

2.1. Introduction :

Dans ce chapitre on s'intéresse à étudier les différents blocs pouvant constituer un dispositif de mesure de la saturation en oxygène.

Comme cela était décrit dans le chapitre précédant le principe de base est la détection de photoplethysmogramme PPG. Décrivant l'impulsion pulsatile artériel dans un lit capillaire à travers deux longueurs d'onde rouge et infrarouge. Soit donc deux signaux photoplethysmographiques. Ces signaux seront exploités pour déduire la saturation en oxygène. Ainsi pour aboutir à cette mesure le dispositif peut se présenter selon le schéma bloc donné figure 2.1 ci-dessous.

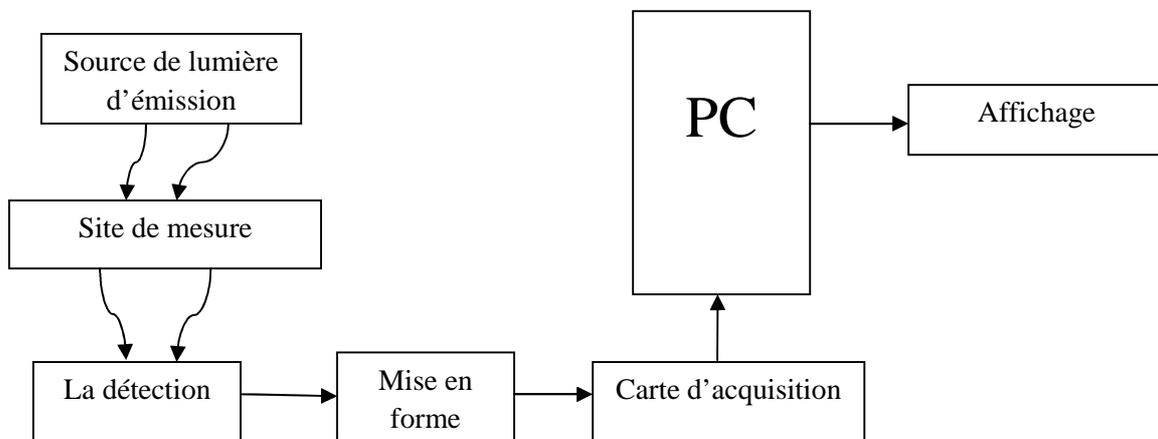


Figure 2.1 Schéma bloc

Il est constitué de:

- Source de lumière
- Circuit de détection
- Une carte d'acquisition
- PC et l'affichage

2.2. Source de lumière :

Comme cela était décrit dans le chapitre précédant les longueurs d'ondes de lumière utilisées en oxymétrie sont le rouge et l'infrarouge compte tenu de leurs absorptions par l'hémoglobine Hb.

Les longueurs d'ondes de 640 nm pour le rouge (R) et 940 nm pour l'infrarouge (IR) sont utilisées.

Cependant, et compte tenu que lors de la détection de la lumière, il faut séparer le signal du rouge de celui de l'infrarouge et aussi dans un but de

minimiser la consommation d'énergie et augmenter l'intensité lumineuse, l'émission de la lumière va être pulsée à une fréquence convenablement choisie (c.-à-d. le rouge puis l'infrarouge de manière cyclique).

Pour réaliser ce processus, la source d'émission de la lumière est constitué de :

- Capteurs : LED rouge et LED infrarouge
- et un circuit de pilotage des capteurs.

2.2.1. Capteurs : LED rouge et LED infrarouge :

L'émission de la lumière par une jonction a été observée en 1923 sur le carbure de silicium, mais il a fallu attendre 1953 pour avoir l'explication du phénomène avec la théorie des semi-conducteurs. C'est enfin vers 1963 que les premières diodes électroluminescentes LED ont été commercialisées.

Pour la réalisation du circuit d'émission, des diodes électroluminescentes sont utilisées pour l'émission des lumières rouge et infrarouge qui traverseront le site de mesure (doigt ou orteil) afin de caractériser l'onde de pouls sanguine. Ces lumières seront captés par une photodiode ou un phototransistor qui constitue l'élément principal du circuit de réception.

2.2.1.1. *Principe de fonctionnement de la LED:*

Le mot LED est l'acronyme de Light Emitting Diode (Diode Electroluminescente en français). Le symbole de la LED ressemble à celui de la diode mais on y a ajouté deux flèches sortantes pour représenter le rayonnement lumineux émis.[7] (figure 2.2 ci-dessous)



Figure 2.2 : Symbole de la LED.

a- Jonction P.N.

Ce phénomène d'électroluminescence sera obtenu à la condition de créer une forte quantité d'électrons dans la bande de conduction. On l'obtient par injection de porteurs polarisant dans le sens direct, une jonction PN à semi-conducteur.

Le même résultat aurait pu être obtenu en irradiant le cristal avec une source lumineuse d'énergie importante (photoluminescence) ou par bombardement électronique (cathodoluminescence).

Selon la fabrication, la lumière peut être émise soit latéralement, soit perpendiculairement à travers la mince couche N ou P.(figure 2.3)

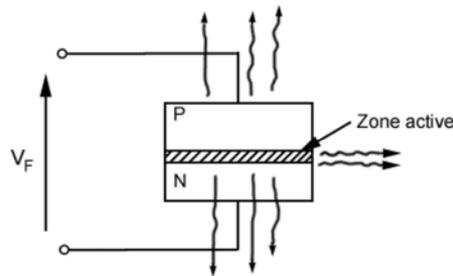


Figure2.3: fonctionnement de la LED

Caractéristiques optiques :

a- Longueur d'onde du pic d'émission

Cette valeur nous indique la longueur d'onde (λ_p), en nanomètre, à laquelle est émise la plus importante partie du rayonnement (wavelength). La valeur est donnée pour une intensité de courant (I_F).

b- Spectre ou largeur spectrale à mi-intensité

Le spectre d'émission d'une diode LED est relativement étroit. Exemple : pour une longueur d'onde à intensité maximale égale à 520 nm, la longueur d'onde à intensité moitié pourra être comprise de 505 nm à 535 nm (soit une largeur spectrale de 30 nanomètres). [7] (figure 2.4)

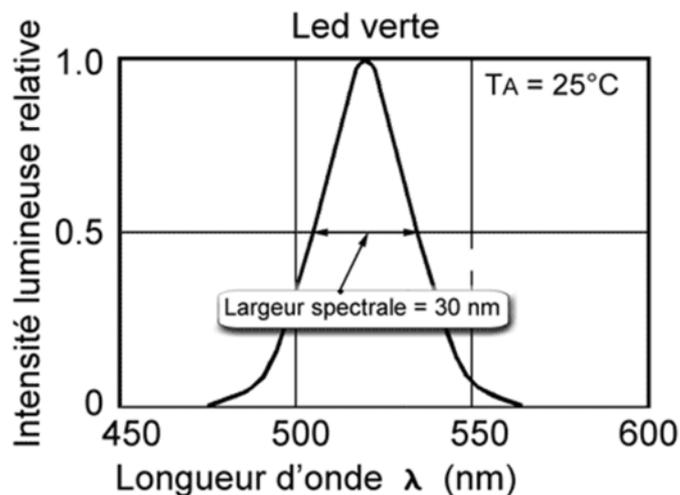


Figure2.4 : spectre d'émission de la LED

Il existe actuellement plusieurs types de LED donnant chacun des spectres différents. Cela est obtenu par la variété des semi-conducteurs utilisés pour fabriquer les jonctions PN.

Des exemples sont donnés dans le tableau suivant pour l'obtention de certaines longueurs d'onde :

Matériaux Rayonnement Longueur d'onde

InAs	UV	315 nm ou 3,15 μm
InP	infra-rouge	910 nm
GaAsP ₄	rouge	660 nm
GaAsP ₈₂	jaune	590 nm
GaP	vert	560 nm

c- Correspondance couleurs, longueurs d'onde et énergie des photons

Couleur Longueur d'onde (nm) Energie des photons (eV)

UltraViolet	< 390	> 3,18
Violet	390-455	2,72-3,18
Bleu	455-490	2,53-2,72
Cyan	490-515	2,41-2,53
Vert	515-570	2,18-2,41
Jaune	570-600	2,06-2,18
Orange	600-625	1,98-2,06
Rouge	625-720	1,72-1,98
InfraRouge	> 720	< 1,72

d- Diagramme de rayonnement

Le flux lumineux n'est pas homogène tout autour de la LED. La répartition spatiale de la puissance émise dépend de la forme de la diode LED :

- forme de la partie émissive (point, trait...),
- avec lentille de concentration ou sans,
- diffusante ou non.

Cette répartition est définie par le diagramme de rayonnement qui représente la répartition angulaire de l'intensité relative émise (exemple sur la figure 2.5 ci-dessous).

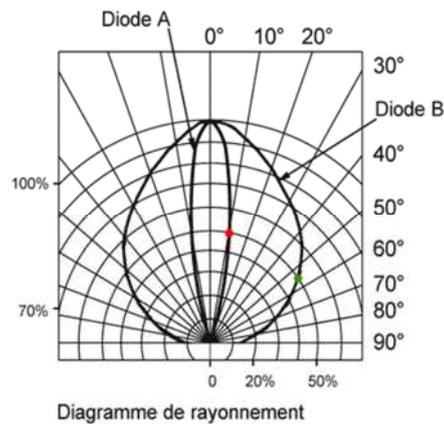


Figure 2.5 : diagramme de rayonnement

e- Angle d'émission à mi- intensité

Les fabricants précisent souvent l'angle pour lequel l'intensité lumineuse a été réduite de moitié. Sur le diagramme figure 2.5 ci-dessus, le point rouge indique un angle de 10 degrés et le point vert un angle de 50° pour une intensité relative émise de 50%.

f- Intensité lumineuse

L'intensité lumineuse (mesurée en candelas) est la quantité de lumière émise dans une certaine direction à 1 mètre de distance. Dans les caractéristiques optiques des LEDs nous l'exprimons aussi en micro-candela (mcd) et se note I_v .

2.2.1.2. Caractéristiques électriques

a- Point de fonctionnement et tension direct

Une LED se comporte électriquement comme une diode. Pour émettre elle doit être polarisée en direct. (Figure 2.6 ci-dessous)

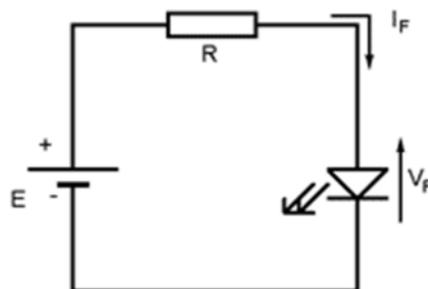


Figure 2.6 : polarisation de la LED

La caractéristique $I_F(V_F)$ (figure 2.7) montre que la tension de conduction de la diode LED (forward voltage) est environ 1,5 Volts à 2 V.

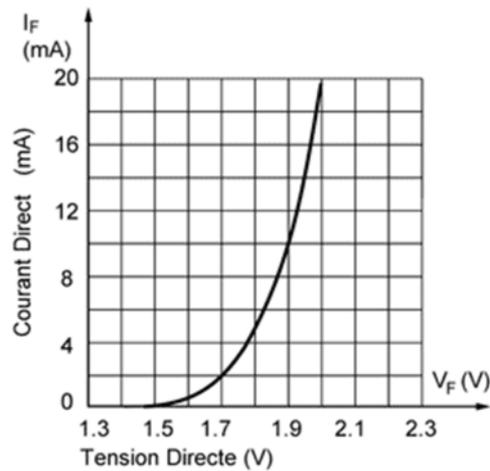


Figure 2.7 : Caractéristique $I_F - V_F$

Le courant I_F vaut environ $E - 2V/R$. En pratique, le constructeur préconise 10 à 20 mA. Le courant traversant la LED détermine l'intensité lumineuse émise.

Tension inverse (V_R)

Dans certains cas, on peut avoir besoin de polariser en inverse la LED. La diode est alors éteinte : elle n'émet plus d'intensité lumineuse. Mais attention, la diode LED ne peut pas supporter des tensions inverses trop importantes comme une diode de redressement par exemple. Les valeurs courantes se situent telles que $V_R \text{ max} = \pm 3V$ à $5V$ (reverse voltage) ; au-delà de ces valeurs il y a endommagement ou destruction du composant. En cas de besoin nous plaçons une diode normale en série avec la LED.

Il est alors extrêmement intéressant d'alimenter la LED en courant pulsé au lieu du courant continu. La valeur crête du courant permet alors d'obtenir des intensités lumineuses importantes. De ce fait nous pouvons :

- augmenter l'intensité lumineuse émise à consommation électrique moyenne égale,
- diminuer la consommation électrique tout en obtenant une intensité lumineuse égale,
- réduire l'échauffement de la jonction.

2.2.2. Circuit associé aux LEDs :

Selon le mode d'attaque de la LED (attaque en courant ou en tension) ou selon l'alimentation associée (alimentation en continu ou en alternatif) plusieurs circuits permettent de polariser la diode dans un circuit pour son utilisation. Le circuit donné sur la figure 2.8 ci-dessous illustre un exemple. C'est le circuit qui va être utilisé dans notre réalisation.

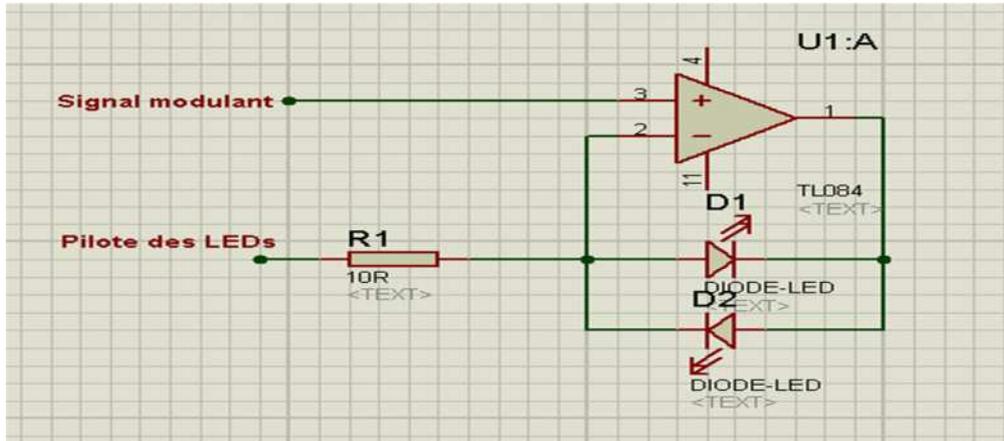


Figure 2.8 : Circuit de pilotage des LEDs

Une attaque en courant et une alimentation en alternatif (c'est-à-dire un fonctionnement des LED en commutation) constituent la base de ce circuit. Car aux faibles courants, l'intensité lumineuse d'une diode électroluminescente croît plus vite que le courant. L'utilisation d'une alimentation en impulsion permet d'accroître l'intensité lumineuse moyenne pour un même courant moyen, par rapport à l'alimentation continue.

Compte tenu que les LEDs Rouge et infrarouge vont être alimentées de manière séquentielle, un circuit générateur séquentiel est nécessaire. Ce circuit c'est le multivibrateur fonctionnant en astable.

Les multivibrateurs sont des montages qui permettent de générer en sortie une tension rectangulaire donc les niveaux hauts et bas sont plus ou moins stables.

En fonction de cette stabilité, on distingue:

- Les multivibrateurs astables.
- Les multivibrateurs monostables.
- Les multivibrateurs bistables

Les astables sont des autos-oscillateurs, car ils ne reçoivent aucune impulsion de l'extérieur alors que les monostables et les bistables sont les oscillateurs de déclenchement. Tout multivibrateur comporte obligatoirement les composants suivants:

- Un élément actif (le transistor, l'amplificateur opérationnel, les portes logiques etc.)
- Un composant qui accumule de l'énergie (le condensateur)
- Un composant qui dissipe de l'énergie (résistance)

En fonction de l'élément actif, on distingue les multivibrateurs à transistor, les multivibrateurs à porte logiques et enfin les multivibrateurs à circuit intégré (NE555; 74121). [10]. Ce sont ces derniers qui vont être utilisés dans notre réalisation.

2.3. Circuit de détection :

Les photos détectrices transforment les radiations lumineuses (visible ou non) en signaux électriques. On les nomme aussi détecteur optiques, photo coupleurs ou capteur optiques. Le symbole d'une photodiode est celui d'une diode, auquel on a ajouté deux flèches pour symboliser l'action du rayonnement (figure 2.8.a). Le phototransistor quant à lui est représenté en (figure 2.8.b)



Figure 2.8.a : symbole d'une photodiode



Figure 2.8.b : Phototransistor.

2.3.1. La photodiode :

Une photodiode est un composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique.

2.3.1. a/ *Principe de fonctionnement* :

Quand un semi-conducteur est exposé à un flux lumineux, les photons sont absorbés à condition que l'énergie du photon (E_{ph}) soit supérieure à la largeur de la bande interdite (E_g) (voir figure 2.9). Ceci correspond à l'énergie nécessaire que doit absorber l'électron afin qu'il puisse quitter la bande de valence (où il sert à assurer la cohésion de la structure) vers la bande de conduction, le rendant ainsi mobile et capable de générer un courant électrique. L'existence de la bande interdite entraîne l'existence d'un seuil d'absorption tel que $E_{ph} = E_g$. Lors de l'absorption d'un photon, deux phénomènes peuvent se produire :

La photoémission : c'est la sortie de l'électron hors du matériau photosensible. L'électron ne peut sortir que s'il est excité près de la surface.

La photoconductivité : l'électron est libéré à l'intérieur du matériau. Les électrons ainsi libérés contribuent à la conductivité électrique du matériau.

Lorsque les photons pénètrent dans le semi-conducteur munis d'une énergie suffisante, ils peuvent créer des photos porteuses (électrons et trous d'électrons) en excès dans le matériau. On observe alors une augmentation du courant. Deux mécanismes interviennent simultanément :

Il y a création de porteurs minoritaires, c'est-à-dire des électrons dans la région P et des trous dans la région N. Ceux-ci sont susceptibles d'atteindre la Z_{CE} par diffusion et d'être ensuite propulsés vers des zones où ils sont majoritaires. En effet, une fois dans la Z_{CE} , la polarisation étant inverse, on favorise le passage des minoritaires vers leur zone de prédilection. Ces porteurs contribuent ainsi à créer le courant de diffusion.

Il y a génération de paires électrons trou dans la Z_{CE} , qui se dissocient sous l'action du champ électrique ; l'électron rejoignant la zone N, le trou la zone P. Ce courant s'appelle le courant de transit ou photo courant de génération.[8]

Ces deux contributions s'ajoutent pour créer le photo courant I_{ph} qui s'additionne au courant inverse de la jonction. L'expression du courant I_d traversant la jonction est alors : $I_d = I_s (e^{(E_g)ut*n} - 1) - I_{ph}$

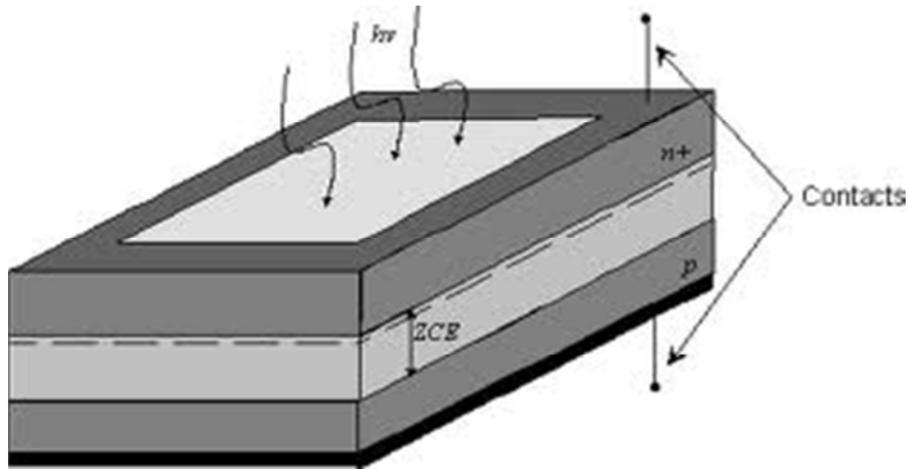


Figure 2.9 : structure d'une photodiode

2.3.2. Le phototransistor :

2.3.2.a/ Principe de fonctionnement :

Un phototransistor est un transistor bipolaire dont la base est sensible au rayonnement lumineux ; la base est alors dite flottante puisqu'elle est dépourvue de connexion. Lorsque la base n'est pas éclairée, le transistor est parcouru par le courant de fuite I_{CE0} . L'éclairage de la base conduit à un photo courant I_{ph} que l'on peut appeler courant de commande du transistor. [8]

Celui-ci apparaît dans la jonction collecteur-base sous la forme :

$$I_C = \beta I_{ph} + I_{CE0}$$

Pour simplifier, lorsque la base est éclairée le phototransistor est équivalent à un interrupteur fermé entre l'émetteur et le collecteur et lorsque la base n'est pas éclairée, c'est équivalent à un interrupteur ouvert.

Le courant d'éclairage du phototransistor est le photocourant de la photodiode collecteur-base multiplié par l'amplification β du transistor. Sa réaction photosensible est donc nettement plus élevée que celle d'une photodiode (de 100 à 400 fois plus). Par contre le courant d'obscurité est plus important.

On observe une autre différence entre le phototransistor et la photodiode : la base du phototransistor est plus épaisse, ce qui entraîne une constante de temps plus importante et, donc une fréquence de coupure plus basse que celle des photodiodes. On peut éventuellement augmenter la fréquence de coupure en diminuant la photosensibilité en connectant la base à l'émetteur. [8]

2.4. Circuit de mise en forme :

La partie mise en forme du signal est constituée essentiellement d'amplification, filtrage et d'un circuit d'échantillonnage pour la détection des lumières rouge et infrarouge réfléchies.

2.4.1. Amplification :

Compte tenu que le signal détecté par la photodiode est très faible, de l'ordre de quelques millivolts une amplification est nécessaire. Souvent un amplificateur à base d'amplificateur opérationnel est utilisé.

2.4.2. Filtrage :

Dans la pratique, le filtrage se compose de deux modes :

- Filtrage analogique
- Filtrage numérique

Le filtrage analogique consiste à réaliser un circuit de filtrage, qui nous permet d'éliminer le bruit qui s'ajoute avec le signal utile, avec des composants soient actifs (généralement les actifs sont les plus utilisés) ou encore passifs.

Il existe plusieurs genres de filtre selon le besoin dont on peut avoir. On trouve ainsi les filtres passe-bas, passe haut, passe bande, coupe bande, etc. Dans chaque cas différentes configurations existent dépendant des caractéristiques de réponses en amplitude et en phase. Ainsi on trouve : des configurations de de Butterworth, Chebychev, Bessel..Etc.

Cependant en filtrage numérique on n'a pas besoin de composants électroniques, c'est des équations de récurrences qui permettent d'aboutir à différents réponses de filtres et de configurations. Ils sont ainsi plus flexibles car c'est du logiciel. La structure générale c'est les RIF (réponse Impulsionnelle Finie) ou les RII (Réponse impulsionnelle infinie). Pour les structure à réponse impulsionnelle fini des réponses en phase linéaire peuvent être réalisés, par contre pour les RII c'est plutôt des réponses en amplitude diverses qui peuvent être réalisés (c'est-à-dire Butterworth-chebyshev Bessels-etc)

2.4.3. circuit d'échantillonnage pour la détection

Pour séparer les lumières réfléchies de la source d'émission R et la source d'émission IR à partir du signal réfléchi détecté par le phototransistor, un circuit d'échantillonnage est nécessaire. Ce circuit doit

être constitué d'un circuit permettant de générer des impulsions à des instants spécifiques en synchronisme avec le signal de pilotage des LEDs. Ces impulsions (d'échantillonnage) commandent des échantillonneurs Bloqueurs respectifs pour chaque voix (voix R et Voix IR) pour permettre de détecter le signal PPG respectif à chaque lumière.

L'échantillonneur bloqueur:

Le rôle d'un échantillonneur bloqueur (**E/B**) est de maintenir constante l'amplitude de l'échantillon prélevé tous les **Te** durant le temps nécessaire à sa conversion. **Te** représente la période d'échantillonnage.[10]

Réaliser un échantillonneur bloqueur consiste à associer un interrupteur à une capacité.(voir figure 2.10)

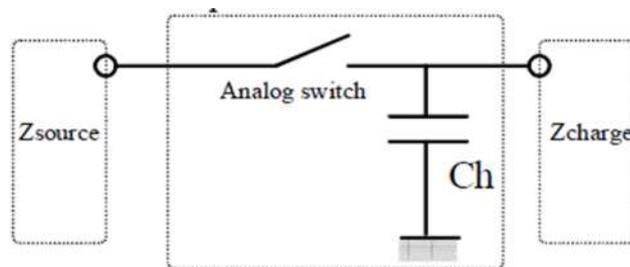


Figure 2.10 : Structure de l'échantillonneur bloqueur

La capacité joue le rôle d'élément mémoire, l'interrupteur est là pour réactualiser la valeur mémorisée ou bien l'isoler vis à vis de l'entrée.

Dans le cas idéal :

- **Interrupteur fermé :**

V_{eb}=V_e

La sortie **V_{eb}** suit les variations de l'entrée **V_e**. On transmet directement l'entrée sur la sortie. On dit que l'on est en phase d'échantillonnage (Sample).

- **Interrupteur ouvert :**

V_{eb}=Cste

La sortie reste constante et égale à la dernière valeur transmise du signal d'entrée. On dit que l'on est en phase de blocage (Hold).

La figure suivante montre l'évolution du signal de sortie durant les différentes phases de fonctionnement.

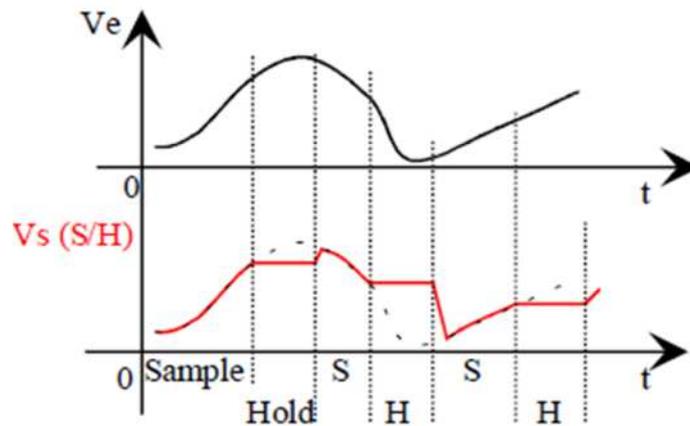


Figure 2.10.a : Evaluation de signal de sortie durant les phases de l'échantillonnage et de maintien

2.5. La carte d'acquisition :

Les expériences de commande ou de contrôle de processus réels à l'aide d'un ordinateur exigent d'abord une liaison convenable de l'ordinateur avec le monde extérieur. Un programme doit être en mesure de récupérer des informations à l'extérieur et de transmettre des signaux de commande à des appareils extérieurs.

Les informations traitées peuvent se présenter sous une forme binaire et ne connaître que deux états, « oui » ou « non » (0 ou 1) ou comme grandeurs analogiques.

L'ouverture indispensable sur le monde extérieur est offerte par des interfaces (également appelées jonctions, ports).

Les formes des ports qui relié le PC avec la carte sont :

- Port parallèle du PC
- Port série RS232
- Port USB.

2.5.1. Le port parallèle :

Le Port parallèle est un connecteur situé à l'arrière (figure 2.11) des ordinateurs compatibles PC reposant sur la communication parallèle. Il est associé à l'interface parallèle Centronics.

La communication parallèle a été conçue pour une imprimante imprimant du texte, caractère par caractère. Les imprimantes graphiques (pouvant imprimer des images) ont ensuite continué à utiliser ce système pour profiter de l'interface parallèle normalisée.

Le port parallèle est à l'origine unidirectionnel. Ce type d'interface a évolué vers le standard IEEE 1284, à la fois bidirectionnel et plus rapide. [9]



Figure 2.11 : port parallèle du PC

2.5.2. Le port série :

RS-232 (parfois appelée EIA RS-232, EIA 232 ou TIA 232) (figure 2.12) est une norme standardisant un bus de communication de type série sur trois fils minimum (électrique, mécanique et protocole). Disponible sur presque tous les PC jusqu'au milieu des années 2000, il est communément appelé le « port série ». Sur les systèmes d'exploitation MS-DOS et Windows, les ports RS-232 sont désignés par les noms COM1, COM2, etc. Cela leur a valu le surnom de « ports COM », encore utilisé de nos jours. Cependant, il est de plus en plus remplacé par le port USB.

Le standard RS-232 recouvre plusieurs autres standards : les recommandations UIT-T V.24 (définition des circuits) et V.28 (caractéristiques électriques), ainsi que la norme ISO 2110 pour la connectique.

Les liaisons RS-232 sont fréquemment utilisées dans l'industrie pour connecter différents appareils électroniques (automate, appareil de mesure, etc.).[9]



Figure 2.12: le port série du PC

2.5.3. Le port USB :

Le Universal Serial Bus (USB, en français Bus universel en série, (figure 2.13) dont le sigle, inusité, est BUS) est une norme relative à un bus informatique en transmission série qui sert à connecter des périphériques informatiques à un ordinateur. Le bus USB permet de connecter des périphériques à chaud (quand l'ordinateur est en marche) et en bénéficiant du Plug and Play (le système reconnaît automatiquement le périphérique). Il peut alimenter certains périphériques en énergie. Apparu en 1996, ce connecteur s'est généralisé dans les années 2000 pour connecter souris, clavier d'ordinateur, imprimantes, clés USB et autres périphériques bon marché sur les ordinateurs personnels. [9]

Le terme clé USB désigne un petit média amovible qui se branche sur le port USB d'un ordinateur, et comportant généralement une mémoire de masse.



Figure 2.13 : le port USB du PC

V. Conclusion :

A travers ce chapitre l'étude des différents blocs qui peuvent être utilisés pour réaliser un dispositif de mesure des signaux photopléthysmographiques a été faite. L'étude était menée sur les différents circuits à partir du capteur émetteur (LEDs), du capteur récepteur (photodiode ou phototransistor), du circuit de pilotage ou encore de mise en forme du signal détecté et de l'acquisition.

Dans le chapitre qui va suivre la description et l'étude du dispositif réalisé sera faite.