

Thème 1 / Réaliser la transmission d'un signal audio analogique par la lumière

Précis :

Le document retrace les étapes à suivre pour mettre en place une transmission Li-Fi simple à l'aide d'une diode électroluminescente (DEL) et une photodiode. Les caractéristiques données seront celles d'un émetteur DEL du type Kingbright Blue 10mm et le récepteur une photodiode du type BPX65. Les données expérimentales présentées ont été obtenues en utilisant une DEL jaune et une photodiode SFH206.

Dans un premier temps, nous présentons les protocoles pour caractériser les dipôles, puis nous étudions les performances du montage de transmission en nous intéressant en particulier à la bande passante. Un modèle simple sera construit des observations expérimentales ouvrant sur une amélioration du montage. Les schémas des montages ont été tirés des documents mis à disposition sur le site du Lense.

► **1 / Réalisation d'un émetteur DEL :**

L'objectif de cette partie est de réaliser une émetteur DEL. Nous caractériserons la DEL statiquement pour déterminer les caractéristiques optimales du signal d'entrée du circuit.

1.a – Caractérisation de la diode électroluminescente :

La caractérisation d'un dipôle se réduit à mettre évidence la relation qu'il existe entre la tension à ses bornes et l'intensité du courant qu'il le traverse. La méthode choisie, ici, est une caractérisation manuelle.

Le schéma du montage (Figure 1) et les caractéristiques du matériel sont données ci-dessous. La manipulation consiste à relever la tension aux bornes de la DEL et l'intensité électrique pour différentes valeurs de tension du générateur.

Caractéristique du matériel¹

LED Kingbright Blue 10mm	$U_{DEL} = 3,3 \text{ V}$	$I_{DEL} = 30 \text{ mA}$
Source tension	$E_{min} = -5 \text{ V}$	$E_{max} = 5 \text{ V}$

La DEL utilisée est un dipôle basse puissance. Il est alors nécessaire de limiter le courant la traversant. Ainsi on intercale une résistance de protection R_p dans le montage.

Pour une intensité maximale de 30 mA et une source de tension $E = \pm 5 \text{ V}$, on obtient la valeur de R_p par application de la loi d'Ohm :

$$R_p = \frac{E_{max} - U_{DEL}}{I_{DEL}} = \frac{5 - 3,3}{0,03} \approx 60 \Omega$$

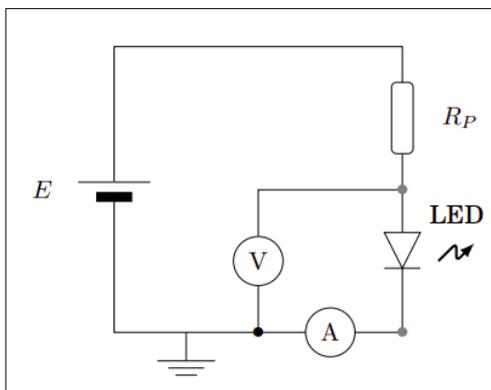


Figure 1 – Schéma du montage
Caractérisation statique d'une DEL.

Après différentes mesures, balayant des valeurs entre E_{min} et E_{max} , on trace l'intensité en fonction de la tension de la DEL (Figure 2). On constate alors que la DEL est un dipôle non linéaire polarisé. En effet la courbe n'est pas une droite et l'intensité s'annule pour des tensions négatives en convention récepteur.

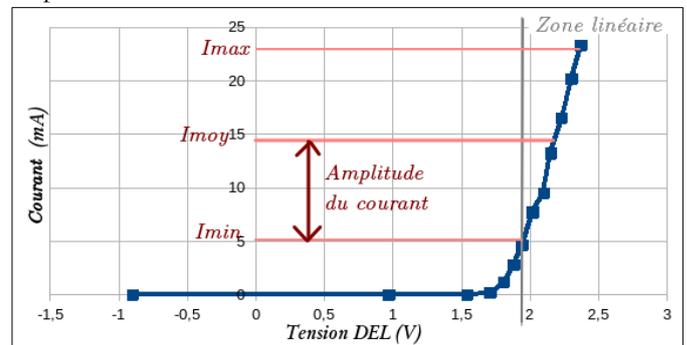


Figure 2 – Caractéristique statique d'une DEL jaune

1.b – Détermination du signal d'entrée :

On cherche à déterminer les caractéristiques du signal du générateur d'entrée, E pour obtenir les plus grandes variations du courant électrique traversant la DEL.

La DEL possède localement un comportement linéaire. Cette hypothèse assure qu'en envoyant un signal sinusoïdal en tension en entrée E le courant électrique sera une sinusoïde de même fréquence. On choisit donc E de la forme

$$E = E_0 + A \cdot \cos(2\pi \cdot \nu)$$

Pour déterminer les valeurs E_0 et A , on trouve le courant électrique moyen I_{moy} au centre de la zone linéaire, et la valeur de l'amplitude (Figure 2). On trace l'intensité du courant en fonction de la tension du générateur (Figure 3), par lecture graphique on accède aux grandeurs souhaitées.

Ainsi dans notre cas, on lit pour la composante continue $E_0 = 3,5 \text{ V}$ et l'amplitude $A = 1 \text{ V}$.

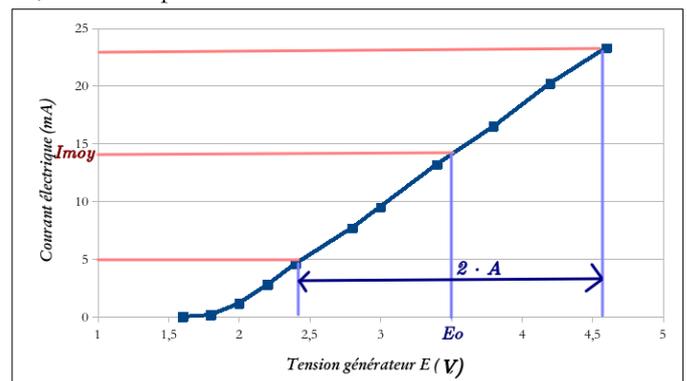


Figure 3 – Courant électrique du circuit en fonction de la tension du générateur

1 L'influence de la température a été négligée. Les caractéristiques des dipôles sont données pour un fonctionnement à 25°C
2 Les données du constructeur sont consultables en ligne : <https://docs.rs-online.com/f62a/0900766b8139d753.pdf>

► **2 / Étude du capteur et réalisation du montage :**

Nous déterminons désormais les caractéristiques électrique de la photodiode pour l'intégrer comme capteur de photon.

Pour mesurer automatiquement la caractéristique statique de la photodiode on met en place le circuit donné Figure 4. On envoie un signal lentement variable et l'on mesure la différence de potentielle au borne du dipôle U_1 et le courant dans le circuit.

Pour la même raison que pour la DEL, on intercale une résistance de protection R_p dans le montage. On ajoute une résistance R_I car la tension U_2 à ses bornes est linéairement relié à l'intensité du courant.

On veillera à respecter $R_I \ll R_p$ pour assurer une bonne mesure du courant. Dans notre cas d'étude nous avons utilisé $R_p = 100 \text{ k}\Omega$ et $R_I = 5\Omega$

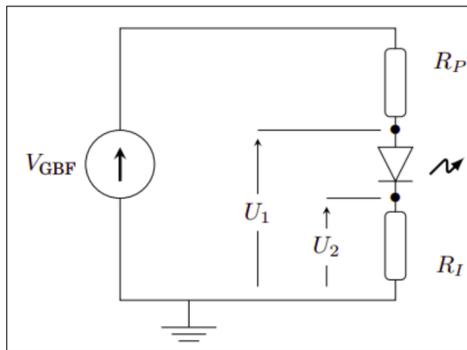


Figure 4 – Schéma du montage

► **3 / Mise en place du montage LiFi:**

Le schéma du montage est donné Figure 6. La photodiode est polarisée dans son sens d'émission de courant et on ajoute un générateur de courant continu dans la partie réception du montage.

On mesure la tension de sortie V_s mesurée est relié à l'intensité de la photodiode par la relation. Pour amplifier le signal il apparaît donc intéressant d'utiliser une résistance R_{PHD} élevée.

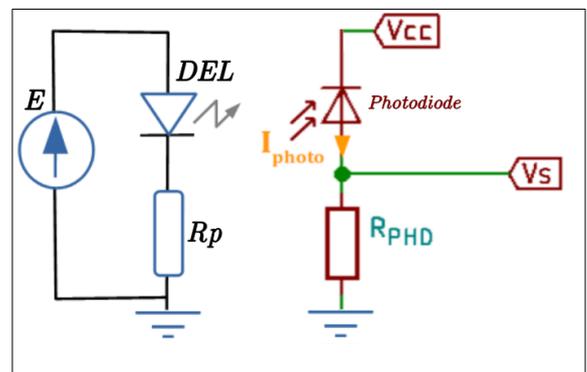


Figure 6 – Schéma du montage de transmission Li-Fi

► **4 / Étude des performances du système:**

On souhaite déterminer la plage de fréquence de fonctionnement du système. Nous présentons ainsi deux méthodes pour déterminer la bande passante du système. Il est important de veiller à relier toutes les masses entre elles pour assurer l'unicité de la référence des potentiels.

4.a – 1^{er} méthode : Étude fréquentielle du système

On règle de générateur basses fréquences (GBF) sur un balayage logarithmique pour des tensions allant de 1 Hz à 100kHz. On synchronise l'oscilloscope au GBF avec la sortie Sync, qui fournit un signal carré de même période que le

Caractérisation statique d'une photodiode

On trace à l'oscilloscope en mode XY U_2 en fonction de U_1 . On obtient alors la caractéristique statique du dipôle (Figure 5).

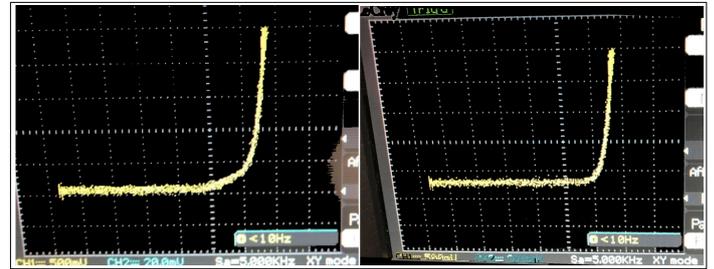


Figure 5 – Caractéristique statique de la photodiode SFH206, à gauche la photodiode est éclairée par une lampe de bureau, à droite par l'éclairage ambiant

On constate que la photodiode est non linéaire polarisé. Lorsque la polarisation est inversé, pour une convention récepteur, la photodiode crée un courant. L'intensité de ce courant dépend de l'intensité lumineuse, c'est à dire la quantité de photon, perçu par la photodiode. Ainsi la photodiode est capable de transformer un signal lumineux en signal électrique par un courant électrique.

balayage et l'on règle l'oscilloscope pour visualiser la réponse du système (Figure 7).

La courbe bleue correspond au signal synchronisé du générateur. Le front montant correspond au démarrage du balayage en fréquence, le front descendant suivant nous renseigne sur la fréquence balayée. La courbe jaune correspond au signal de sortie du système. Le balayage logarithmique permet d'obtenir l'allure de la réponse en fréquence du système.

Le filtre se comporte comme un filtre passe-bas car seuls les hautes fréquences sont atténuées. C'est pourquoi nous cherchons à déterminer la fréquence de coupure.

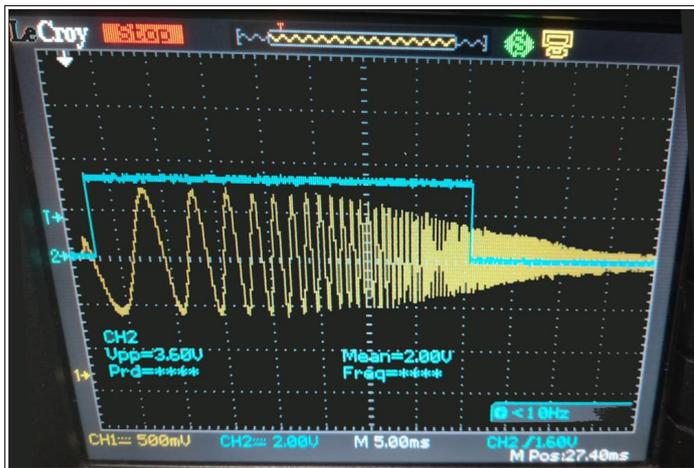


Figure 7 – Mesure à l'oscilloscope de la réponse du système à un balayage fréquentielle logarithmique. ($R_{phd} = 1 \text{ M}\Omega$)

Nous déterminons, dans un premier temps, grossièrement³ la fréquence de coupure à l'aide du front descendant du signal synchronisé. On envoie alors en entrée une tension sinusoïdale de fréquence dans la bande passante pour relever l'amplitude maximale H_{max} . On augmente alors progressivement la fréquence du GBF, la fréquence de coupure à -3dB est obtenu lorsque l'amplitude vaut

$$H_{max} / \sqrt{2} .$$

Par exemple pour une résistance $R_{phd} = 1 \text{ M}\Omega$, on conjecture une fréquence de coupure proche de 3 kHz. L'amplitude maximale mesurée dans la bande passante vaut

$$H_{max} = 1,36 \text{ V} .$$

$$H_{max} / \sqrt{2} = 0,96 \text{ V} \text{ pour une fréquence } \nu_c = 2,10 \text{ kHz} .$$

4.b – 2^{ème} méthode : Réponse du système à un échelon

Une autre approche pour étudier les performances du système est de le soumettre à un échelon de tension. La réponse temporelle (Figure 8) ne présente aucun dépasse et la pente à l'origine est non-nulle. Dès lors la modélisation la plus simple est le filtre linéaire du premier ordre. La théorie des systèmes linéaires continus invariants donne la relation entre la fréquence de coupure et le temps de montée de 10 % à 90 % de la valeur finale⁴ : $\nu_c = 0,35 / \tau_{montée}$

On relève expérimentalement $\tau_{montée} = 170 \mu s$, on conclut que $\nu_c = 2,06 \text{ kHz}$. On constate que les valeurs obtenues par les deux méthodes sont identiques.

Finalement les fréquences supérieur à 2 kHz du signal transmis seront atténuées. La même démarche réaliser pour

des résistances plus faibles laisse penser que la fréquence de coupure est inversement proportionnelle à la résistance R_{phd} . Dans la suite nous proposons une modélisation du circuit de photodétection et du système de mesure.

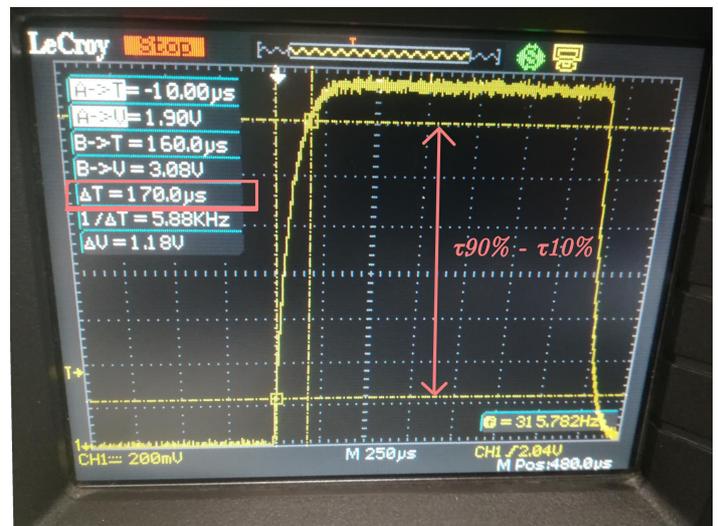


Figure 8 – Réponse à un échelon de tension du système ($R_{phd} = 1 \text{ M}\Omega$)

3 On montre dans la suite que le système est assimilable à filtre linéaire du premier ordre. On cherche alors la fréquence à l'intersection des deux asymptotes.

4 Une démonstration (en anglais) est donnée au lien suivant : https://en.wikipedia.org/wiki/Rise_time#One-stage_low-pass_RC_network

► 5 / Modélisation réelle du circuit de photodétection:

On ramène l'étude expérimentale à l'étude d'un filtre RC passe-bas du premier ordre. Aussi on modélise les effets capacitifs de la photodiode et du système de mesure (oscilloscope, câble coaxial...) par l'ajout de condensateurs dans le montage. On prend en compte de plus la résistance d'entrée de l'oscilloscope. Le schéma du montage est donné ci-contre (Figure 9).

On obtient alors la fonction de transfert

$$\frac{V_s}{I_{phd}} = \frac{1}{1 + j R_{eq} C_{eq} \omega}$$

où $R_{eq} = \frac{R_{phd} R_e}{R_{phd} + R_e}$ et $C_{eq} = C_{phd} + C_e$.

La fréquence de coupure du système vaut

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

En ordre de grandeur, le constructeur de la photodiode donne une capacité maximale⁵ de 3,5 pF lorsque celle-ci est soumise à une tension de 20V.

Pour améliorer la fréquence de coupure, on peut désormais chercher à réduire la valeur de la capacité. Par exemple l'emploi d'un montage suiveur avant le système de mesure supprime son influence sur la bande passante.

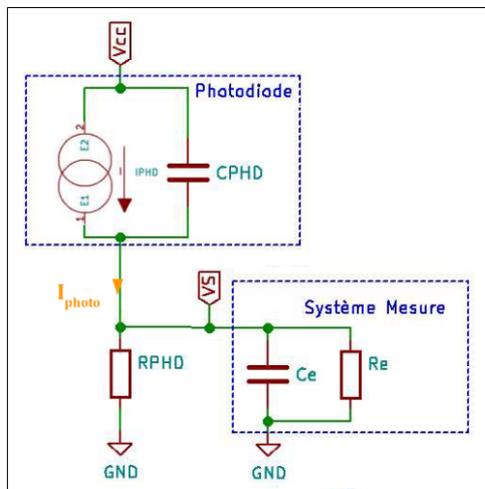


Figure 9 – Schéma du modèle de photodétection

⁵ Les données constructeurs sont consultables : <https://docs.rs-online.com/078a/0900766b814f49b8.pdf>