

Projet EI-2I3

Suiveur solaire asservi (*solar tracker*)

Lyès Bait, Petr Dobiáš, Maha Zoghلامي

I. Introduction

Le but de ce projet est de concevoir un système de production d'énergie électrique solaire asservi à la source lumineuse en mouvement : un tournesol électronique (ou *solar tracker*). Ce système utilisera un panneau photovoltaïque. Dans le cadre de ce projet, nous simulons donc un système photovoltaïque optimal tenant compte du mouvement relatif du soleil par rapport à la terre. Ainsi, notre source lumineuse simulée devra être dans l'axe normal par rapport au centre du panneau photovoltaïque. L'objectif est donc de concevoir un système autonome qui fait les mesures de luminosité afin que le panneau suive toujours le soleil.

Le système sera principalement constitué des sous-ensembles suivants :

- Carte STM32F072RB.
- Tourelle avec deux axes et servomoteurs PIMORONI PIM 183.
- Panneau solaire SUNTECH STP005B-12/DEA.
- Trois capteurs pour la mesure de la lumière, capteurs de type photorésistances (modèle : NSL-19M51).

Lors de ce projet, vous allez développer entre autres les compétences suivantes :

- Principe de fonctionnement de différents sous-ensembles (matériels et logiciels).
- Programmation du microcontrôleur STM32 (de chez STMicroelectronics).
- Conception d'une chaîne de mesure (avec simulation et réalisation expérimentales).
- Asservissement d'un système.
- Optimisation de l'ensemble du système (optimisations logicielles et matérielles).

II. Déroulement du projet

Dans le cadre de ce projet, vous allez tout d'abord étudier les caractéristiques et le principe de fonctionnement de différents composants. Ensuite, vous allez réaliser des simulations pour voir le comportement théorique du système (et notamment de la chaîne d'acquisition et de mesures).

Après avoir réalisé une première version fonctionnelle du système (mais non optimisée), une seconde phase du projet sera dédiée à l'amélioration de ses performances. L'ensemble des tâches prévisionnelles sera le suivant (mais pas nécessairement dans l'ordre) :

- Montage des tourelles avec les servomoteurs, ainsi que leurs tests.
- Mesures délivrées par les capteurs de lumière.
- Câblage des fonctions sur circuits (platine d'expérimentation ou *breadboard*).
- Codage logiciel.
- Montage et intégration de tout le système.
- Test et validation expérimentale du système.

III. Evaluation et livrables

Vous serez évalué(e)s au fur et à mesure du projet. Ainsi, en terminant une question, vous allez demander à votre encadrant(e) d'évaluer vos réponses.

A la fin du projet, vous allez rendre la version finale de votre rapport individuel.

IV. Principe de fonctionnement de différents composants et étude de leurs caractéristiques

Dans cette partie, vous prendrez connaissance des caractéristiques des différents sous-ensembles constituant le système, puis vous étudierez le principe de leur fonctionnement.

Question 1 : Système complet (vision préliminaire)

- 1) Avant de définir le schéma structurel détaillé du système, et en ne vous basant que sur ce qui a été expliqué jusqu'à ce stade, donnez un diagramme approximatif du système.

Objectif de cette question : Il y a deux objectifs essentiels. D'une part, permettre d'appréhender le système de manière globale (vision système). D'autre part, cela permet d'affiner les critères de choix des différents sous-ensembles constituant le système et surtout le choix de la carte (E/S analogiques, E/S numériques, intégrant un micro-contrôleur, ...).

Conseil pour cette question : penser à un schéma synoptique faisant appel aux différents sous-ensembles cités à ce stade (le panneau PV, la carte intelligente, les capteurs photorésistances, la tourelle) ainsi que la source d'énergie lumineuse mobile (c'est-à-dire que l'on déplacera manuellement).

- 2) Avec tout ce qui a été décrit pour l'instant, proposer (en 1 page maximum) un cahier des charges global, décrivant le système (sans trop détailler) en termes de besoins fonctionnels.

But : appréhender la rédaction d'un cahier des charges avant conception d'un système... Nous sommes au tout début du "Cycle en V".

Question 2 : Cellule photovoltaïque et panneau solaire

A) La cellule photovoltaïque (PV) :

- 1) Expliquez le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.
- 2) Donnez les différents types de cellules photovoltaïques.
- 3) Donnez le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.
- 4) Donnez les paramètres physiques d'une cellule PV, par exemple l'expression du courant généré par la cellule photovoltaïque.

B) Le panneau solaire :

- 1) De manière générale, décrivez le fonctionnement d'un panneau solaire. Précisez également quels sont les différents types/technologies de tels composants et quel est leur rendement.
- 2) Dans le cadre de ce projet, il y a plusieurs panneaux solaires que vous pourrez manipuler. Parmi eux, le modèle SUNTECH STP005B-12/DEA. Donnez ses caractéristiques.
- 3) Qu'est-ce qu'un tracker solaire ? Et dans quels objectifs on l'utilise ?
- 4) Quels sont les deux principaux mécanismes de suivi ?
- 5) Quelles sont les coordonnées géographiques d'un point sur Terre ?
- 6) Quels sont les angles et mouvements solaires ?

Question 3 : Carte STM32

Notre réalisation d'un tracker solaire avec la carte STM32F072 se base principalement sur un automate capable de suivre une source lumineuse en s'orientant de façon optimale en direction des rayons lumineux.

Les mouvements de rotations se produisent selon deux axes (vertical et horizontal), nous utilisons donc deux moteurs commandés par le microcontrôleur.

- 1) Donnez les principales caractéristiques de la carte STM32F072. Justifiez le choix de cette carte ? Répond-t-elle aux contraintes du système (des points de vue : Entrées/Sorties A/N, possibilité de calculs, ...) ?
- 2) Comme ce projet est lié à l'aspect énergétique, regardez en détail comment le microcontrôleur peut gérer les différents modes énergétiques. Précisez leurs avantages et leurs inconvénients.

Question 4 : Tourelle

Le but de cette question est de comprendre le principe de fonctionnement d'une tourelle motorisée à 2 axes.

Introduction (et Aide) : pour vous répondre aux questions sur cette partie, on précise les éléments suivants :

- La référence de la tourelle qui sera utilisée est : **BPT-KT**.
- Cette tourelle utilise 2 servomoteurs de référence **HS-300**. Consultez leurs caractéristiques (Exemple de lien: <https://servodatabase.com/servo/hitec/hs-300>).
- Pour les systèmes mécaniques rotatifs, quelques rappels et notions de calcul des couples/forces sont introduits en annexe.

- 1) Expliquez brièvement la fonction de ce sous-ensemble : type de mouvement, signaux de commande (type analogique ou numérique ? dynamique/niveaux des signaux nécessaires pour les piloter, ...). En particulier, précisez comment les servomoteurs sont commandés ?
- 2) Évaluez l'angle solide couvert par le modèle de tourelle choisie.

Question 5 : Photorésistance

- 1) Expliquez le principe de fonctionnement de la photorésistance.
- 2) Dans le projet, vous allez vous servir des photorésistances NSL-19M51, regardez la documentation constructeur et donnez les principales caractéristiques.
- 3) Proposez un schéma électrique de base utilisant une photorésistance et un amplificateur opérationnel de type suiveur non-inverseur. Expliquez en quoi ce type de montage est-il bien adapté à ce type de capteur ?
- 4) Dans notre cas -comme déjà expliqué- nous devons mesurer une variation spatiale de l'intensité lumineuse et non une seule intensité immobile (spatialement). Pensez-vous que le simple montage précédent utilisant un seul capteur (et son ampli suiveur) suffit pour suivre une source en mouvement (et donc qui varie en intensité) ? Justifiez votre réponse et compléter le schéma (de principe) si besoin ?

Question 6 : Système complet

Après avoir étudié les différentes composantes du système, faites un schéma structurel (donc plus détaillé) montrant la totalité des sous-ensembles et leurs liens (branchement complet et connexions des composants).

V. Simulations

Avant de passer aux manipulations, vous allez réaliser plusieurs simulations en utilisant le logiciel LTspice qui permet de concevoir des schémas et d'étudier leur comportement avant de passer à l'étape de fabrication (CAO de la carte électronique et son routage). Ce logiciel est téléchargeable gratuitement depuis le site suivant : <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html#>.

Question 7 : Photorésistance

Le but de cette question est d'utiliser ce logiciel afin d'étudier le comportement de votre système.

1) Cas de R_LDR constante (intensité lumineuse fixe) :

Sous LTspice, réalisez un premier schéma comportant un pont diviseur de tension alimenté par une tension $V_{cc} = +5v$. Ce pont sera constitué d'une résistance R_LDR (modélisant la LDR) et d'une autre résistance R1 de même valeur que R_LDR. Enfin, le point milieu du pont attaquera un AOP monté en suiveur (l'AOP sera alimenté symétriquement, en $\pm 5v$).

A noter que :

La librairie standard de LTSpice ne disposant pas de modèle LDR, on se propose d'abord de simuler le signal de sortie engendré par une intensité lumineuse constante, ce qui peut-être réalisé en remplaçant la LDR par une résistance fixe (qu'on appellera R_LDR) dont la valeur nominale sera choisie selon la datasheet.

Remarque : pour vous aider à choisir la valeur de R_LDR, télécharger la datasheet du modèle NSL-19M5 et prendre la valeur de résistance qui correspond à un éclairage de 100 lux (éclairage moyen en intérieur).

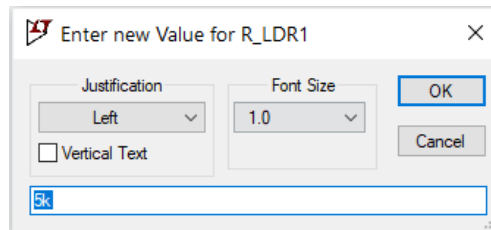
Simulez le comportement du circuit en visualisant les niveaux de tensions d'entrée et de sortie. Pour cela :

- Selon la fenêtre obtenue par la commande "**Menu : Simulate >> Edit Simulation Command**", fixer un temps de simulation de 10000s et un pas de 1s. Ce temps de l'ordre de 3 heures est représentatif des durées d'événements qui nous intéressent (mouvement relatif du soleil).
- Visualiser les deux tensions : d'entrée et de sortie et faire une copie d'écran du schéma et du résultat de simulation.

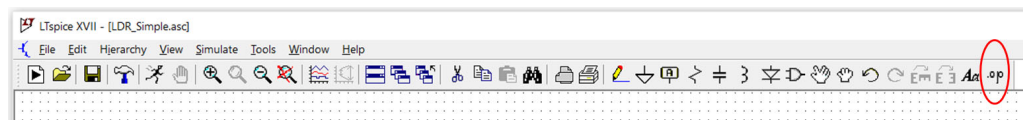
2) Cas de R_LDR variable (modélisant une intensité lumineuse variable) :

Modifier le schéma précédent afin que R_LDR devienne variable (but : simuler des intensités lumineuses variables). Pour cela :

- faire un clic droit sur la valeur 5k (de R_LDR) et remplacer le texte 5k par {R} pour indiquer que R est variable.

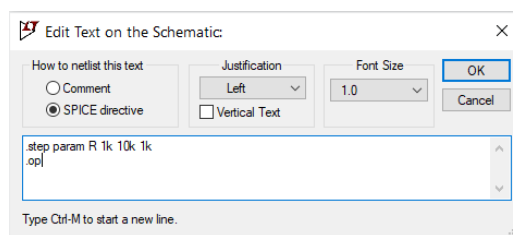


- Dans la barre de menu principale, cliquer sur le bouton à droite **.op**.



- Dans la fenêtre qui s'ouvre (ci-dessous), spécifier la façon dont doit évoluer R_LDR, en tapant le texte en bleu suivant (pour revenir à la ligne, taper Ctrl-M) :

```
.step param R_LDR1 1k 10k 1k
.op
```



- Expliquer la signification des deux lignes de cette directive (en bleu).
- Lancer la simulation et faire une copie d'écran du résultat.

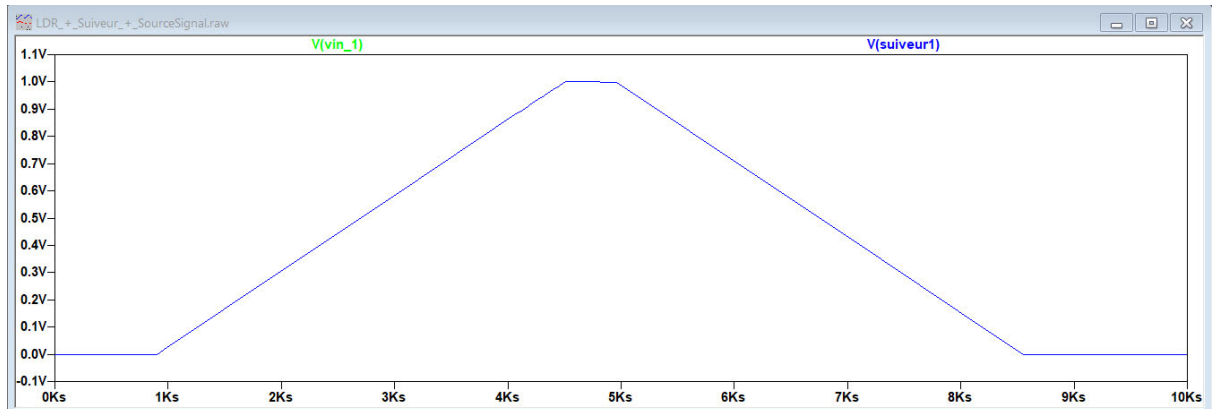
Remarque : Vous devez obtenir plusieurs niveaux de tension de sortie correspondant chacun à un niveau de résistance de la LDR 1.

3) Utilisation d'une source de tension variable pour modéliser une intensité lumineuse variable :

Dans le cas précédent "2)", la modélisation d'une lumière variable s'effectuait en fixant la tension du pont diviseur (à +Vcc) tout en variant la résistance nominale équivalente de la LDR. Maintenant, nous opérerons autrement en variant la tension d'attaque..

Remplacez le +Vcc alimentant le pont par une source de tension variable qui attaquera directement l'entrée de l'étage suiveur. Cette source (dont vous définirez les caractéristiques) devra être représentative des caractéristiques (tension, fréquence, ...) des signaux attendus de la photorésistance lorsque celle-ci est censée observer une lumière solaire qui bouge ?

Pour vous aider, voici un gabarit de la forme d'onde attendue que doit délivrer le générateur de tension :



- Simulez votre schéma et vérifiez que vous obtenez bien la forme d'onde ci-dessus à la fois en entrée et en sortie.

Commentez ce résultat ?

A quoi sert le suiveur dans ce cas ?

Question 8 : Circuit électrique

Ce circuit servira à trouver la résistance idéale pour le montage dans un premier temps puis à tester les capteurs de lumière.

- 1) Avec le schéma électrique suivant, simplifiez et représentez la tension reçue par les résistances R1 et R2 (qui remplace le capteur). Grâce à la relation du pont diviseur de tension trouvez la résistance idéale pour le montage :

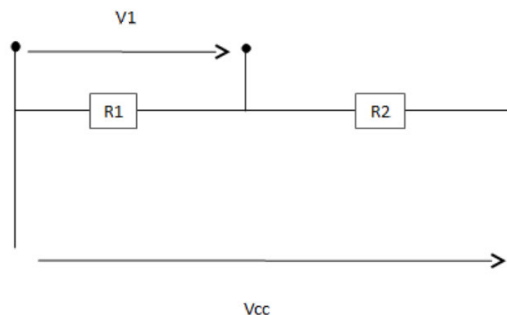


Schéma électrique simplifié

- 2) Réalisez le montage électronique et faites le test des composants ?

VI. Montage de la tourelle

Avant d'utiliser une tourelle, il faut l'assembler.

Question 9 : Tourelle

- 1) Par un simple calcul de couple de force et en vous aidant des données sur les servomoteurs évaluer la charge maximale (en kg) que peut supporter la tourelle en garantissant un fonctionnement normal (sans décrochage) dans les deux axes.
- 2) Suivez le guide du constructeur pour bien assembler la tourelle ayant deux axes avec servomoteur.
- 3) Vérifiez que votre tourelle fonctionne bien en lui appliquant un signal dont vous trouverez les caractéristiques en fonction des données fabricant de la tourelle.

Indication : vous pouvez générer dans un premier temps un signal avec un générateur de signaux arbitraires de laboratoire. Ensuite, vous testerez la réponse de la tourelle face à un signal carrée (rapport cyclique = $\frac{1}{2}$).

- 4) Refaites la manipulation de la question précédente en appliquant cette fois-ci le même signal au 2ème axe de la tourelle.
- 5) Décrivez ce que vous observez.
- 6) Faites varier le rapport cyclique (via votre générateur) et décrivez ce qui se passe.
- 7) Les butées (sur chaque axe) sont-elles en rapport avec les caractéristiques du signal de commande ? Si oui, décrivez le(s) lien(s) entre elles ?

VII. Manipulations

Ce projet sera entièrement réalisé en langage C. Pour programmer la carte, vous utiliserez le logiciel Keil MDK (Microcontroller Development Kit) de μ Vision. Ce logiciel est payant mais une version "Lite" (suffisant pour ce projet) est disponible gratuitement sur le site suivant : <https://www2.keil.com/mdk5>.

Question 10 : Prise en main de la carte

Avant d'intégrer la carte STM32F072RB dans le système, vous allez prendre connaissance de cette carte. Codez alors un exemple de base classique : un clignotement d'une LED. Suivez pour cela les indications illustrées dans le tutoriel.

Question 11 : Premiers essais avec la carte

Pour réaliser le travail demandé dans cette question, on vous conseille de regarder ce que vous avez fait pendant le cours sur les microcontrôleurs et de consulter la « datasheet » de la carte STM32F072RB, ainsi que sa « reference manuel » disponible sur <https://usermanual.wiki/Pdf/STM32Fxreference20manual.1209178456/view>. Vous pouvez également regarder d'autres exemples d'utilisation disponibles sur st.com.

Avant d'écrire votre code, on vous conseille d'ouvrir un modèle (« template ») pour vous faciliter l'écriture de votre code, ainsi que la gestion des fichiers des bibliothèques.

Quand vous écrivez votre code, vous pouvez configurer les registres directement ou utiliser les fonctions définies pour STM32 Nucleo dans le fichier `stm32f0xx_nucleo.c` situé dans le répertoire `STM32_Nucleo`. Quant à la manipulation avec les périphériques, vous pouvez vous servir des fonctions définies dans les fichiers situés dans le répertoire `STM32F0xx_StdPeriph_Driver`.

Si vous constatez qu'il y a plusieurs options à configurer et que le sujet ne précise pas de détails, vous pouvez choisir l'option que vous souhaitez. Néanmoins, on vous conseille de conserver les options par défaut.

A) Génération de deux signaux PWM (Pulse Width Modulation)

- 1) Quelles sont les trois caractéristiques principales pour définir un signal PWM ? Vous allez définir leurs valeurs plus tard pour qu'elles soient bien adaptées au projet.
- 2) La résolution du signal PWM est un pas temporel le plus petit. Dans le cas étudié, précisez donc la résolution souhaitée.

Indication : la résolution est liée aux valeurs des angles de servomoteur.

3) Afin de bien initialiser la génération du signal PWM, on précise les informations suivantes. Pour avoir plus de détails, on vous conseille de consulter la notice d'utilisation de la carte STM32F032RB.

- Les broches utilisées pour envoyer les signaux PWM sont 8 et 9 du GPIO A. Comme elles sont commandées par le timer 1, il faut bien choisir le mode AF2 (voir le tableau 15 de la notice d'utilisater pour plus de détails).
- Les horloges "High Speed APB (APB2) peripheral clock" lié au timer 1 et "AHB peripheral clock" lié au GPIO A doivent être activées (enable).
- Pour configurer le timer 1, il faut préciser (i) les valeurs de la période et de prescaler qui correspond à la résolution ; (ii) la largeur du pulse, i.e. le rapport cyclique, et préciser les détails concernant « Output Compare (OC) Mode », i.e. qu'il s'agit de « TIM_OCMode_PWM1 » et que « TIM_OutputState » et « TIM_OutputNState » sont activés.
- N'oubliez pas d'activer le timer et le contrôle de PWM.

4) Observez les signaux générés à l'aide de votre boîtier Analog Discovery 2.

B) Communication série

Mettez en place la communication série USART (Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter). Vous avez déjà vu lors de cours de microcontrôleurs comment la configurer et utiliser. Dans le cadre de ce projet, on vous conseille de reprendre la même configuration et utiliser les mêmes fonctions que vous avez créées et/ou adaptées.

C) Acquisition des données

- 1) De quel type sont les données délivrées à la broche de la carte ? Quelle est leur unité ? Quel type de données la carte utilise-t-elle ? Que faut-il faire ?
 - 2) Les broches utilisées pour récupérer les signaux générés par le boîtier Analog Discovery 2 sont les broches 0, 1, et 2 du GPIO C. D'après le tableau 14 de la notice d'utilisateur, aux quelles entrées du convertisseur correspondent-elles ?
 - 3) Est-ce qu'il est possible d'utiliser un convertisseur analogique-numérique tout seul ou faut-il obligatoirement passer par la mémoire de la carte ? Si l'utilisation de la mémoire n'est pas nécessaire, quelles sont les conditions à respecter ?
 - 4) Afin de bien initialiser votre convertisseur analogique-numérique, on précise les informations suivantes. Pour avoir plus de détails, on vous conseille de consulter la notice d'utilisateur et le guide de la carte STM32F032RB.
- L'horloge pour le convertisseur analogique-numérique doit être activée.
 - N'oubliez pas de calibrer votre convertisseur, l'activer et choisir le taux de conversion.

- On vous conseille d'utiliser le mode de conversion « single » et de lancer la conversion plusieurs fois.
- 5) Vérifiez le bon fonctionnement de l'acquisition des données sur les trois broches en utilisant la communication série. Pour ceci, vous allez appliquer une tension continue sur chaque broche à l'aide de votre boîtier Analog Discovery 2.

Question 12 : Algorithme

- 1) En vous inspirant du schéma de la partie théorique, dénombrez les fonctions clés que le système devra réaliser.
- 2) Donnez l'algorithme final qui intègre ces fonctions.

Rappel : on entend ici par algorithme, une représentation abstraite (sans code spécifique) pouvant être de forme schématique ou écrite, qui explique le principe de fonctionnement de votre futur programme informatique.

Question 13 : Codage logiciel

- 1) En vous basant sur votre algorithme, écrivez votre code en C (pensez à bien le commenter fonction par fonction).
- 2) Téléchargez le code sur votre carte STM32.
- 3) Mettez en œuvre le système. Et testez son fonctionnement.

VIII. Améliorations

A cette étape, votre système fonctionne correctement, i.e. qu'en fonction de la luminosité mesurée par les capteurs, le panneau solaire suit la direction émettant le plus de lumière. Néanmoins, vous pouvez constater que la réaction du système ne sera pas toujours optimale en fonction du mouvement de la source lumineuse (risque de mouvement brusque en cas de 2ème source parasite par exemple, ou bien mouvement de suivi pas assez réactif). L'objectif de cette partie est donc d'améliorer la réponse du système.

Question 14 : Régulateur PID

- 1) Décrivez le principe d'un régulateur PID (proportionnel, intégral et dérivé).
- 2) Étudiez en détail le principe de ce régulateur et réfléchissez comment vous allez l'implémenter.
- 3) Mettez en place un régulateur PID pour améliorer l'asservissement de votre système.

Question 15 : Filtrage

Afin d'améliorer la réponse du système, une amélioration du rapport signal sur bruit (S/B) des signaux provenant des capteurs peut être envisagée. Cette opération permet de réduire les bruits parasites, et pouvant être réalisée par un filtrage.

- 1) Décrivez donc le principe de cette méthode et mettez-la en pratique.
- 2) Quel(s) type(s) de filtre(s) devons nous utiliser ?
- 3) Expliquez le lien entre l'amélioration du rapport S/B et le gabarit du filtre à rajouter.

Question 16 : Bonus

Proposez d'autres améliorations au système étudié pendant ce projet.

Annexe : Simulations :

- **Eclairage et unités “Lux” :**

Tableau d'exemples de niveaux d'éclairage (en lux) en fonction des environnements :

Activité ou lieu concerné	Éclairement moyen
Sensibilité d'une caméra	0,001 lux
Nuit de pleine lune	0,5 lux
Rue de nuit bien éclairée	20 à 70 lux
Local de vie	100 à 200 lux
Appartement bien éclairé	200 à 400 lux
Local de travail	200 à 3 000 lux
Stade de nuit (suivant les différentes catégories : E1, E2, E3, E4, E5)	150 à 1 500 lux
Extérieur par ciel couvert	500 à 25 000 lux
Extérieur en plein soleil	50 000 à 100 000 lux

- **Photorésistance NSL-19M51 (extrait de la datasheet) :**



NSL-19M51
Plastic Encapsulated

Electrical Characteristics ($T_A=25^\circ\text{C}$, source at 2854°K)(2)

Symbol	Parameter	Min	Typ	Max.	Units	Test Conditions
R_L	Light Resistance	20		100	$K\Omega$	10 lux
			5		$K\Omega$	100 lux
R_D	Dark Resistance	20			$M\Omega$	10 sec after removal of light
λ_p	Peak spectral wavelength		550		nm	
Γ	Gamma		0.7			1 - 10 Lux
Γ	Gamma		0.7			10 - 100 Lux

Annexe : Tourelles :

- Tourelle 2 axes (PAN/TILT), modèle **BPT-KT** :

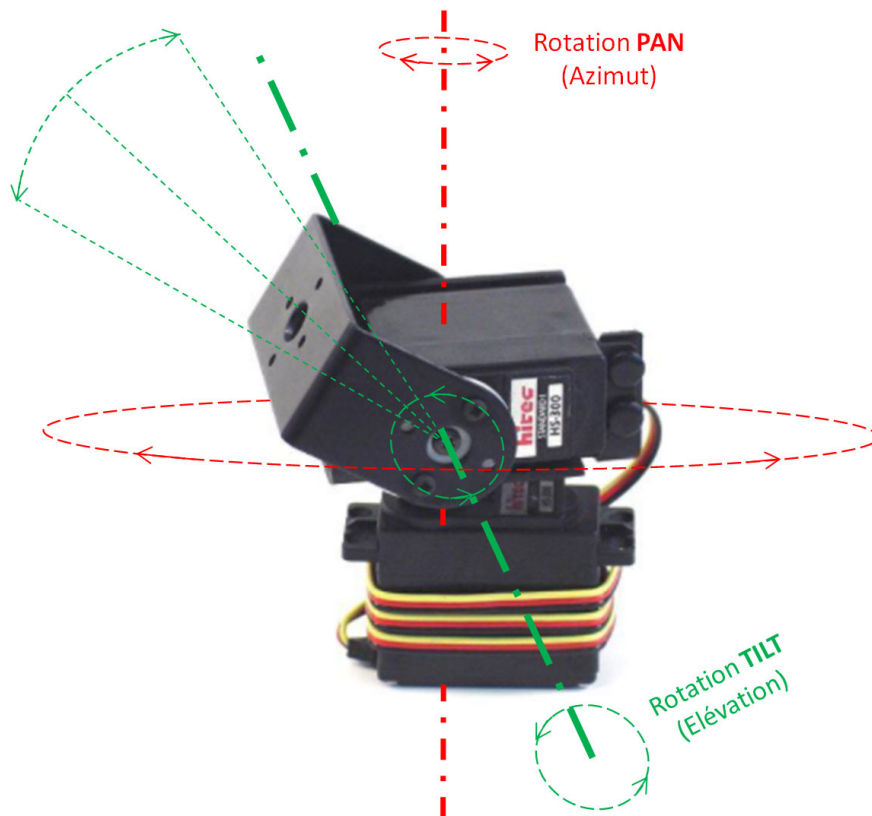


Figure (1) : Photographie de la tourelle Pan/Tilt utilisée (modèle **BPT-KT**)

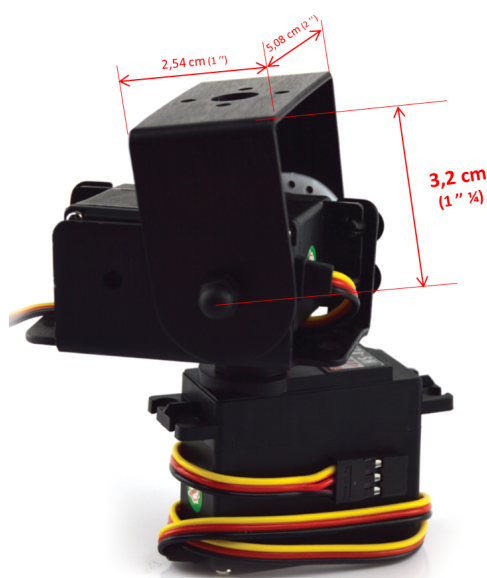


Figure (2) : distance entre 'axe tilt' et 'surface de fixation' de la Tourelle **BPT-KT**

- **Notice de montage de la Tourelle BPT-KT (si livrée non-montée, en kit) :**

Cf. lien URL suivant :

<http://www.lynxmotion.com/images/html/build16a.htm>

- **Couple d'un bras de levier :**

Dans système mécanique à bras de levier, le couple se calcule par la formule suivante :

$$\vec{C} = \vec{F} \times \vec{L}$$

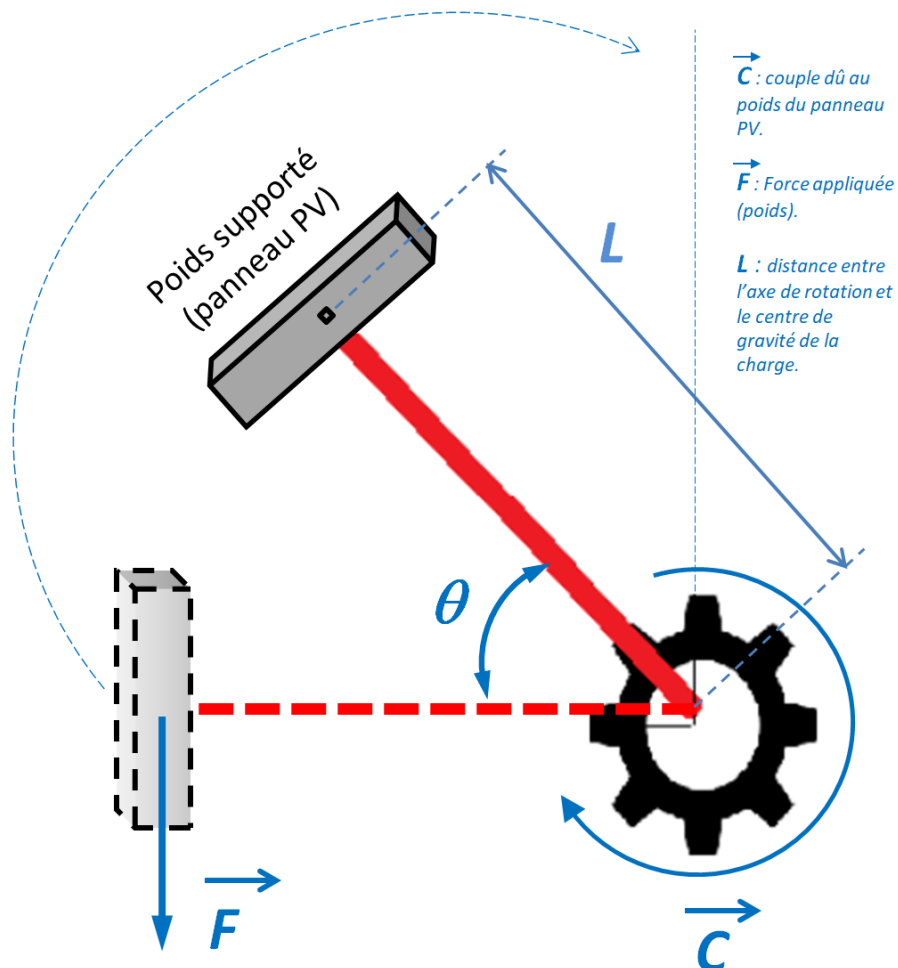


Figure (3) : couple d'un bras de levier ; schéma de principe et de représentation des forces/couples.

