



Réf. : XXX-YY-NN

NV: 0 ou 1

Edition : 1

Date : XX-XX-XX

Révision : 0

Date :



LabEx UnivEarthS



Ionospheric and
gamma-ray
Observations
Satellite

SCAO : CAPTEURS D'ATTITUDE ET BANC DE CONTROLE

Date 12/05/2015

Signature

Préparé par :

Guillaume CHAMOIS – Mirela SMAJOVIC – Wendy CALMA
Atik LAHIYANE – Reda ELMEKKAOUI

Approuvé par :

Table des matières

I.	Introduction	5
A.	Présentation IGOSAT	5
B.	Présentation de la SCAO	5
1.	Système de contrôle d'attitude	5
2.	Nos objectifs	7
II.	Capteur solaire	8
A.	Origine	8
B.	Principe du capteur solaire	9
C.	Champ de vue.....	11
D.	Détermination de l'angle d'incidence	11
E.	Émission spectrale de la Lune	13
F.	Émission spectrale de la terre.....	14
III.	Dimensionnement de l'architecture	16
A.	Analyse des besoins	16
B.	Spécification technique des besoins	17
C.	Emplacement/dimension dédiée au capteur solaire dans le CubeSat	18
D.	Choix de la photodiode	18
E.	Choix des matériaux pour l'encadrement de la photodiode	23
F.	Dimensionnement et design du capteur solaire	25
G.	Détail et explication des dimensionnements	25
1.	Choix de la hauteur et de la largeur du trou.....	25

2.	Champ de vue	27
IV.	Estimation des paramètres du capteur.....	29
A.	Variation du décalage	30
B.	Variation des intensités.....	31
C.	Erreur de pointage	34
D.	Densité d'erreur de pointage.....	36
E.	Effets de la lune sur le capteur	37
F.	Effets de la terre sur le capteur.....	40
G.	Se prémunir des effets de la lune et du soleil	41
V.	Architecture Electronique.....	42
A.	Solution A	43
1.	Premier étage : Convertisseur courant-tension	43
2.	Deuxième étage	45
B.	Solution B	46
VI.	Ce qu'il reste à faire	47
VII.	Le magnétomètre	47
A.	Honeywell HMC2003	47
B.	Test unitaire avec Labview	48
1.	Installation et configuration de l'outil de conception de système de mesure <i>Labview</i>	48
2.	Branchement du magnétomètre HMC2003 et premières mesures avec un champ magnétique ambiant	49
VIII.	Annexe.....	54
IX.	Bibliographie	56

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Edition :	Révision :	Date	Modifications
1	0	12/05/2015	Création du document

I. Introduction

A. *Présentation IGOSAT*

IGOsat est un projet de nano satellite entièrement conçu et développé par des étudiants de l'Université Paris-Diderot encadrés d'une équipe de chercheurs et ingénieurs des laboratoires spatiaux d'UnivEarths. Il sera placé sur une orbite polaire héliosynchrone entre 600 et 700 kilomètres. Ses principales missions seront d'améliorer les connaissances actuelles des particules de hautes énergies qui sont piégées dans les ceintures de radiation et de faire les mesures de la densité d'électrons dans l'ionosphère.

B. *Présentation de la SCAO*

1. **Système de contrôle d'attitude**

Un **système de commande d'attitude et d'orbite** ou **SCAO** (AOCS en anglais) est un ensemble de composants et de logiciels de bord qui ont pour rôle le pilotage d'un satellite pour lui imposer l'attitude voulue et d'ajuster son orbite aux exigences de la mission.

Le système de contrôle d'attitude est composé de capteurs qui ont pour rôle de déterminer la position du satellite, et d'actionneurs pour modifier celle-ci :

Magnétomètre

Les Magnétomètres permettent de mesurer le champ magnétique présent aux alentours du capteur. Dans notre cas le champ magnétique mesuré sera celui de la terre, ce qui nous permettra d'orienter le satellite en fonction de notre planète.

Gyroscope

Les gyroscopes permettent de mesurer la vitesse angulaire d'un objet en utilisant l'effet des forces de Coriolis. Ainsi il est possible de mesurer la rotation du satellite dans les trois axes et de pouvoir réagir en conséquence.

GPS

Le GPS ou Global Positioning System est un système qui permet d'obtenir sa position sur terre par des valeurs de longitude et latitude fournies grâce à un réseau de satellites stationnaires. Bien qu'il existe d'autres systèmes similaires, comme GLONASS (équivalent du GPS contrôlé par la fédération de Russie), le nom GPS est attribué le plus souvent pour les capteurs eux-mêmes.

Comme cité précédemment, le système utilise des satellites présents en orbite terrestre, ainsi le système est utilisable seulement sur terre et pour des satellites présents en orbite terrestre basse. Ce qui peut poser des problèmes si la mission du satellite utilisant le GPS exige de dépasser les 2000 km d'altitude.

Magnéto-coupleurs

Les magnétos coupleurs (aussi appelés magneto-toquers en anglais) permettent à un satellite de modifier son orientation grâce aux effets des champs magnétiques.

Ces actionneurs se composent uniquement d'une simple bobine où circule un courant électrique. Ce dernier va générer un champ magnétique à travers la bobine qui va ensuite interagir avec le champ magnétique terrestre pour créer un couple, ce qui permet finalement de contrôler l'orientation du satellite.

Pour un contrôle total du satellite, trois magnéto-coupleurs sont nécessaires, un pour chaque axe de rotation.

Les capteurs solaires

Les capteurs solaires sont des composants indiquant la direction de la source de lumière par rapport à leur position en fournissant deux angles : dans l'axe X et dans l'axe Y.

La source de lumière sous-entendue est en général bien entendu le Soleil, et donc ces capteurs permettront d'orienter le satellite par rapport à notre étoile. Comme le satellite a une forme cubique, il faudra déployer cinq à six capteurs pour couvrir toutes les orientations possibles.

2. Nos objectifs

La SCAO composée de plusieurs capteurs. Notre mission est d'étudier de manière approfondie le fonctionnement d'un magnétomètre, de concevoir des capteurs solaires et éventuellement un capteur de Terre. Notre équipe composé de 5 membres, nous nous sommes répartis en deux sous-groupes dont :

Un groupe de deux personnes travaillant sur le magnétomètre et le gyromètre (déjà acheté) et un autre groupe sur la partie capteurs solaires et Terre. Chaque sous-groupe a des objectifs bien précis :

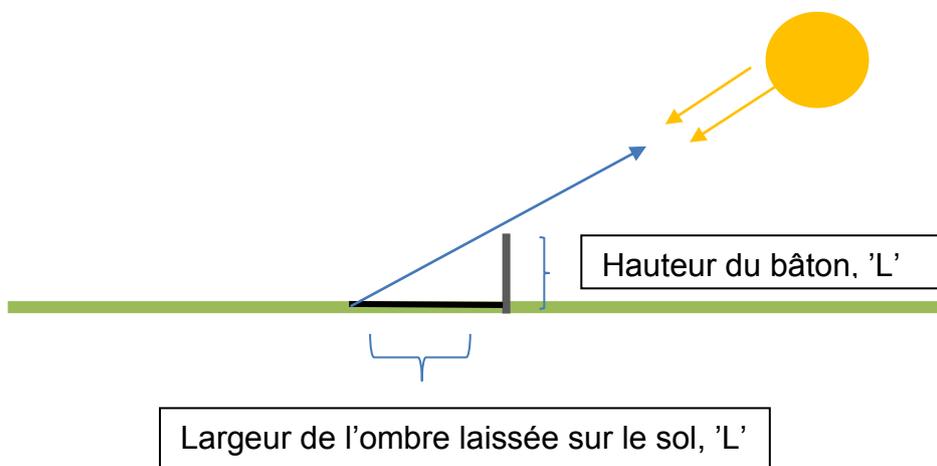
- Dimensionnement, design et réalisation d'un prototype de capteur solaire.
- Étude de faisabilité, dimensionnement et design d'un capteur de Terre
- Interfaçage et analyse des données issues du magnétomètre et du gyromètre.

Afin d'accomplir les tâches au mieux, nous avons décidé de nous concentrer essentiellement sur le capteur solaire et le magnétomètre. Et si le temps et le travail fait nous le permettent, nous nous occuperons du gyromètre et du capteur Terre.

II. Capteur solaire

A. Origine

Il faut remonter loin dans le temps pour voir apparaître l'émergence du principe de fonctionnement des capteurs solaires actuels. À l'antiquité, les mathématiciens, astronomes et géographes utilisent différents instruments d'observation et de mesure pour observer le ciel. L'astronomie leur apporte une image de leur planète. Ils cherchent notamment à mieux comprendre la trajectoire du soleil dans le ciel et mettent au point un dispositif permettant de mesurer l'angle que forme le soleil avec la terre, quelle que soit l'heure de la journée. Le principe est décrit ci-dessous et est encore à la base des capteurs solaires actuels.



Ils mesurent l'allongement des ombres au fil du temps, avec l'aide d'un gnomon, parfois simultanément à différents endroits, permettant des mesures d'angle. Grâce à la formule trigonométrique de la tangente, déjà connue à l'époque, les astronomes réussissent à trouver l'angle avec le soleil en fonction des heures de la journée.

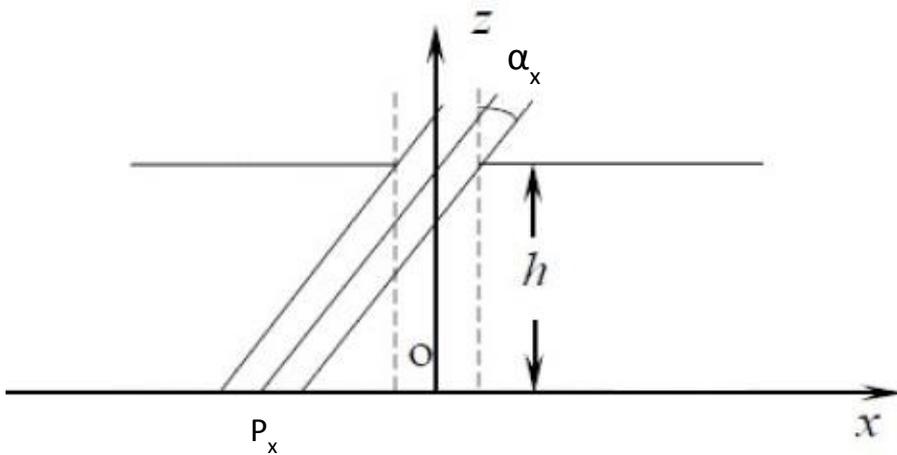
B. Principe du capteur solaire

Les capteurs solaires servent à indiquer la position et l'orientation du soleil suivant les faces du satellite. Les capteurs solaires sont, parmi l'ensemble des capteurs optiques, ceux qui sont le plus utilisés. Le capteur solaire sera indispensable pour le cubeSat, ils permettront de détecter les rayons du soleil et d'adapter la position des panneaux solaires du nanosatellite en fonction des besoins. Ils sont utilisés principalement pour la détermination de son positionnement et de son orientation. Il existe plusieurs types de capteurs solaires, photodiode, CCD ou CMOS. Tous ces capteurs sont détaillés dans un précédent rapport. Il avait alors été convenu de dimensionner et concevoir un capteur analogique avec une photodiode, moins gourmand en énergie et moins cher que les CCD ou CMOS, mais avec une précision angulaire plus faible. Le capteur utilise une photodiode quatre cadrans dans le plan du détecteur. L'image du soleil à travers le trou vient se projeter sur la photodiode à cadran. Quatre courants sont alors générés par les cadrans selon l'angle d'incidence. Par un système de barycentre des intensités détaillé dans la suite du rapport, il est possible de retrouver l'angle incident du faisceau.

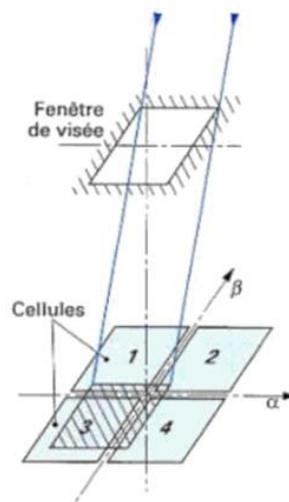
Capteur solaire



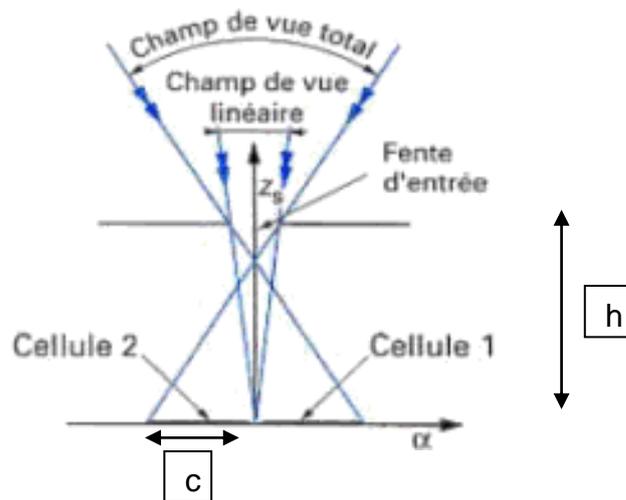
Le capteur soleil actuel est basé sur le même principe que l'horloge solaire de l'antiquité. Ci-dessous, un capteur solaire en coupe transversale.



Le capteur est composé de deux surfaces parallèles. La surface du dessus est trouée permettant aux rayons du soleil incident d'imprimer une image ponctuelle sur la face du dessous. La distance entre les deux plans et la position de l'image sur le plan du dessous sont connues et permettent de remonter à un angle d'incidence grâce à la formule de la tangente. À la différence du dispositif utilisé par les Grecs, ce capteur permet de déterminer deux angles d'incidence. La coupe transversale suivant y est similaire à la coupe suivant x, nous pouvons donc déterminer deux angles α_x et α_y



C. Champ de vue



a = largeur de la fente d'entrée

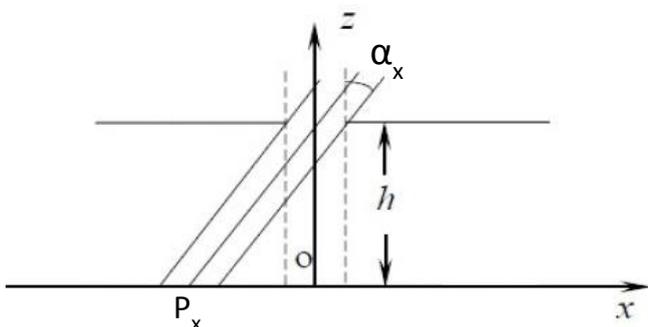
Le champ de vue total et le champ de vue linéaire dépendent tous les deux de la distance entre le trou et la photodiode et la taille du trou. Les formules sont données par :

$$\text{Champ de vue linéaire} = \arctan\left(\frac{a}{2h}\right)$$

$$\text{Champ de vue total} = \arctan\left(\frac{c + \frac{a}{2}}{h}\right)$$

D. Détermination de l'angle d'incidence

Coupe transversale du capteur.

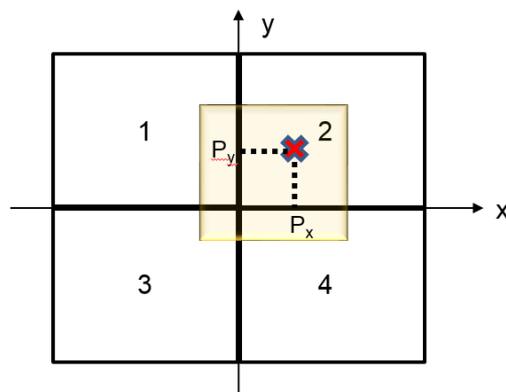


L'angle du faisceau central incident est déterminé par les équations suivantes :

$$\left. \begin{aligned} \alpha_x &= \arctan\left(\frac{P_x}{h}\right) \\ \alpha_y &= \arctan\left(\frac{P_y}{h}\right) \end{aligned} \right\} \text{Angles du rayon incident} \quad (1)$$

Le faisceau incident forme une image carrée de la taille du trou sur le plan du détecteur. Selon l'angle d'incidence, chaque cellule de la photodiode reçoit un éclairage différent et délivre donc une intensité différente. L'intensité délivrée par les cellules est fonction de l'angle d'incidence du faisceau.

Représentation du faisceau sur le plan des détecteurs



Pour remonter à un angle d'incidence à partir du spot lumineux des détecteurs, il faut effectuer une pondération des intensités des cellules 1,2, 3,4 par la formule suivante :

$$P_y = \frac{(I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}$$

$$P_x = \frac{(I_1 + I_3) - (I_2 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}$$

On remplace dans (1) :

$$\alpha_x = \operatorname{artan} \left[\frac{(I_1 + I_3) - (I_2 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \cdot \frac{1}{h} \right]$$

$$\alpha_y = \operatorname{artan} \left[\frac{(I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \cdot \frac{1}{h} \right]$$

} Angles du rayon incident
en fonction des intensités
sur les capteurs

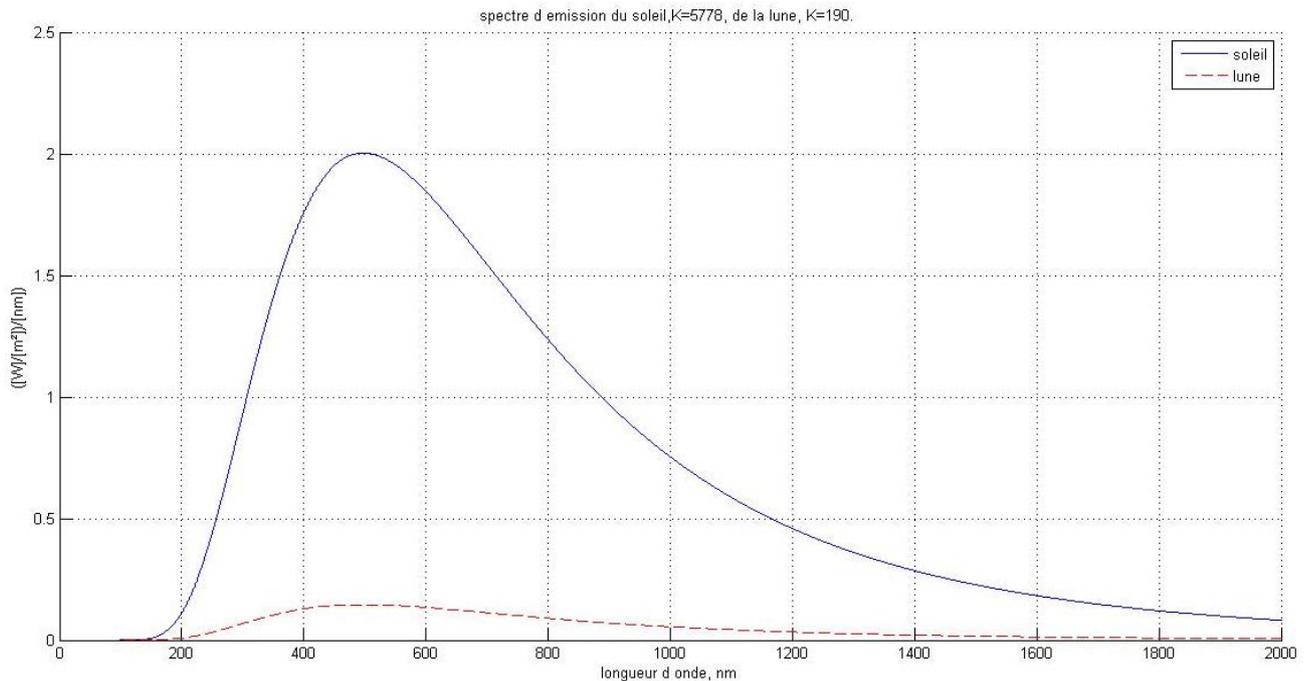
L'un des problèmes des capteurs solaires est de pouvoir prendre n'importe quelle source lumineuse comme venant du soleil. Le capteur pourrait donc dans certaines situations pointer la terre ou la lune au lieu du soleil. Il faut donc prendre en compte les effets de la terre ou de la lune sur le capteur solaire.

E. Émission spectrale de la Lune

Très peu d'informations sont disponibles sur le spectre d'émission de la lune. La lune peut être considérée comme un corps noir émettant dans le lointain infrarouge. La diode du capteur n'étant pas sensible au-delà de 1100 nm (détaillé dans la suite), ce rayonnement n'aura aucun impact sur le capteur.

Le rayonnement de la lune pouvant perturber le capteur vient de la réflexion du spectre solaire par la surface de la lune. La surface lunaire a un albédo de 0.073. Cela signifie que seuls 7.3 % de la puissance incidente est réfléchiée par la surface lunaire. En l'absence de données supplémentaires, en considérant cette réflexion uniforme en longueur d'onde. Le spectre d'émission de la lune est le suivant.

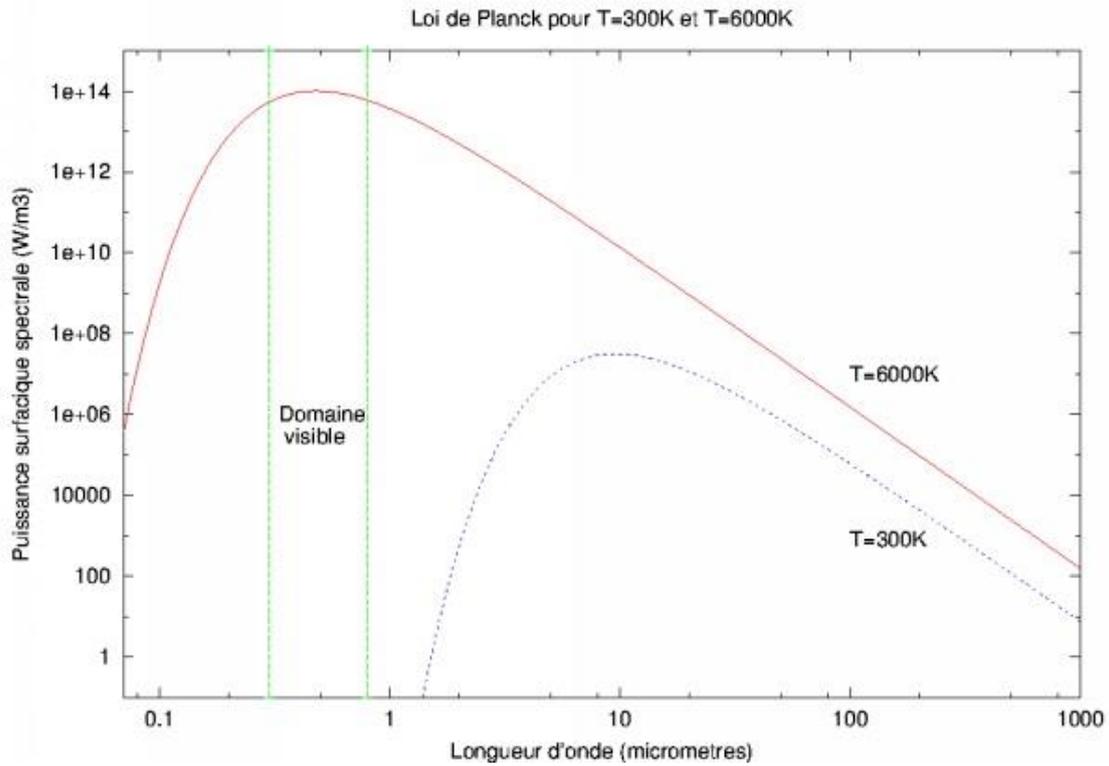
Spctre d'émission de la Lune, pointillé



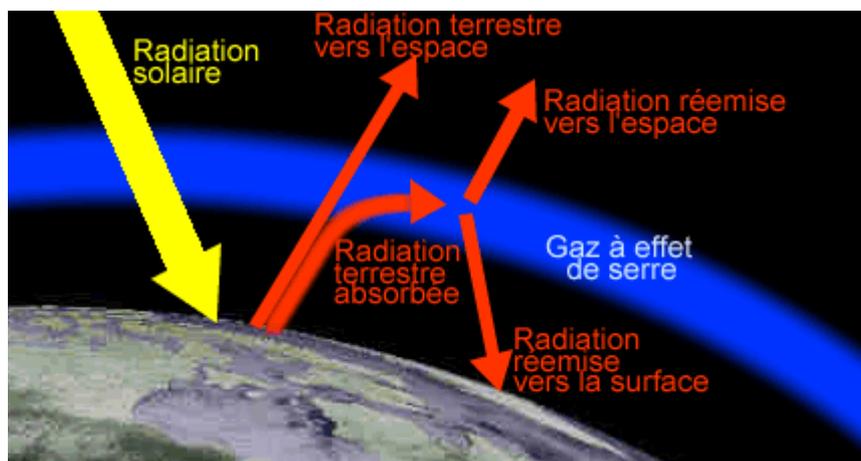
La puissance orthogonale reçue sur le capteur sera d'environ 90W/m².

F. Émission spectrale de la terre

La terre absorbe une grande partie du rayonnement solaire et en réémet une petite quantité vers l'espace. La terre rayonne principalement comme un corps noir à 300K, émettant dans l'infrarouge. Là encore, ces rayonnements ne perturberont pas le capteur.



Seules les réflexions du spectre solaire visible pourront perturber la photodiode. L'albédo terrestre moyen est de 0.30. Toute la puissance réémise n'est pas renvoyée vers l'espace, il faut prendre en compte des phénomènes complexes d'absorption et de diffusion dans l'atmosphère.



À cause de ces phénomènes de diffusion et d'absorption, sur les 60W/m^2 atteignant le sol, seuls 40 % sont réémis vers l'espace, soit environ 24W/m^2 .

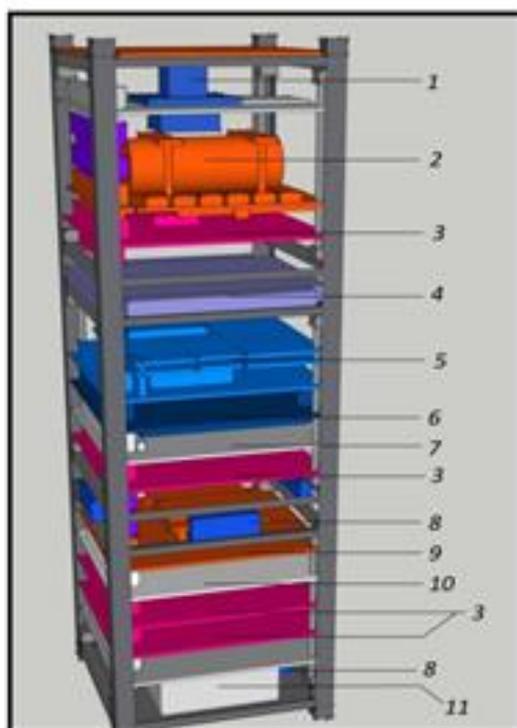
III. Dimensionnement de l'architecture

A. Analyse des besoins

Les capteurs solaires, comme définis précédemment, servent à indiquer la position et l'orientation du soleil suivant les faces du satellite.

Le satellite sera équipé de 5 capteurs solaires. Un capteur par face latérale et un capteur sur la face du dessous. Avec un champ de vue de 110° , les quatre capteurs des faces latérales permettront de couvrir les 360° de l'axe de rotation du satellite.

Position des capteurs solaires



Legend:

1. Sciintillator with shielding
2. Battery
3. Empty Board
4. ISIS Communication Antenna
5. AMSAT Communication Board
6. Magnetorquer Board
7. ISIS Computer
8. Sun Sensors
9. GPS Board
10. Thermal Control
11. GPS Antenna

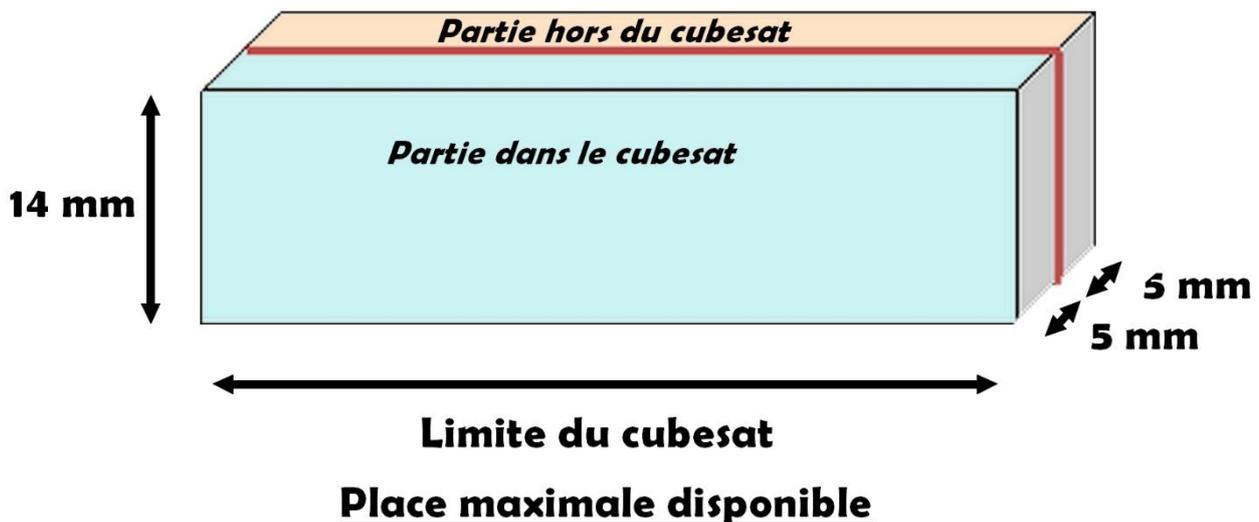
Fig. 2 - Internal View of ICOSat with Google SketchUp

B. Spécification technique des besoins

Plusieurs caractéristiques seront importantes lors de la construction de l'architecture de capteur solaire. Disposés dans un étage du nano satellite, les capteurs solaires ne devront pas dépasser une certaine taille et un certain poids. Toutes les spécifications importantes à prendre en considération sont résumées dans le tableau ci-dessous. Ces valeurs ne sont pas totalement arbitraires, elles se basent entre autres sur des modèles déjà existants de capteur solaire tel que le Sinclair SS- 411

Spécification technique des besoins	
Taille	< 10 mm*14mm*50mm
Poids	< 50 g
Champ de vue total	110°
Précision	~ 1°
Consommation Electrique	Au soleil : < 60 mW Obscurité : < 15 mW
Température de fonctionnement	-40C° à 90C°
Temps de réponse	0.1 s

C. *Emplacement/dimension dédiée au capteur solaire dans le CubeSat*



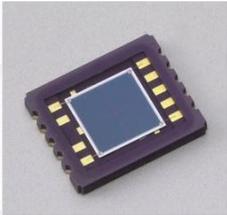
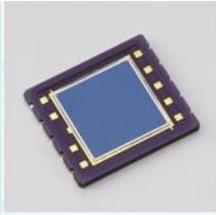
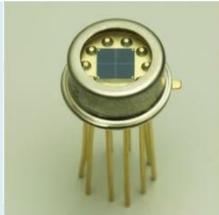
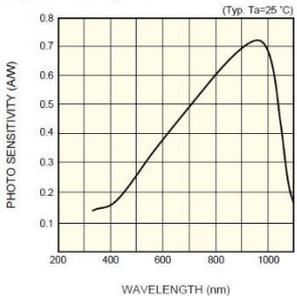
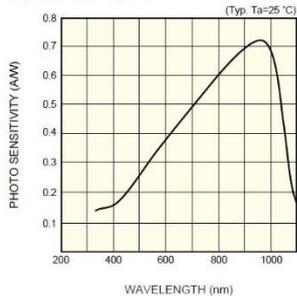
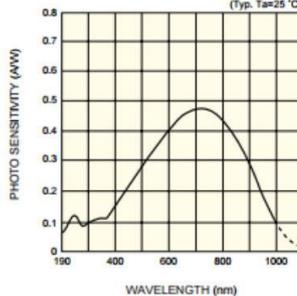
La taille du capteur est directement déterminée par la place disponible à l'étage du capteur. Cet étage contient déjà :

- Une carte GPS qui doit être positionnée au centre de l'étage où doivent se situer les capteurs actuellement (étage 9)
- Des connecteurs limitent la place des capteurs en profondeur sur une des faces du cubesat.

D. *Choix de la photodiode*

Il existe différents types de photodiodes sur le marché. Nous avons centré nos recherches d'une part sur les diodes à quatre cadrans et d'autre part sur les PSD (position sensitive detector). Finalement avec les spécifications et le prix demandé, nous avons retenu trois photodiodes de chez Hamamatsu.

Les trois diodes sélectionnées sont les suivantes:

	S5980	S5981	S4349
Taille de la surface photosensitive	5 × 5 mm	10 × 10 mm	3 x 3 mm
Photo			
Domaine spectral	320 à 1100 nm	320 à 1100 nm	190 à 1000 nm
Pic de sensibilité	960 nm	960 nm	720 nm
Rendement Max	0.72 A/W	0.72 A/W	0.45 A/W
Rendement en fonction de la longueur d'onde.	<p>■ Spectral response (Typ. Ta=25 °C)</p> 	<p>■ Spectral response (Typ. Ta=25 °C)</p> 	<p>■ Spectral response (Typ. Ta=25 °C)</p> 

Comparaison des différentes photodiodes :

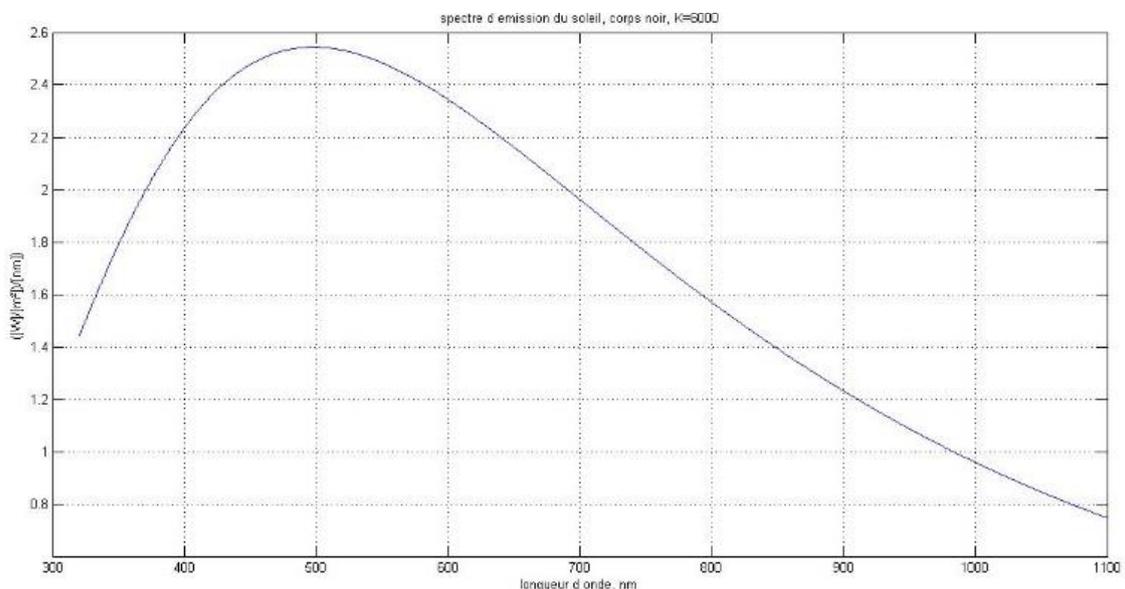
Type No.	Product Name	Photosensitive area	Package	Package category	Cooling	Spectral response range	Peak sensitivity wavelength	Photosensitivity (typ.)	Dark current (max.)	Cutoff frequency (typ.)	Terminal capacitance (typ.)
 S4349	Si PIN photodiode	3 x 3 mm	Metal	TO-5	Non-cooled	190 to 1000 nm	720 nm	0.45 A/W	200 pA	20 MHz	25 pF
 S5980	Si PIN photodiode	5 x 5 mm	Ceramic	Surface mount type	Non-cooled	320 to 1100 nm	960 nm	0.72 A/W	2000 pA	25 MHz	10 pF
 S5981	Si PIN photodiode	10 x 10 mm	Ceramic	Surface mount type	Non-cooled	320 to 1100 nm	960 nm	0.72 A/W	4000 pA	20 MHz	35 pF

Rendement des photodiodes :

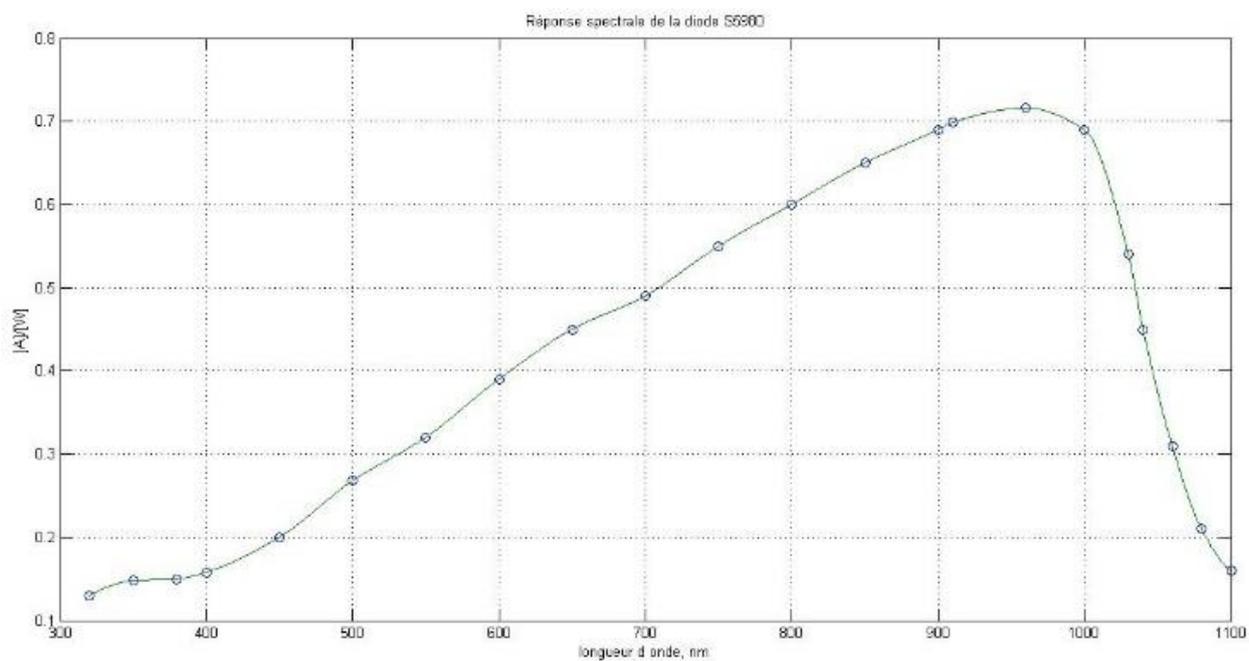
Le courant délivré par les photodiodes est un point clef pour le choix.

En multipliant les réponses spectrales (en A/W) de chaque photodiode par le spectre d'émission du soleil (en W/(m²/λ)), nous obtenons le courant délivré par chaque photodiode en A/m².

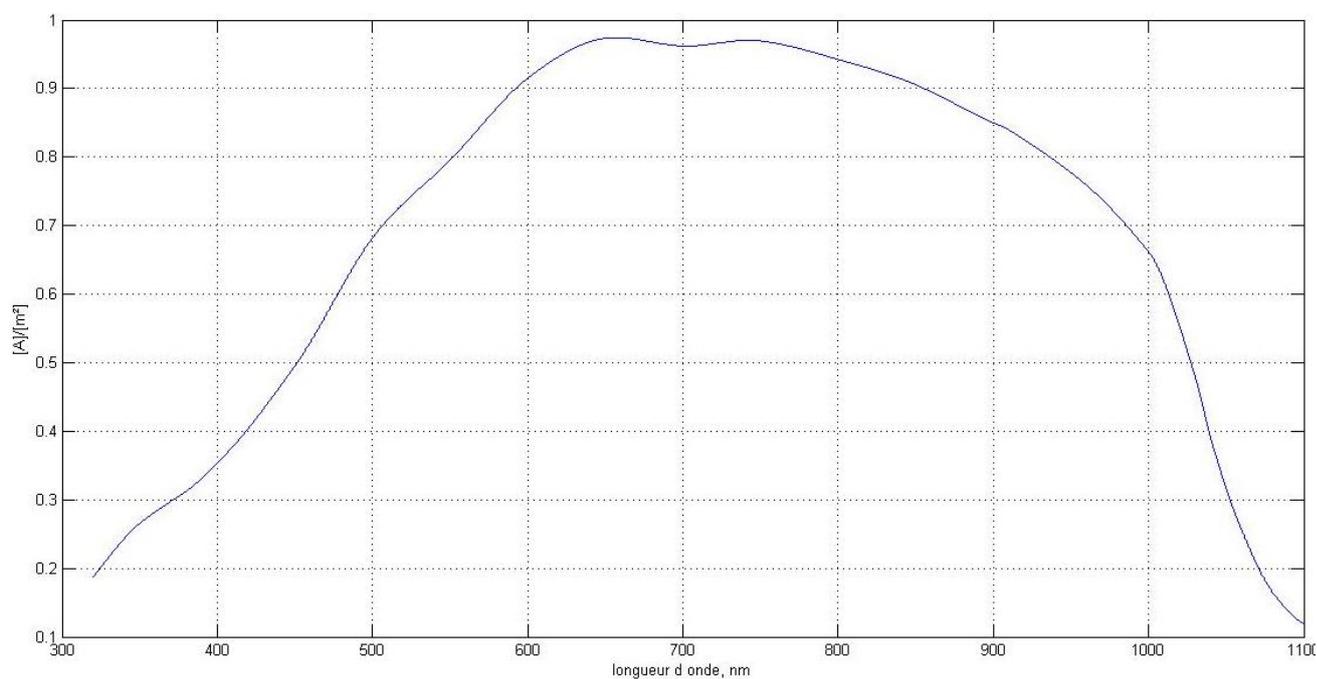
Spectre d'émission du soleil



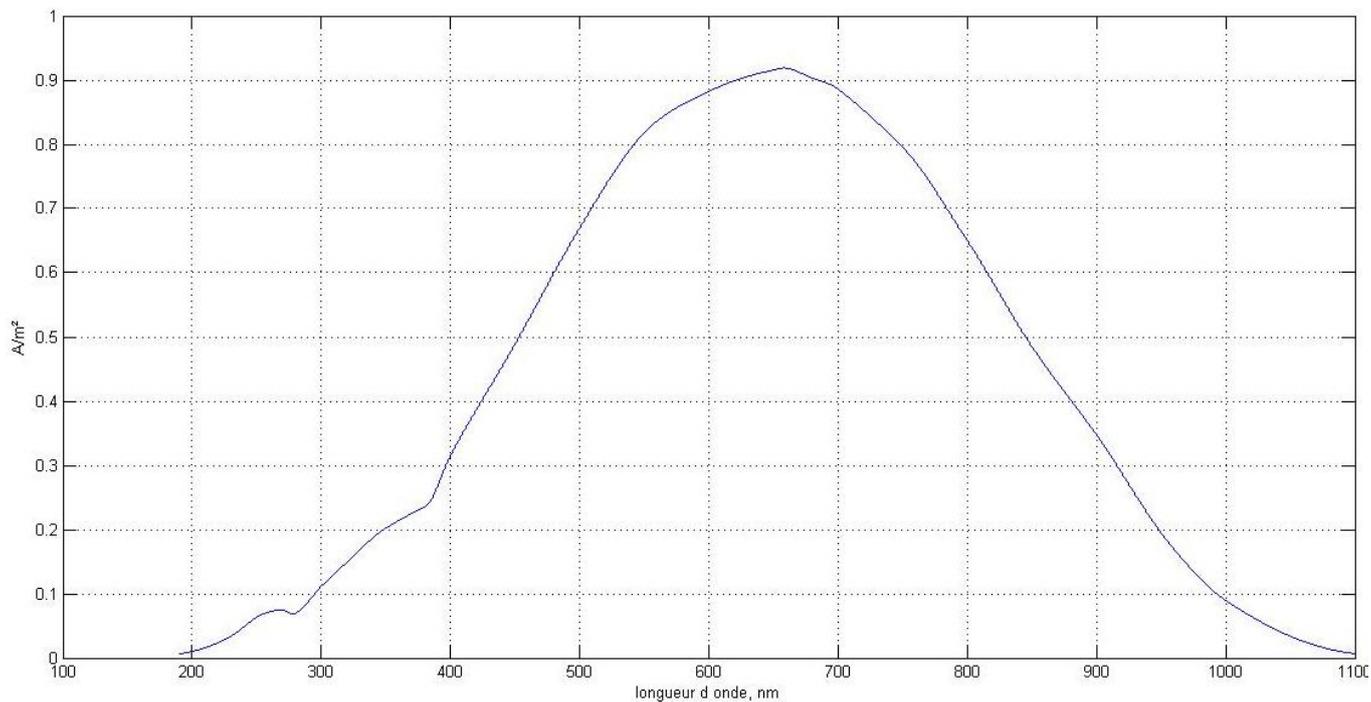
Rendement S5980, S5981



Courant délivré par S5980, S5981



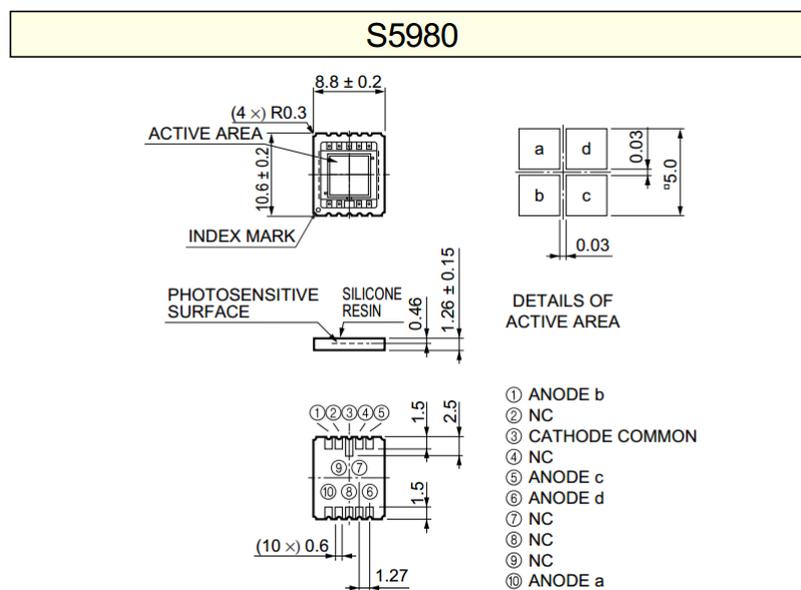
Courant délivré par S4349



Par intégration des courants délivrés en fonction de la longueur d'onde, il est possible d'en déduire le courant total délivré par la photodiode par un éclairage orthogonal.

Photodiode	Courant total délivré [mA]
S4349	3,6
S5980	13,7
S5981	54,7

Les photodiodes S5980 et S5981 sont plus performantes que la S4349 même si elles couvrent un domaine spectral plus petit, elles sont donc mieux adaptées pour la fabrication de notre capteur. Cette permet de choisir la S5980, qui possède le plus grand rendement et dont la taille est la plus adaptée pour notre projet.



La dimension de la photodiode nous permet de tenir les tailles imposées par l'étage des capteurs solaires.

E. Choix des matériaux pour l'encadrement de la photodiode

Le choix des matériaux est important. La photodiode étant recouverte d'un cadre métallique percé pour effectuer le pointage du soleil, il faut que ce cadre soit résistant, c'est pourquoi nous avons choisi un masque en Aluminium.

Il existe un alliage d'aluminium qui se compose d'aluminium, avec du cuivre comme élément d'alliage principal. Il est utilisé dans des applications nécessitant une haute résistance, ainsi

qu'une bonne résistance à la fatigue. Il est seulement soudable par soudage par friction. Il est souvent revêtu d'aluminium ou Al-1zn pour augmenter sa résistance à la corrosion.

Ses caractéristiques :

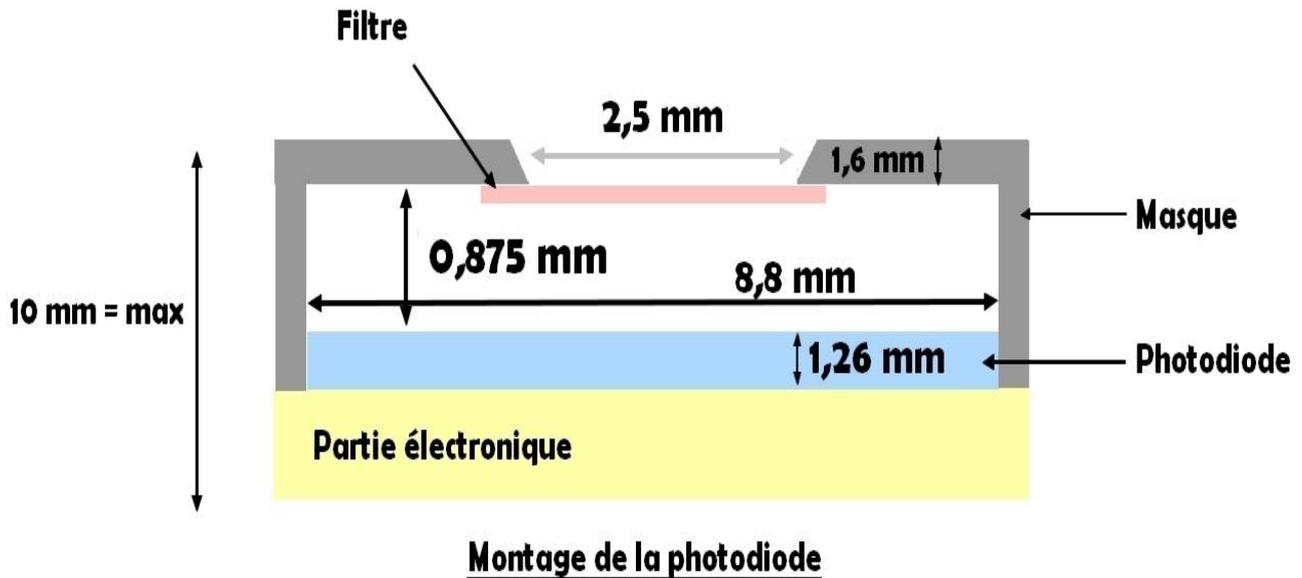
- Densité = 2.78 g/cm³
- Module de young = 73 GPa
- Température de fusion = 500 °C (932 °F)
- Épaisseur = 1,6 mm
- Sa composition: 4.3-4.5% de cuivre, 0.5-0.6 % de manganèse, 1.3-1.5 % de magnésium et moins de 0.5 % de silicium, zinc, nickel, chrome, plomb et de bismuth.

Une feuille de 300*300 mm se vend à 166 € chez goodfellow, et deux feuilles de 300*300 mm sont au prix de 209 €.

Un matériau isolant peut également être nécessaire, pour éviter que l'alliage d'aluminium ne soit en contact avec l'électronique de la photodiode et provoque des courts-circuits. Pour cela, nous pouvons utiliser de l'alumine, l'un des meilleurs isolants électriques.

Al2O3	1	2	3	4
Épaisseur	0,15 mm	0,25 mm	0,25 mm	0,50 mm
Impureté	96 %	96 %	99 %	96 % (existe en 99 %)
Prix	214 € (50*50mm)	176 € (25*25 mm) 220 € (2x (25*25mm)) 347 € (5x(25*25mm))	247 € (60*60 mm)	169 € (25*25 mm) 209 € (2x(25*25mm)) 308 € (5*(25*25 mm))

F. Dimensionnement et design du capteur solaire



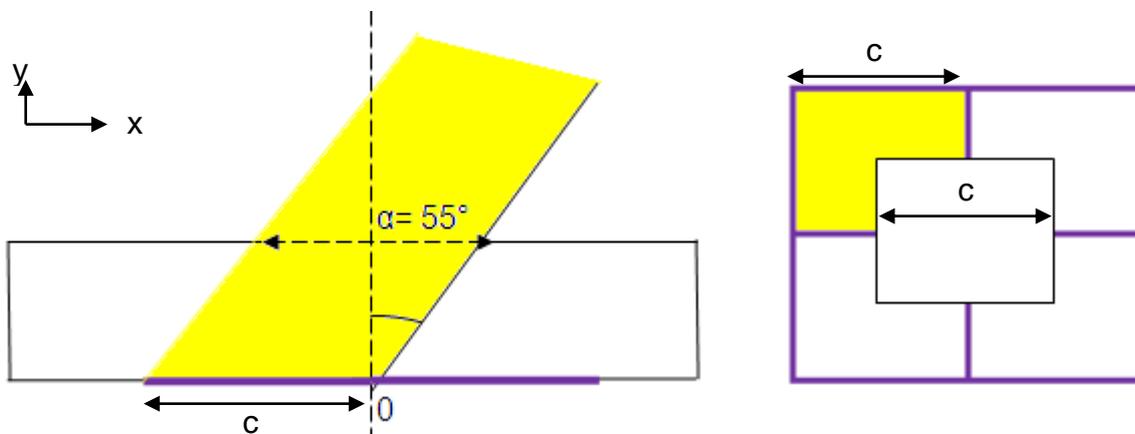
La photodiode choisie possède donc une hauteur de 1,26 mm et une largeur de 8,8 mm. Elle sera protégée par un masque en aluminium d'une épaisseur de 1,6 mm environ. Entre le masque et la photodiode, il doit y avoir un espace de 0,875 mm si le trou du masque fait 2,5 mm. La partie électronique située à l'arrière de la photodiode possèdera un peu moins de 5 mm de place.

G. Détail et explication des dimensionnements

1. Choix de la hauteur et de la largeur du trou

Précédemment dans la théorie, nous avons vu que le choix de h (= hauteur entre photodiode et la fente d'entrée) et a (= largeur du trou) sont des dimensionnements essentiels pour la précision du pointage du soleil et la valeur du champ de vue du capteur.

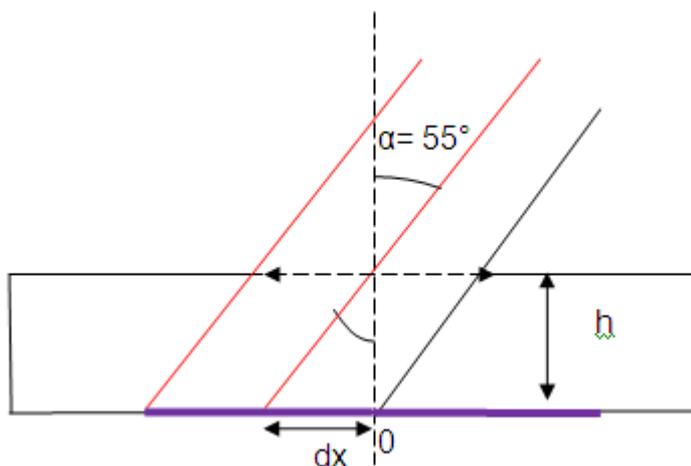
Afin d'utiliser le maximum du potentiel des cadrans de la photodiode, le trou sera de même taille que la taille des cadrans. Cela permettra de maximiser les intensités sur les cadrans, pour diminuer l'erreur de pointage. Dans le cas extrême d'un angle d'incidence à 55° suivant x et 55° suivant y, l'image du trou remplira un cadran.



La photodiode étant de taille finie, le dimensionnement de la hauteur permet d'éviter le débordement des rayons incidents hors de la photodiode. En considérant un rayon lumineux au maximum de l'angle d'incidence (55°), le déplacement de l'image (dx), sur le capteur, ne doit pas dépasser la demi-longueur d'un cadran. ($C/2$)

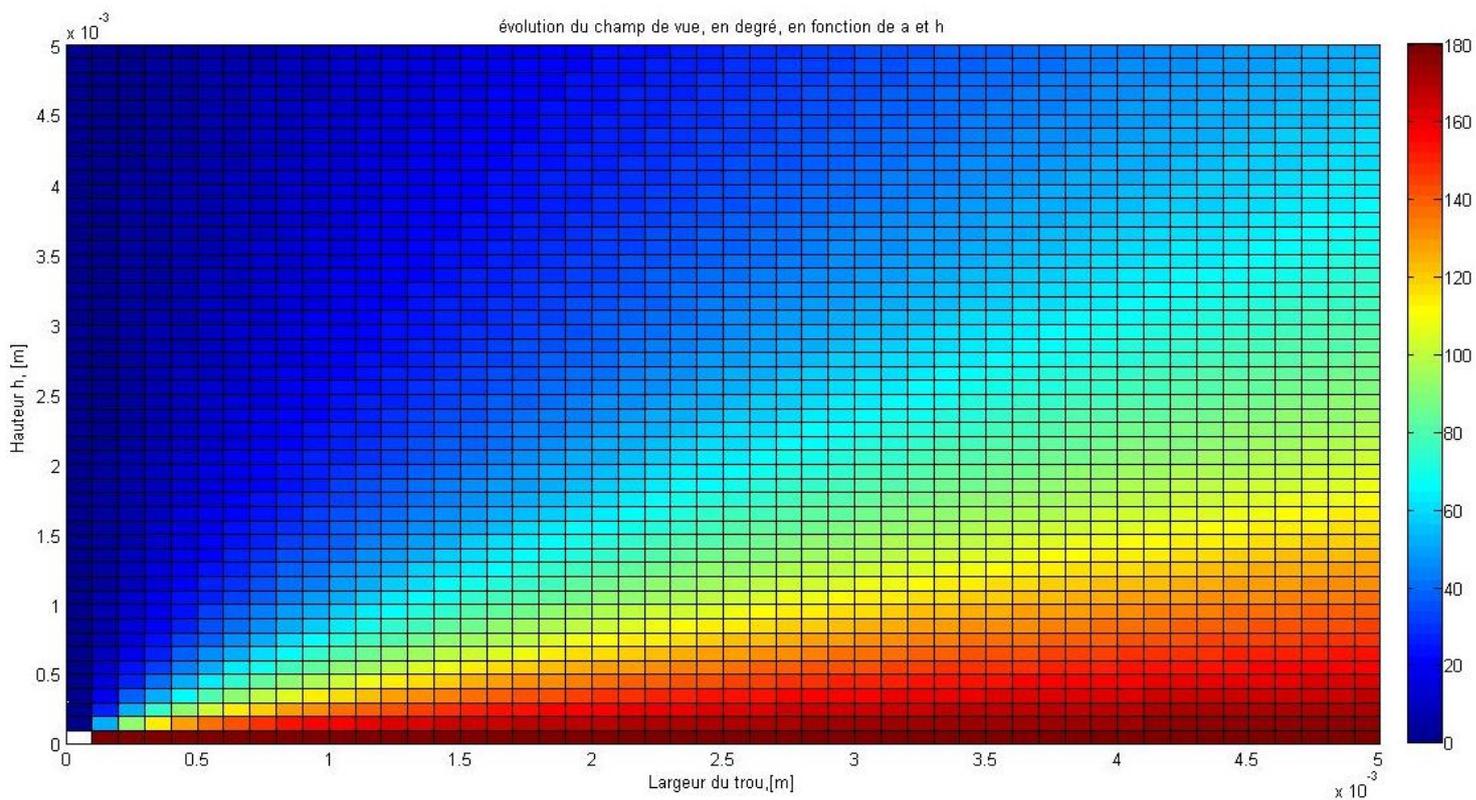
$$\text{D'où } h = \frac{dx}{\tan(\alpha)} = \frac{c/2}{\tan(55)} = \frac{2,5}{\tan(55)} = 0,875 \text{ mm}$$

Coupe transversale du capteur

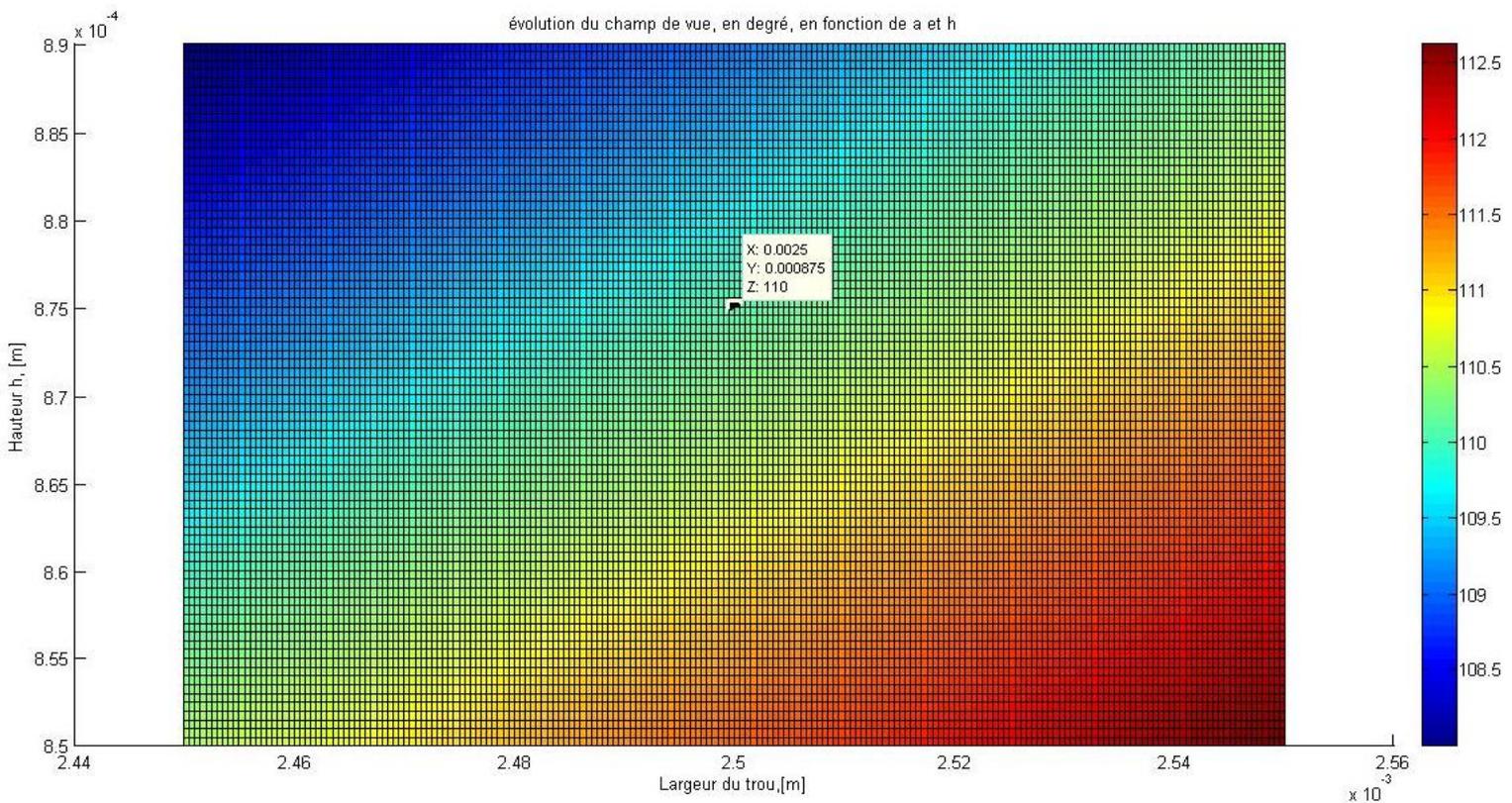


2. Champ de vue

Une simulation sur matlab permet de vérifier la valeur du champ de vue du capteur en fonction de la hauteur 'h' et la taille du trou choisit 'a'.



Pour plus de précision sur la valeur du champ de vu. Ci-dessous un agrandissement sur les valeurs importantes :



Pour les valeurs de hauteur et de taille de trou choisies, la valeur du champ de vue correspond aux attentes de la spécification technique des besoins. Cette valeur de champs de vue permettra de couvrir les 360 degrés autour du satellite avec une marge de 20 degrés par face.

IV. Estimation des paramètres du capteur

Après avoir effectué les dimensionnements du capteur, il est nécessaire de connaître le comportement de ce capteur en fonction des angles d'incidence du soleil. La simulation suivante, faite avec Matlab, modélise la réponse du capteur selon les angles d'incidence. Elle modélise :

Sur les deux axes, x et y, en fonction de l'angle d'incidence :

- La variation du décalage 'dx' de l'image du trou sur la photodiode.
- La variation des intensités sur les cadrans.
- La variation de l'intensité totale sur les cadrans.
- La variation de l'erreur de pointage.
- La loi de probabilité suivie par l'erreur de pointage.

Elle prend en compte :

- La variation de la puissance reçue sur le capteur en fonction de l'angle.⁽¹⁾
- Le bruit de courant de la photodiode. ⁽²⁾

⁽¹⁾ La puissance reçue sur le capteur dépend de l'angle d'incidence du faisceau lumineux.

Soit la puissance lumineuse P_0 reçue perpendiculairement au capteur. La puissance lumineuse sur le capteur pour un angle θ est donnée par la formule : $P_\theta = P_0 \cdot \cos(\theta)$.

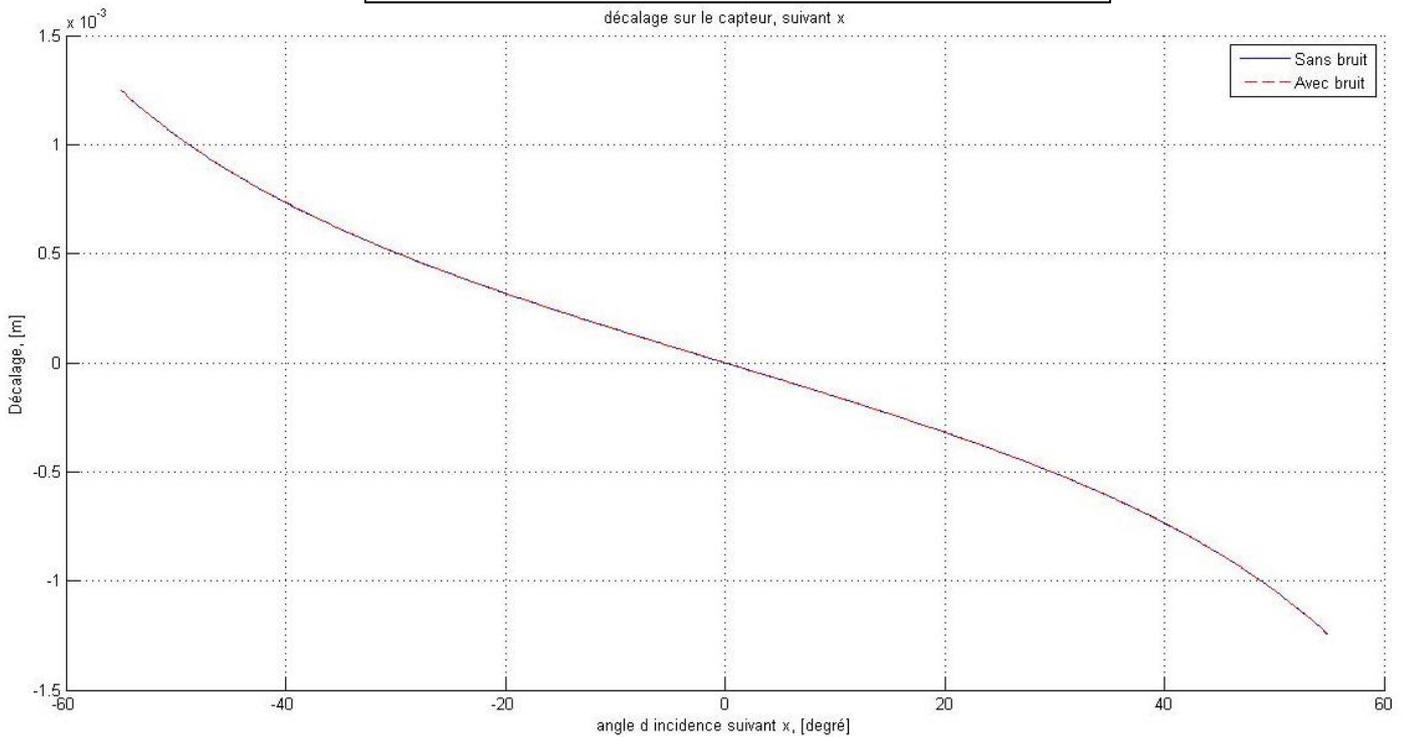
⁽²⁾ Le bruit de courant de la photodiode est donné dans la data-sheet de la photodiode. "Noise equivalent power", $NEP = 1.4 \times 10^{-14}$ [W]/[Hz^{1/2}]

A. Variation du décalage

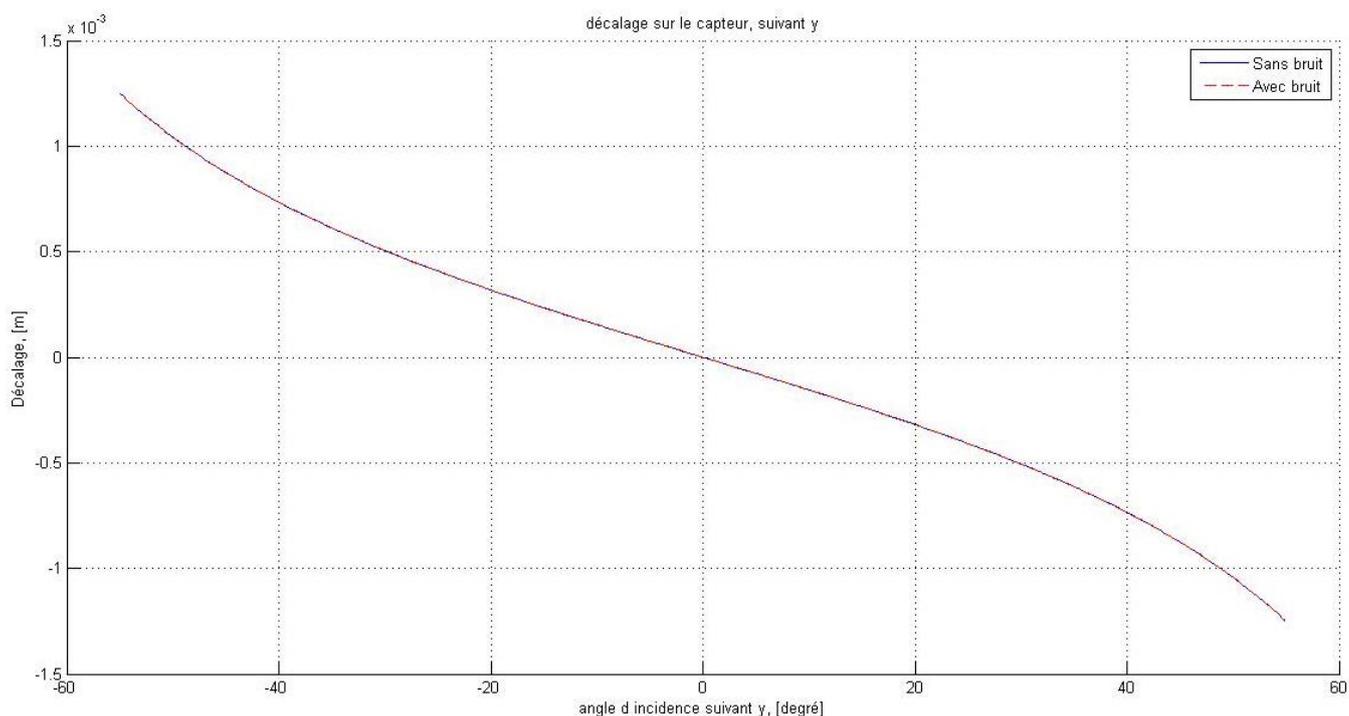
Le décalage de l'image sur le détecteur dépend de l'angle d'incidence du faisceau. Les courbes ci-dessous donnent la valeur de ce décalage suivant x et suivant y en fonction des angles d'incidence. Pour un angle de 0°, le décalage est nul. Pour un angle de -55°, le décalage sur le capteur est de 1.25 mm, correspondant à la moitié de la taille de chaque cadran. Pour rappel, le dx est donné par la formule suivante :

$$dx = h \cdot \tan(\alpha)$$

Décalage suivant x, $\alpha_y = 0$, $\alpha_x \in [-55, 55]$ degrés

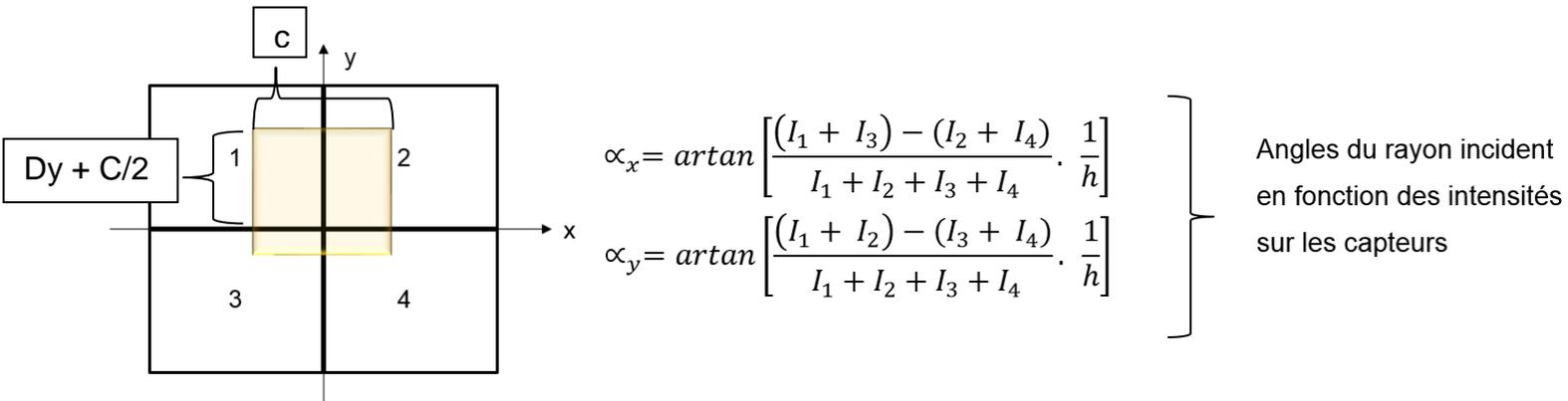


Décalage suivant y , $\alpha_x = 0$, $\alpha_y \in [-55,55]$ degrés



B. Variation des intensités

Pour calculer l'angle d'incidence du faisceau, il faut utiliser la formule de barycentre des intensités. Grâce au décalage sur le capteur, il est possible de connaître l'air de chaque zone illuminée suivant l'angle.



Il est possible de relier les intensités théoriques à des surfaces éclairées sur le capteur. Ainsi :

$$I_1 + I_2 = \left(\frac{c}{2} + dy \right) \times c \times R \times \cos(\theta)$$

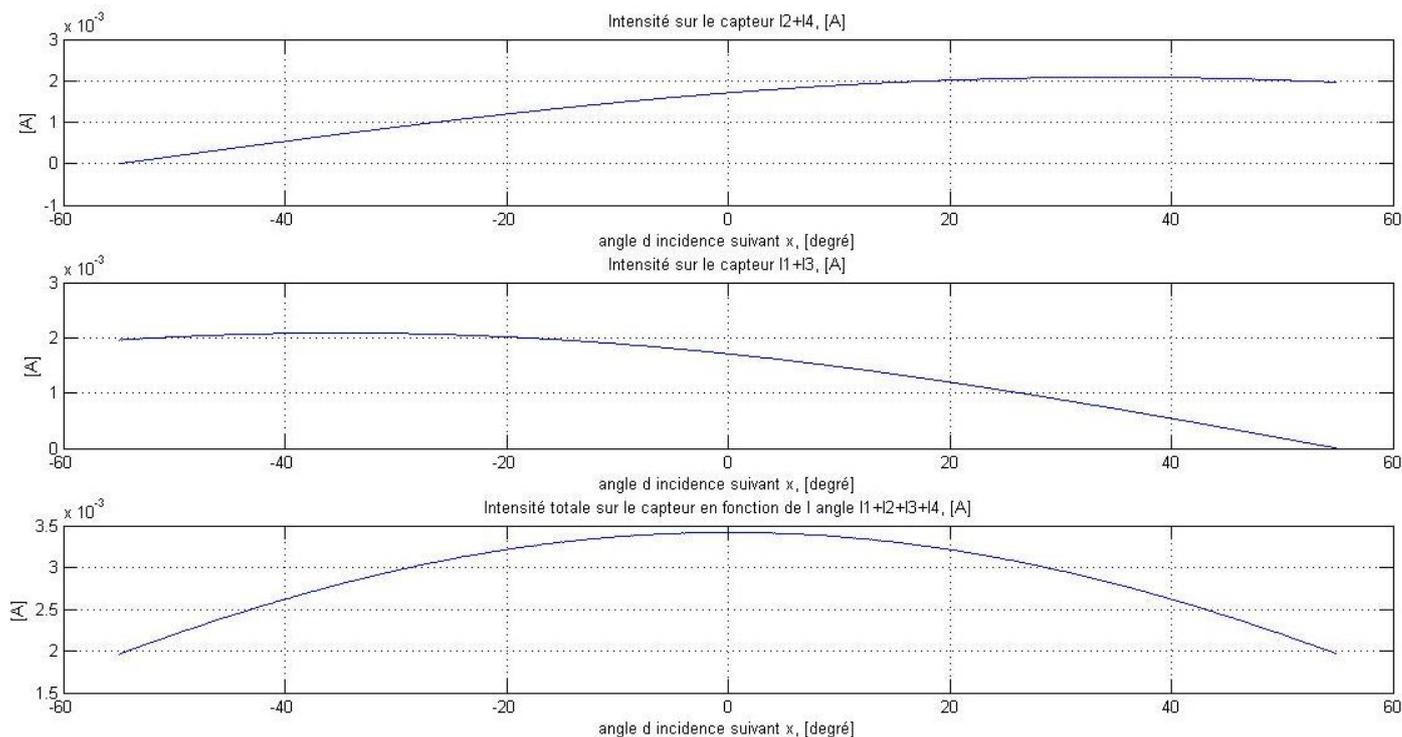
$$I_3 + I_4 = \left(\frac{c}{2} - dy \right) \times c \times R \times \cos(\theta)$$

$$I_2 + I_4 = \left(\frac{c}{2} + dx \right) \times c \times R \times \cos(\theta)$$

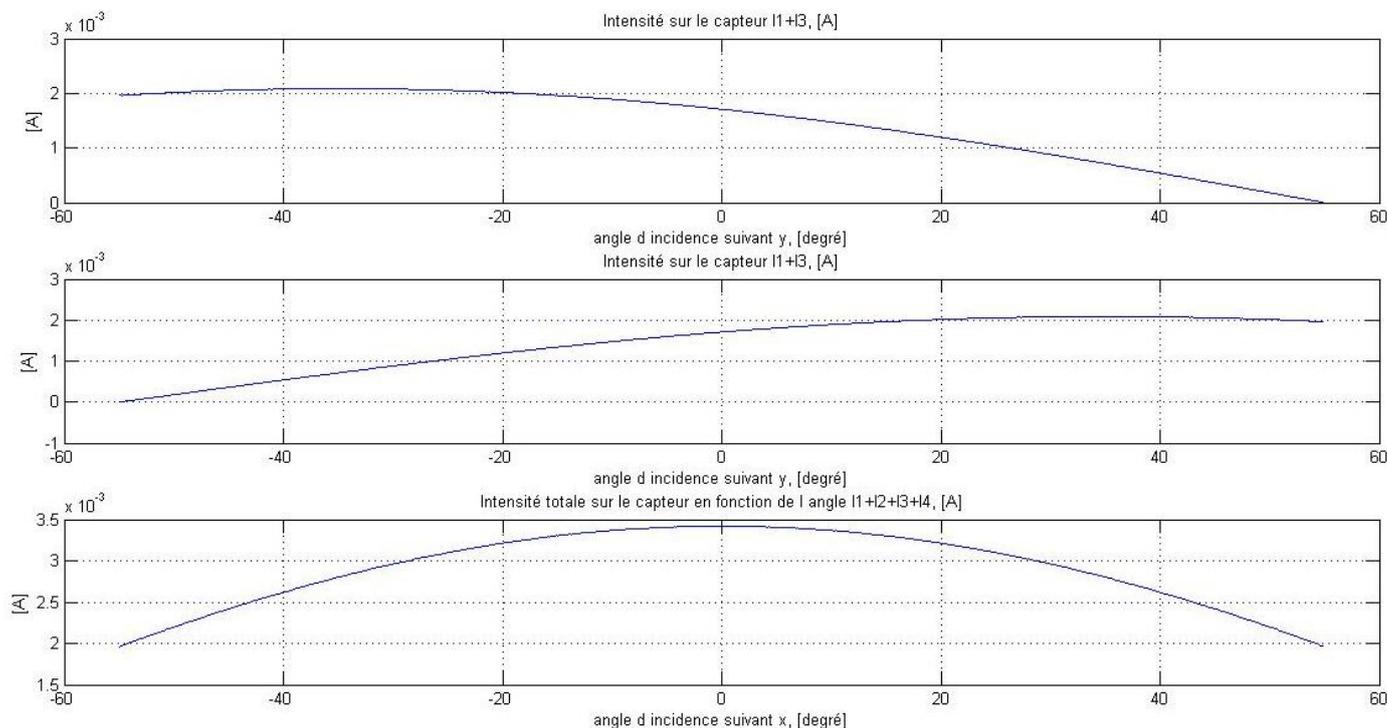
$$I_1 + I_3 = \left(\frac{c}{2} - dx \right) \times c \times R \times \cos(\theta)$$

Avec R, le rendement de la diode en [A]/[m²]. Le cos(θ) est toujours dû à la variation de puissance en fonction de l'angle. Les courbes suivantes donnent les variations des quatre équations ci-dessus.

Intensité sur les capteurs, suivant x, $\alpha_y = 0$, $\alpha_x \in [-55,55]$ degrés



Intensité sur les capteurs, suivant y, $\alpha_x = 0$, $\alpha_y \in [-55,55]$ degrés

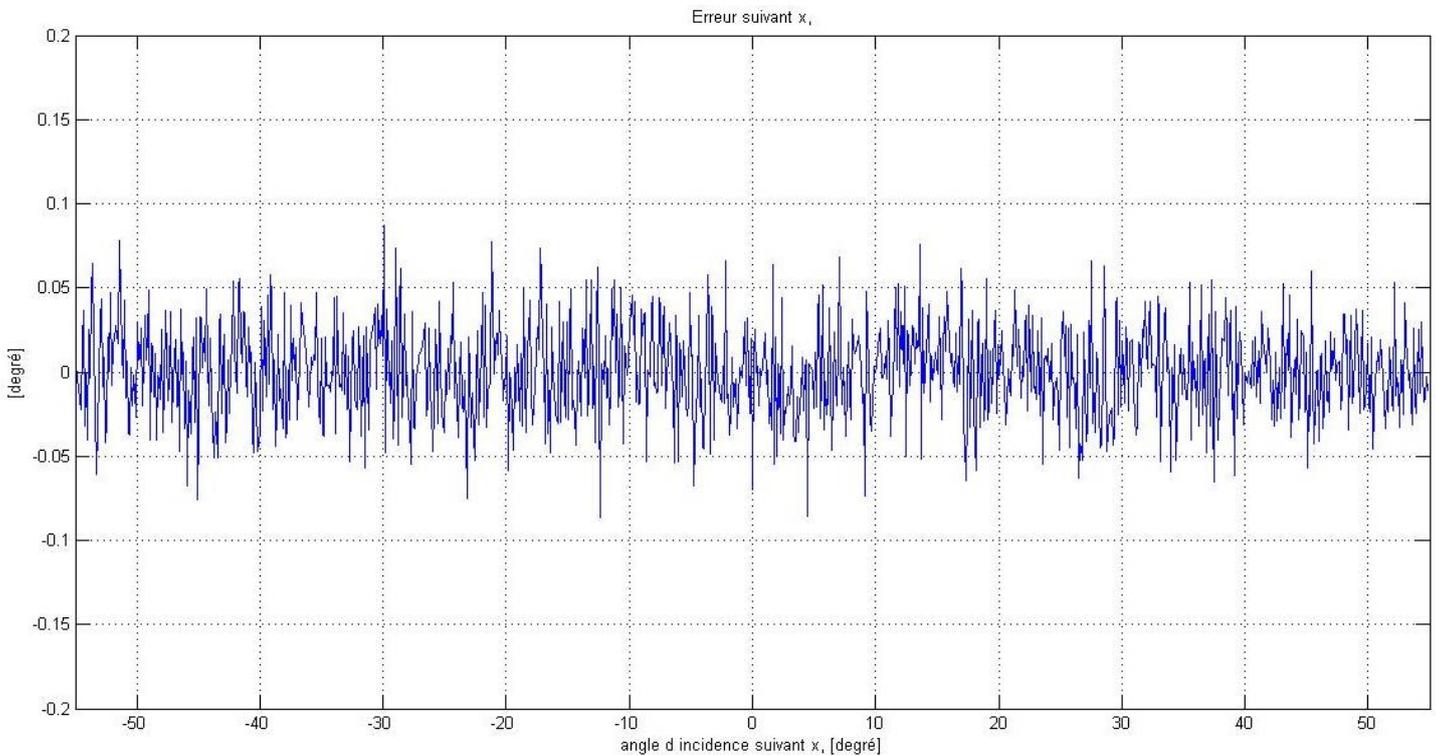


C. Erreur de pointage

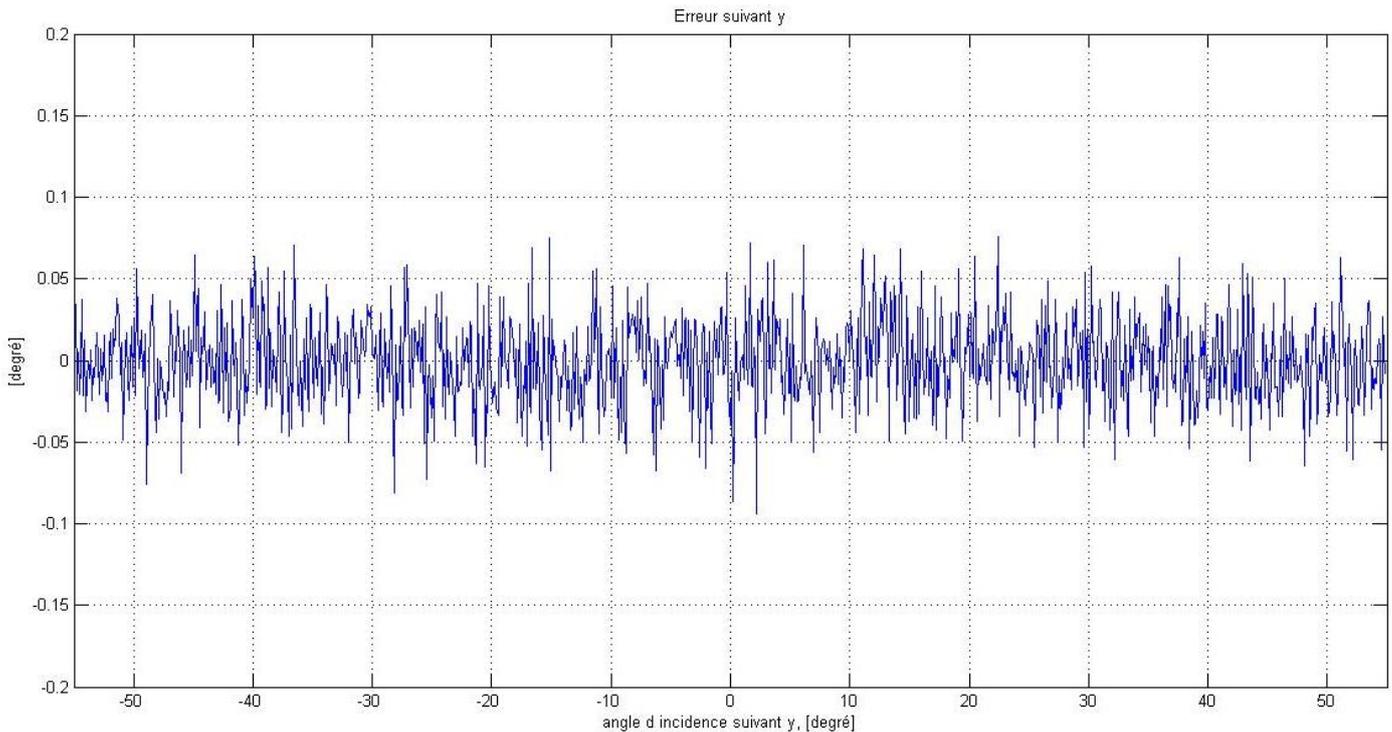
Grâce aux intensités sur les capteurs, il est possible de remonter à l'angle du faisceau incident. Il est alors possible de calculer l'erreur de pointage en fonction de l'angle d'incidence. Cet angle est connu et peut être comparé à la valeur de l'angle trouvée grâce au barycentre des intensités. La soustraction des deux donne une erreur de pointage en degré.

$$\text{Erreur de Pointage} = \alpha(\text{théorique}) - \alpha(\text{Simulé})$$

Erreur de pointage, suivant x, $\alpha_y = 0$, $\alpha_x \in [-55,55]$ degrés



Erreur de pointage suivant y, $\alpha_x = 0$, $\alpha_y \in [-55,55]$ degrés

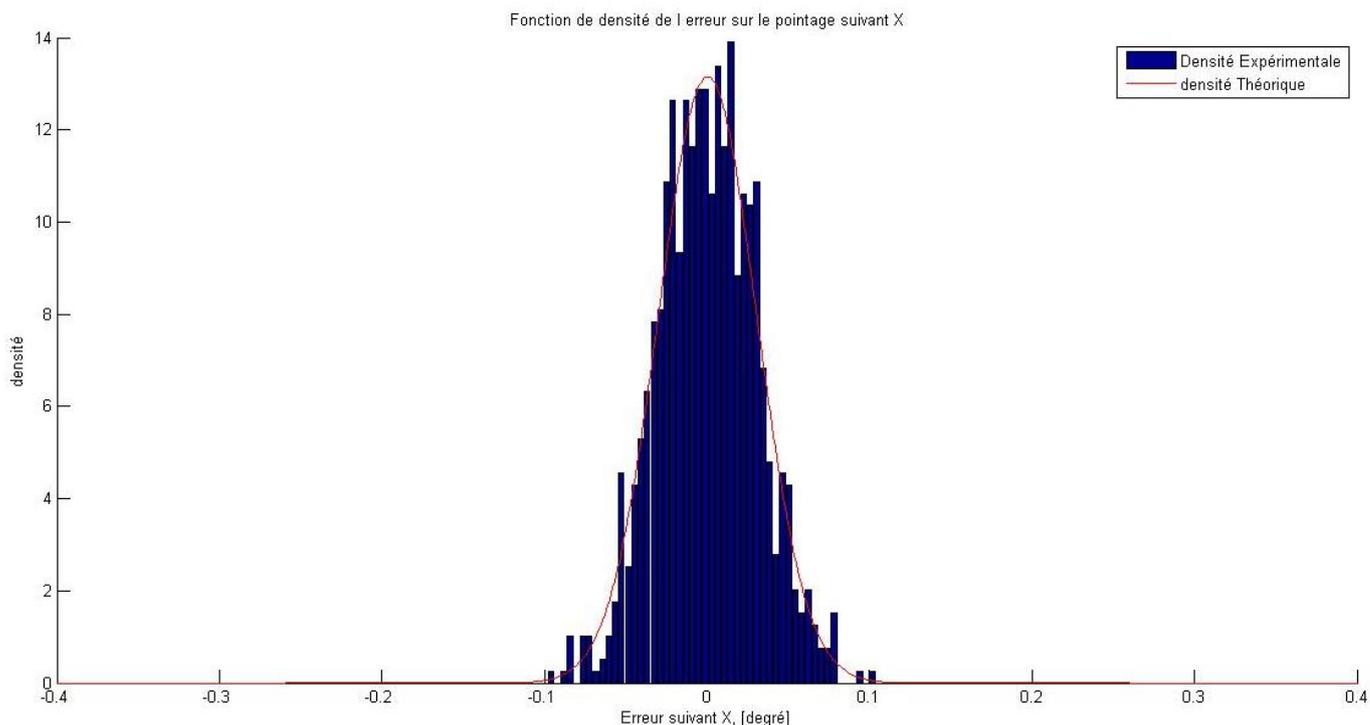


L'erreur de pointage suivant les deux axes est comprise entre -0.1° et 0.1° . Le capteur semble finalement plus précis que la spécification de départ. Cette précision ne semble pas absurde, elle est de l'ordre de grandeur des précisions faites dans le commerce. Il ne faut pas oublier que le bruit apporté par la chaîne de traitement n'est pas pris en compte dans cette simulation.

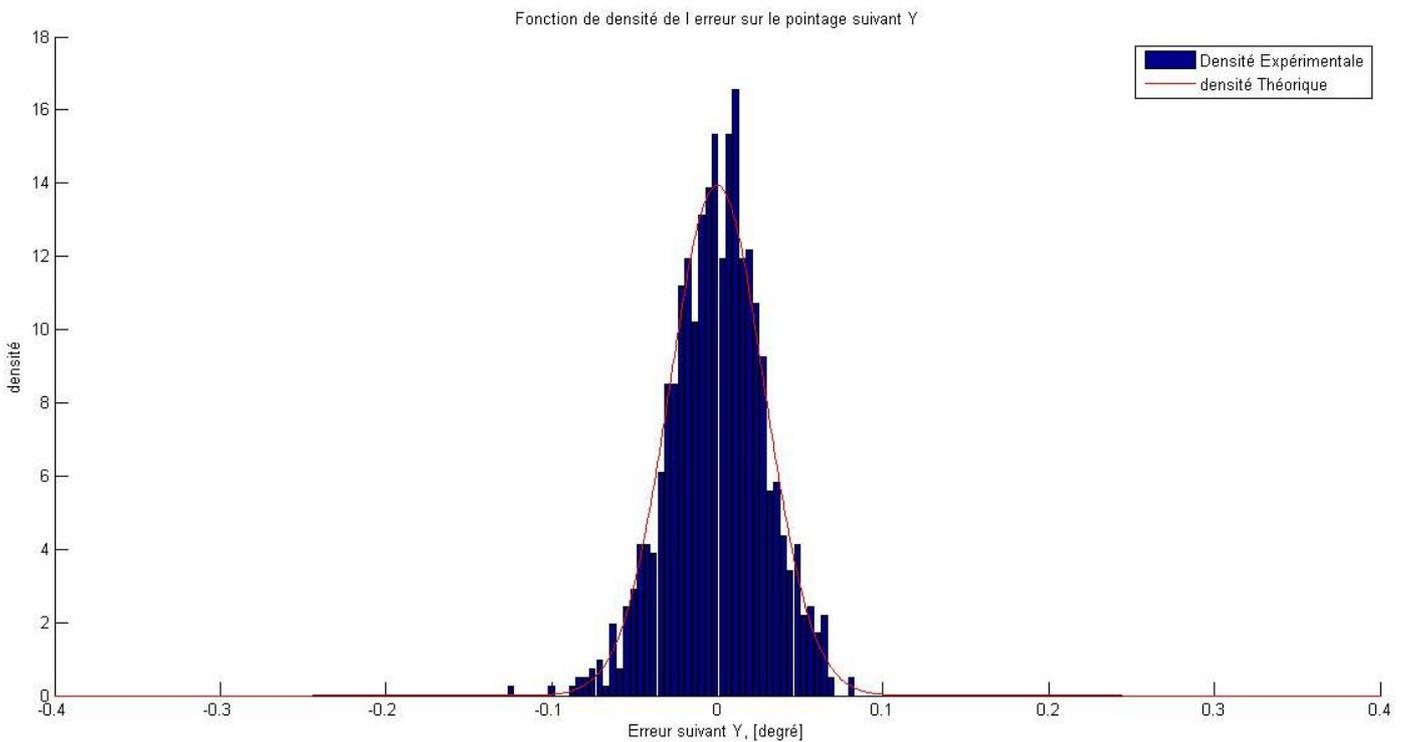
D. Densité d'erreur de pointage

L'erreur de pointage semble aléatoire et ne dépend pas de l'angle d'incidence. La seule façon de l'appréhender et de quantifier cette erreur pour en tenir compte pendant le vol. Il faut connaître sa densité.

Densité, suivant x , $\alpha_y = 0$, $\alpha_x \in [-55,55]$ degrés



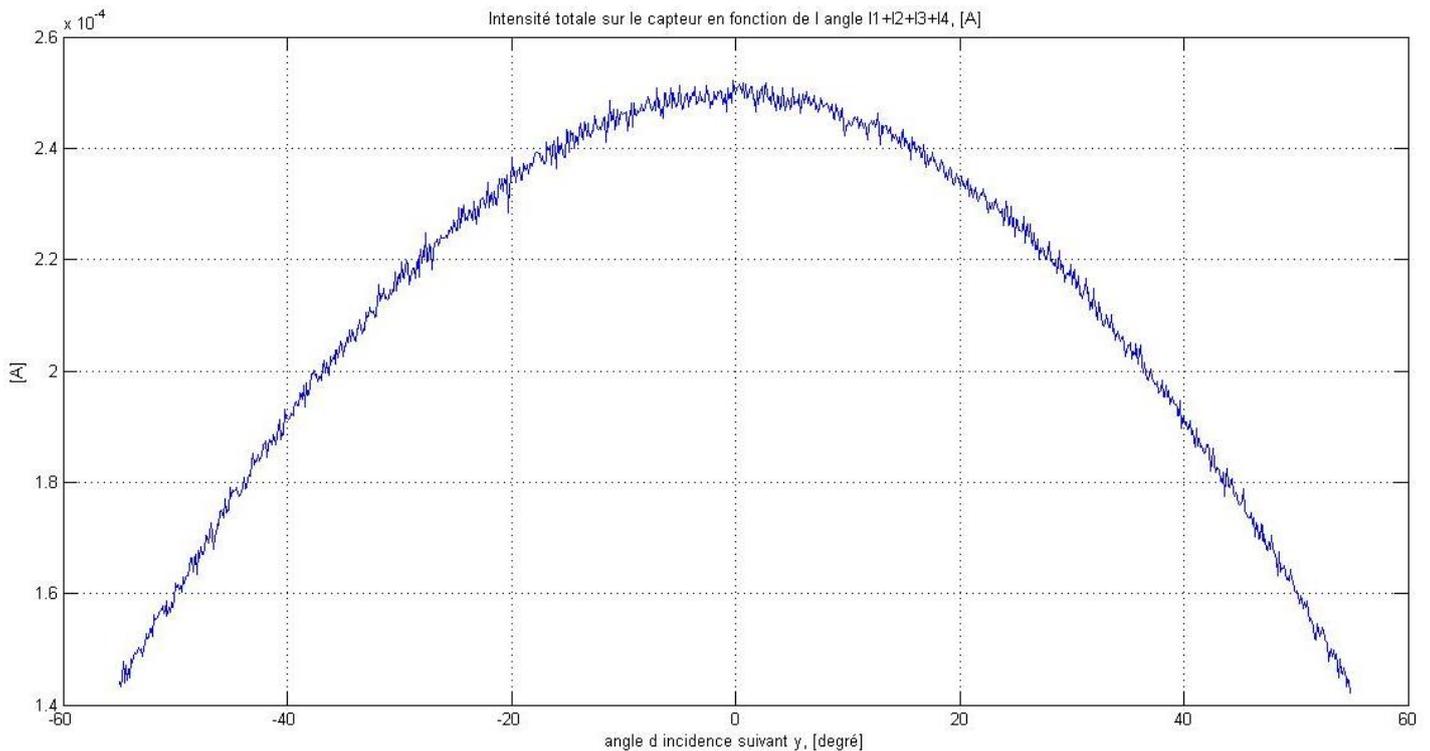
Densité, suivant y , $\alpha_x = 0$, $\alpha_y \in [-55,55]$ degrés



E. Effets de la lune sur le capteur

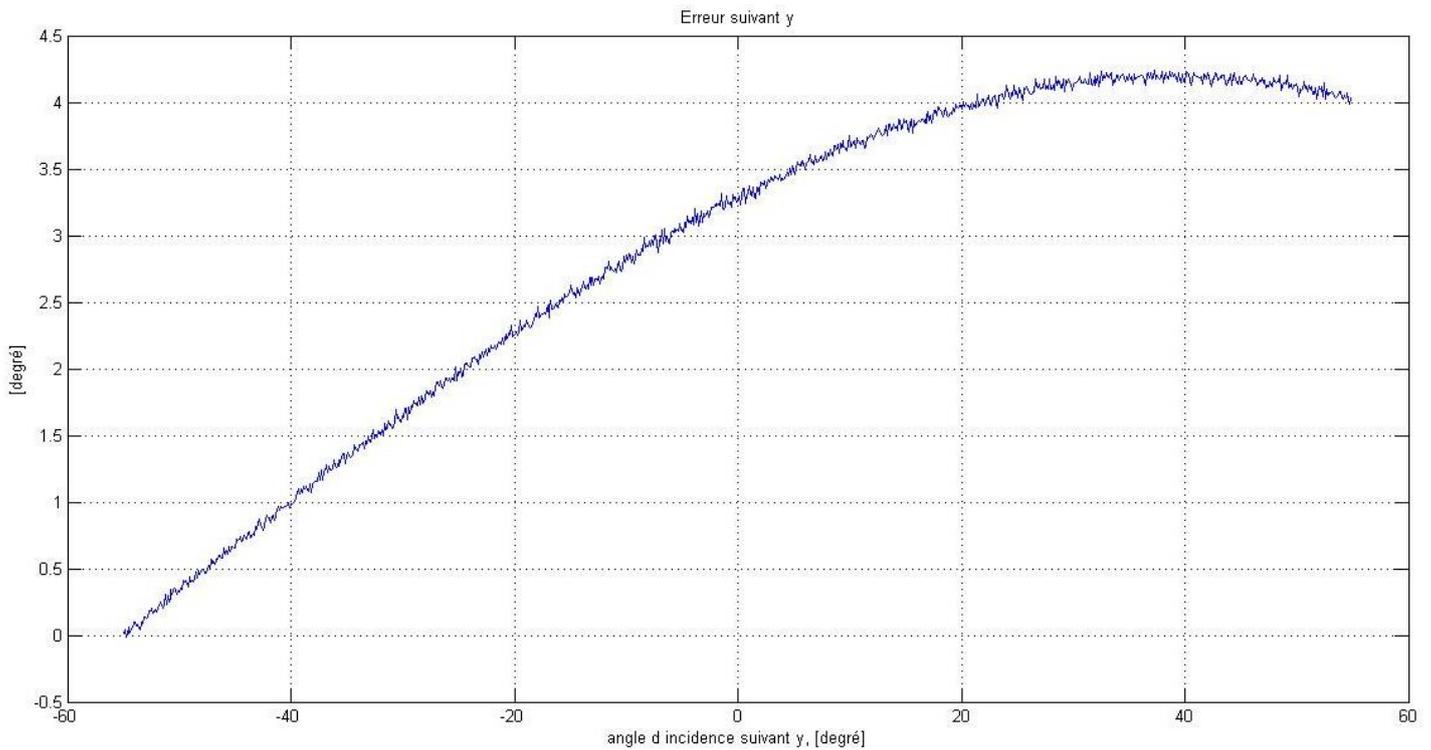
Étude d'un cas extrême. La lune imprime une image sur le capteur avec un angle d'incidence de -55° , comment réagit le capteur ? Pour rappel, la lune renvoie vers le capteur 7.3 % de la puissance solaire incidente. Environ 100W de puissance lumineuse vient éclairer la photodiode.

Intensité sur les capteurs due à la lune.



La lune génère sur le capteur un courant total de l'ordre de 10^{-4} ampères, soit un peu plus de dix fois plus petit que le courant généré par le soleil. Il a donc un effet non négligeable de la lune dans le calcul de l'angle d'incidence du faisceau. Le calcul de barycentre donnera une valeur d'angle "moyenne" entre l'angle de la lune et l'angle du soleil. L'erreur de pointage représentée ci-dessous correspond à une lune éclairant le capteur avec un angle de -55° suivant y et le soleil variant dans la totalité du champ de vue $[-55,55^\circ]$.

Erreur de pointage suivant y, avec la lune à -55°

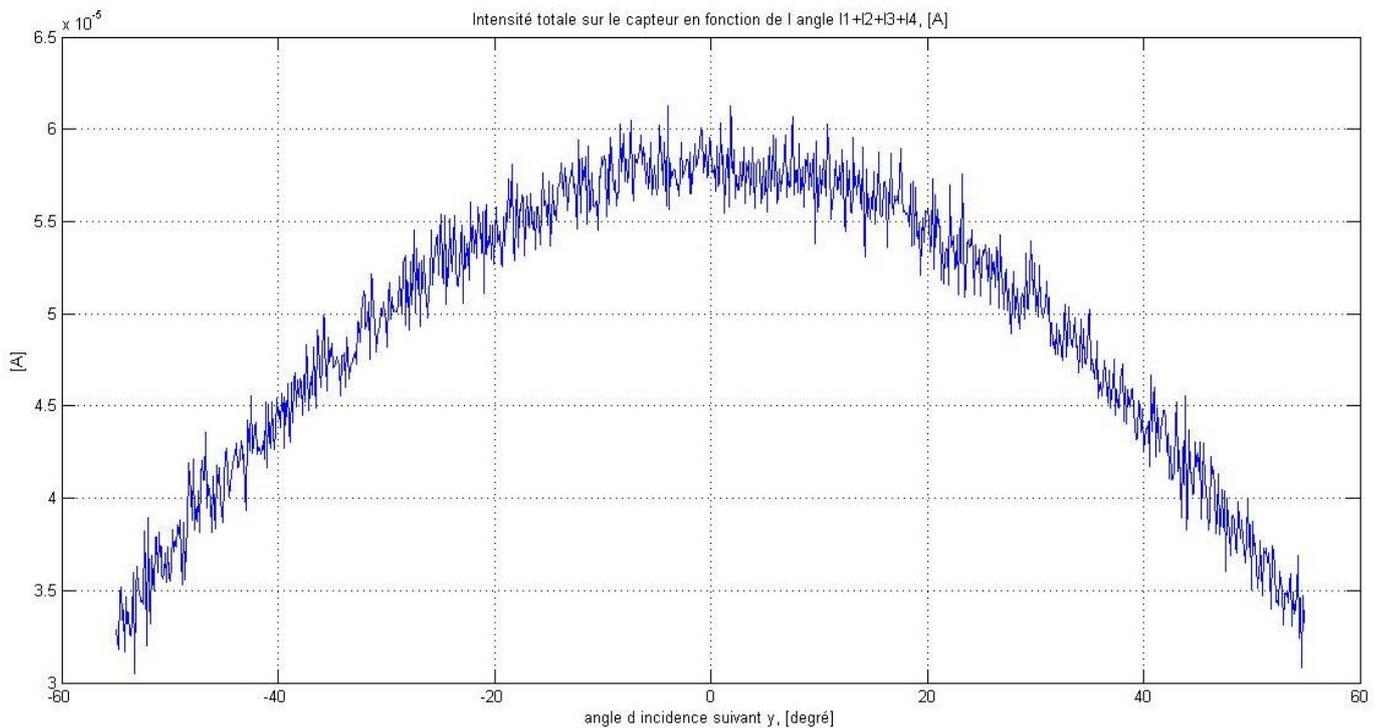


Dans ce cas extrême, l'erreur de pointage induite par la lune est au maximum de 4° (correspondant à la lune à -55° et le soleil à 55°). Si l'on rajoute donc cet effet de la lune sur le capteur, l'erreur de pointage est comprise entre [-4,4] degrés avec une densité d'erreur quasiment uniforme.

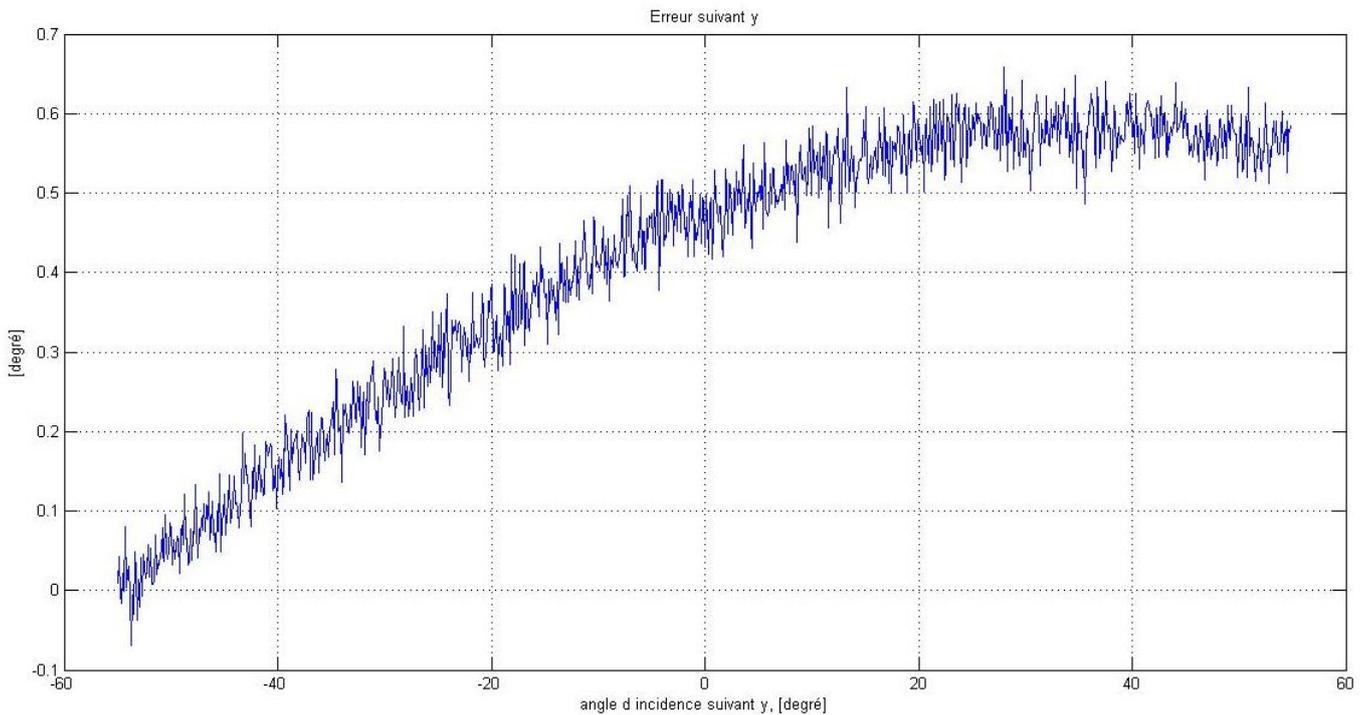
F. Effets de la terre sur le capteur

La terre aura les mêmes effets que la lune sur le capteur. Si nous ne considérons aussi que son albédo et grossièrement les effets d'absorption et de diffusion de l'atmosphère, la terre émet vers le satellite 24W/m^2 . La démarche suivante est la même que pour la lune.

Intensité sur les capteurs due à la terre.



Erreur de pointage suivant y, avec la terre à -55°



G. Se prémunir des effets de la lune et du soleil

Il est possible de distinguer plusieurs cas :

- Cas 1 : La lune et la terre n'éclairent pas le même capteur que le soleil.
- Cas 2 : La lune ou le soleil éclaire le même capteur que le soleil.

En fonction des cas, des solutions pourront être mises en place pour réduire les effets de la lune et de la terre sur le pointage des capteurs.

Cas 1 : Dans le cas où la lune et la terre n'éclairent pas le même capteur que le soleil, il est possible de comparer l'intensité totale sur chaque capteur et considérer que le capteur pointant le soleil est celui qui reçoit le plus d'intensité. Ce code sera à implémenter sur le calculateur du satellite.

Cas 2 : Dans le cas où un capteur est éclairé par une autre source que le soleil, le problème devient plus compliqué. Une solution avec un filtre en longueur d'onde avait été envisagée. Mais l'influence de la lune et du soleil étant simplement due aux réflexions du spectre solaire, il n'est pas possible d'atténuer leurs effets en longueur d'onde sans diminuer l'intensité solaire reçu. Cette solution ne semble donc pas viable. Une autre solution envisagée est d'utiliser un filtre polariseur. La lumière du soleil étant polarisée avec la réflexion sur la terre et la lune, il serait possible de filtrer en fonction de la polarisation de la lumière. Cette méthode semble difficilement applicable à cause de la rotation du satellite et donc l'impossibilité de garder un angle constant avec l'axe de la lumière polarisée.

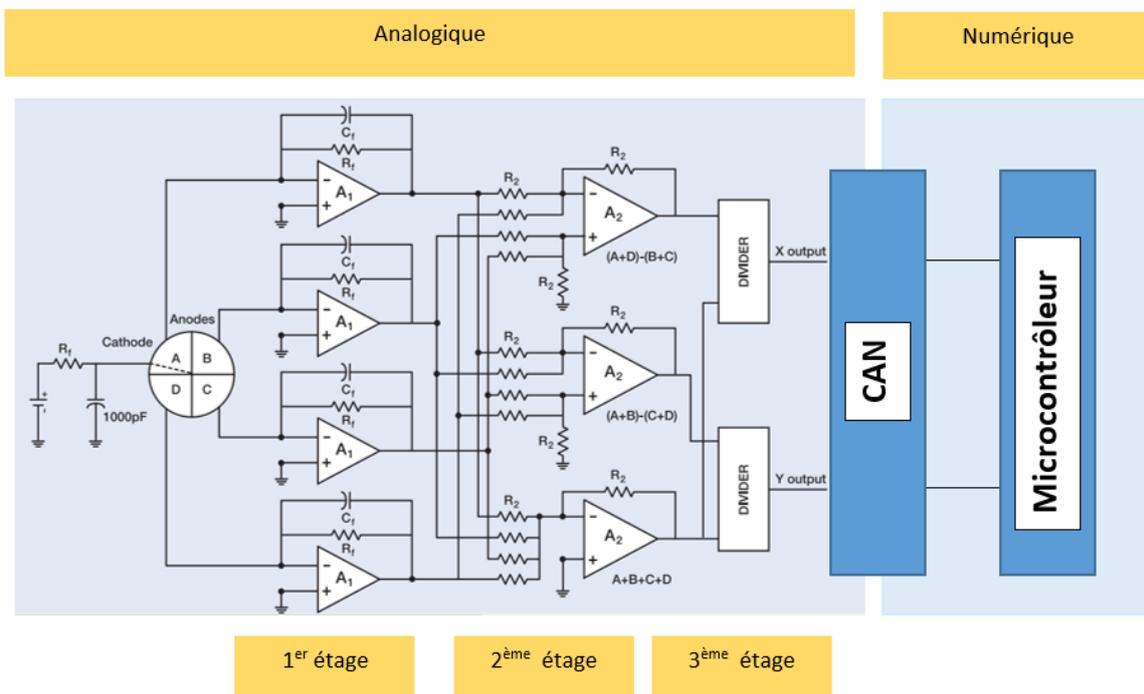
Ces deux solutions restent encore à être approfondies, notamment par des tests lors de la réalisation d'un premier capteur solaire.

V. Architecture Electronique

Cette partie présente les différentes solutions existantes pour faire les calculs de détermination d'angle, aucune n'a pour l'instant été privilégiée par rapport à l'autre. Chaque solution entraîne une architecture électrique différente.

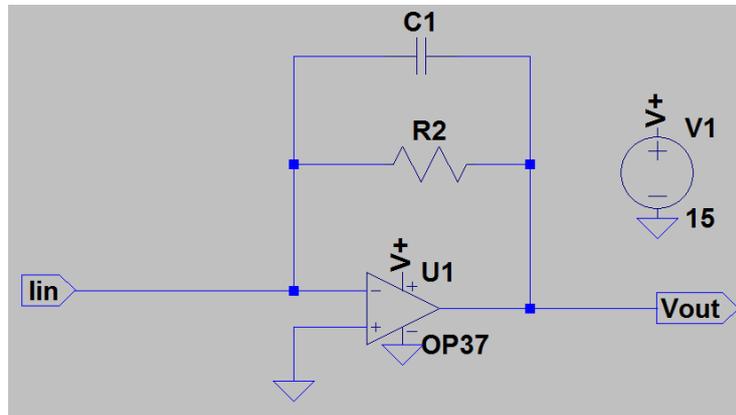
- 1- Solution A : Les calculs d'angles se font grâce à un microcontrôleur à l'intérieur de chaque senseur solaire.
- 2- Solution B : Le calcul d'angle est délocalisé au niveau de l'ordinateur de bord.

A. Solution A



1. Premier étage : Convertisseur courant-tension

La première chaîne d'amplification d'un signal de faible amplitude est à la fois indispensable pour rendre le signal insensible aux "parasites" tout en étant la principale source de dégradation du rapport signal à bruit. Il est important d'amplifier tôt dans une chaîne de lecture et d'éviter toute atténuation du signal. Une fois amplifiée, l'amplitude du signal devient grande devant l'amplitude des sources de bruits des étages suivants. Notre premier étage doit avoir ce rôle amplificateur tout en ne dégradant pas trop le signal des diodes. En première approximation, le bruit apporté par le premier étage constituera la seule source de dégradation.



Le courant généré par les photodiodes passe à travers un filtre passe-bas. Ce premier étage de gain permet de transformer un courant en tension. Le premier étage se comporte donc comme un générateur de tension commandée en courant.

$$V_{out} = R_{eq} * I$$

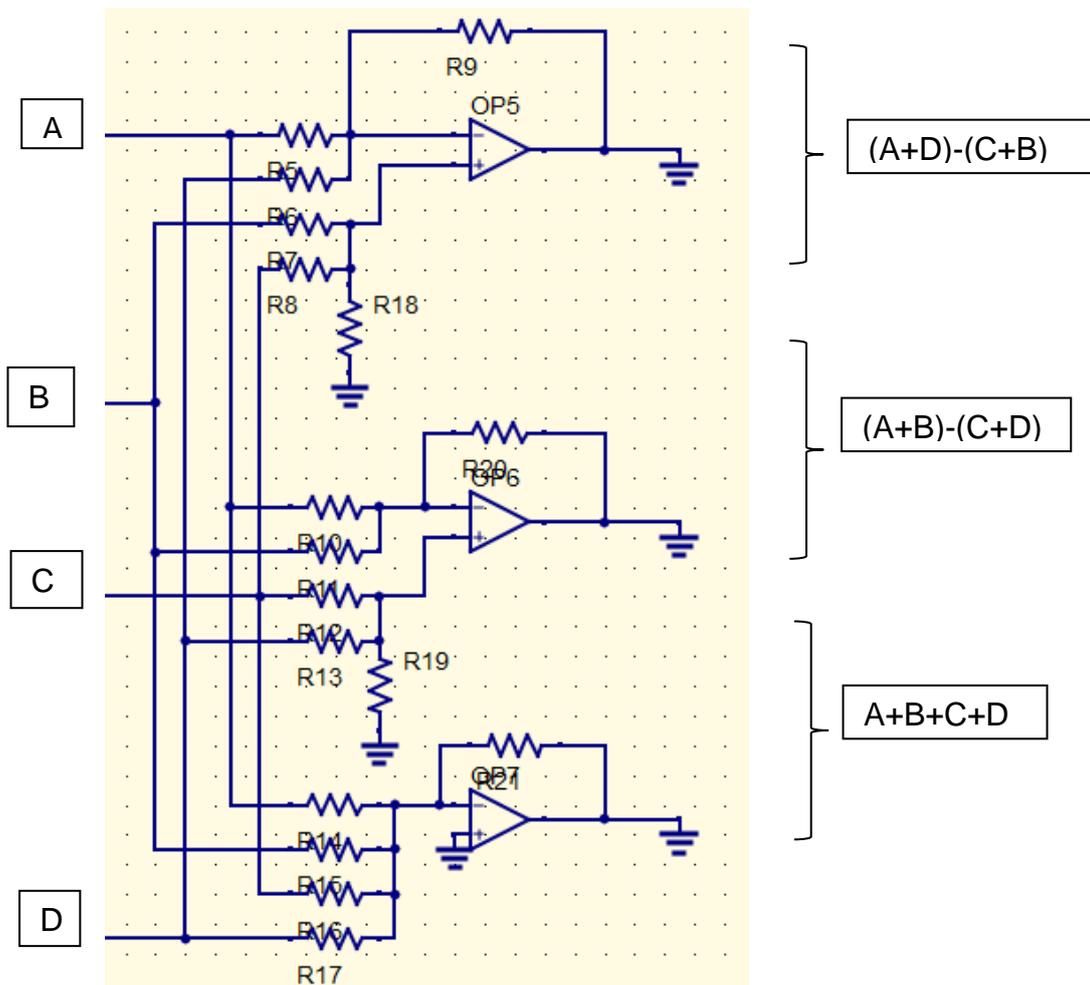
Avec

$$R_{eq} = C1 || R2 = \frac{R2}{R2j\omega + 1} = \frac{R2}{1 + \frac{f}{f_c}}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi.R1.C}$$

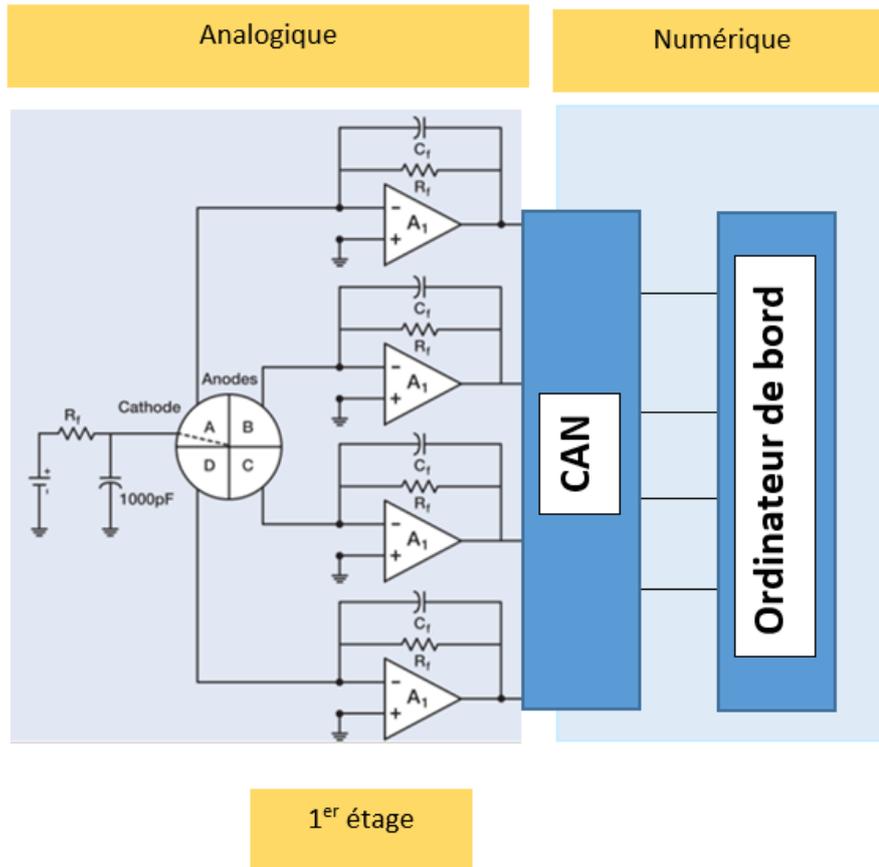
Fc est la fréquence coupure du filtre passe-bas. C'est lui qui détermine le temps de réponse de notre capteur.

2. Deuxième étage



Le deuxième étage permet d'appliquer le barycentre des intensités détaillé dans la partie théorique.

B. Solution B



Quelle que soit la solution choisie. Le premier étage d'amplification est indispensable pour amplifier le signal reçu et limiter la propagation des bruits électroniques.

Quelques idées de composants pour les montages :

Amplificateurs	OPA37 (bas bruit)
Diviseur	AD-534
Résistances R2-RF	10k-20kΩ

VI. Ce qu'il reste à faire

Ce qu'il reste à faire

Acheter les composants pour construire le capteur

- Photodiode
- Amplificateurs-Résistances
- Réaliser la structure protectrice de la photodiode

Faire des tests de pointage

Fixer l'architecture Electronique

- Calculs internes au capteur ?
- Calculs dans l'ordinateur de bord ?

Continuer le travail sur les filtres

VII. Le magnétomètre

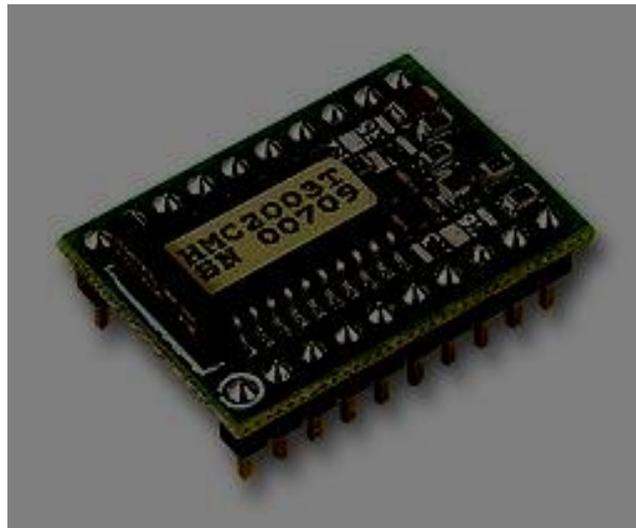
A. *Honeywell HMC2003*

Un capteur sera présent dans le système, pour des raisons de performances que nous citerons dans la suite, le choix s'est porté sur le magnétomètre HMC2003 de l'entreprise américaine *Honeywell*, déjà acheté et présent en laboratoire, mais jamais utilisé, notre travail partait de zéro. il fallait faire l'étude de ce magnétomètre en lisant sa datasheet pour comprendre son fonctionnement et comment exploiter les données qu'il renvoie.

Le HMC2003 Honeywell est un capteur de haute sensibilité, avec un capteur magnétique à trois axes utilisé pour mesurer les champs magnétiques à faible intensité, il contient à lui seul deux capteurs à magnétorésistances (HMC1001 et HMC1002) pour fournir plus de fiabilité et de précision.

L'interface du HMC2003 est analogique (voir figure en bas) avec des nœuds mis en évidence à la broche pour une flexibilité maximum de l'utilisateur, l'interface contient de plus de filtres passe-bas qui fournissent des mesures précises tout en rejetant les bruits indésirables.

HMC2003 Honeywell



B. Test unitaire avec Labview

1. Installation et configuration de l'outil de conception de système de mesure *Labview*

Après l'installation du logiciel de conception système Labview, il fallait installer d'une part la carte d'acquisition NI PCIe-8361 qui va permettre l'interfaçage du châssis NI PXIe-1073 avec l'ordinateur, et d'autre part l'installation des pilotes nécessaire aux instruments utilisés dans l'expérience (le NI PXIe-1073 en est un) pour que l'ordinateur et Labview puissent les reconnaître.

2. Branchement du magnétomètre HMC2003 et premières mesures avec un champ magnétique ambiant

Pour réaliser le branchement du HMC2003 nous nous sommes basés sur le circuit proposé dans la datasheet (voir annexe).

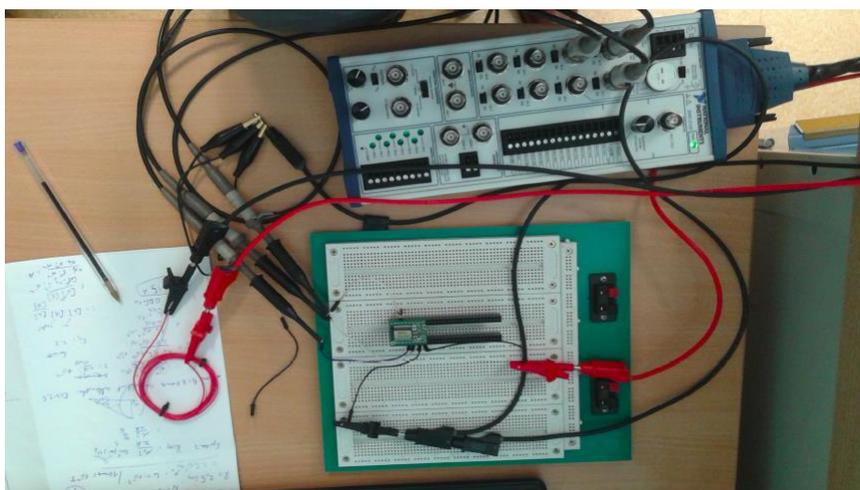
On voit par exemple que le capteur a besoin d'une alimentation à l'entrée 10 qui pourra être déterminée en suivant le schéma détaillé des entrées/sorties (voir annexe) à la sortie, le capteur fournit une intensité du champ mesuré suivant X au nœud 7, suivant Y au nœud 14, et suivant Z au nœud 6.

Le *National instrument* BNC 2120 jouera le rôle du convertisseur AD.

Le châssis et l'ordinateur joueront le rôle du contrôleur et du microprocesseur.

Tous les composants sont en place, il reste plus qu'à effectuer le branchement du magnétomètre.

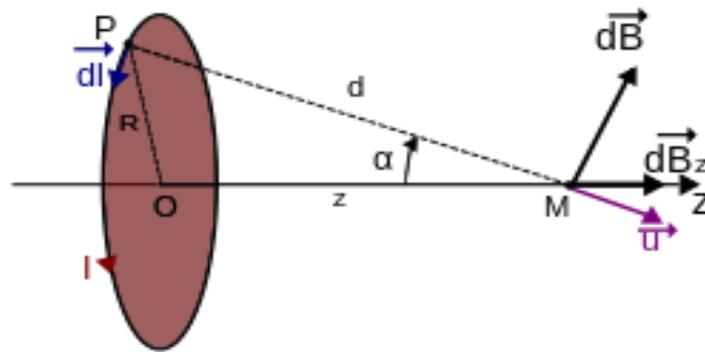
*Branchement initial du
magnétomètre*



Pour générer un champ magnétique, on utilise une bobine parcourue par un courant électrique I.

Calcul théorique du champ :

On calcule le champ par la méthode directe en un point M de l'axe (Oz) :



On calcule le champ par la méthode directe en un point M de l'axe (Oz) :

- Tout plan contenant (Oz) est plan d'antisymétrie de la distribution donc $\vec{B}(M)$ est suivant \vec{u}_z
- La distribution est invariante par rotation autour de (Oz) donc, en coordonnées cylindriques, $\vec{B} = \vec{B}(r, z)$. En particulier, sur l'axe, $\vec{B}(M) = B(z)\vec{u}_z$
- Le champ créé en M par une longueur infinitésimale de longueur dl située en P vaut $d\vec{B}_{reel} = \frac{\mu_0 I}{4\pi d^2} (d\vec{l} \wedge \vec{u})$. En réalité, la seule composante utile de ce champ élémentaire est la composante suivant \vec{z} , comme le champ final $\vec{B}(M)$ est suivant \vec{z} . Comme $\|d\vec{l} \wedge \vec{u}\| = \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) dl = dl$, on considère $dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi d^2} \sin(\alpha) dl$, norme de la projection de $d\vec{B}_{reel}$ sur (Oz).

- On souhaite une expression en fonction de α : on remarque que $d = \frac{R}{\sin(\alpha)}$ et on remplace :

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} dl \sin^3(\alpha)$$

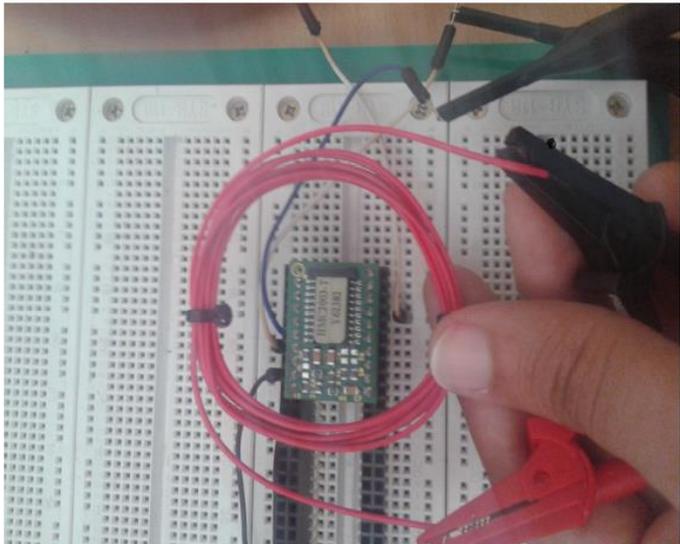
- Enfin, on intègre pour l compris entre 0 et $2\pi R$ (qui donnera le bon résultat car α est constant) :

$$B(M) = \int_0^{2\pi R} \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \sin^3(\alpha) dl = \frac{\mu_0 I}{2R} \sin^3(\alpha)$$

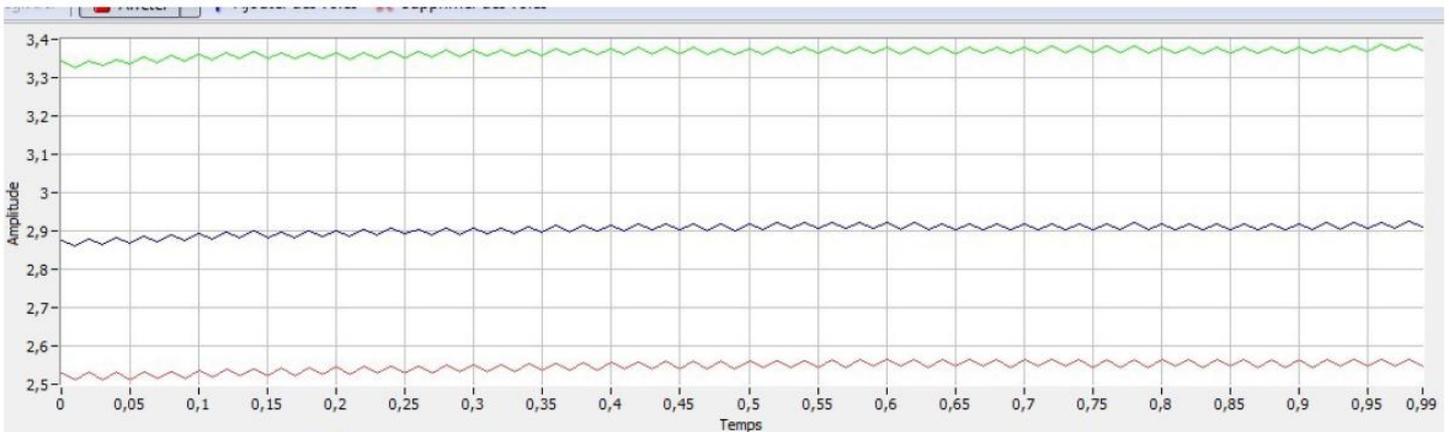
Expérience 1 : application d'un champ et mesure suivant Oz

Nous posons le solénoïde de telle sorte que son axe soit confondu avec l'axe z du magnétomètre, rappelant que nous avons réglé le générateur sur 1 A avec un rayon de spire égale à 2.5 cm donc d'après la formule précédente, cela doit générer un champ égale à 1 Gauss :

Manipulation 1



Résultats fournis par labView : Z en vert, X en bleu, Y en rouge

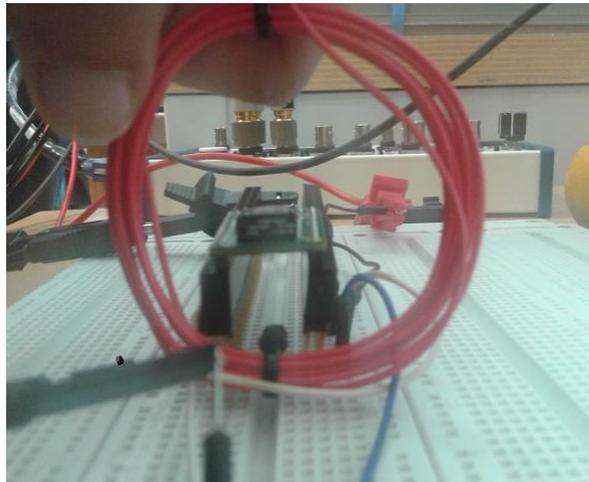


On observe 3.5 V qui est une augmentation suivant z de 1 gauss (car la valeur par défaut retourné par le magnétomètre est 2.5 V), c'est le résultat attendu.

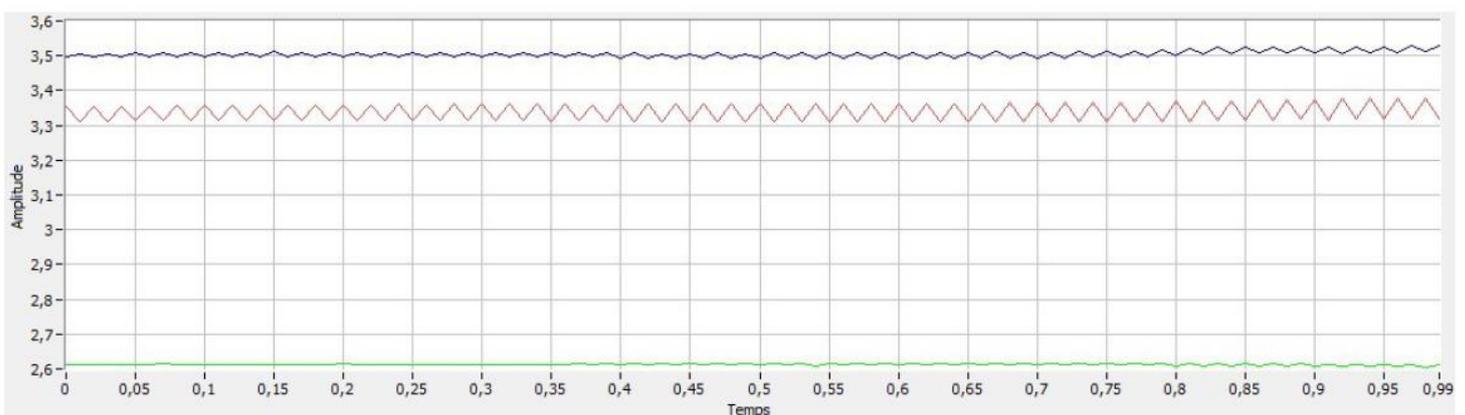
Expérience 2: application d'un champ et mesure suivant Ox

Nous posons une bobine de telle sorte que son axe soit confondu avec l'axe x du magnétomètre, rappelant qu'on a réglé le générateur sur 1 A avec un rayon de spire égale à 2.5 cm donc d'après la formule précédente cela doit générer un champ égal à 1 Gauss :

Manipulation 2



Résultats fournis par labVIEW: Z en vert, X en bleu et Y en rouge

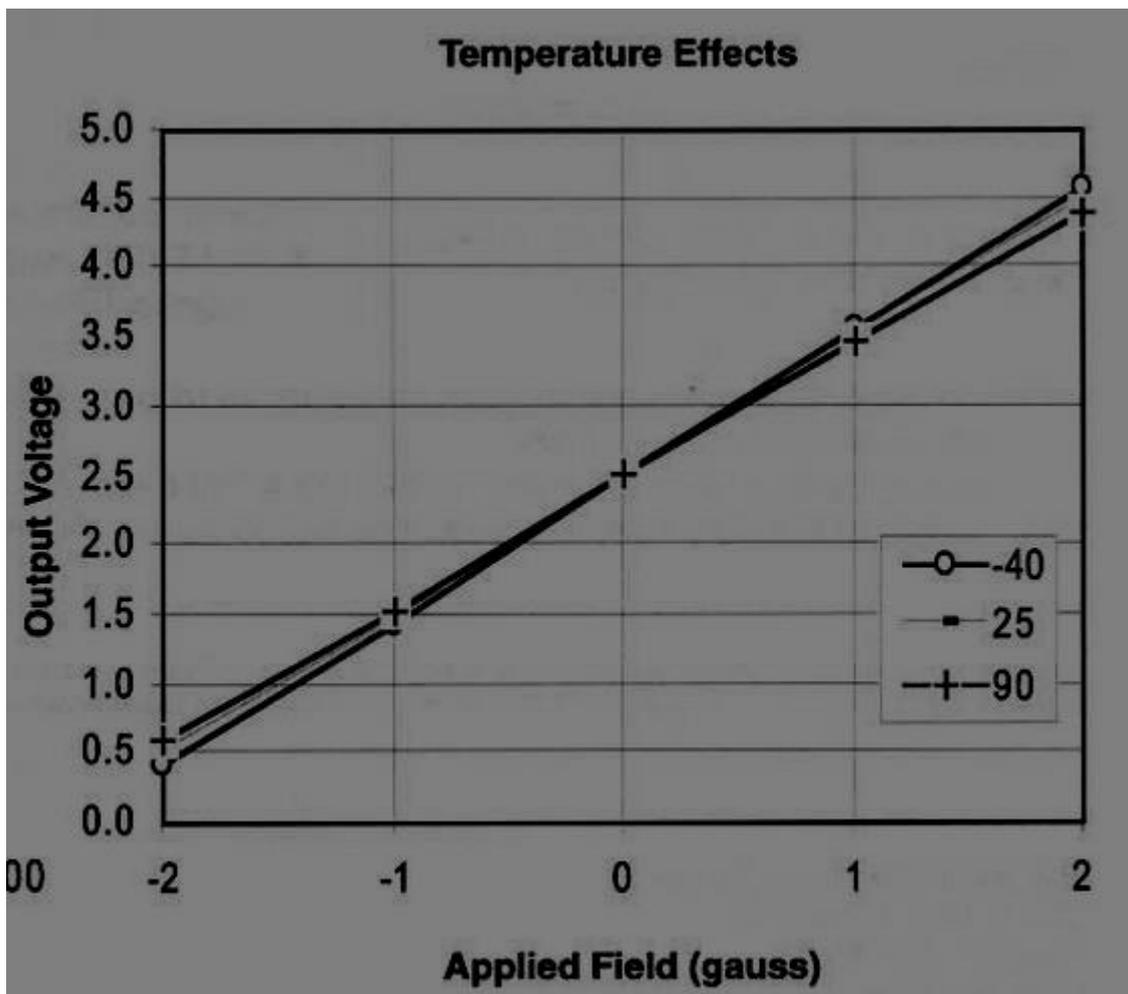


On observe les 3.5 V sont une augmentation suivant x de 1 gauss (car la valeur par défaut retournée par le magnétomètre est 2.5 V), c'est le résultat attendu.

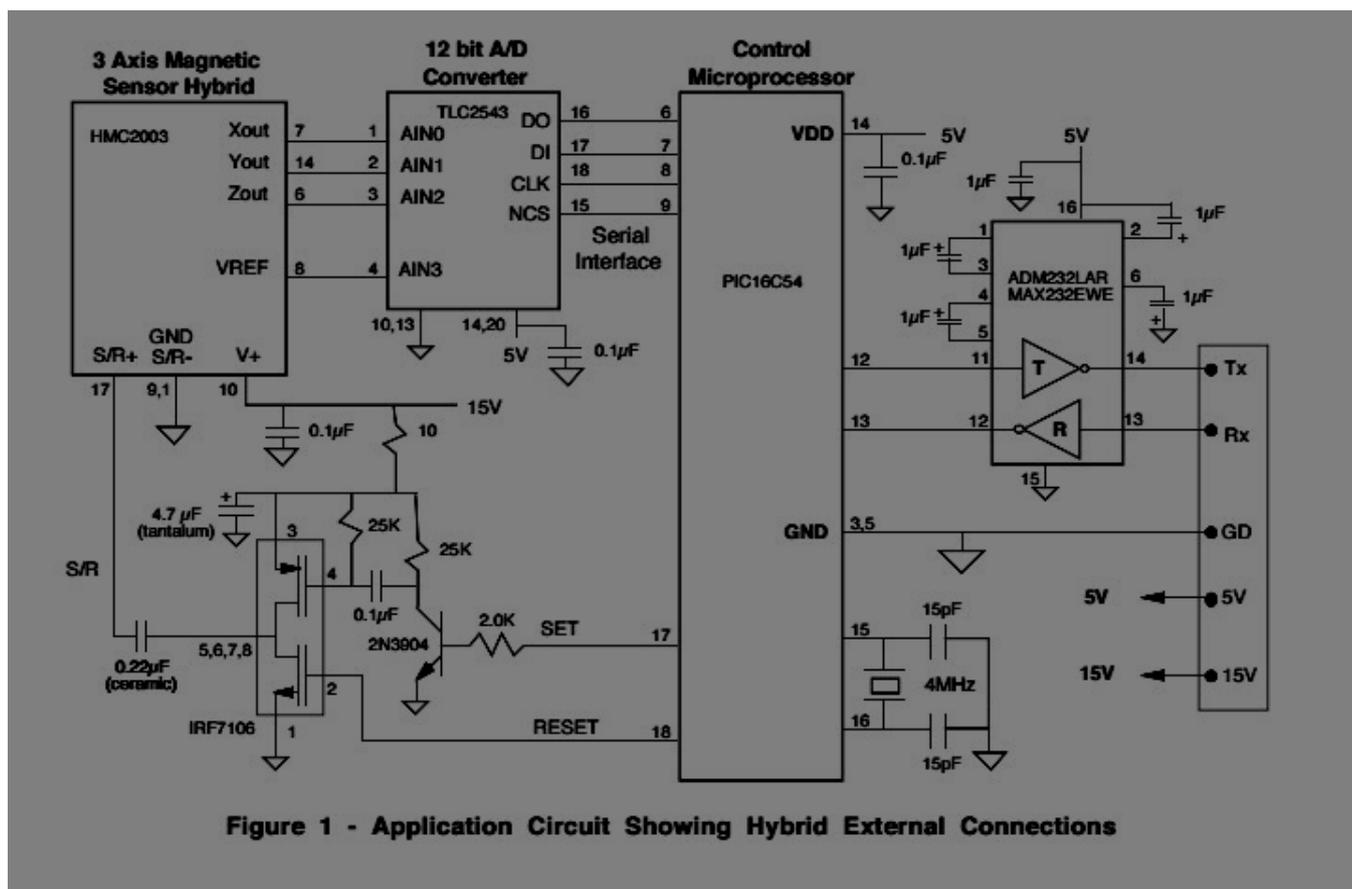
Remarques : On observe des fluctuations suivant x, y et z dues à deux raisons.

- L'expérience a été réalisée dans un laboratoire qui contient des instruments et ordinateurs qui eux même peuvent générer un champ magnétique, d'où cette fluctuation.

Voilà une courbe qui donne pour chaque champ appliqué au voisinage du magnétomètre la tension que renverra ce dernier :

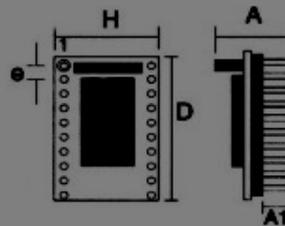
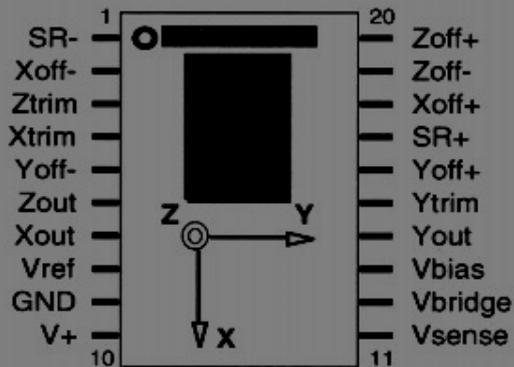


VIII. Annexe



Circuit de branchement du magnétomètre

PINOUT DIAGRAM AND PACKAGE DRAWING



Symbol	Millimeters		Inches	
	Min	Max	Min	Max
A	10.92	11.94	0.43	0.47
A1	2.92	3.42	0.115	0.135
D	25.91	27.30	1.02	1.075
e	2.41	2.67	0.095	0.105
H	18.03	19.69	0.71	0.775

ORDER INFORMATION

Ordering Number	Product
HMC2003	Three-Axis Magnetic Sensor Hybrid



Caution
This part is sensitive to damage by electrostatic discharge. Use ESD precautionary procedures when touching, removing or inserting.

CAUTION: ESDS CAT. 1B

Entrées et sorties du magnétomètre

IX. Bibliographie

Cutler, J. C. (s.d.). Photodiode Placement & Algorithms for CubeSat Attitude Determination. University of Michigan, Ann Arbor, MI.

D. Fontani, P. S. (s.d.). *Pointing Sensors and Sun Tracking Techniques*. Récupéré sur <http://www.hindawi.com/journals/ijp/2011/806518/>

Filtres. (s.d.). Récupéré sur Edmundoptics: <http://www.edmundoptics.fr/optics/optical-filters/shortpass-edge-filters/high-performance-od-4-shortpass-filters/84697/>

Jaroslav CHUM, J. V. (s.d.). *A SIMPLE LOW COST DIGITAL SUN SENSOR FOR*. Academy of Sciences of the Czech Republic.

Martin Pedersen, J. H. (24th August 2004). *Linear Two-Axis MOEMS Sun Sensor*. University of Denmark.

Matériaux. (s.d.). Récupéré sur GoodFellow:

http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat4I.php?ewd_token=M3DDxjur3d2GmEKXhSx4ok8iRNN6IK&n=NzVhpkEqCHEdTQVxgb1oAXnqsF6WsC&ewd_urlNo=GFCat4C10&Catite=AB200350&CatSearNum=1

Mengden, D. v. (s.d.). *Development and Integration of a Sun Sensor for the Pico Satellite MOVE*. Récupéré sur <http://hakenberg.de/automation/sunsensor.htm>

Photodiode. (s.d.). Récupéré sur Hamamatsu:

<http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/3100/4001/index.html>

PSSCT-2 (Pico Satellite Solar Cell Testbed-2). (2015, Mars). Récupéré sur

<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/p/pssct-2>

https://aerospace.honeywell.com/~media/Images/Plymouth%20Website%20PDFs/Magnetic%20Sensors/Data%20Sheets/HMC_2003.ashx

http://fr.wikipedia.org/wiki/Contr%C3%B4le_d%27attitude

<http://www.klubprepa.fr/Site/Document/ChargementDocument.aspx?IdDocument=4006>

<http://www.cs.unc.edu/~vicci/comp261/compass/hmc2003.pdf>