

Sphygmo-oxymétrie

Travaux pratiques en biophotonique

Protocole à l'intention des étudiants au baccalauréat et aux études graduées

Prof. Daniel Côté
Prof. Simon Rainville

Protocole modifié par :
Mireille Quémener
Elahe Parham

Version : dernière modification le 18 novembre 2022

Table des matières

1	Introduction	3
2	Objectifs	4
3	Matériel	4
4	Principes	4
4.1	Fonctionnement du sphygmo-oxymètre	4
4.2	La loi de Beer	5
4.3	Questions	6
5	Théorie	7
5.1	L'intensité lumineuse dans le cycle cardiaque	7
5.2	Saturation d'oxyhémoglobine	8
5.3	R Le rapport des rapports	8
6	Montage	9
7	Manipulations : première séance	9
7.1	Précautions	10
7.2	Familiarisation avec Arduino	10
7.3	Vérification des DELs de l'oxymètre	11
7.4	Circuit de détection	11
7.5	Circuit d'illumination	12
7.5.1	Alimentation de la DEL rouge	13
8	Manipulations : deuxième séance	14
8.1	Alimentation de la DEL infrarouge	14
8.2	Montage du circuit complet	15
8.3	Acquisition des données et analyse	15

1 Introduction

L'oxymétrie est un terme général référant à la mesure, généralement optique, de la saturation sanguine de l'oxyhémoglobine. Plusieurs méthodes existent pour effectuer cette mesure. Cependant, la plupart des méthodes chimiques et optiques non pulsatives sont généralement longues et invasives. L'idée d'utiliser la nature pulsée du sang artériel remonte à 1987 et elle est attribuée à un Japonais, Takuo Aoyagi. Parce qu'elle permet de s'affranchir de la majorité des problèmes qui existaient alors en oxymétrie, cette technologie est maintenant utilisée de manière extensive dans tous les hôpitaux et centres de santé. Comme ses composantes sont relativement économiques, on verra de plus en plus les sphygmo-oxymètres apparaître dans les foyers.

Tout au long de cette expérience, et entre les séances, il est fortement conseillé de consulter le livre de référence [1]. Il détaille toutes les parties de l'expérience hormis la programmation avec Arduino. On y trouve à la fois une description médicale, physique, optique et électronique du problème.

2 Objectifs

Introduire l'étudiant à

- L'oxymétrie à pulsations ;
- La théorie de propagation lumineuse dans les tissus ;
- L'électronique d'acquisition et de génération de signaux ;
- L'analyse de signaux.

3 Matériel

- Une sonde SpO_2 de Nellcor (CST060-3120) ;
- Un microcontrôleur Arduino Due avec son câble USB ;
- Une plaquette électronique pour montage sans soudure (breadboard) ;
- Un oscilloscope ;
- Un ordinateur avec le logiciel Arduino ;
- Différentes composantes électroniques telles que :
 - Amplificateur opérationnel de précision (OP741) ;
 - Résistances ;
 - Potentiomètres ;
 - Transistors (2N3904).

4 Principes

4.1 Fonctionnement du sphygmo-oxymètre

Le sphygmo-oxymètre, ou saturomètre, est un appareil relativement simple. D'un côté se trouvent deux diodes électroluminescentes : une émettant dans le rouge et l'autre dans l'infrarouge. De l'autre côté, il y a une photodiode pour détecter la lumière qui est transmise. À chaque battement de cœur, les vaisseaux sanguins se gorgent de sang, puis se dégonflent au rythme de la pulsation cardiaque. Cela modifie le chemin optique d et par le fait même, l'intensité lumineuse détectée à la photodiode.

On considère que les deux principaux atténuateurs du sang artériel sont l'hémoglobine et l'oxy-hémoglobine. Comme l'illustre la figure 1, le coefficient d'extinction de ces deux molécules varie différemment en fonction de la longueur d'onde. Cependant, il n'y a pas que le sang artériel qui atténue la lumière avant sa détection à la photodiode. On retrouve, en outre, l'eau, le sang veineux, la pigmentation des tissus, etc. Ainsi, l'intensité lumineuse sera atténuée d'une composante constante causée par ces diverses absorptions et d'une composante oscillante avec la pulsation cardiaque. On représente l'absorption constante par une distance optique fixe, et l'absorption suivant les pulsations cardiaques par une distance optique variable oscillant entre d_{\min} et d_{\max} . En bref, grâce aux battements de cœur, il est possible de discriminer le sang artériel des autres composantes atténuantes, et grâce aux deux longueurs d'onde, il est possible de discriminer l'hémoglobine de

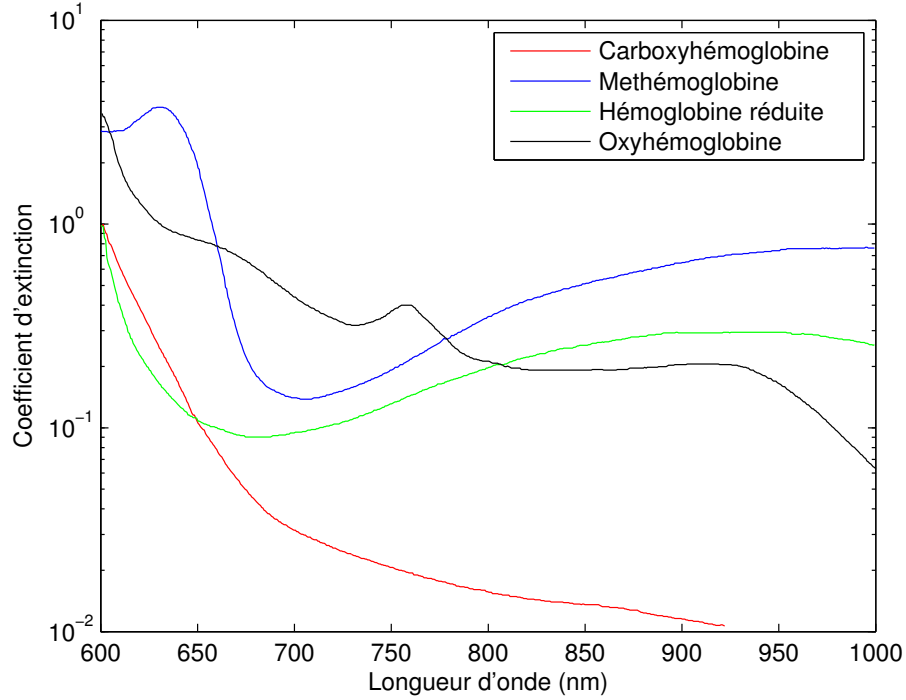


FIGURE 1 – Spectre des composantes sanguines

l'oxyhémoglobine. Nous verrons dans la section théorie comment extraire le rapport R avec lequel nous pourrions trouver la saturation d'oxygène SpO_2 .

4.2 La loi de Beer

La loi de Beer, aussi connue sous le nom de Beer-Lambert, décrit l'atténuation d'un signal lumineux traversant un milieu homogène tel que,

$$I(d) = I_0 e^{-\epsilon(\lambda)cd} \quad (1)$$

où I_0 est l'intensité lumineuse incidente, ϵ est le coefficient d'extinction qui dépend de la longueur d'onde λ , c la concentration d'absorbant dans le milieu et d la longueur du chemin optique. S'il y a plusieurs absorbants, on peut représenter l'exposant comme ceci,

$$\epsilon(\lambda)cd = \sum \epsilon_i(\lambda)c_i d_i \quad (2)$$

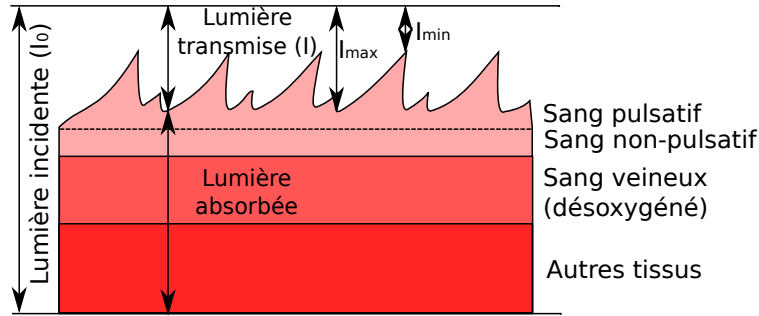


FIGURE 2 – Signal transmis et absorbé, incluant absorption due au sang artériel pulsé, non pulsé, et l'absorption due aux autres tissus

Notez que la longueur des chemins optiques varie selon l'absorbant, car l'indice de réfraction de celui-ci peut être différent.

4.3 Questions

Avant de lire la section théorie, faites les exercices suivants. À partir de l'équation (1), tenter de modéliser les quatre variables qui seront mesurées dans l'expérience, soit : $I_{\max,R}$, $I_{\max,IR}$, $I_{\min,R}$, $I_{\min,IR}$. Elles représentent les maximums et minimums d'intensités lumineuses détectées dans le rouge et l'infrarouge. Vous devez considérer trois composantes absorbantes : l'hémoglobine (Hb) et l'oxyhémoglobine (HbO_2) qui oscilleront avec la pulsation cardiaque et une composante constante (*cte*) due à l'absorption dans les autres tissus. De plus, considérez que les concentrations c ne changent pas et que la longueur du chemin optique d oscille entre d_{\min} et d_{\max} à cause du changement de volume lors d'une pulsation cardiaque.

Insérez les quatre expressions obtenues pour I dans l'équation suivante.

$$R = \frac{\ln(I_{\min,R}/I_{\max,R})}{\ln(I_{\min,IR}/I_{\max,IR})} \quad (3)$$

Vous devriez obtenir le rapport R suivant.

$$R = \frac{\epsilon_{Hb}(\lambda_R)c_{Hb} + \epsilon_{HbO_2}(\lambda_R)c_{HbO_2}}{\epsilon_{Hb}(\lambda_{IR})c_{Hb} + \epsilon_{HbO_2}(\lambda_{IR})c_{HbO_2}} \quad (4)$$

Ensuite, déterminer l'expression théorique de la saturation d'oxygène SpO_2 en fonction du R mesuré et des coefficients d'extinctions $\epsilon_{Hb}(\lambda_R)$, $\epsilon_{HbO_2}(\lambda_R)$, $\epsilon_{Hb}(\lambda_{IR})$, $\epsilon_{HbO_2}(\lambda_{IR})$ ¹, sachant que la

1. $\epsilon_{Hb}(\lambda_R)$ est le coefficient d'extinction pour l'hémoglobine dans le rouge
 $\epsilon_{HbO_2}(\lambda_R)$ est le coefficient d'extinction pour l'oxyhémoglobine dans le rouge
 $\epsilon_{Hb}(\lambda_{IR})$ est le coefficient d'extinction pour l'hémoglobine dans l'infrarouge
 $\epsilon_{HbO_2}(\lambda_{IR})$ est le coefficient d'extinction pour l'oxyhémoglobine dans l'infrarouge

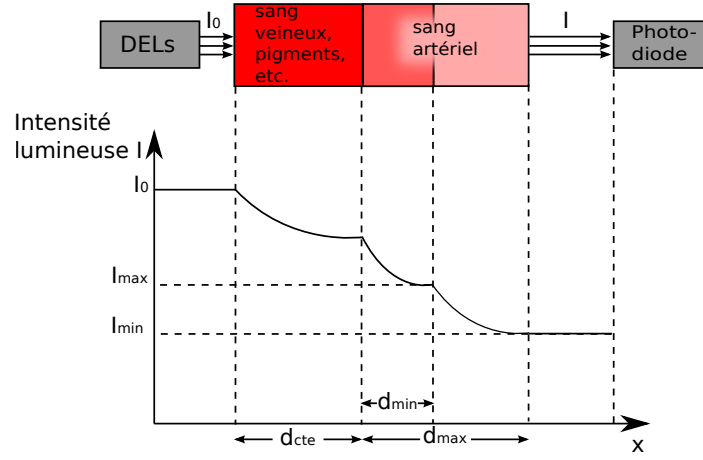


FIGURE 3 – Décroissance exponentielle par diverses composantes selon la loi de Beer en oxymétrie

définition de la saturation d'oxygène est

$$SpO_2 = \frac{c_{HbO_2}}{c_{Hb} + c_{HbO_2}} \quad (5)$$

Selon vous, qu'arriverait-il s'il y avait d'autres composantes absorbantes hormis l'hémoglobine et l'oxyhémoglobine ?

5 Théorie

5.1 L'intensité lumineuse dans le cycle cardiaque

On sait que le maximum d'intensité lumineuse I_{\max} se produit lorsqu'on se trouve au minimum de pression sanguine dans le cycle cardiaque et vice-versa pour le minimum I_{\min} . Donc,

$$I_{\max} = I_0 e^{-\epsilon_{cte}(\lambda) c_{cte} d_{cte}} e^{-[\epsilon_{Hb}(\lambda) c_{Hb} + \epsilon_{HbO_2}(\lambda) c_{HbO_2}] d_{\min}} \quad (6)$$

et

$$I_{\min} = I_0 e^{-\epsilon_{cte}(\lambda) c_{cte} d_{cte}} e^{-[\epsilon_{Hb}(\lambda) c_{Hb} + \epsilon_{HbO_2}(\lambda) c_{HbO_2}] d_{\max}} \quad (7)$$

Puisqu'on sait que d varie entre d_{\min} et d_{\max} dans le temps, il suffit de substituer d_{\max} par $d_{\min} + \Delta d(t)$ pour obtenir l'expression suivante pour l'intensité lumineuse détectée en fonction du temps $I(t)$,

$$I(t) = I_{\max} e^{-[\epsilon_{Hb}(\lambda) c_{Hb} + \epsilon_{HbO_2}(\lambda) c_{HbO_2}] \Delta d(t)} \quad (8)$$

5.2 Saturation d'oxyhémoglobine

La saturation d'oxyhémoglobine s'écrit SaO_2 . Cependant, en oxymétrie à pulsation, on la désigne par SpO_2 pour indiquer qu'il s'agit d'une mesure faite par un appareil comportant certaines limites et ne mesurant pas directement l'oxygène. On définit SpO_2 comme la fraction d'oxyhémoglobine sur l'hémoglobine totale. On utilise aussi le rapport de ces concentrations qui est le même.

$$SpO_2 = \frac{c_{HbO_2}}{c_{Hb} + c_{HbO_2}} \quad (9)$$

Cela nous permet d'isoler les deux relations suivantes qui nous seront utiles.

$$c_{HbO_2} = SpO_2(c_{HbO_2} + c_{Hb}) \quad (10)$$

$$c_{Hb} = (1 - SpO_2)(c_{HbO_2} + c_{Hb}) \quad (11)$$

5.3 R Le rapport des rapports

On appelle R le rapport des atténuateurs ou rapport des rapports. C'est cette variable qui nous permet de déterminer la saturation d'oxygène à partir des mesures des minima et maxima pour le rouge et l'infrarouge.

$$R = \frac{\ln(I_{\min,R}/I_{\max,R})}{\ln(I_{\min,IR}/I_{\max,IR})} \quad (12)$$

En remplaçant par les expressions connues de I_{\max} et I_{\min} , respectivement (6) et (7), nous obtenons,

$$R = \frac{\epsilon_{Hb}(\lambda_R)c_{Hb} + \epsilon_{HbO_2}(\lambda_R)c_{HbO_2}}{\epsilon_{Hb}(\lambda_{IR})c_{Hb} + \epsilon_{HbO_2}(\lambda_{IR})c_{HbO_2}} \quad (13)$$

On introduit les expressions des concentrations en fonction de SpO_2 provenant des équations (10) et (11) pour obtenir,

$$R = \frac{\epsilon_{Hb}(\lambda_R) + [\epsilon_{HbO_2}(\lambda_R) - \epsilon_{Hb}(\lambda_R)]SpO_2}{\epsilon_{Hb}(\lambda_{IR}) + [\epsilon_{HbO_2}(\lambda_{IR}) - \epsilon_{Hb}(\lambda_{IR})]SpO_2} \quad (14)$$

Finalement, il est possible d'inverser cette équation pour obtenir le modèle théorique de $SpO_2(R)$,

$$SpO_2 = \frac{\epsilon_{Hb}(\lambda_R) - \epsilon_{Hb}(\lambda_{IR})R}{\epsilon_{Hb}(\lambda_R) - \epsilon_{HbO_2}(\lambda_R) + [\epsilon_{HbO_2}(\lambda_{IR}) - \epsilon_{Hb}(\lambda_{IR})]R} \quad (15)$$

De plus, les valeurs des différents coefficients d'extinction ϵ sont bien connues dans la littérature scientifique. Les voici :

	λ (nm)	ϵ_{Hb} (mM ⁻¹ cm ⁻¹)	ϵ_{HbO_2} (mM ⁻¹ cm ⁻¹)
λ_R	660	0.81	0.08
λ_{IR}	940	0.18	0.29

6 Montage

Le montage d'oxymétrie que vous utiliserez est composé d'une sonde, d'un circuit d'illumination, un circuit de détection et d'un bloc d'acquisition. Les données sont acquises à l'aide de la carte Arduino. Le circuit final est disponible à la figure 4. Les valeurs des résistances se trouvent dans le tableau suivant :

Résistance	R1	R2	R3	R4	R5	R6	P1	P2
Valeur [Ω]	12	12	12	12	1M	10k	≈ 7	≈ 7

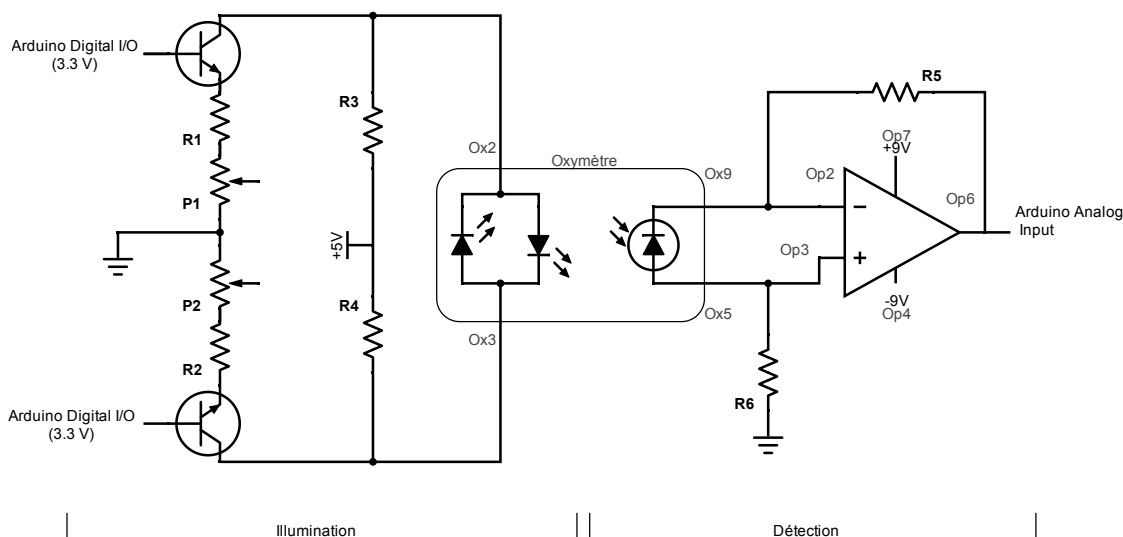


FIGURE 4 – Schéma du circuit électronique final permettant de gérer l'alimentation de l'oxymètre et la mesure des signaux.

7 Manipulations : première séance

L'objectif des manipulations est de faire clignoter en alternance deux DELs, une rouge et une infrarouge, tout en contrôlant leur intensité et en même temps, acquérir le signal provenant de la photodiode. Les diodes électroluminescentes se trouvent à l'intérieur de la sonde du côté de l'ongle. Une photodiode se trouvant de l'autre côté du doigt détecte l'intensité lumineuse qui traverse celui-ci. Les DELs sont branchées ensemble en polarisation inverse sur les broches 2 et 3 du connecteur



FIGURE 5 – Oxymètre comprenant deux DELs rouge et infrarouge ainsi qu’une photodiode.

de la sonde. Les broches sont identifiées par Ox2 et Ox3 sur le circuit de la figure 4. Vous devrez construire ce circuit plus tard. Notez que ces DELs sont plus efficaces lorsqu’on les fait clignoter rapidement et qu’on les fait travailler seulement le tiers du temps².

7.1 Précautions

Au cours de ce laboratoire, il vous sera demandé de construire ou modifier un circuit électronique. Assurez-vous de toujours mesurer le courant dans votre circuit avant de connecter l’oxymètre pour éviter de l’endommager.

7.2 Familiarisation avec Arduino

Vous avez à votre disposition une carte Arduino Due munie d’un câble USB qui se branche à un ordinateur. À l’ordinateur, le logiciel Arduino permet d’écrire un programme qui est envoyé à la carte qui l’exécute ensuite.

La carte Arduino possède notamment des entrées et sorties *digitales* et des entrées *analogiques*, permettant ainsi de lire et d’envoyer des signaux. Les broches correspondant aux sorties digitales ont simplement deux états possibles, soit "0" ou "1", correspondant respectivement à 0V et 3.3V. Quant aux entrées digitales, celles-ci permettent de lire un signal compris entre 0V et 5V, puis de le classer comme un "1" ou un "0". Tout signal se trouvant au-dessus du seuil de 3.3V est considéré comme étant un "1" alors que ceux se trouvant en-dessous de 3.3 V sont des "0". Les entrées analogiques permettent de lire des signaux qui varient entre 0V et 5V. Un convertisseur analogique-numérique (souvent appelé ADC, pour *Analog to Digital Converter*) permet de discrétiser les signaux continus en 1024 niveaux. En effet, la carte Arduino possède un ADC de 10 bits, correspondant à $2^{10} = 1024$

2. Ce qu’on appelle un cycle de service de 33%.

niveaux.

Vous aurez à écrire vous-mêmes votre programme Arduino pour faire l'envoi et l'acquisition des signaux. Vous devrez vous référer à la page d'aide Arduino³ pour comprendre les fonctions de base.

7.3 Vérification des DELs de l'oxymètre

Avant de réaliser le circuit électronique, confirmez que les DELs rouge et infrarouge de l'oxymètre allument bien. Pour ce faire, utilisez votre Arduino et écrivez un programme qui permet d'allumer en alternance les deux DELs de manière à ce que chacune soit allumée durant 1s. Pour ce faire, utilisez deux broches digitales du Arduino que vous connecterez aux broches Ox2 et Ox3 de l'oxymètre (le circuit est représenté à la figure 6).

Branchez la sortie de l'oxymètre (broches Ox5 et Ox9) à l'oscilloscope.

- Êtes-vous en mesure de distinguer les signaux des deux DELs ?
- Est-ce que le signal a une amplitude qui est aisément détectable ? Quelle est son amplitude (en V) ?
- Si vous insérez votre doigt dans l'oxymètre, êtes vous capable de détecter votre pulsation ?

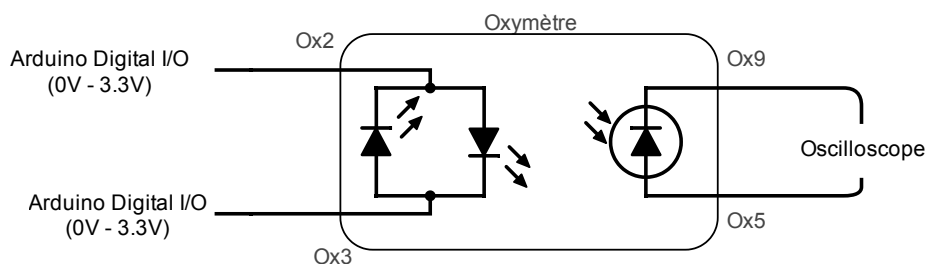


FIGURE 6 – Circuit pour tester les DEL rouge et infrarouge.

7.4 Circuit de détection

Réalisez le circuit de détection présenté à la figure 7. Utilisez deux batteries 9V branchées ensemble pour alimenter votre amplificateur opérationnel avec +9V et -9V. Pour le moment, ne branchez pas la broche 6 de l'amplificateur (Op6) au Arduino, branchez-la plutôt à l'oscilloscope. Utilisez le ground des batteries comme ground commun pour tout le circuit.

3. <https://www.arduino.cc/reference/en/>

- Est-ce que votre signal est amplifié par rapport au signal obtenu à l'étape précédente ? Quel est le facteur d'amplification ? Correspond-t-il au facteur d'amplification théorique ? Si non, pourquoi ?
- Est-ce que les signaux des DELs rouge et infrarouge ont la même amplitude ?
- En considérant que l'entrée analogique d'un Arduino peut discrétiser des signaux entre 0V et 5V, est-ce que les signaux mesurés ont une amplitude optimale ?
- Êtes-vous en mesure de détecter votre pulsation cardiaque en plaçant votre doigt dans l'oxymètre ?

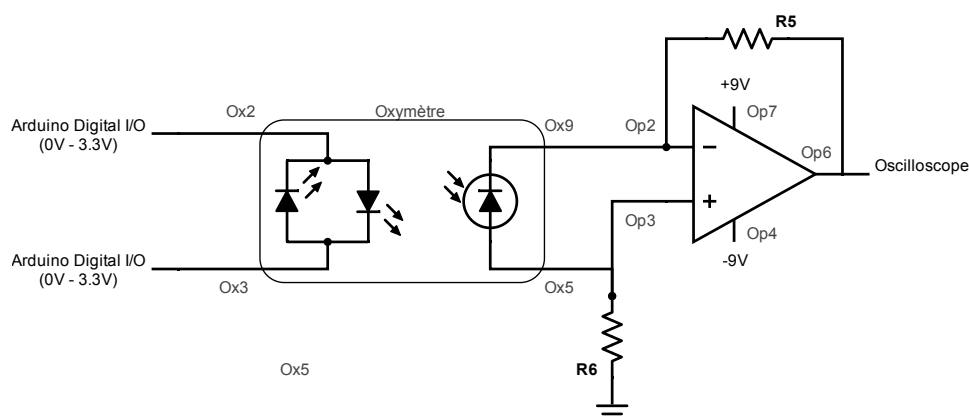


FIGURE 7 – Schéma du circuit de détection avec alimentation de l'oxymètre par Arduino et mesure du signal à l'oscilloscope.

7.5 Circuit d'illumination

Comme vous avez pu le remarquer, il n'est pas possible d'obtenir un signal optimal en utilisant directement la carte Arduino comme source de tension pour allumer les DELs. Effectivement, les sorties digitales du Arduino sont limitées à un courant d'environ 40 mA alors que les DELs de l'oxymètre sont des diodes haute puissance, pouvant tolérer un courant allant jusqu'à 200 mA. D'autre part, vous avez remarqué que l'amplitude des signaux rouge et infrarouge sont différentes. Idéalement, nous aimerions avoir des signaux rouge et infrarouge dont l'amplitude se rapproche de la limite du Arduino (5V) afin de maximiser le signal.

Pour fournir plus de courant aux DELs tout en gardant la possibilité de modifier activement la tension fournie à ces dernières, nous utiliserons des transistors avec des potentiomètres. Un transistor est une composante électronique comprenant une base b, un émetteur e et un collecteur

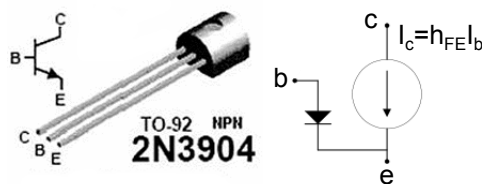


FIGURE 8 – Le transistor 2N3904

c (voir figure 8). Le modèle le plus simple pour un transistor est celui d'une valve limitant le courant au collecteur I_c et contrôlé par le courant à la base I_b . Lorsqu'on dépasse une certaine valeur de courant I_b , le transistor sera considéré comme complètement ouvert, c'est-à-dire que la résistance entre le collecteur et l'émetteur est considérée comme nulle. Autrement, les courants I_c et I_e seront régis par l'équation suivante :

$$I_e \approx I_c = h_{FE} I_b, \quad (16)$$

où h_{FE} est le gain du transistor. Notez qu'à la figure 4, on désigne le transistor par 2N3904, la broche de l'émetteur est représentée par une flèche, la base par une ligne verticale, l'autre broche est le collecteur (voir aussi figure 8).

7.5.1 Alimentation de la DEL rouge

Faites le circuit de gauche montré à la figure 9. Avant toute chose, réglez les valeurs des potentiomètres à environ 7Ω (utilisez le multimètre). Utilisez une broche digitale du Arduino (dont la sortie est programmée pour rester à "1") ou une sortie d'alimentation à 3.3V du Arduino pour alimenter la base du transistor. Pour l'alimentation au collecteur, utilisez la broche d'alimentation 5V du Arduino. Pour débiter, n'alimentez pas la DEL de l'oxymètre afin d'éviter un bris de l'oxymètre si vous avez fait une erreur de branchement du circuit. Placez plutôt votre multimètre dans le circuit afin de mesurer le courant.

- Comment mesure-t-on le courant dans un circuit avec un multimètre ?
- Quel est le courant à la base ?
- Quel est le courant au collecteur ? Est-ce que le courant à l'émetteur est le même ?
- Quel est le gain du transistor ? Est-ce qu'il correspond à la valeur théorique indiquée dans la fiche technique ?
- Comment varie le courant lorsque vous changez la valeur de la résistance du potentiomètre ?

Sachant que le courant maximal que la DEL peut supporter est 200 mA, vérifiez que le courant mesuré au collecteur (et à l'émetteur) ne dépasse pas cette valeur. Branchez ensuite l'oxymètre dans le circuit à l'aide des broches Ox2 et Ox3 afin de réaliser le circuit de droite de la figure 9. Visualisez le signal de la sonde à l'oscilloscope.

- Est-ce que vous remarquez une différence d'intensité lumineuse de la DEL ?

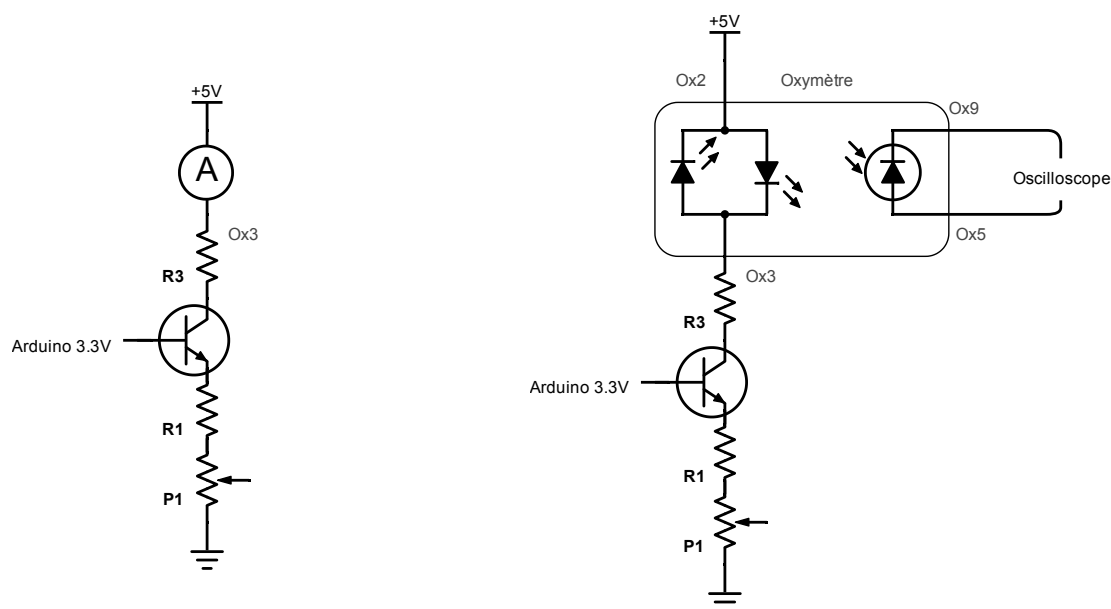


FIGURE 9 – Circuit amplifiant le courant pour la DEL rouge. Dans le circuit de gauche, l'oxymètre est remplacé par un multimètre pour mesurer le courant et s'assurer qu'il ne dépasse pas la valeur maximale de 200 mA.

Important : conservez vos circuits pour la prochaine séance.

8 Manipulations : deuxième séance

8.1 Alimentation de la DEL infrarouge

Reproduisez le circuit de la dernière séance de manière à alimenter la DEL infrarouge. Ultime-ment, vous pourrez joindre vos deux circuits d'alimentation des deux DELs de manière à obtenir le même circuit que celui représenté dans la partie de gauche de la figure 4.

Note : les valeurs des résistances du tableau de la figure 4 sont des suggestions pour vous aider à débiter votre circuit. Vous pouvez modifier les résistances au besoin pour peaufiner votre circuit.

8.2 Montage du circuit complet

1. Faites le circuit complet montré à la figure 4 mais connectez la sortie de l'amplificateur à l'oscilloscope.
2. Programmez votre Arduino afin que les DELs rouge et infrarouge clignotent de manière alternée avec un cycle d'environ 1 ou 2 secondes.
3. Insérez votre doigt dans l'oxymètre et prenez soin de le maintenir à plat sur la table sans trop bouger. À ce stade, vous devriez être en mesure de distinguer votre pulsation cardiaque sur les signaux de l'oscilloscope, autant par la détection rouge que infrarouge.
4. À l'aide des potentiomètres du circuit d'illumination, ajustez le courant traversant les deux DELs afin que les signaux rouge et infrarouge aient une amplitude similaire. Maximisez votre signal tout en vous assurant qu'il ne dépasse pas 5V.
5. Remplacer la sortie à l'oscilloscope par une entrée analogique de votre Arduino. Collectez le signal et visualisez le en utilisant l'outil *Serial Monitor* ou *Serial Plotter* du logiciel Arduino.

8.3 Acquisition des données et analyse

Maintenant que vous avez confirmé que vous êtes en mesure de distinguer votre pulsation cardiaque, programmez votre Arduino afin d'augmenter la fréquence du cycle d'allumage des deux DELs. Quelle fréquence d'acquisition devrait-on utiliser ?

Sur Arduino, trouvez une méthode pour enregistrer les données des deux DELs dans deux listes différentes. Effectuez l'analyse des signaux afin de calculer votre valeur de SpO_2 . L'analyse peut être faite directement sur le logiciel Arduino, ou vous pouvez exporter vos données et les analyser à l'aide d'un autre logiciel comme Python. Êtes-vous également en mesure de calculer votre fréquence cardiaque ? Note : pour avoir une mesure fiable de votre SpO_2 , vous devez ajouter un facteur de calibration. Pour cela, utilisez l'oxymètre portatif comme référence et calculez le facteur multiplicatif nécessaire pour corriger votre calcul.

Références

- [1] John G. Webster, Design of pulse oximeters, CRC Press, 1st edition, 1997.