INT** pin of the MPU-6050, the **CS** pin of the Magnetometer, and the **SDA** and **SCL** pins of both the MPU-6050 and the Magnetometer. The **SYSTEM BUS** is also connected to the **VDD_IO** pin of the System Processor IO. The **SYSTEM BUS** is connected to the **INT** pin of the MPU-6050, the **CS** pin of the Magnetometer, and the **SDA** and **SCL** pins of both the MPU-6050 and the Magnetometer. The **SYSTEM BUS** is also connected to the **VDD_IO** pin of the System Processor IO.

Il convenait donc dans le soft, avant toute opération sur le magnétomètre de créer un pont logique dans le circuit MPU6050 entre SDA et AUX_DA ainsi que SCL et AUX_CL. En d'autre termes permettre à l'Arduino de gérer de manière transparente le magnétomètre.

```
accelero.initialize();

// Spécial action to be able to talk to magnetometer following
accelero.setI2CBypassEnabled(true);
// allow direct access of I2C extensions of MPU6050 by main process
accelero.setI2CMasterModeEnabled(false);
//..the two conditions must be sets to access by main process
```

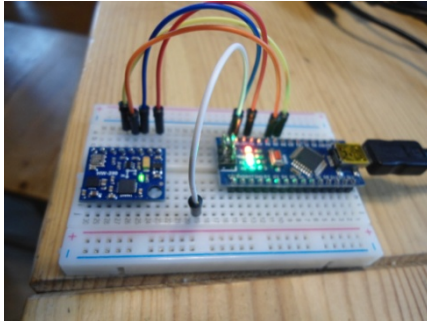
Après pas mal de recherches, j'ai trouvé sur le net une bibliothèque complète de gestion des ces circuits en mode i2c (i2cdev, MPU6050 écrite par jrowberg) dont je n'utilise qu'une infime partie.

Je le remercie ici pour son travail de lecture des datasheet et de traduction en code C++).

<https://drive.google.com/file/d/1qQyX1cCCijx1q1IKiPZuhHgtWCmFrEmP/edit>

<https://bitbucket.org/christandlg/bmp180mi/src/master/>

Ne perdez plus le nord : Adoptez un capteur magnétique !	Cordier Yves Le 22/06/2024	P 23/24
---	-------------------------------	---------



Une plaque d'essai, un 'Arduino nano' de base, un module GY 87 et quelques fils de connexion.

Gnd(bleu), 5v(rouge), SDA (jaune)(A4), SCL(orange) (A5), bouton(bleu) (2)

Comme vous pouvez le voir, rien de bien compliqué. Le fil blanc sert ici d'interrupteur pour provoquer la calibration du système lorsqu'on le relie à la masse.

Le détail du listing du programme n'ayant pas sa place ici (si ce n'est des pages de codes à recopier !!) Vous trouverez en annexe le source du programme Arduino (.ino) ainsi qu'une copie des bibliothèques employées. Libre à vous d'utiliser comme tel, de recopier transformer ...

4.4.4 Le résultat sur la console

```
10:29:53.415 -> temp : 26.37    external temp : 24.90 °C    Pressure: 86862.00 Pa    cap :41.74
10:29:53.547 -> temp : 26.27    external temp : 24.90 °C    Pressure: 86864.00 Pa    cap :43.38
```

Les deux températures données par les deux capteurs (celui de l'accéléromètre et du capteur externe), la pression (j'habite à 1370 m d'altitude donc la pression standard est de 86126 Pa. Il semblerait qu'il fasse beau alors qu'il pleut ! Comprenne qui pourra à la météo !).

La direction de l'axe x tracé sur le module GY 87 (la boussole en fait).

La diode intégrée du « nano » s'allume lorsque la condition d'horizontalité est correcte et s'éteint en cas de « tilt ».

4.4.5 A vous de continuer !!

A vous de customiser ce programme qui au départ ne devait être qu'une simple démo d'utilisation d'un capteur magnétique, mais qui au final se rapproche beaucoup plus d'une station de navigation (eh oui on veut toujours exploiter au maxi les joujoux que l'on découvre).

Ne perdez plus le nord : Adoptez un capteur magnétique !	Cordier Yves Le 22/06/2024	P 24/24
---	-------------------------------	---------