

○ LIFI : La communication sans fil par la lumière visible

ABIDI AYMEN



Sommaire:

- ◎ Problématique
- ◎ Historique et applications possibles
- ◎ Mise en évidence de la méthode de transmission
- ◎ Etude de système de communication :
 - 1 : Transmission
 - 2 : Réception
- ◎ Simulation de propagation
- ◎ Simulation de taux d'erreur
- ◎ Conclusion

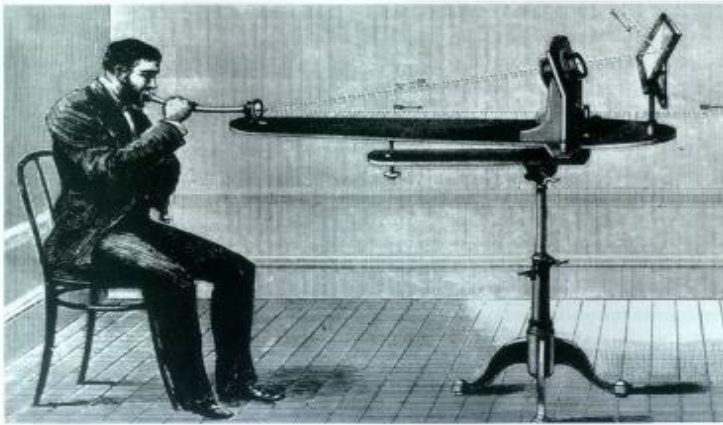


Problématique

Concevoir un prototype pour étudier l'utilité dans le monde réel de l'utilisation de la lumière dans la communication numérique.

Historique

- © 1867 : Première utilisation du code Morse
- © 1880 : Alexander Graham Bell présente le « Photophone »



(a) Émetteur



(b) Récepteur

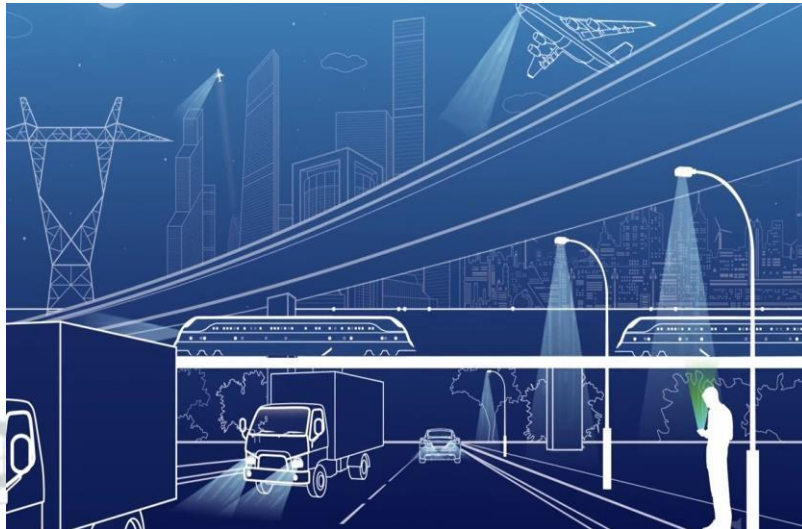
- © 1962 : Apparition des premières diodes LED
- © 1976 : Première utilisation des diodes LED dans les fibres optique pour la transmission des informations
- © 2011 : invention du premier système Li-Fi (Fidélité Lumineuse) capable d'une communication à une haute vitesse

Applications Possibles :



Avions connectés

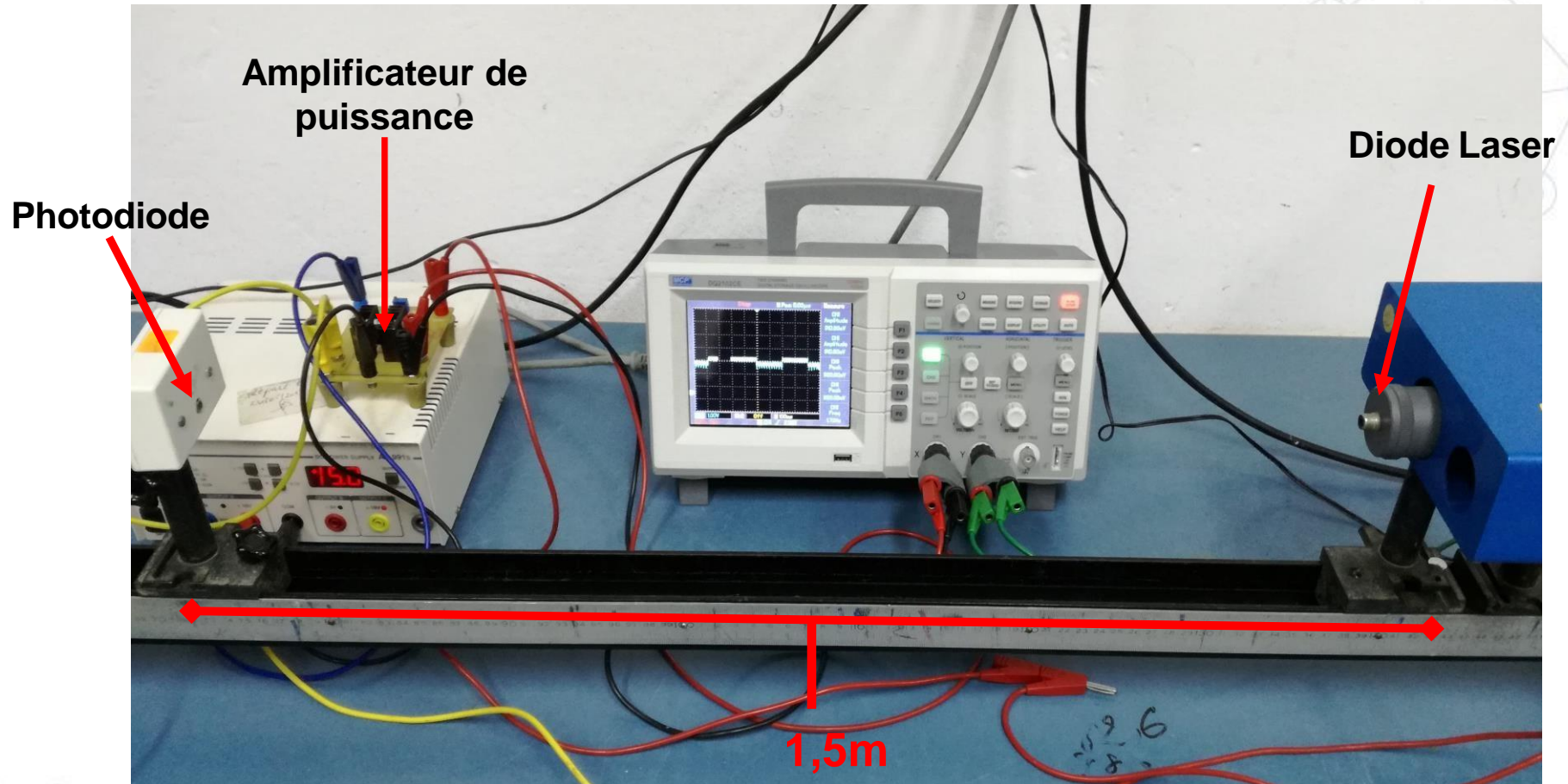
Voitures Connectées



Hôpitaux connectés



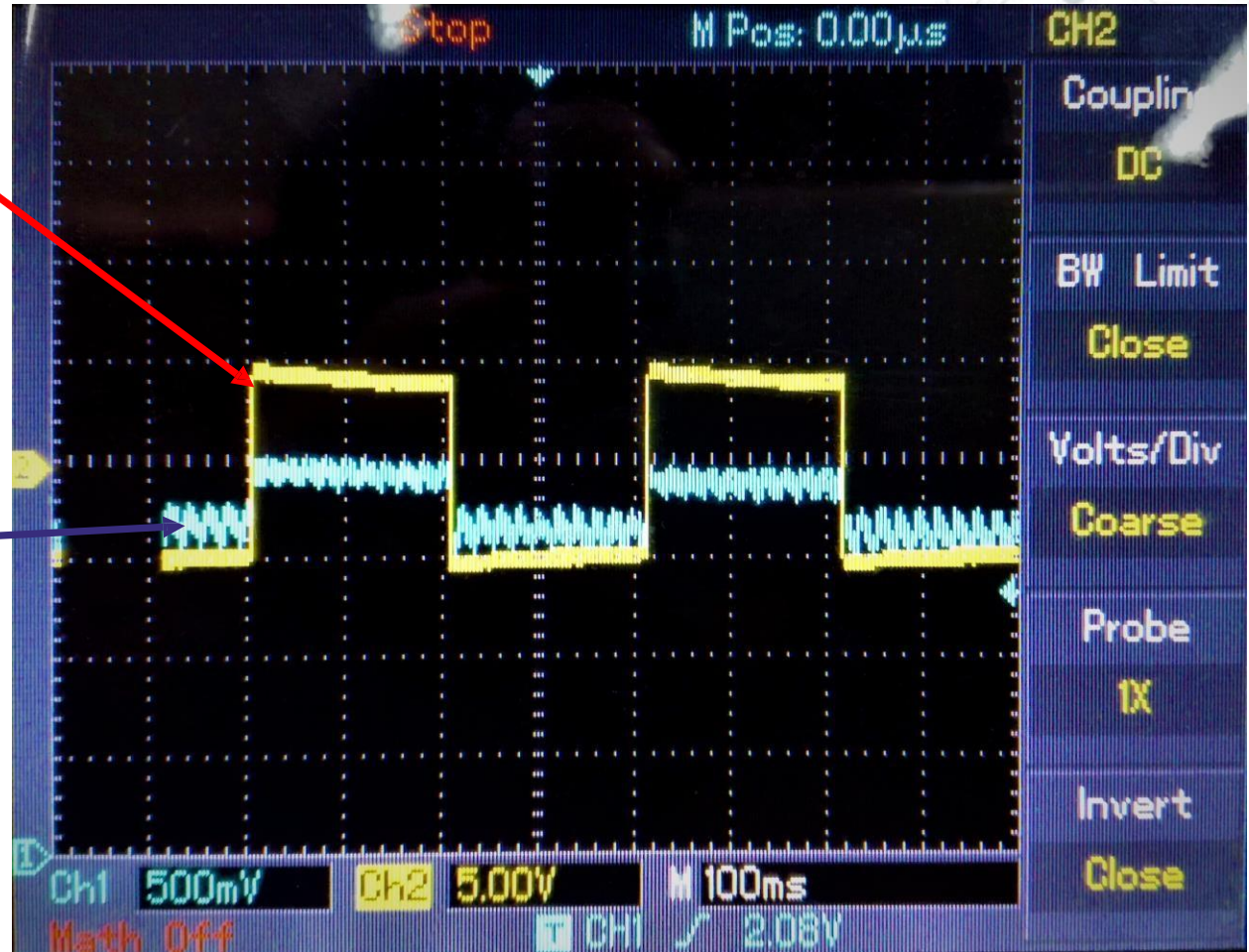
Expérience de mise en évidence



Résultat de l'expérience

Signal électrique transmis

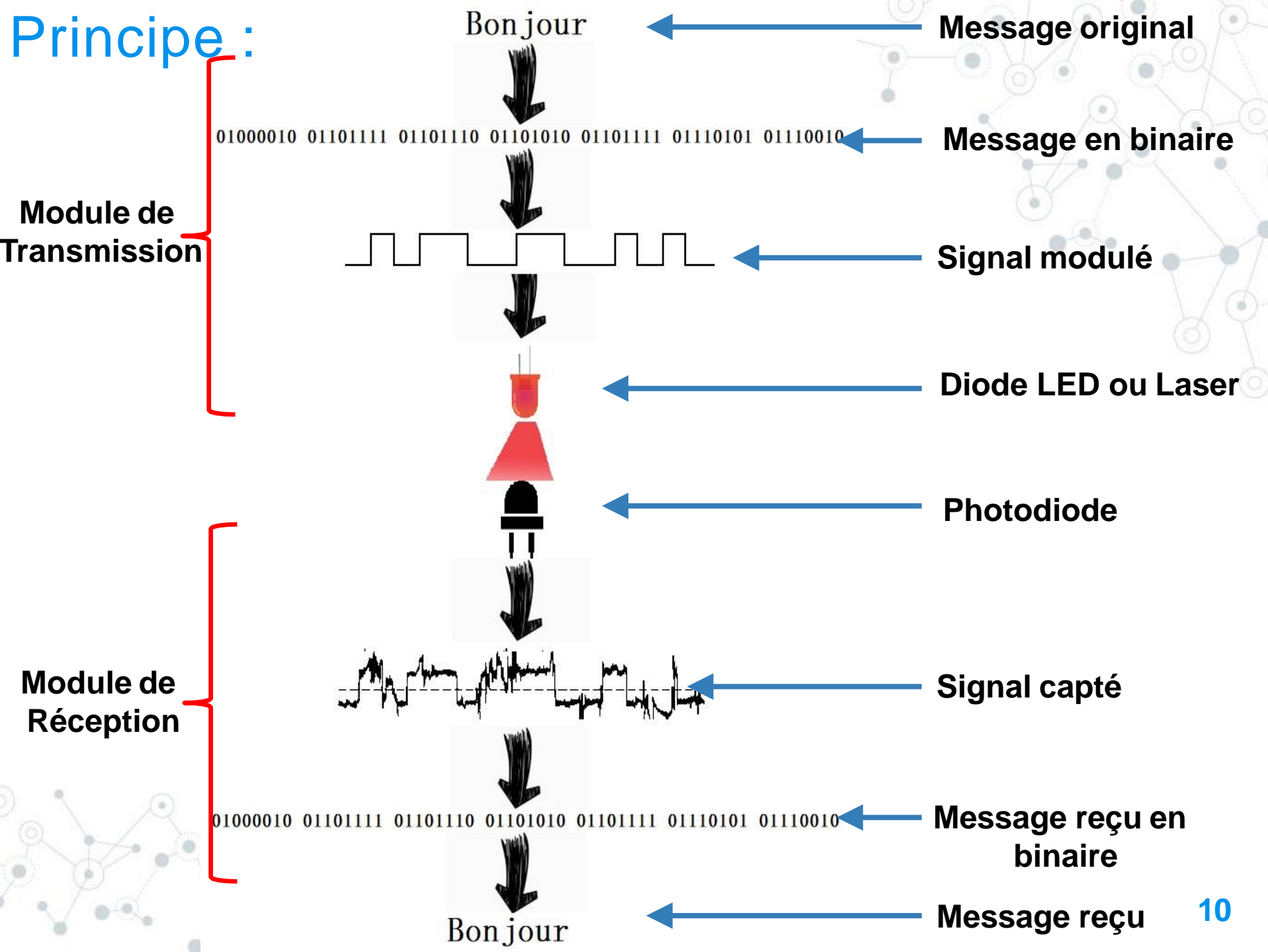
Signal électrique récupéré



Observations

- ◎ Le signal reçu par la photodiode suit le signal envoyé par le GBF par le biais du laser avec une certaine atténuation.
- ◎ Possibilité de l'envoi des informations en formes des bits 0 et 1 par modulation d'amplitude du signal envoyée au laser :

C'est la modulation OOK : ON-OFF-KEYING



Matériel utilisé pour le prototype

◎ Ordinateur

◎ Module de l'émission :

- Arduino UNO
- 2 diodes LED
- 2 diodes Laser
- 2 résistances ($R1 = 150 \Omega$)
- Des câbles

◎ Module de la réception :

- Arduino Méga
- 2 photodiodes (BPW21R)
- 2 résistances ($R1 = 100 \Omega$)
- Des câbles

Matériel utilisé pour le prototype

La diode LED

Equation de la diode idéale

$$I_d = I_f \left(e^{\frac{q \cdot V_d}{k \cdot T}} - 1 \right) \quad \text{où :}$$

- I_f est le courant de fuite
- q la charge de l'électron = $1,6E-19C$
- k constante de Boltzman = $1,38E-23 J/K$
- T température absolue (en degré Kelvin)

Pour éviter d'endommager la diode on limite l'intensité de couranta 20mA

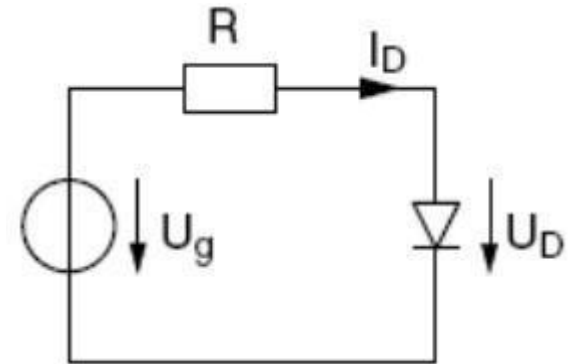
La Arduino délivre une tension : 5V

La tension seuil pour une diode Bleu est 2,7V

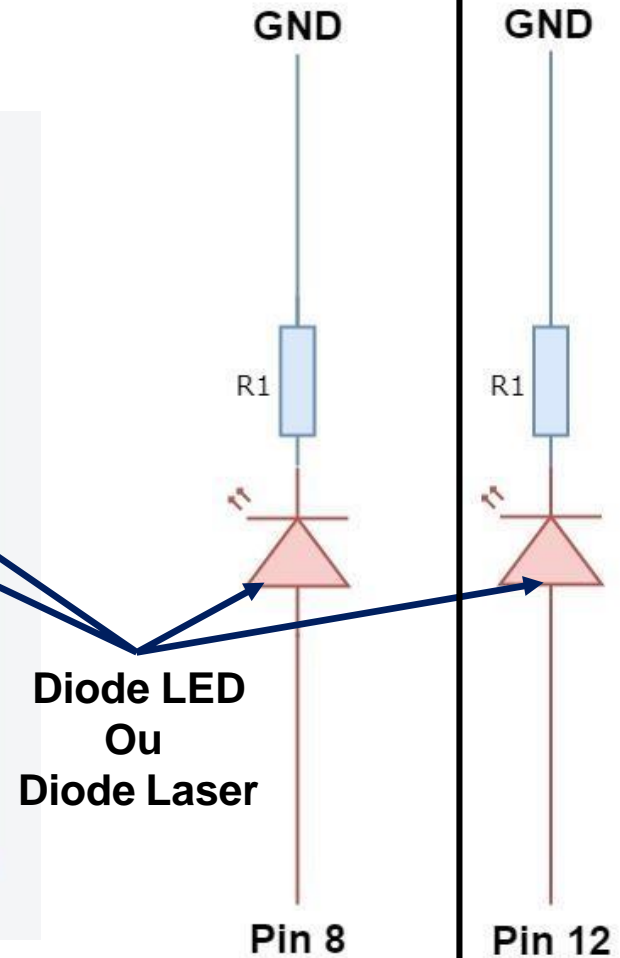
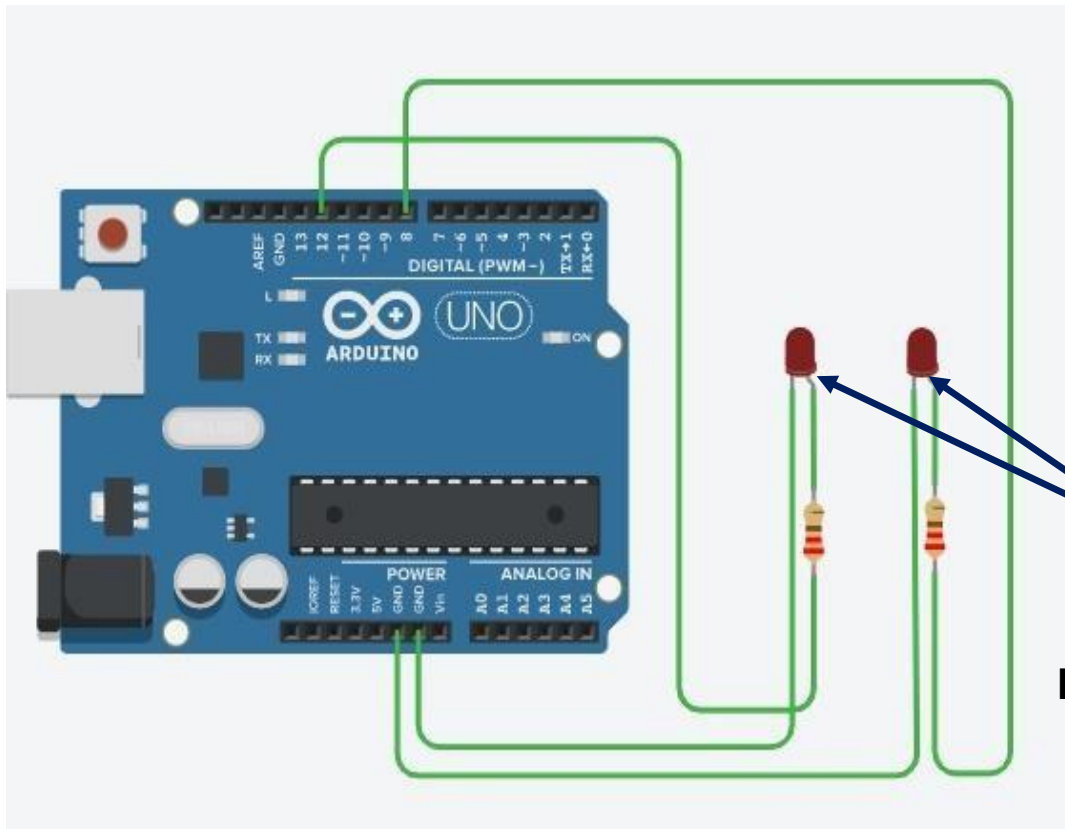
D'après la loi des mailles : $U_g = U_D + U_R = R * I_D + U_D$

Ainsi
$$R = \frac{U_g - U_D}{I}$$

Donc une résistance **R = 150 Ω** est bien appropriée pour notre circuit



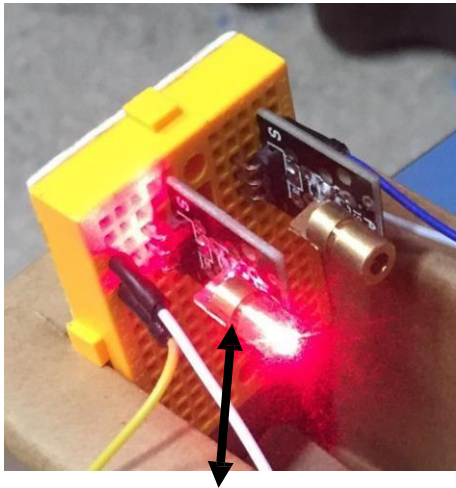
Circuit de L'Émetteur



Emission de l'information

Synchronisation

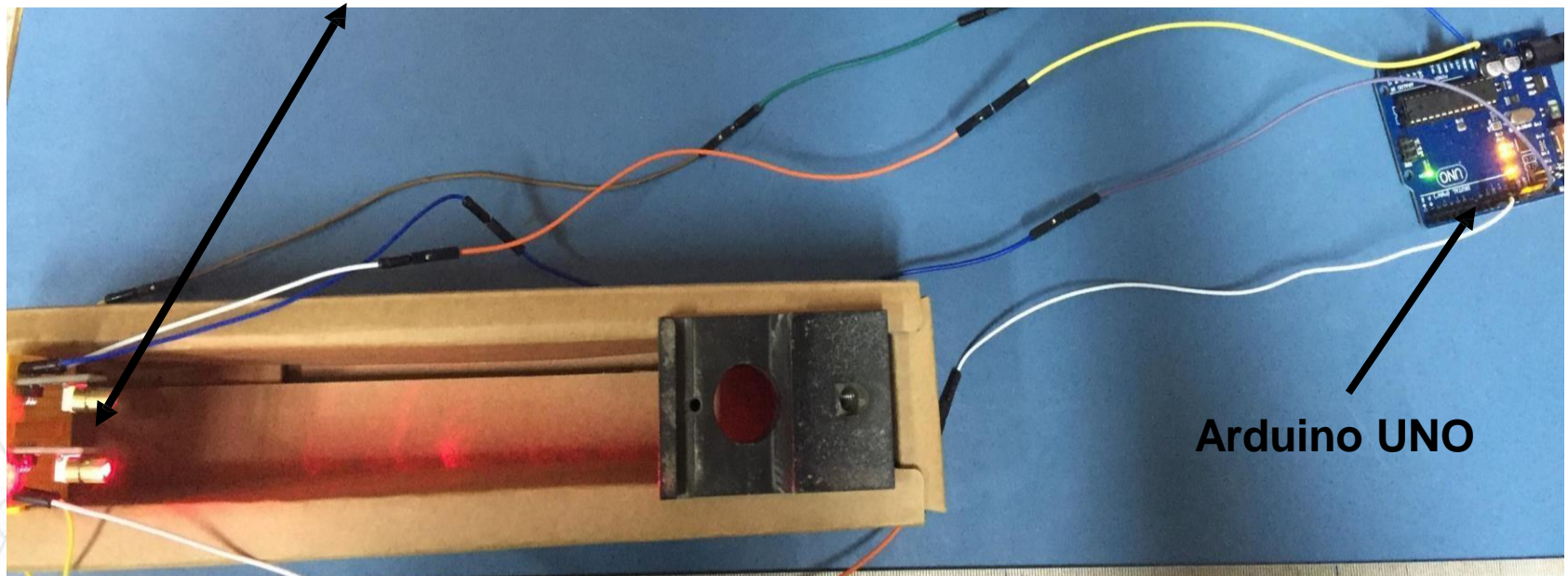
Circuit de L'Émetteur



Diodes Laser



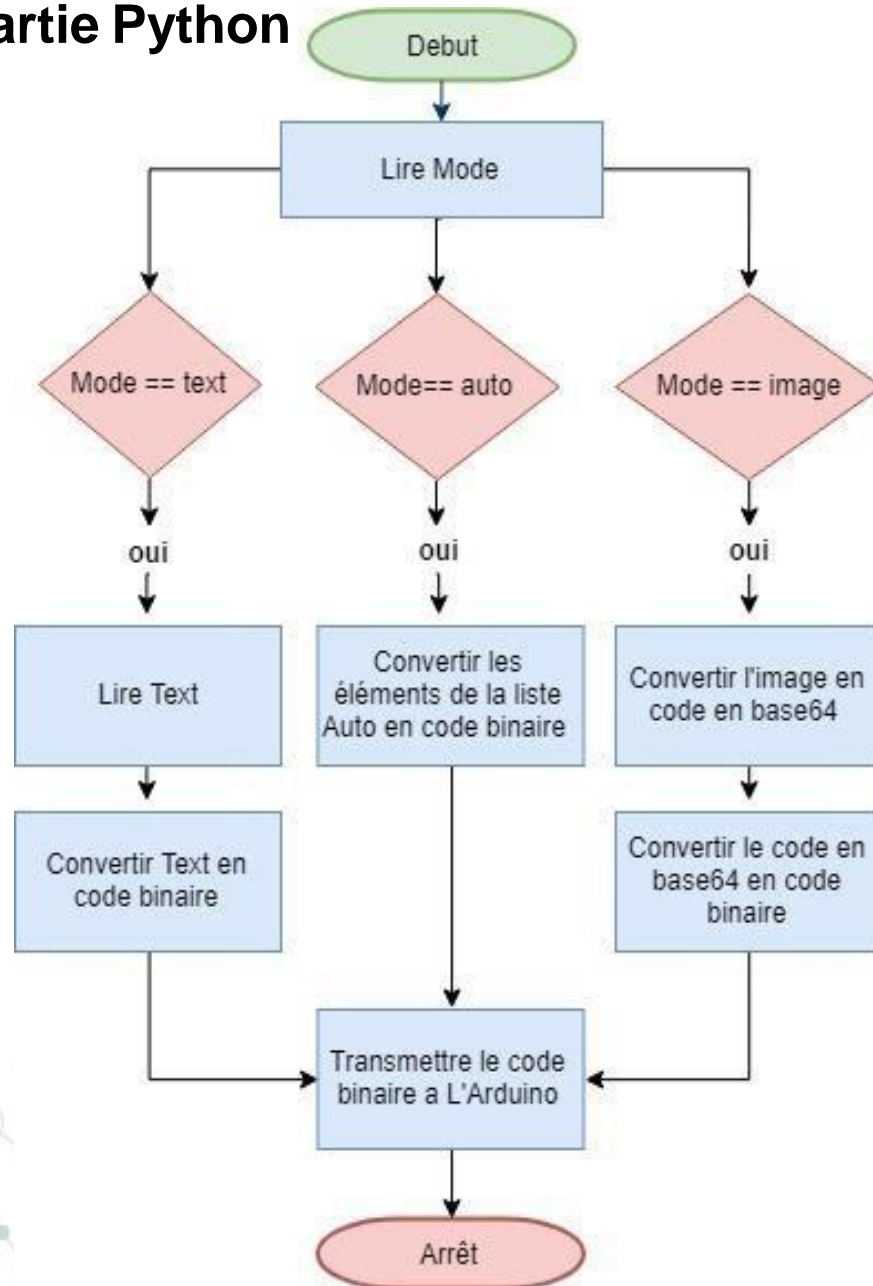
Diodes LED



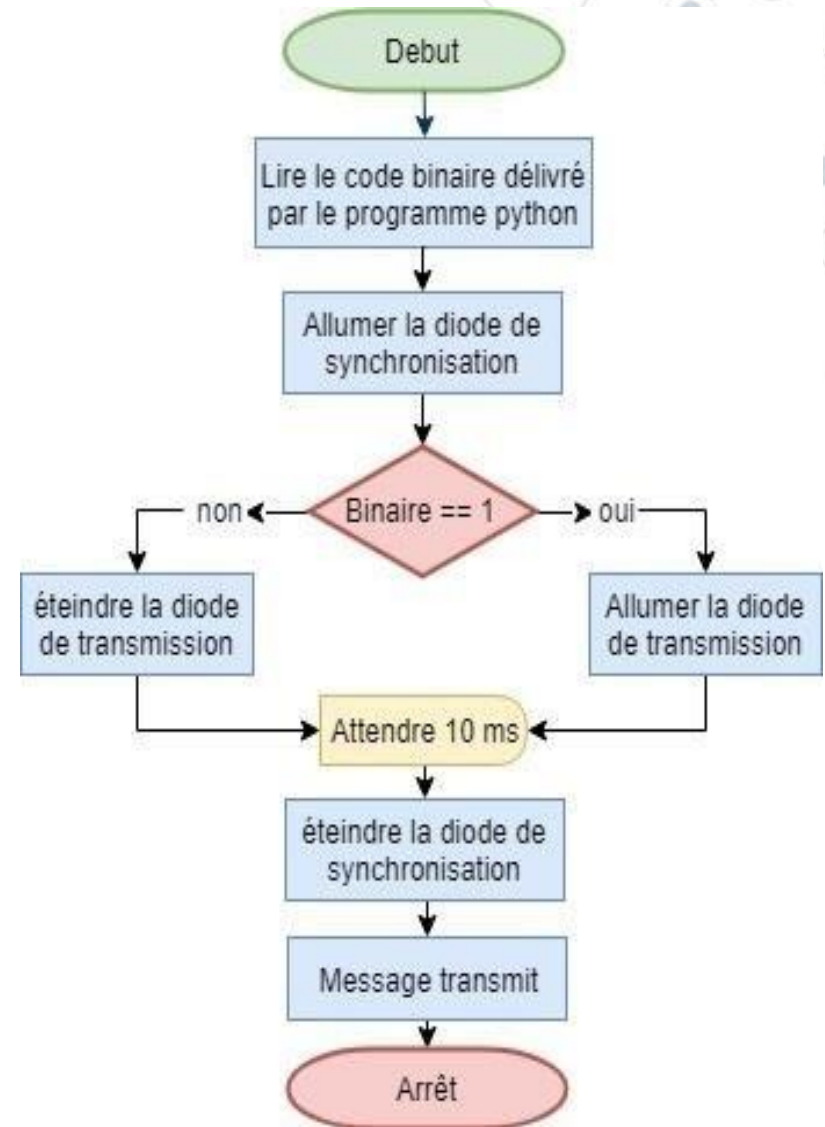
Arduino UNO

Algorithme de l'émission :

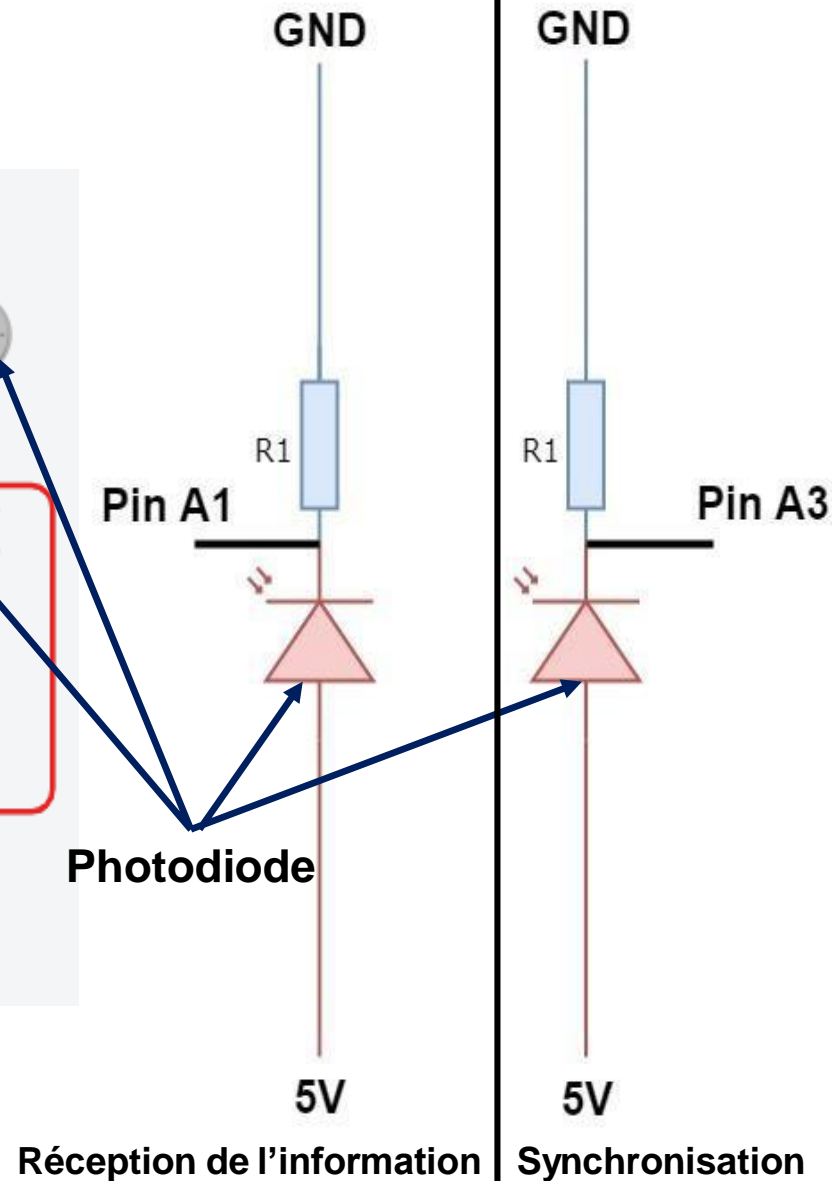
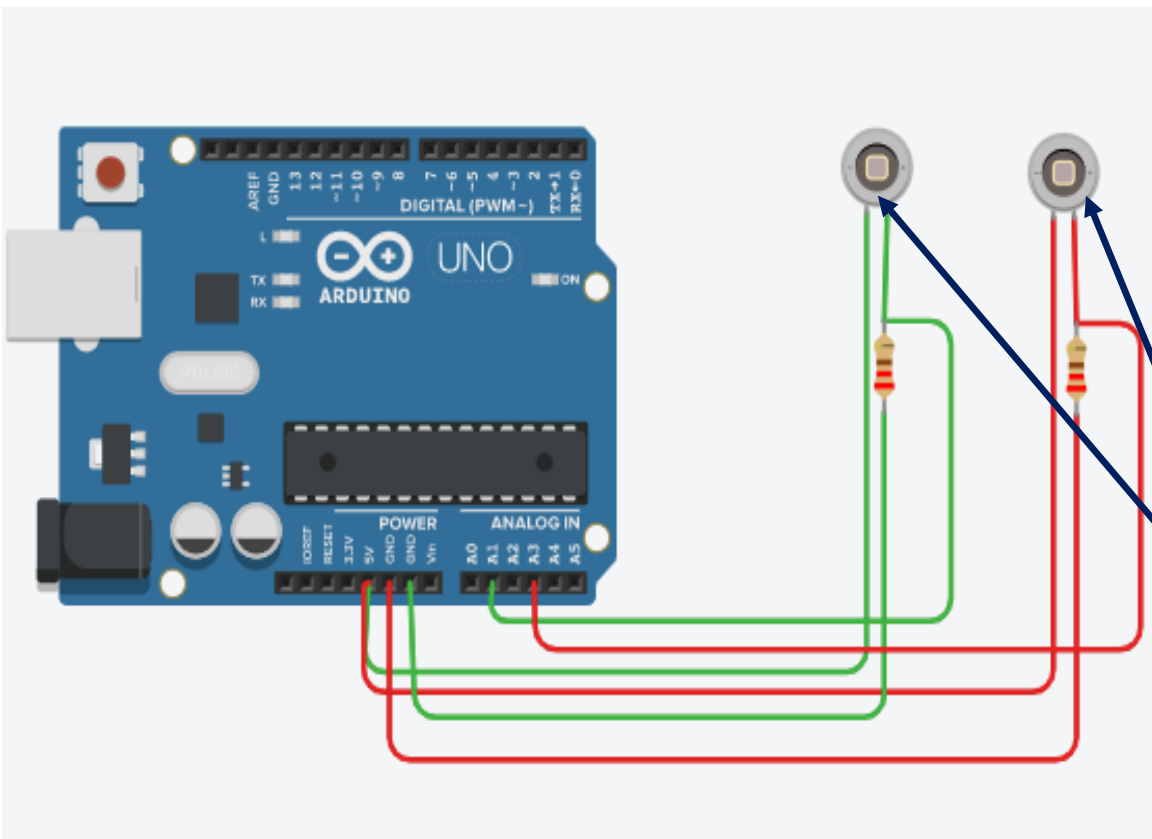
Partie Python



Partie Arduino



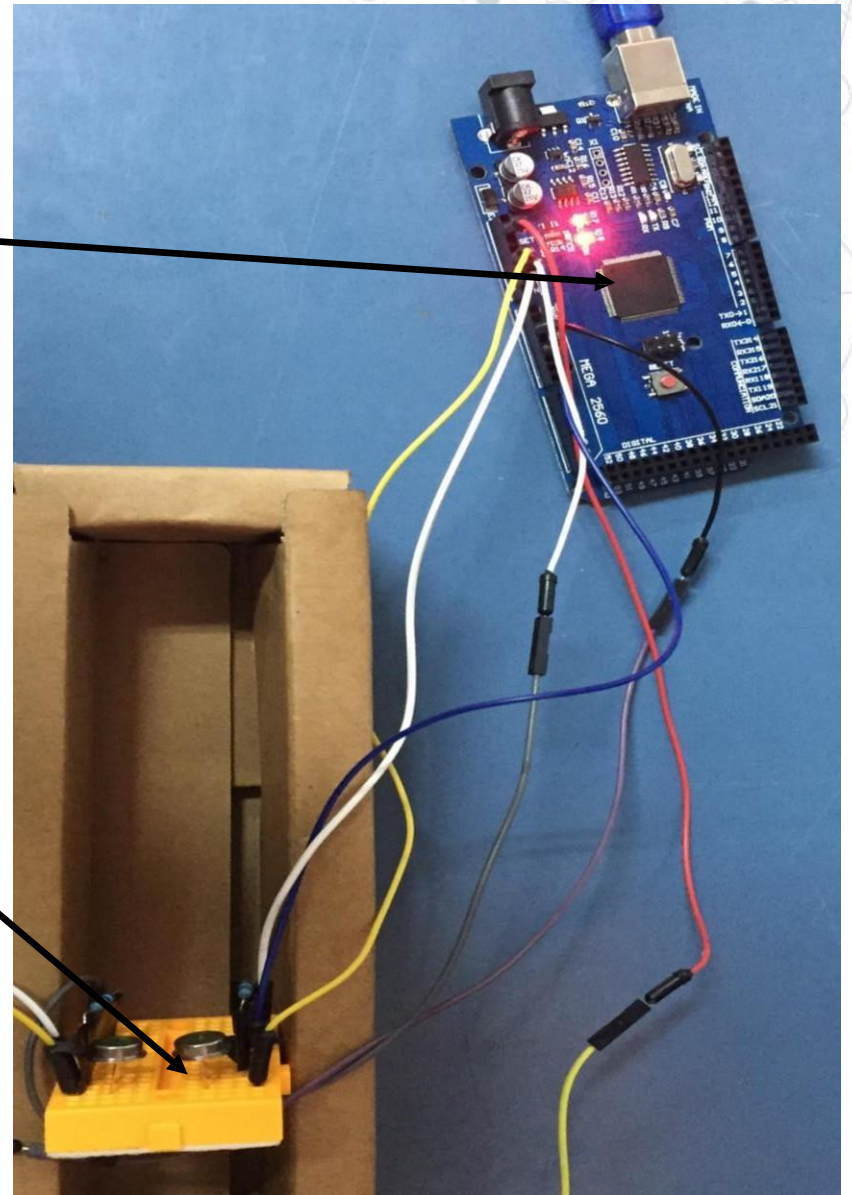
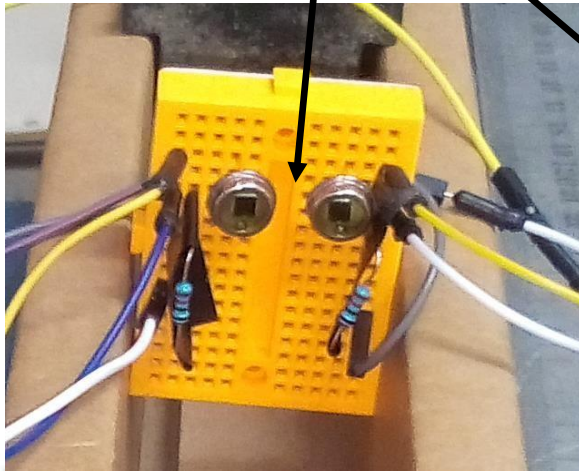
Circuit de Réception



Circuit de Réception

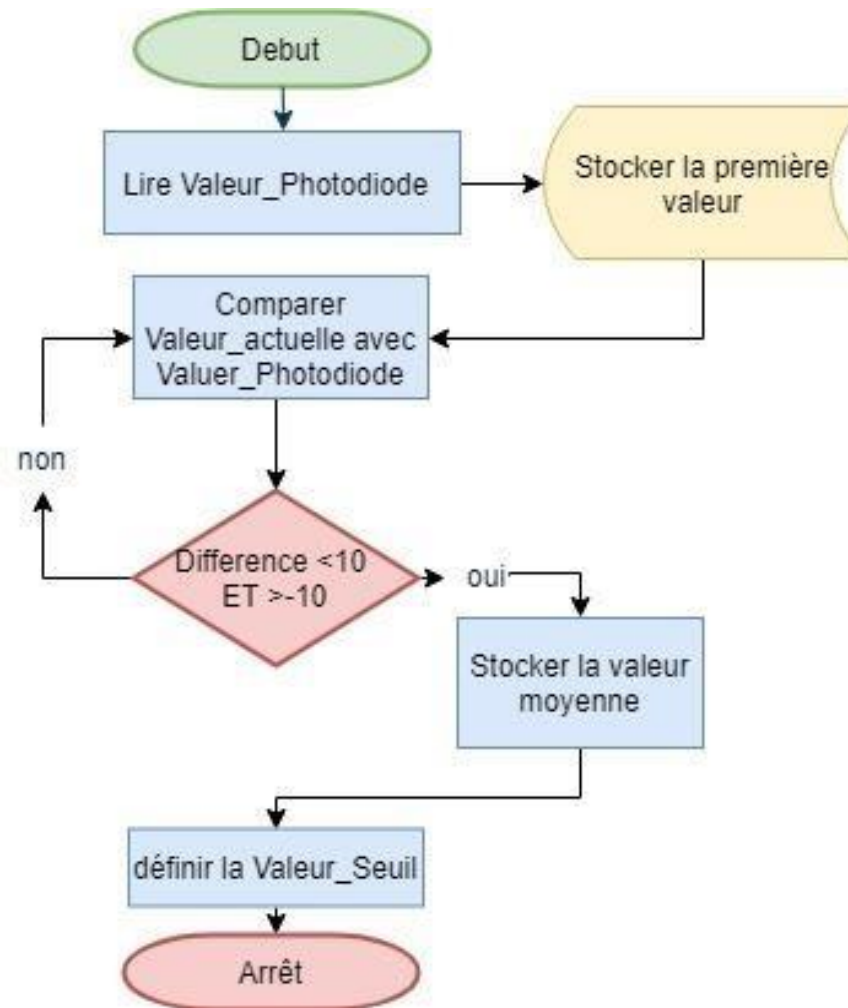
Arduino MEGA

Les photodiodes



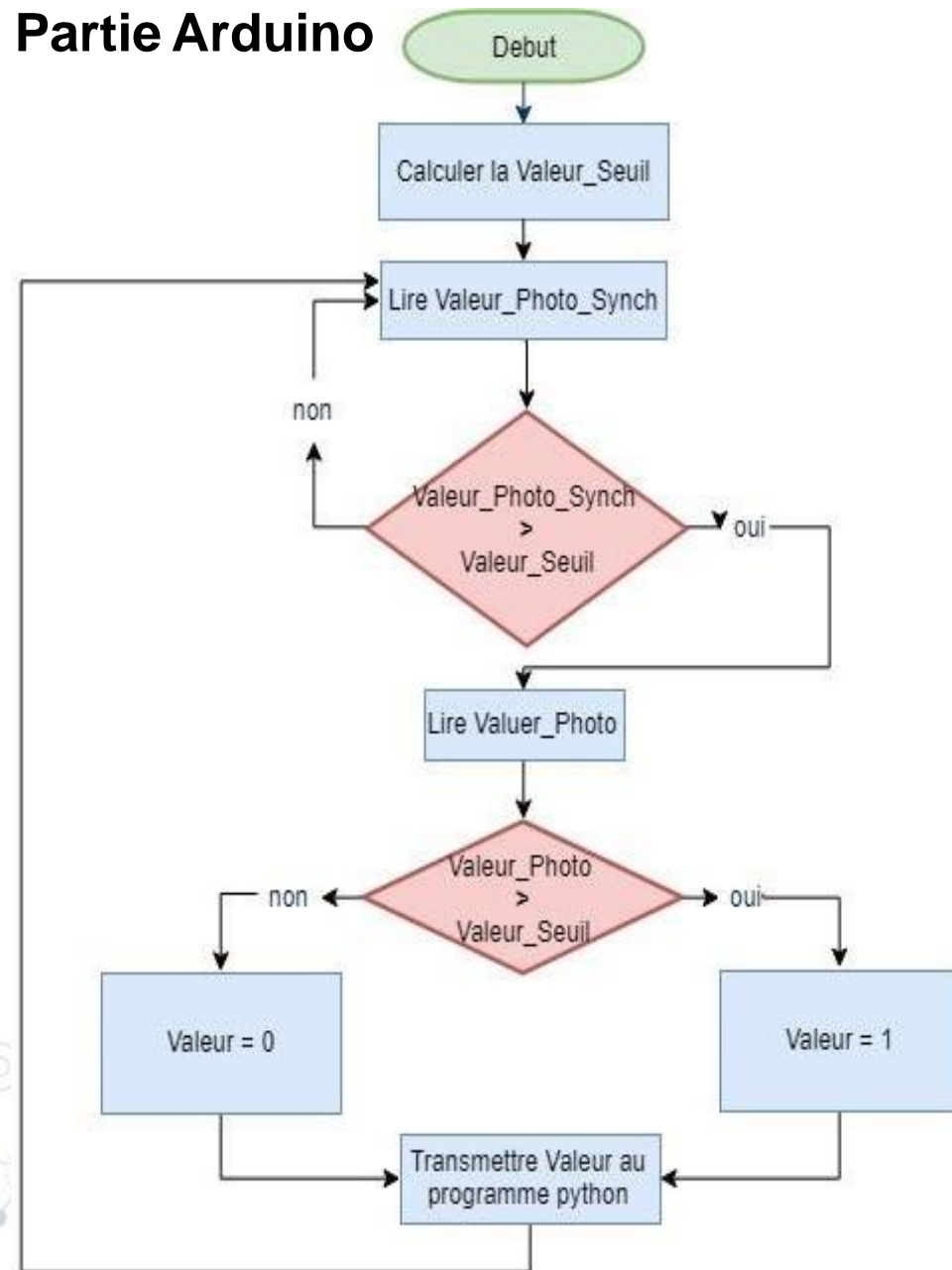
Algorithme de définition de la valeur seuil :

Partie Arduino

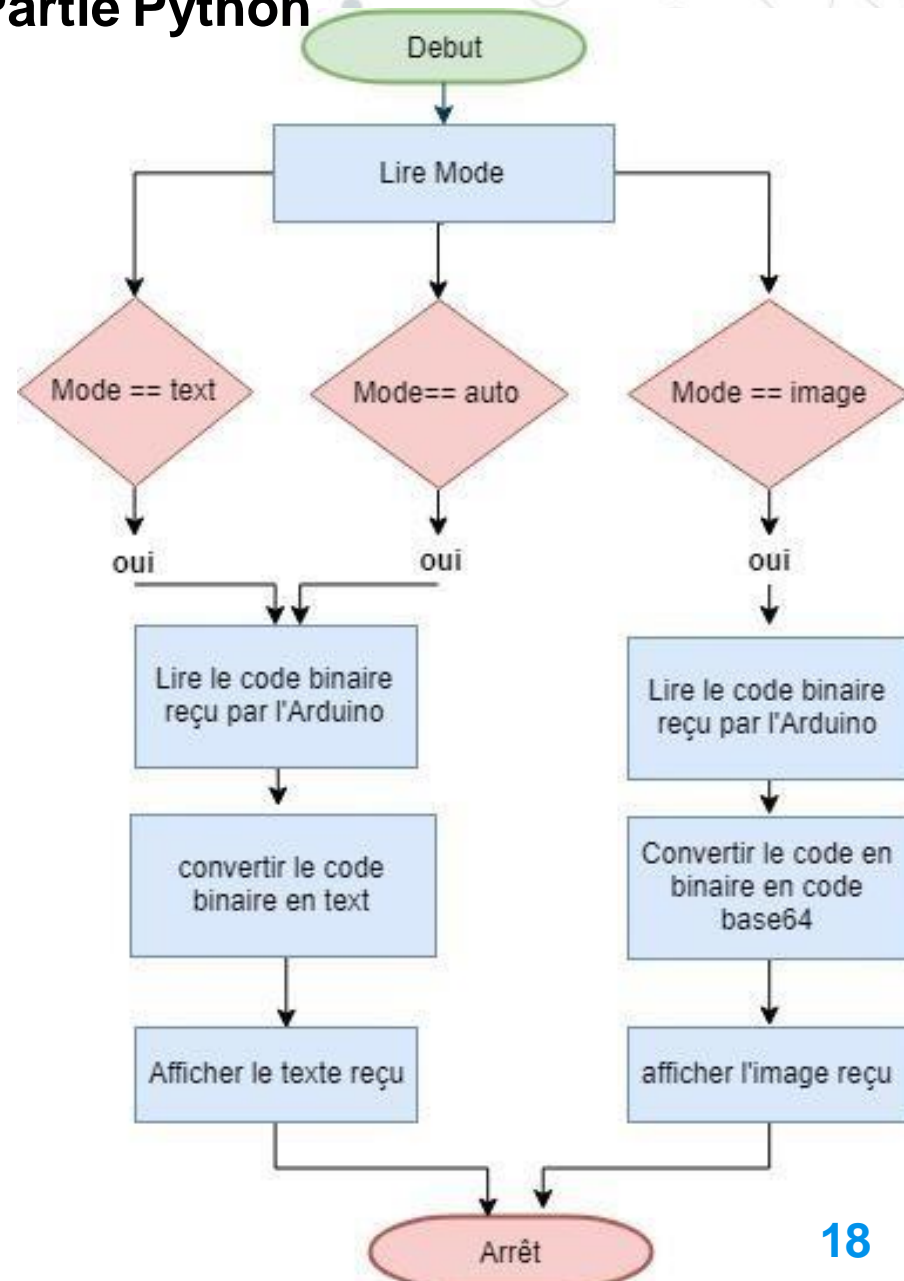


Algorithme de la réception:

Partie Arduino



Partie Python



Contrôle de donnée

Pour s'assurer d'extraire la bonne information et minimiser l'erreur on ajoute des bites de contrôle :

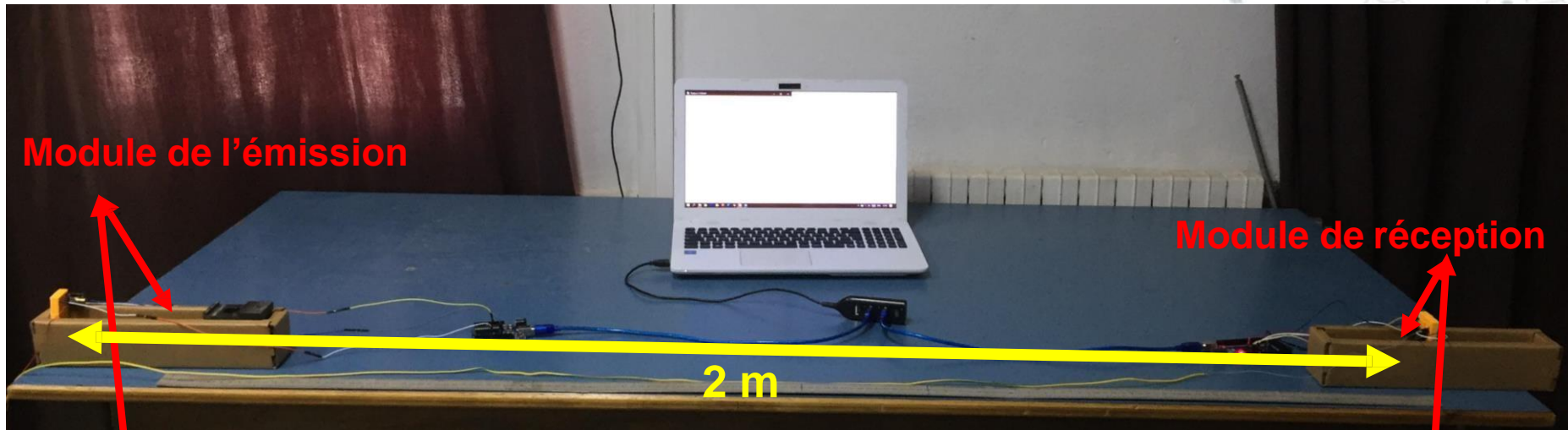
Début de message : On ajout la séquence : 0010

```
ser.write(bytes("00010\n",encoding="ascii"))
```

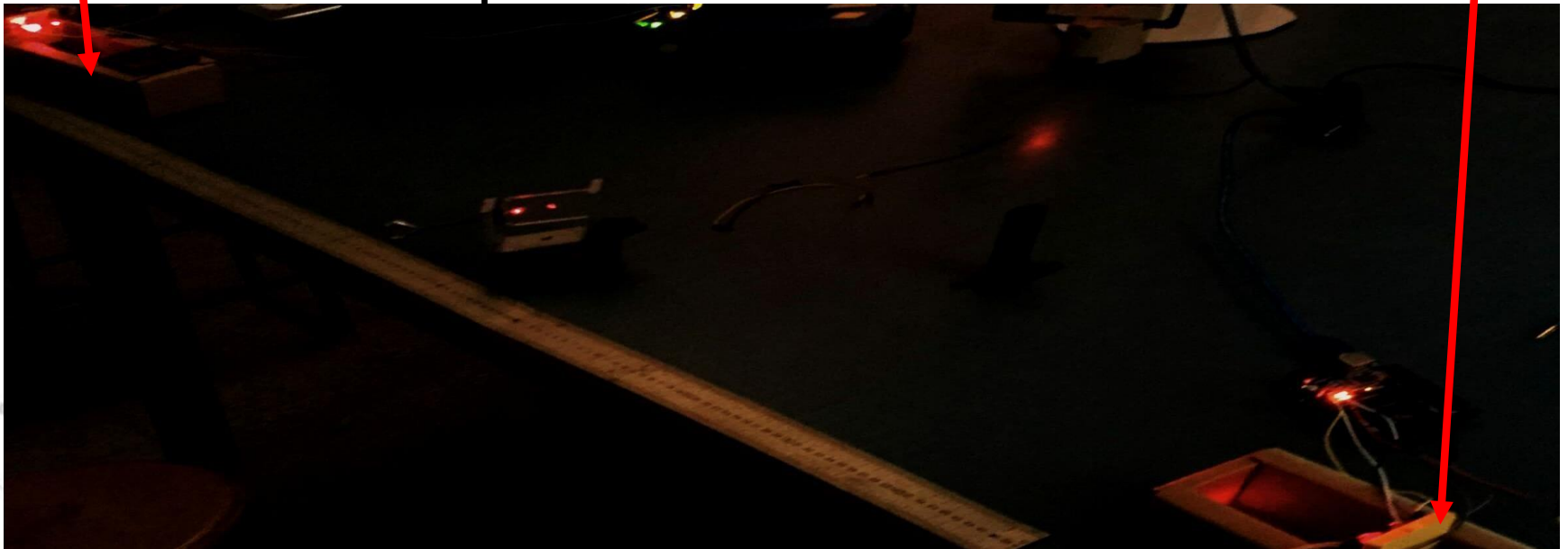
Fin de message : On ajout la séquence : 0011

```
ser.write(bytes("00011\n",encoding="ascii"))
```

Expérience en utilisant les Diodes Laser:

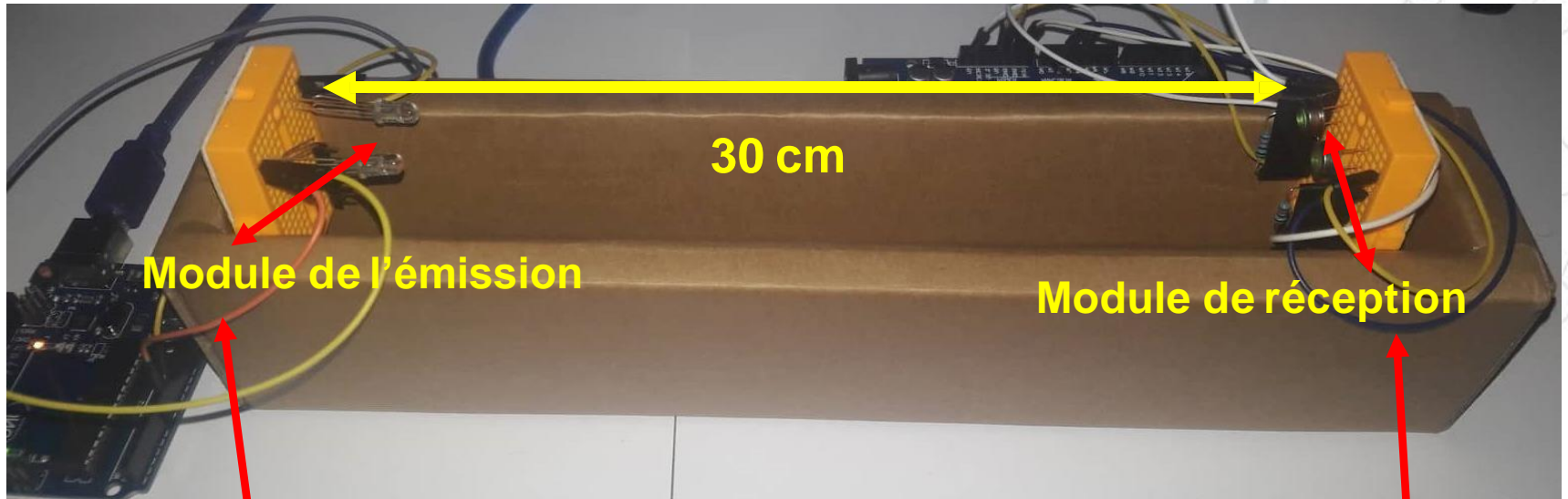


Expérience avec Lumière ambiante

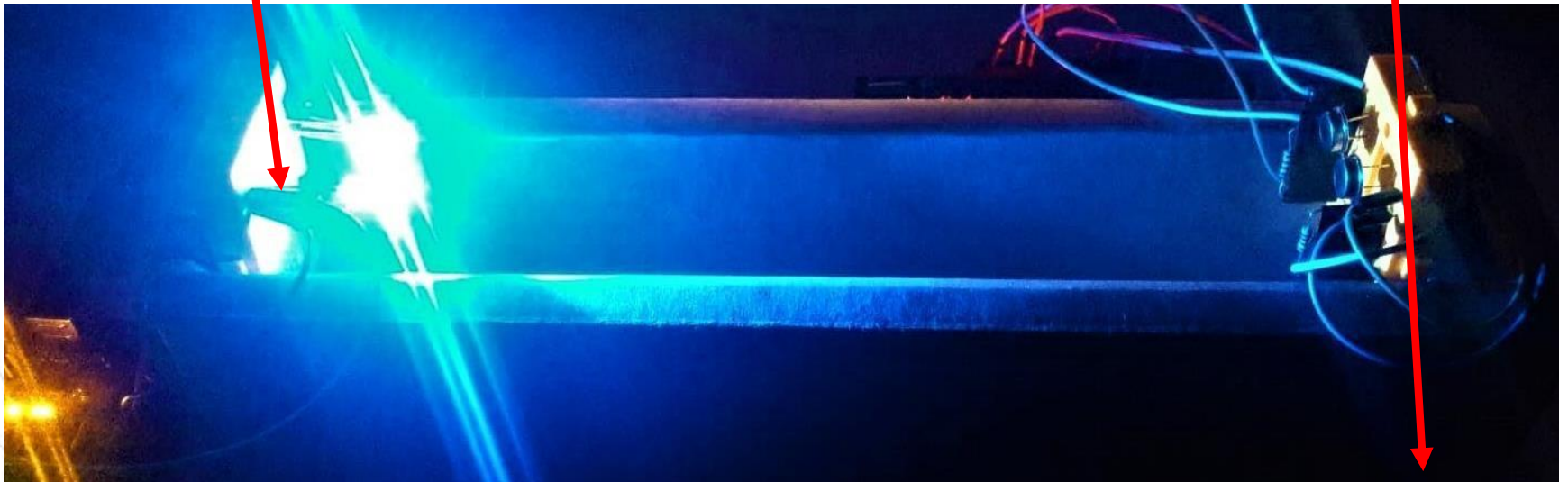


Expérience sans Lumière ambiante

Expérience en utilisant les Diodes LED :



Expérience avec Lumière ambiante



Expérience sans Lumière ambiante

Résultats de Transmission de Texte

```

*****
**_____Commencement_____**
*****
**_____DEBUT DE TRANSMISSION DE DONNEE_____**
*****
| | | | | TAPER LE MODE DE TRANSMISSION | | | | |

```

auto

[illegible]

```
*****# No.0-> fonctionne
*****# No.1-> qui
*****# No.2-> 123456789
*****# No.3-> blond
*****# No.4-> 2018-2019
*****# No.5-> Happy
*****# No.6-> juge
*****# No.7-> au
*****# No.8-> Portez
*****# No.9-> juge
*****# No.10-> 2018-2019
*****# No.11-> vieux
*****# No.12-> fonctionne
*****# No.13-> ce
*****# No.14-> fonctionne
*****# No.15-> :)
*****# No.16-> qui
*****# No.17-> fume
*****# No.18-> juge
*****# No.19-> HELLO
*****# No.20-> 2018-2019
*****# No.21-> 123456789
*****# No.22-> ce
*****# No.23-> au
*****# No.24-> 123456789
*****# No.25-> juge
*****# No.26-> whisky
```

```
*****
**-----Commencement-----**
*****
**-----DEBUT DE RECEPTION DE DONNEE-----**
*****
||||| TAPER LE MODE DE RECEPTION |||||
```

texte

```

**-----Mode TEXTE-----**
*****

```

```
*****# No.0 fonctionne
*****# No.1 qui
*****# No.2 123456789
*****# No.3 blond
*****# No.4 2018-2019
*****# No.5 Happy
*****# No.6 juge
*****# No.7 au
*****# No.8 Portez
*****# No.9 juge
*****# No.10 2018-2019
*****# No.11 vieux
*****# No.12 fonctionne
*****# No.13 ce
*****# No.14 fonctionne
*****# No.15 :)
*****# No.16 qui
*****# No.17 fume
*****# No.18 juge
*****# No.19 HELLO
*****# No.20 2018-2019
*****# No.21 123456789
*****# No.22 ce
*****# No.23 au
*****# No.24 123456789
*****# No.25 juge
*****# No.26 whisky
```

Fenêtre de l'émission

Fenêtre de la réception

Résultats de Transmission d'une image

```
1%| | 0.8420658682634731/100 [00:02<04:39, 2.82s/it]
1%|1 | 1.122754491017964/100 [00:03<04:42, 2.85s/it]
1%|1 | 1.4034431137724552/100 [00:04<04:38, 2.83s/it]
2%|1 | 1.6841317365269464/100 [00:04<04:41, 2.86s/it]
2%|1 | 1.9648203592814375/100 [00:05<04:42, 2.89s/it]
2%|2 | 2.2455089820359286/100 [00:06<04:43, 2.90s/it]
3%|2 | 2.5261976047904198/100 [00:07<04:44, 2.92s/it]
3%|2 | 2.806886227544911/100 [00:08<04:45, 2.94s/it]
3%|3 | 3.087574850299402/100 [00:08<04:46, 2.95s/it]
3%|3 | 3.368263473053893/100 [00:09<04:45, 2.96s/it]
4%|3 | 3.6489520958083843/100 [00:10<04:45, 2.96s/it]
4%|3 | 3.9296407185628754/100 [00:11<04:40, 2.92s/it]
4%|4 | 4.210329341317366/100 [00:12<04:43, 2.96s/it]
4%|4 | 4.491017964071857/100 [00:13<04:42, 2.96s/it]
5%|4 | 4.771706586826348/100 [00:13<04:38, 2.92s/it]
5%|5 | 5.0523952095808395/100 [00:14<04:38, 2.94s/it]
5%|5 | 5.333083832335331/100 [00:15<04:33, 2.89s/it]
6%|5 | 5.613772455089822/100 [00:16<04:34, 2.91s/it]
6%|5 | 5.894461077844313/100 [00:17<04:35, 2.92s/it]
6%|6 | 6.175149700598804/100 [00:18<04:35, 2.93s/it]
6%|6 | 6.455838323353295/100 [00:18<04:30, 2.90s/it]
7%|6 | 6.736526946107786/100 [00:19<04:32, 2.92s/it]
7%|7 | 7.0172155688622775/100 [00:20<04:27, 2.88s/it]
7%|7 | 7.297904191616769/100 [00:21<04:29, 2.91s/it]
8%|7 | 7.57859281437126/100 [00:22<04:25, 2.87s/it]
8%|7 | 7.859281437125751/100 [00:22<04:27, 2.90s/it]
8%|8 | 8.139970059880241/100 [00:23<04:29, 2.93s/it]
8%|8 | 8.420658682634732/100 [00:24<04:30, 2.95s/it]
9%|8 | 8.701347305389223/100 [00:25<04:30, 2.96s/it]
9%|8 | 8.982035928143715/100 [00:26<04:29, 2.96s/it]
9%|9 | 9.262724550898206/100 [00:27<04:29, 2.96s/it]
10%|9 | 9.543413173652697/100 [00:27<04:23, 2.91s/it]
10%|9 | 9.824101796407188/100 [00:28<04:20, 2.89s/it]
10%|# | 10.104790419161679/100 [00:29<04:22, 2.92s/it]
10%|# | 10.38547904191617/100 [00:30<04:23, 2.94s/it]
11%|# | 10.666167664670661/100 [00:31<04:23, 2.95s/it]
11%|# | 10.946856287425152/100 [00:32<04:23, 2.96s/it]
11%|#1 | 11.227544910179644/100 [00:32<04:17, 2.91s/it]
```

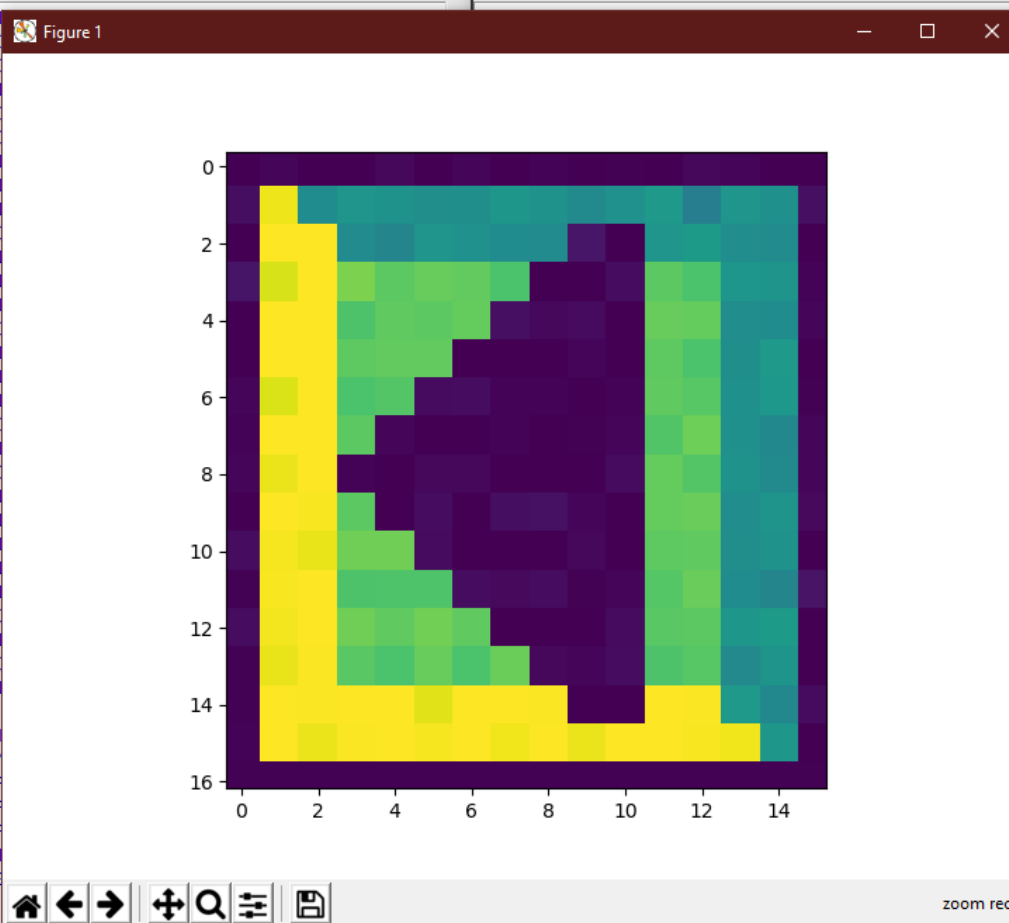
Fenêtre de l'émission

```
1%| | 0.8403361344537815/100 [00:02<04:54, 2.97s/it] Done
1%|1 | 1.1204481792717087/100 [00:03<04:52, 2.96s/it] Done
1%|1 | 1.4005602240896358/100 [00:04<04:46, 2.90s/it] Done
2%|1 | 1.6806722689075628/100 [00:04<04:46, 2.92s/it] Done
2%|1 | 1.96078431372549/100 [00:05<04:46, 2.93s/it] Done
2%|2 | 2.240896358543417/100 [00:06<04:46, 2.93s/it] Done
3%|2 | 2.521008403361344/100 [00:07<04:47, 2.95s/it] Done
3%|2 | 2.801120448179271/100 [00:08<04:47, 2.95s/it] Done
3%|3 | 3.081232492997198/100 [00:09<04:47, 2.97s/it] Done
3%|3 | 3.361344537815125/100 [00:09<04:46, 2.97s/it] Done
4%|3 | 3.6414565826330523/100 [00:10<04:46, 2.97s/it] Done
4%|3 | 3.9215686274509793/100 [00:11<04:41, 2.93s/it] Done
4%|4 | 4.201680672268907/100 [00:12<04:44, 2.97s/it] Done
4%|4 | 4.481792717086834/100 [00:13<04:43, 2.97s/it] Done
5%|4 | 4.761904761904761/100 [00:14<04:39, 2.93s/it] Done
5%|5 | 5.042016806722688/100 [00:14<04:39, 2.94s/it] Done
5%|5 | 5.322128851540615/100 [00:15<04:34, 2.90s/it] Done
6%|5 | 5.602240896358542/100 [00:16<04:35, 2.92s/it] Done
6%|5 | 5.882352941176469/100 [00:17<04:35, 2.93s/it] Done
6%|6 | 6.162464985994396/100 [00:18<04:35, 2.94s/it] Done
6%|6 | 6.442577030812323/100 [00:18<04:31, 2.90s/it] Done
7%|6 | 6.72268907563025/100 [00:19<04:32, 2.93s/it] Done
7%|7 | 7.0028011204481775/100 [00:20<04:28, 2.89s/it] Done
7%|7 | 7.2829131652661045/100 [00:21<04:29, 2.91s/it] Done
8%|7 | 7.563025210084032/100 [00:22<04:26, 2.88s/it] Done
8%|7 | 7.843137254901959/100 [00:22<04:28, 2.91s/it] Done
8%|8 | 8.123249299719886/100 [00:23<04:29, 2.94s/it] Done
8%|8 | 8.403361344537814/100 [00:24<04:30, 2.96s/it] Done
9%|8 | 8.683473389355742/100 [00:25<04:30, 2.96s/it] Done
9%|8 | 8.96358543417367/100 [00:26<04:30, 2.97s/it] Done
9%|9 | 9.243697478991598/100 [00:27<04:29, 2.97s/it] Done
10%|9 | 9.523809523809526/100 [00:27<04:24, 2.92s/it] Done
10%|9 | 9.803921568627453/100 [00:28<04:20, 2.89s/it] Done
10%|# | 10.084033613445381/100 [00:29<04:23, 2.93s/it] Done
10%|# | 10.36414565826331/100 [00:30<04:24, 2.95s/it] Done
11%|# | 10.644257703081237/100 [00:31<04:24, 2.96s/it] Done
11%|# | 10.924369747899165/100 [00:32<04:23, 2.96s/it] Done
11%|#1 | 11.204481792717093/100 [00:32<04:18, 2.91s/it] Done
11%|#1 | 11.484593837535021/100 [00:33<04:19, 2.93s/it]
```

Fenêtre de la réception

Résultats de Transmission d'une image

```
1000100010001111000010011010101100001000111
0101110100010011000101010000110001010011100
0010110100011001001110101010010000110100100
011101010110011001101111001101100110010101
0110000001110010110011001100010001100110010
1110010110111101000001010000110100000101000
0111101000001010010110101000001101010011101
0100010011000010101101000100011101100110011
000011010000011001101010001101101000110001
0101101000010011000100100001100001010100010
0001101110110101101110111010011000111010101
0111100001100100001010110110111001001111011
1111010011001100111011101100110011100000111
0001000100000101101110011110000101000000110
1000001101100011001000101000101101001011101
01110011001001000101010011011000010111011
1100100001100110100010110000100111101010001
000011011100110001001101110111000001101000
1010011000100100001110111010011010010101101
0111011001000110011000100011011000110011010
1101010011100110011011100110100011100110111
1101100100101001101100001101010111100101011
0010101110001010100110101001101001101001101
1000010011100110010101000010011001100100011
1010101010001111000010111100110000100101011
1101100001010110000100110001100010011000010
0011110000101100101000111010000100110000101
0110000101001101011100110100110101000011010
1001010011100100011010101100100011011110111
668
/9j/4AAQSkZJRgABAQEBAEAAAD/2wBDAAUDBAQEAWUEBAQ
FRERGCEYGHdHx8fExcjCieJBweHx7/wAALCAARABABAREAA
L/8QAtRAAAgEDAwIEAwUFBAQAAAF9AQIDAAQRBRIhMUEGE1F
SoONTY3ODk6QORFRkdISUpTVFVWV1hZWmNkZWZnaGlqc3F
ztLW2T7I5usLDxMXGx8jYtLT1NXW19JZ2uHi4+Tl5ufo6erx8vF
m1PUvC9hLHaQ20lkv7kwLuc7k0Oxd+n0cFmAbzfwpuk6/w
7x4x+Cl+LHwM+H11p9vFb63Z+EdOjs74sqg4gVvJl5yZnOcE
BaKm9T0aMsMCRcoT0Jr5dor/9k=
```



```
101101100100010010010100110101010
111010101100011000101101000010110
1101011010011011100110000101000011
101100100011011100110010000110100
101100100011011100110010000110100
00101110100011101101000001101000
1101100010010010101110101011101
0010110110101001110000010010101010
100100111001001001011011110100111
100100111010101101011100101001
000001110000110101001001010011110
000101011100110001001110010110101
000101010101000110110000110101
01110000011100001110101010000
101000001101110001101100010111100
00010010000010100000101000001001
100110101000001101000010011100011
00100111000010011100111001001001
000010101010111011001000011001110
100011000001001001011010110111011
10011011101101010100111101001111
010001100110110101000001011000100
110101100110110001011110111011101
110001011101100111010001000110001
101110111010101000011010000010111
111101001100010101100101101001000
000010011110100001101010011010101
000010101101000011010010010010101
000110001001100010111000000111001
00101011010000101011001000101110
110011100110100011001110101011001
111010011011100100111101100011010
110100101011100111000001100000011
100001101000010010000011100101101
010011001100100010001110101011011
100110010101101001010100010101010
1011011010011100101010000110000
01100011010111101010100001100000
010111001110010110101100111101
```

Fenêtre de l'émission

Fenêtre de la réception

Limitations et Problèmes

Pour les deux circuit :

- Une limitation de débit : pour un débit plus que 1Kbit/s , l'erreur devient très grand et on peut plus récupérer un message correct
- C'est un problème lié au performance des diodes (les diodes utilisé sont de faible qualité) et au circuit de photodiode (il faut ajouter un circuit de filtrage)

Pour le circuit avec le laser :

- Placer le faisceau de laser sur la surface de photodiode (1 cm²) est difficile et instable (chaque déviation d'un des deux modules peut provoquer la rupture de la transmission) :
- ✓ On peut changer la photodiode par un panneau solaire

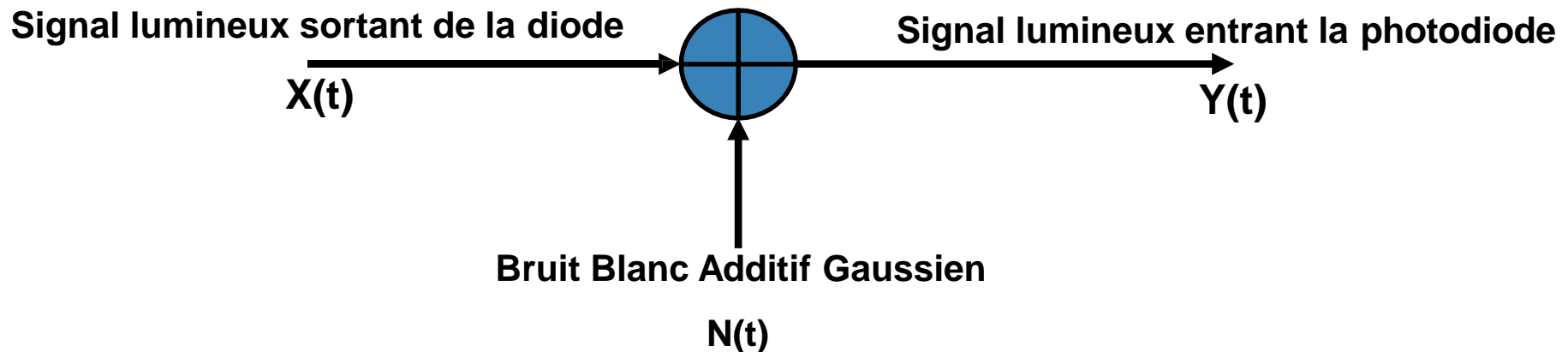
Pour le circuit avec la diode LED :

- Une limitation de distance : pour une distance plus grande que 20 cm en présence de lumière ambiante et plus grande que 40 cm sans lumière ambiante , on ne peut plus récupérer le signal original
- ✓ On peut ajouter un circuit d'amplification de signal reçu par la photodiode (On risque d'amplifier aussi le bruit présent dans le signal)
- ✓ On peut utiliser une matrice de diodes LED et des photodiodes qui peut améliorer l'intensité émit et plus qu'un signal récupérer pour minimiser l'effet de bruit

Canal De transmission

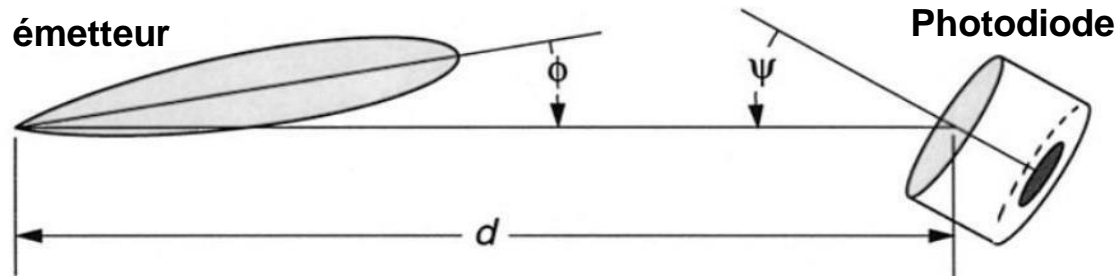
$$Y(t) = R * X(t) + N(t)$$

R : Sensitivité spectrale de la photodiode



Liaison optique :visibilité directe LOS (Line of Sight) entre les extrémités des points de communication

En utilisant la loi de cosinus de Lambert :



La distribution angulaire du rayonnement Lumineux :

$$R_0(\phi) = \begin{cases} \frac{(m_l + 1)}{2\pi} \cos^{m_l}(\phi) & \phi \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \\ 0 & \phi \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} m_l = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \phi_{\frac{1}{2}})} \\ \Phi_1 : \text{Angle de} \\ \quad \quad \quad \frac{\pi}{2} \text{ demi-puissance} \end{cases}$$

La surface de récepteur :

$$A_{eff}(\psi) = \begin{cases} A_r \cos \psi & 0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \psi > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad \text{avec } A_r \text{ la surface de la photodiode}$$

Ainsi on obtient la puissance reçue :

$$P_r = A_r \frac{(m_l + 1)}{2\pi d^2} \cos^{m_l}(\phi) \cos(\psi) P_t$$

Avec P_t la Puissance transmise

Simulation de la propagation dans une chambre :

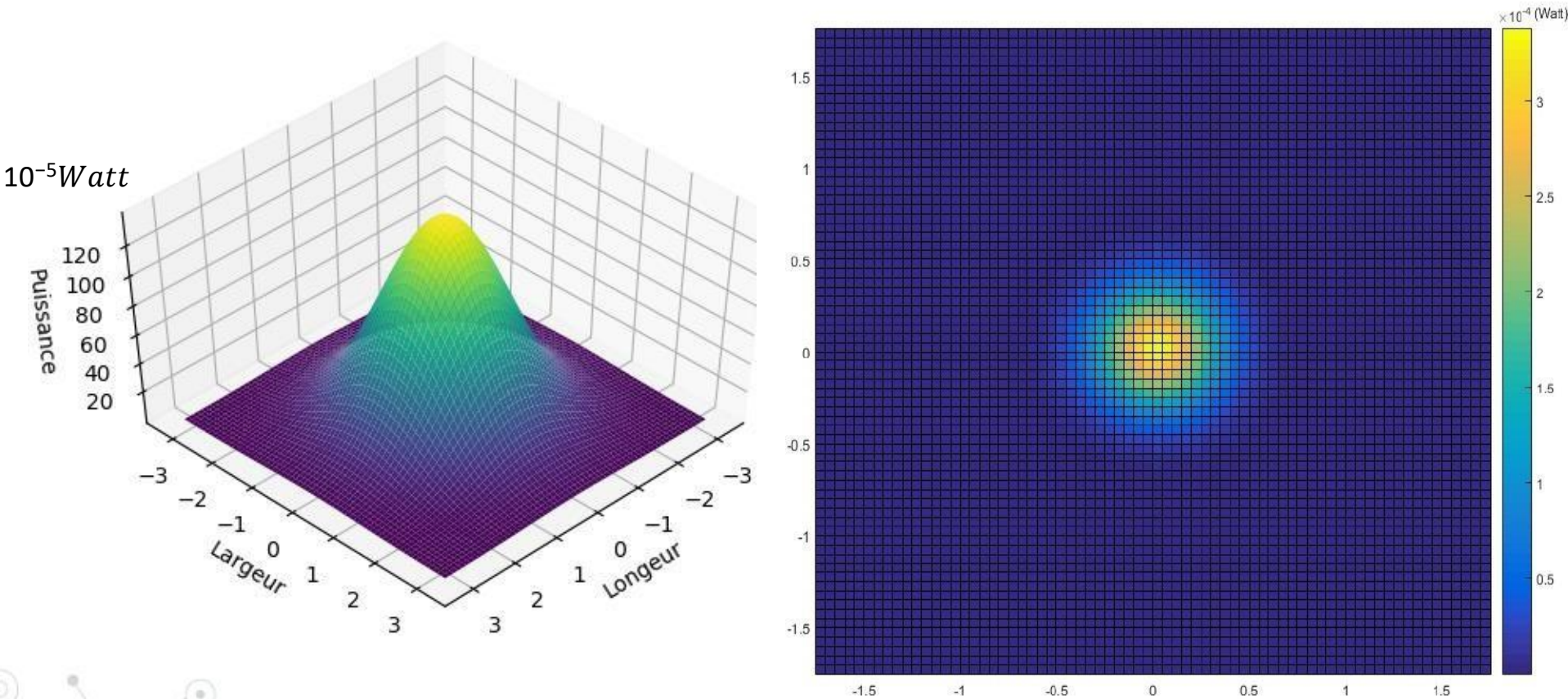
On considère :

- Une chambre vide de dimensions $x=3,5\text{m}$; $y=3,5\text{m}$; $z=2,5\text{m}$
- Une diode LED : Position fixe au centre du plafond ;
angle de demi-puissance variable(10, 30, 75)
Puissance 1 Watt
- Une photodiode : sensibilité spectrale = 1 ($\lambda=560\text{ nm}$ pour la photodiode réelle «BPW21R»)
surface : 1 cm^2
distance au sol : 1m

On fait varier la angle de demi-puissance de la diode entre les valeur : 10 , 30 , 75

Simulation de la propagation dans une chambre :

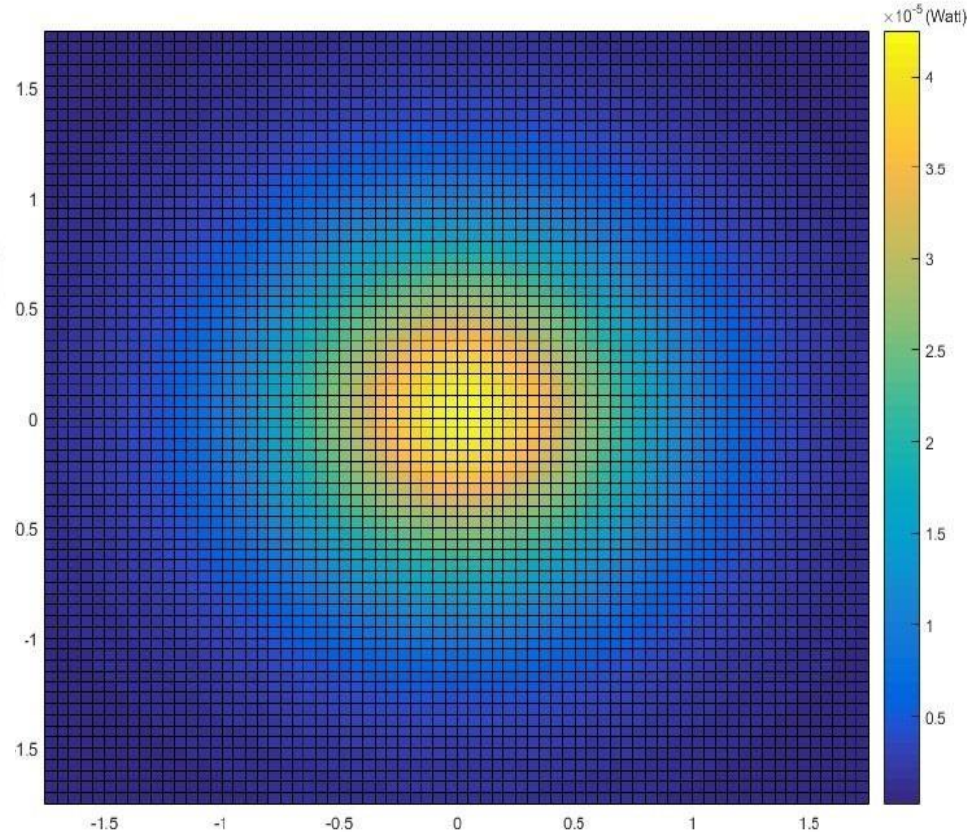
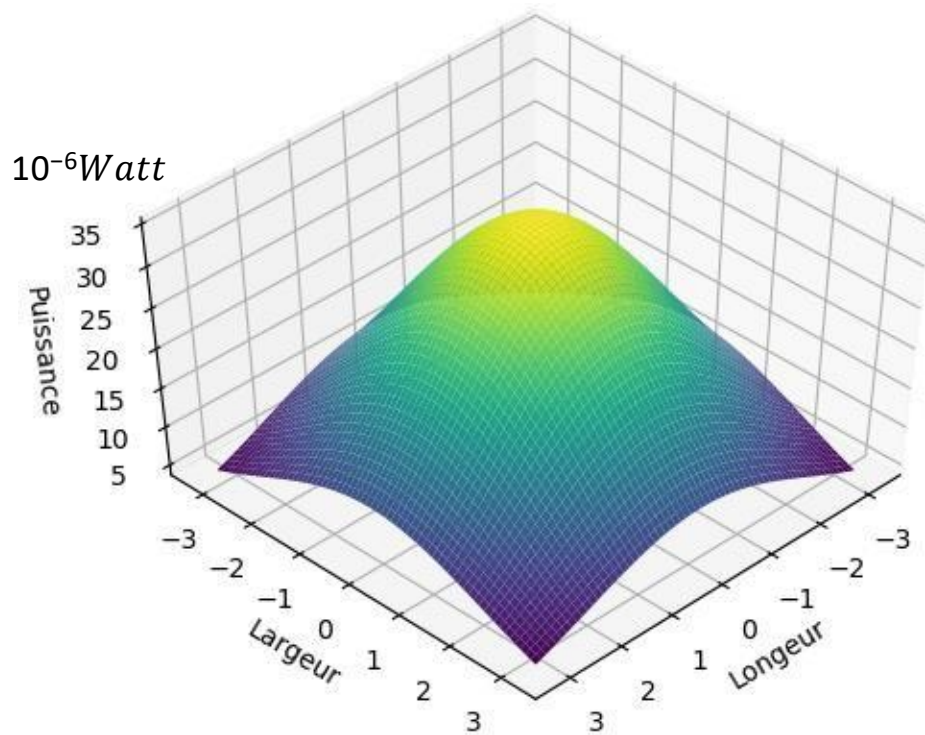
Puissance reçue sur la surface de la chambre



angle de demi-puissance = 75°

Simulation de la propagation dans une chambre :

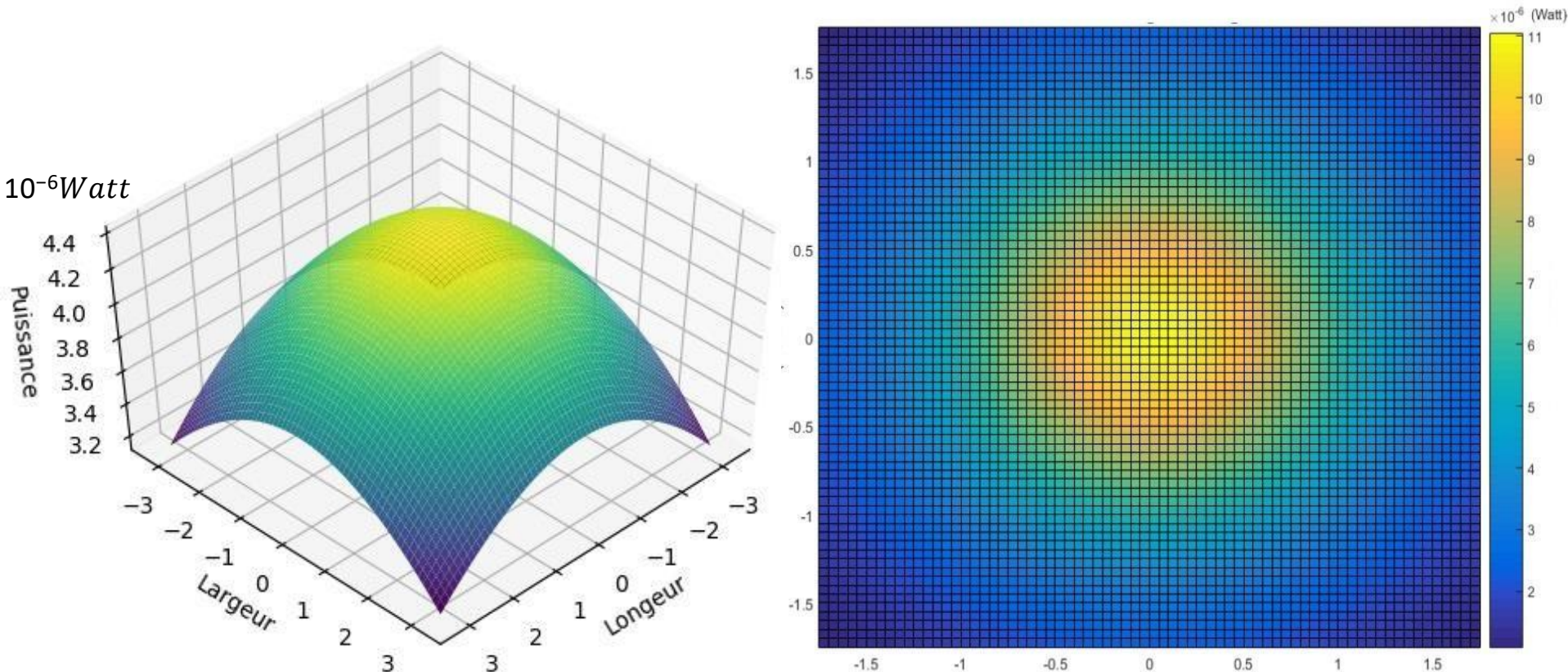
Puissance reçue sur la surface de la chambre



angle de demi-puissance = 75°

Simulation de la propagation dans une chambre :

Puissance reçue sur la surface de la chambre



angle de demi-puissance = 75°

Simulation de la propagation dans une salle :

- ❖ La répartition de la puissance reçue dans les différents points dépend strictement de l'angle de demi-puissance de la LED.
 - ❖ Pour des raisons expérimentales ,on préférera utiliser une LED avec un angle à demi-puissance faible, car la puissance est très concentrée et permet de n'utiliser que peu de LED dans un espace réduit.
 - ❖ Mais comme on peut le voir, l'énergie reçue est en général très basse.
-
- ✓ Ce problème pourrait être résolu en utilisant une matrice de diodes LED .

Simulation de la transmission avec la modulation On-Off-Keying

On peut évaluer le performance du système a l'aide de ces deux paramètres :

- ❖ On définit le rapport signal a bruit (RSB) (SNR en anglais) comme étant le rapport entre la puissance du terme utile du signal d'entrée et la puissance du bruit
- ❖ On définit le taux d'erreur binaire (BER en anglais) comme le rapport entre le nombre d'erreurs et le nombre de bits totale

Simulation de la transmission avec la modulation On-Off-Keying

On peut obtenir la courbe de $BER=f(SNR)$ par :

Une simulation :

- On génère un message aléatoire de 0 et 1
- On lui ajout de bruit gaussien selon le SNR choisit
- On le multiplie avec l'intensité moyenne d'une diode LED et la sensibilité de la photodiode pour récupérer le signal reçu
- On compare le signal avec la valeur seuil et on récupère un message binaire
- On évalue le BER

Une courbe théorique:

- En utilisant la densité de probabilité de la loi gaussienne (ou loi normale)

Simulation de la transmission avec la modulation On-Off-Keying (la courbe théorique)

$$P_e = p(0) \int_{i_{th}}^{+\infty} p(i/0) di + p(1) \int_0^{i_{th}} p(i/1) di$$

Avec $p(i/0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(\frac{-i^2}{2\sigma^2}\right)$ | $p(i/1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(\frac{-(i-I_p)^2}{2\sigma^2}\right)$ | $I_p = 2I_{th}$

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{1}{2} \int_{i_{th}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(\frac{-i^2}{2\sigma^2}\right) di + \frac{1}{2} \int_0^{i_{th}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(\frac{-(i-I_p)^2}{2\sigma^2}\right) di \\ &= \frac{1}{2\sqrt{2\pi\sigma^2}} \left(\int_{i_{th}}^{+\infty} \exp\left(\frac{-i^2}{2\sigma^2}\right) di + \int_0^{i_{th}} \exp\left(\frac{-(i-I_p)^2}{2\sigma^2}\right) di \right) \\ &= \frac{1}{2\sqrt{2\pi\sigma^2}} \left(2 * \int_{i_{th}}^{+\infty} \exp\left(\frac{-i^2}{2\sigma^2}\right) di \right) \end{aligned}$$

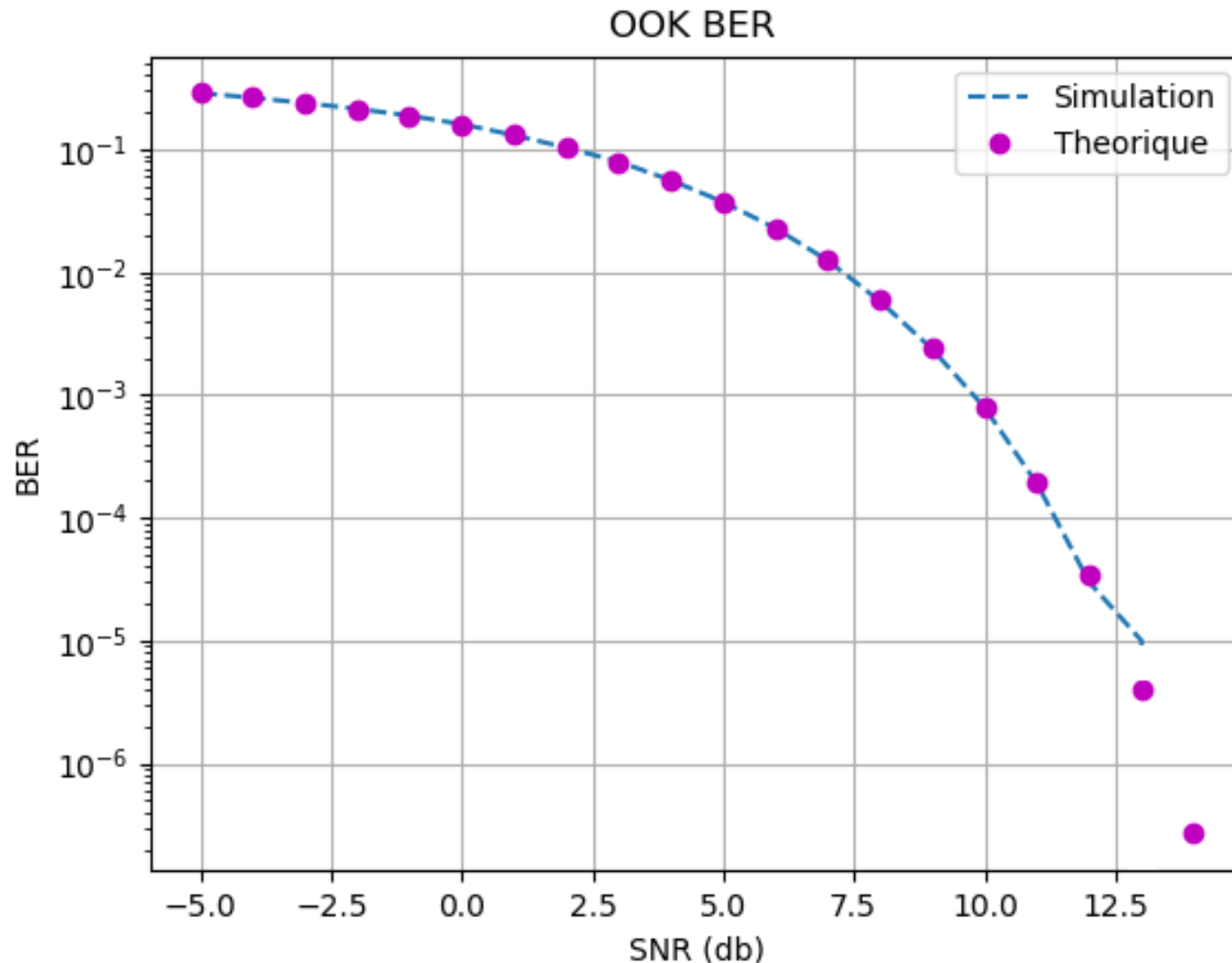
On effectue un changement de variables

$$\begin{cases} \frac{i^2}{\sigma^2} = t^2 \\ i = t\sigma \\ di = \sigma dt \end{cases} \quad \begin{cases} t(i_{th}) = \frac{i_{th}}{\sigma} \\ t(i_{th} = \infty) = \infty \end{cases}$$

On obtient

$$P_e = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(\int_{\frac{i_{th}}{\sigma}}^{+\infty} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt \right)$$

Simulation de la transmission avec la modulation On-Off-Keying



le BER théorique peut bien être approximée au BER simulé pour un OOK. 39

Conclusion

- ◎ Ce prototype démontre bien la possibilité de transmission des données par la lumière. Mais il reste encore des problèmes à résoudre pour qu'il soit plus performant.