

GARNIER Julien, GABILLET Thomas, CHEVRON Nathan – Groupe 3.6

Synthèse du 29 Septembre 2022 – pour l'équipe de R&D de la transmission Li-Fi

Thème 1 : Réalisation d'un démonstrateur « simplifié » d'un système de transmission Li-Fi

L'objectif est de développer un système de transmission de l'information par la lumière et de caractériser la dynamique de la source (rapidité de transfert). Ce document permet de mettre en place une transmission Li-Fi à l'aide d'une LED, commandée en courant et capable d'émettre un signal lumineux, ensuite reçu par une photodiode. La photodiode utilisée par l'entreprise est de type BPX65, sensible dans le rouge (800nm), qui convertit ce flux lumineux en électrons. Dans un premier temps, on caractérisera la LED et la photodiode en traçant leur caractéristique $i = f(u)$ par méthode manuelle et automatique. Ensuite, un montage simple de photodétection permettra de transmettre l'information par la lumière. Enfin, une étude du système de mesure en fréquences permettra de modéliser le système de mesure réel comme un filtre passe-bas en étudiant le montage « simple » et « transimpédance ». Les avantages de chacun des montages permettront de choisir la bande passante pour transmettre l'information à la fréquence de 40kHz.

“Nous attestons que ce travail est original, que nous citons en référence toutes les sources utilisées et qu'il ne comporte pas de plagiat”

Matériel utilisé : Photodiode de type BPX65, LED rouge, Résistances de protection R_p et R_{phd} , Oscilloscope numérique, ALI symétrique (type TL071), Multimètre numérique (type : Fluke45), Source de tension stabilisée (type : Philips PE1542).

Remarque : Les résultats expérimentaux sont réalisés à partir d'une LED rouge et d'une photodiode SFH206.

I. CARACTERISER UNE LED – EMETTEUR DE L'INFORMATION

1.1 Fonctionnement d'une diode

Une LED est une diode émettant de la lumière. Le flux lumineux émis transporte l'information. C'est un dipôle non linéaire tel que la LED est :

- passante, émission de lumière où $\Phi_e = ki$:
 $i > 0$ si $u > V_F$
- bloquée, pas de lumière :
 $i = 0$ si $u < V_F$
- avec V_F la tension de seuil.
- Pour la led rouge analysée $V_F = 2.2V$

Sa représentation est la suivante :

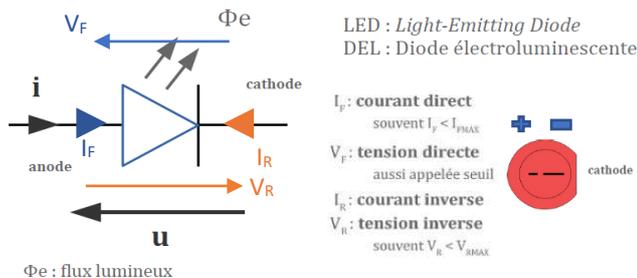


Figure 1 : Schéma d'une LED (Source : LEnsE)

On veillera à ce que $i_F < i_{Fmax} = 30mA$ et $V_R > V_{Rmax} = -4V$ d'après la documentation technique. On insère en série de la LED une résistance de protection pour ne pas endommager le composant :

$$R_p = \frac{V_{R MAX} - V_F}{I_{F MAX}} = \frac{4 - 2,2}{30 \cdot 10^{-3}} = 60\Omega$$

Soit dans la série E12 : $R_p = 100\Omega$

1.2 Détermination de la caractéristique courant-tension de la LED

Pour caractériser un dipôle, on trace sa caractéristique $i = f(u)$. Pour cela, pour différentes valeurs de tensions imposées par un générateur stabilisé en tension, on mesure à l'aide d'un voltmètre la tension aux bornes de la LED et le courant qui la traverse. Pour chaque couple de tension, courant on peut tracer la courbe $i = f(u)$.

Le montage est donc le suivant pour tracer la caractéristique par méthode manuelle :

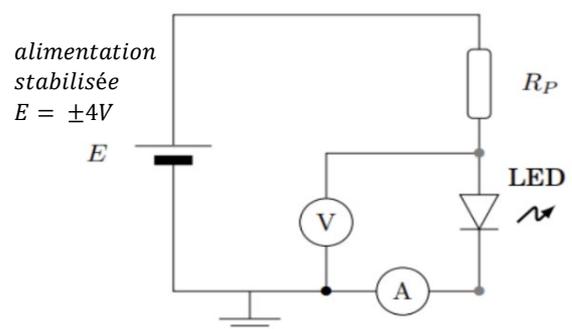


Figure 2 : Schéma de câblage pour la méthode manuelle et tracer la caractéristique de la LED. (Source : LEnsE)

La caractéristique de la LED rouge obtenue en prélevant plusieurs points de courant et tension est :

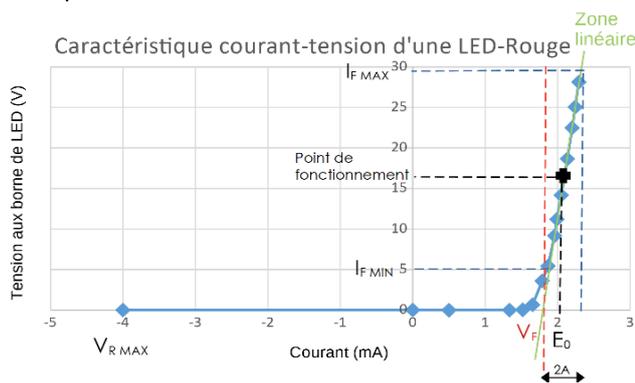


Figure 3 : Caractéristique courant-tension de la LED rouge

La caractéristique est celle d'une diode où le flux lumineux émis sera proportionnel au courant traversé par la LED. Pour une tension supérieure à V_f , la loi est exponentielle et proche d'une droite linéaire. Pour une tension inférieure à V_f , on vérifie que la diode est éteinte (pas de courant).

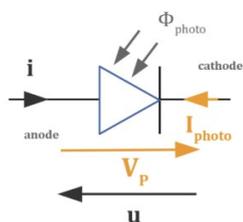
Le signal d'entrée à appliquer devra se situer au point de fonctionnement et ne pas dépasser la zone linéaire. En envoyant une sinusoïde $V_e(t) = E_0 + A \sin(\omega t)$, on s'assure qu'en sortie, on ait un signal sinusoïdal atténué, en se situant dans le domaine linéaire.

II. CARACTERISER LA PHOTODIODE

2.1 Fonctionnement d'une photodiode

Une photodiode est un dipôle non linéaire qui en réponse à un flux lumineux en entrée, convertit les photons en électrons et génère un courant électrique. On peut utiliser la photodiode comme capteur de lumière :

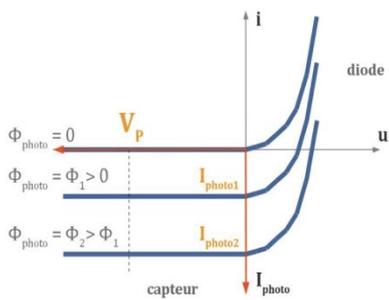
Sa représentation est la suivante :



I_{photo} est le photo-courant généré par la lumière

V_p est la tension de polarisation permettant de fixer le composant dans le domaine de capteur.

Figure 4 : Schéma d'une photodiode (source : LEnsE)



En mode capteur, en réponse à un flux lumineux, un courant I_{photo} est généré. En l'absence de lumière, le courant créé est nul.

Figure 5 : Caractéristique d'une photodiode (Source : LEnsE)

Comme pour la LED, il faut protéger le composant par une résistance R_{Phd} de protection :

La photodiode utilisée est de type BPX65. Les mesures présentées seront sensiblement similaires avec la photodiode SFH206.

Dans notre cas, on utilise une résistance de protection $R_{Phd} = 330\Omega$ après calcul.

2.2 Détermination de la caractéristique courant-tension de la photodiode

Pour caractériser la photodiode, on cherche à tracer la caractéristique $i = f(u)$ par méthode automatique. On utilise le mode d'affichage XY de l'oscilloscope. On applique à l'entrée sur le GBF une tension sinusoïdale de faible fréquence (10Hz).

Le montage pour la méthode automatique est le suivant :

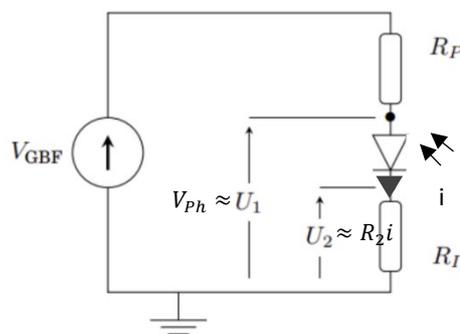


Figure 6 : Schéma de câblage de la mesure automatique pour tracer la caractéristique de la photodiode. (Source : LEnsE)

L'oscilloscope est capable uniquement d'acquérir des tensions. Le mode XY de l'oscilloscope permet de tracer la caractéristique $u_2=f(u_1)$ avec par exemple u_1 sur la voie 1 et u_2 sur la voie 2. En effet $u_2=R_i i$, donc mesurer le courant i revient à mesurer la tension u_2 à l'oscilloscope étant relié par le facteur R_i (résistance faible (typiquement $R_i = 10 \Omega \ll R_p$) pour ne pas perturber la mesure de courant). La tension u_1 est la tension de la photodiode comme R_i est faible.

Sur l'oscilloscope, on obtient en isolant la photodiode de la lumière, une tension u_2 dans le cadran « capteur » nulle, ou encore aucun photo-courant. A l'opposé, en éclairant la photodiode, la caractéristique est translatée vers le bas. La tension u_2 devient négative dans le cadran « capteur », donc un photo-courant est créé, proportionnel au flux de photon reçu par la photodiode.

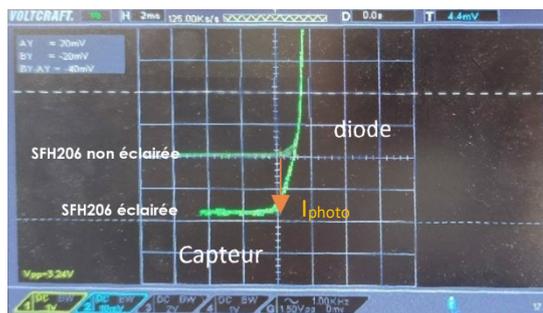


Figure 7 : Caractéristique de la photodiode SFH206 non éclairée à tension u_2 nulle et éclairée avec formation d'un photo-courant.

Lorsque la polarisation de la photodiode est inversée, la photodiode crée un photo-courant.

III. REALISATION D'UN ETAGE SIMPLE DE PHOTODETECTION

Pour réaliser un système émetteur-récepteur de lumière, on met en vis-à-vis une LED et une photodiode, ce qui constitue le montage Li-Fi. On fait clignoter la LED par une tension sinusoïdale de 10Hz appliquée en entrée par le GBF et d'amplitude $V_{PP} = 5V$ (basse-fréquence pour se situer dans la bande passante du filtre passe-bas étudié en IV). En face, la photodiode est alimentée par l'alimentation stabilisée autour d'une tension de polarisation de $V_p = -10V$. On observe le photo-courant en le convertissant en tension par la résistance R_{phd} . La tension est mesurée par l'oscilloscope. En appliquant en entrée une tension alternative, en sortie, on s'attend à un photo-courant sinusoïdale. Le montage est le suivant :

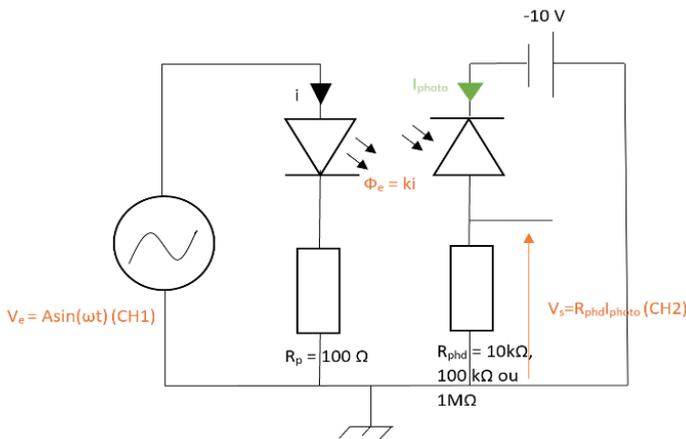


Figure 8 : Schéma de câblage du montage Li-Fi simplifié

La résistance R_{phd} sera étudiée pour 10kΩ, 100kΩ, 1MΩ pour caractériser la sensibilité et son influence sur la sortie du filtre en terme de gain. En appliquant une tension, de polarisation $V_p = -10V$, on se déplace dans la partie gauche de la caractéristique $i = f(u)$ de la photodiode (cadran capteur).

On mesure le signal émis par la LED et celui émis par la photodiode :

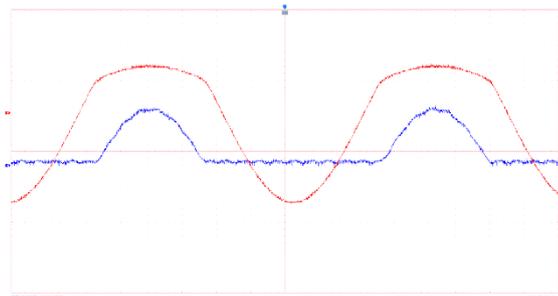


Figure 9 : V_e = tension du GBF : en rouge, V_s = tension aux bornes de la résistance R_{phd} : en bleu. Pour $R_p = 10k\Omega$

Plus la valeur de résistance est élevée, plus la sensibilité augmente car $V_s = R_{phd} * I_{photo}$. En multipliant par 10 la valeur de résistance, la valeur de tension est

multipliée par 10, à photo-courant constant (même flux lumineux). On peut donc contrôler le gain du filtre passe-bas, où lorsque la valeur de résistance augmente, la sensibilité et le gain augmente dans la bande passante.

IV. CARACTERISATION DU CIRCUIT EN FREQUENCE

Comment caractériser le circuit de photodétection en fréquence et mesurer sa bande-passante, afin de prédire la fréquence maximale de fonctionnement ?

2.1 Caractérisation du montage simple

a) Mesurer la bande passante à l'oscilloscope par balayage des fréquences :

Le montage simple est celui en figure 8. Pour étudier fréquemment le circuit, il est nécessaire de tracer l'allure du diagramme de Bode à l'oscilloscope. La fonction sweep du GBF permet de balayer les fréquences d'une fréquence minimale à maximale de manière logarithmique. On synchronise l'oscilloscope avec le signal « porte » de synchronisation du GBF, sur front montant. On applique un offset au signal d'entrée, pour éviter l'écrêtage, et rester dans le domaine linéaire de la diode autour du point de fonctionnement à environ $V_0 = 2V$. L'oscilloscope affiche alors l'allure du diagramme de Bode de type passe-bas du premier ordre :

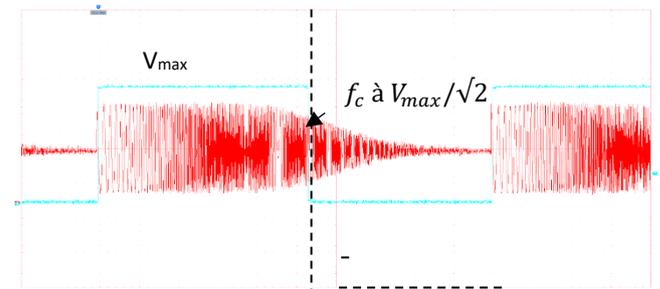


Figure 10 : Diagramme de Bode de type passe-bas à l'oscilloscope pour une résistance $R_p = 100k\Omega$ (LED rouge et photodiode SFH206) avec en bleu le signal du Trigger de synchronisation - $f_c = 9,5kHz$

Afin de mesurer la fréquence de coupure du filtre, on place la discontinuité du signal du trigger à $\frac{V_{Max\text{ bande passante}}}{\sqrt{2}}$ avec la fonction « MarkerFreq » afin de se situer à -3dB. La bande passante diminue lorsque que R_{phd} augmente.

b) Mesurer la bande passante à l'oscilloscope par mesure du temps de montée :

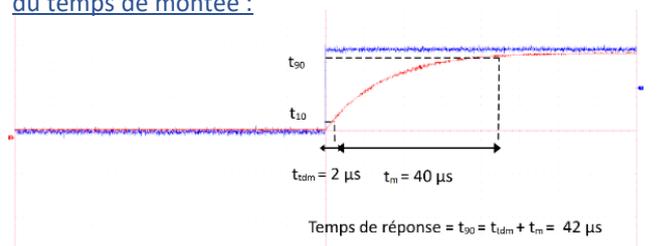


Figure 11 : Réponse de la photodiode SFH206 à un échelon : *le temps de réponse à 90% est de 42μs.

On peut déterminer le temps de réponse à 90% du filtre en envoyant un échelon de tension et en observant le temps pour lequel le signal de sortie atteint 90% de sa valeur finale. Le temps de montée t_m augmente avec R_{phd} .

On peut alors vérifier la valeur de la fréquence de coupure pour un filtre passe-bas du 1^{er} ordre, par la formule liant le temps de montée et la bande passante : $BP = \frac{0.35}{t_m}$.

Pour nos mesures avec la photodiode SFH 206, on obtient :

R_{phd}	t_m	$BP = 0.35 / t_m$	$BP = f_c \text{ oscillo}$
1M Ω	130 μ s	2,7kHz	1,9kHz
100k Ω	40 μ s	8,75kHz	9,5kHz
10k Ω	3 μ s	115kHz	95kHz

Les deux méthodes de mesures de la bande passante par le temps de montée ou à -3dB coïncident au vu de la rigueur de nos mesures. On constate que lorsque la résistance R_{phd} augmente, le gain augmente (III.), mais la bande passante diminue. Il faut donc un compromis.

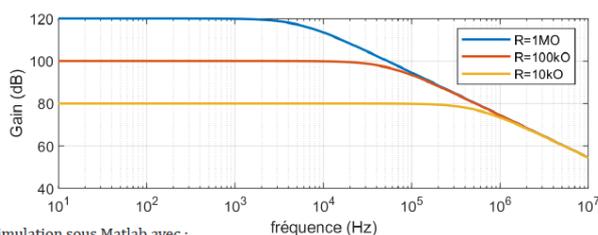


Figure 12 : Modélisation du montage simple par un filtre passe-bas d'ordre 1 (source : LEnsE)

Explication du phénomène passe-bas :

Cette bande passante limitée du montage « simple », est due à la capacité intrinsèque de la photodiode, qui en parallèle avec la capacité des câbles coaxiaux, donnent $C_{eq} = C_{ph} + C_{coaxiaux}$. De même, la résistance R_{phd} en parallèle avec le système de mesure (impédance d'entrée de l'oscilloscope (1M Ω)) donne une résistance équivalente $R_{eq} = \frac{R_{phd}R_{oscillo}}{R_{phd}+R_{oscillo}}$.

Or, pour un filtre passe-bas, la fréquence de coupure est :

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{eq} C_{eq}}$$

donc de R_{phd} réduit la bande passante mais d'autre part les effets capacitifs diminuent également la fréquence de coupure. Il ne faut donc pas choisir une résistance R_{phd} trop importante sous peine d'atténuer le gain en haute fréquence. Le système Li-Fi doit transmettre de l'information à 40kHz, donc il faut vérifier que la fréquence de coupure liée à R_{phd} soit supérieure à cette fréquence. Dans notre cas, pour le montage simple, seul 10k Ω convient. Le montage transimpédance qui suit, a pour objectif de diminuer ces effets capacitifs pour augmenter la bande passante.

2.2 Caractérisation du transimpédance

Le schéma de câblage est le suivant :

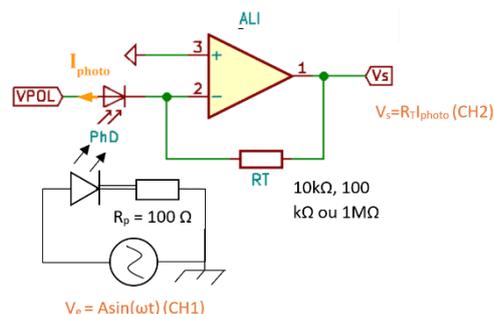


Figure 13 : Montage transimpédance

Le filtre se comporte comme un filtre passe-bas du 2nd ordre, caractérisé par l'apparition d'une résonance.

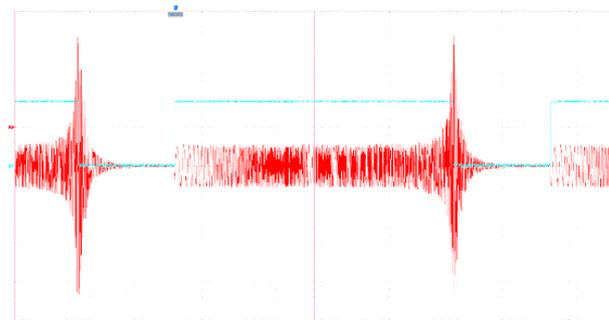


Figure 14 : Passe-bas du second ordre avec résonance : $R_T = 100k\Omega$, $f_c = 305kHz$: Bande passante plus étendue.

On a obtenu pour la photodiode SFH206 :

R_T	Fréquence propre $\approx BP$
1M Ω	102kHz
100k Ω	305kHz
10k Ω	1Mhz

Les avantages du montage sont l'augmentation de la bande passante, grâce à un système moins sensible à la capacité intrinsèque de la photodiode augmentant f_c .

Cependant, les désavantages sont l'apparition d'une résonance à f_0 pouvant abîmer des composants récepteurs par l'augmentation brutale du signal. De plus, le montage est plus coûteux et complexe avec la présence d'un ALI.

Conclusion :

La vitesse de transfert de l'information doit être autour de 40kHz, donc la dynamique de la source doit être rapide en envoyant une tension sinusoïdale sur l'émetteur LED à cette fréquence. Cependant, à 40kHz, on souhaite obtenir la tension de sortie en amplitude la plus grande, tout en ayant une bande passante satisfaisante. Il faudra donc choisir soit un montage simple avec une résistance R_{phd} faible pour se situer dans la bande passante ; cependant le désavantage est la réduction du gain. Ou bien choisir un montage transimpédance, avec $R_{phd} = 1M\Omega$ permettant d'augmenter le gain dans la bande passante tout en ayant une bande passante large d'environ 100kHz, mais le montage est plus complexe. On veillera à ne pas saturer l'ALI et à réduire l'amplitude en entrée.