



**UNIVERSITE SULTAN MOULAY SLIMANE**  
**FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES**  
**BENI-MELLAL**

---



**Licence Ingénierie Electronique et Télécommunication**

**Rapport de Projet de Fin d'Etudes**

*Présenté par*

**ELFATAOUY Abdelkodouss**

**AHARHAR Mohammed**

**Etude et réalisation d'un suiveur de piste avec régulation PID**

**Réalisé au sein de la FST Béni-Mellal**

**Encadré par : Pr. El-Hocine AGOURIANE**

**Soutenue publiquement le JJ /06/2021 devant le jury :**

**NOM1**

**Président**

**NOM2**

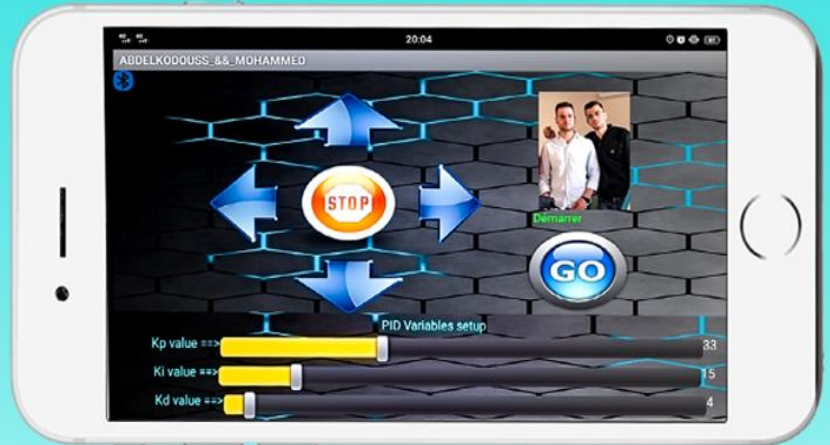
**Examineur**

**Pr. El-Hocine AGOURIANE**

**Encadrant**

realiser par :

- ✓ Abd elkodouss Elfataouy
- ✓ Mohammed Aharhar



encadrer par :

- ✓ Agouriane EL-Hocine

## Remerciement

En premier lieu, nous tenons à remercier « **DIEU** » pour nous avoir donné le courage et la patience durant nos années d'études.

En second lieu, nous adressons nos reconnaissances à notre encadrant **AGOURIANE EL-Hocine** Professeur à la faculté des sciences et techniques Béni-Mellal pour son aide précieuse, son encadrement de qualité et ses directives qui nous ont été d'une grande utilité afin d'accomplir notre projet de fin d'études.

Nous tenions également à remercier le professeur **L. OUFNI** chef du département de physique, pour avoir permis de mener ce travail dans de bonnes conditions.

Enfin, nous exprimons nos remerciements, les plus dévoués, au professeur **MABROUKI Mustapha responsable de la formation** ainsi qu'aux **membres de jury** pour avoir accepté de juger notre modeste projet de fin d'études.

## **Dédicace**

### **Nous dédions ce modeste travail**

*À nos chers parents*

*pour leur soutien, leur patience, leur sacrifice,*

*et leur amour, vous méritez tout éloge.*

*Vous qui avez fait de nous ce que nous sommes aujourd'hui.*

*Nous espérons être l'image que vous avez fait de nous, que dieu vous garde et vous bénisse.*

*Nous dédions aussi ce travail à nos chers frères et sœurs,*

*pour leur affection et leur encouragement qui ont toujours*

*été pour nous des plus précieux.*

*Que ce travail soit pour vous le gage de notre profond amour.*

*A tous nos amis,*

*A tous ceux qui nous ont aidés,*

*A tous ceux que nous aimons, nous dédions ce travail.*

# Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Chapitre I : Généralités sur la Robotique .....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>Introduction .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>I.1. Généralités sur les robots mobiles .....</b>  | <b>3</b>  |
| I.1.1. Définition d'un robot mobile .....   | 3         |
| I.1.2. Classification des robots mobile .....   | 3         |
| I.1.3. Types de robots : .....  | 3         |
| I.1.4. Les applications .....   | 4         |
| I.1.5. Les avantages dans l'utilisation du robot mobile .....   | 4         |
| <b>I.2. La structure mécanique et motricité .....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>I.3. Les composants d'un robot.....</b>  | <b>5</b>  |
| I.3.1 Les capteurs .....  | 5         |
| I.3.1.1 Classification des capteurs .....   | 6         |
| I.3.1.1.1 Le signal analogique .....  | 6         |
| I.3.1.1.2 Le signal numérique .....   | 6         |
| I.3.1.1.3 Le signal logique .....   | 7         |
| I.3.2 Les actionneurs .....   | 7         |
| I.3.2.1 Le type d'actionneurs .....   | 7         |
| I.3.2.1.1 Moteur à courant continue .....   | 7         |
| I.3.2.1.2 Servomoteur .....   | 8         |
| <b>Conclusion.....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>Chapitre II : L'étude du régulateur PID et description de fonctionnement du suiveur de piste .....</b> | <b>10</b> |
| <b>Introduction .....</b>   | <b>10</b> |
| <b>Partie I : Généralités sur la régulation PID : analogique et Numérique .....</b>                       | <b>10</b> |
| <b>II.1 Historique de contrôleur PID .....</b>  | <b>10</b> |
| <b>II.2 Définition de l'automatique. ....</b>   | <b>11</b> |
| <b>II.2.1 Système automatisé.....</b>   | <b>11</b> |
| II.2.2 Système linéaire et non linéaire.....  | 11        |
| <b>II.4 Notion de système asservi.....</b>  | <b>11</b> |
| <b>II.5. La régulation dans l'automatique .....</b>   | <b>12</b> |
| II.5.1. Les performances d'un système asservi : .....   | 12        |
| <b>II.6. Classification selon le type de régulateur .....</b>   | <b>13</b> |
| II.6.1. Le Régulateur analogique (d'un système continu).....  | 13        |
| II.6.1.1. Le régulateur PID .....   | 14        |
| II.6.1.2. Le système asservi continue avec régulateur PID .....   | 17        |
| II.6.2. Le Régulateur numérique.....  | 18        |
| II.6.2.1. Le signal échantillonné .....   | 18        |
| II.6.2.2. Le système asservi numérique avec régulateur PID .....  | 19        |
| II.6.2.2.1. Structure générale d'un asservissement numérique d'un système analogique.....                 | 19        |
| II.6.2.3. Le régulateur PID .....   | 20        |

|   |                  |
|---|------------------|
| <b>Conclusion.....</b>  | <b>21</b>        |
| <b>Partie II : Le fonctionnement et description du suiveur de piste .....</b>   | <b>22</b>        |
| <b>II.1. Cahier de charge et analyse fonctionnelle du suiveur de piste .....</b>  | <b>22</b>        |
| II.1.1. Cahier de charge .....  | 22               |
| <b>II.2 Appinventor .....</b>   | <b>31</b>        |
| <b>Conclusion.....</b>  | <b>32</b>        |
| <b><i>Chapitre III : Conception, Simulation et Réalisation.....</i></b>   | <b><i>33</i></b> |
| <b>Introduction .....</b>   | <b>33</b>        |
| <b>III.1. Présentation matérielle de robot.....</b>   | <b>33</b>        |
| III.1.1. La partie mécanique.....   | 33               |
| III.1.2. La partie électronique .....   | 34               |
| III.1.2.1. Les cartes électroniques .....   | 34               |
| III.1.2.1.1. Les capteurs infrarouge tct5000 .....  | 35               |
| <b>III.2. Le fonctionnement de suiveur de piste .....</b>   | <b>36</b>        |
| <b>III.3. Les problèmes et solutions .....</b>  | <b>39</b>        |
| III.3. 1. Les problèmes techniques.....   | 39               |
| III.3.1.1. La connexion des capteurs .....  | 39               |
| III.3.2. Installation du robot manuellement sur une piste et réglage des coefficients du régulateur PID à distance..... | 41               |
| III.3.2.1. Le robot ne détecte pas l'obstacle sur la piste .....  | 43               |
| III.3.2.2. Le chargeur de batterie lithium .....  | 44               |
| III.3.2. Les problèmes mécaniques.....  | 46               |
| III.3.2.1. Roues de guidage : roue décentré orientable et roue à bille .....  | 46               |
| III.3.2.2. La vitesse des quatre moteurs n'est pas identique .....  | 47               |
| <b>III.4. Le Schéma global de suiveur de piste avec PID intelligent.....</b>  | <b>47</b>        |
| <b>III.5. La connexion entre les composants de suiveur de piste avec PID intelligent.....</b>                           | <b>49</b>        |
| <b>III.6. Localisation des composants sur le robot suiveur de piste .....</b>   | <b>52</b>        |
| <b>III.7. Les modes de suiveur de piste avec PID intelligent .....</b>  | <b>53</b>        |
| <b>Conclusion.....</b>  | <b>54</b>        |
| <b><i>Conclusion générale.....</i></b>  | <b><i>55</i></b> |
| <b><i>Annexe .....</i></b>  | <b><i>56</i></b> |

## **Résumé**

Le but de ce projet est l'étude et la réalisation d'un robot autonome avec PID, capable de suivre une piste et éviter les obstacles, offrant la possibilité de le commander en utilisant un mode Bluetooth de contrôle à distance. Ce robot est à base d'un microcontrôleur Arduino Uno, de capteurs de lumières, capteur ultrasonique ainsi que d'un driver de puissance pour alimenter les moteurs qui assurent le déplacement du robot à travers le mécanisme que nous avons réalisé. Son rôle est de développer les capacités d'action des humains dans des environnements hostiles ou inaccessibles, et transporter les produits dans le domaine industriel.

## Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| TABLEAU 1: CARACTERISTIQUES DE LA CARTE ARDUINO UNO                     | 26 |
| TABLEAU 2: TABLEAU : LE FONCTIONNEMENT DES BROCHES                      | 29 |
| TABLEAU 3: LA TABLE DE VERITE DE FONCTIONNEMENT DE CONTROLE D'UN MOTEUR | 30 |
| TABLEAU 4: FONCTION DE SUIVEUR DE PISTE                                 | 38 |
| TABLEAU 5: LES DEFAUTS DE ROUE DE GUIDAGE                               | 46 |
| TABLEAU 6: DESCRIPTION LES DIFFERENTS TYPES DE COMMUNICATION            | 48 |
| TABLEAU 7: LES CAPTEURS INFRAROUGES IR                                  | 50 |
| TABLEAU 8: LES BROCHES DE CAPTEUR ULTRASON :                            | 50 |
| TABLEAU 9: LES BROCHES DE CAPTEUR ULTRASON :                            | 50 |
| TABLEAU 10: LES BROCHES DE CARTE BLUETOOTH                              | 51 |
| TABLEAU 11: LA CONNEXION ENTRE ARDUINO ET DRIVER MOTEUR DU PONT H       | 51 |
| TABLEAU 12: DESCRIPTION DE DIFFERENTES TACHES DE ROBOT                  | 53 |

## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| FIGURE 1: QUELQUES APPLICATIONS DES ROBOTS MOBILES                 | 4  |
| FIGURE 2: DIFFERENTES STRUCTURES MECANIQUES DES ROBOTS             | 5  |
| FIGURE 3: REPONSE D'UN CAPTEUR ANALOGIQUE                          | 6  |
| FIGURE 4: REPONSE D'UN CAPTEUR NUMERIQUE                           | 6  |
| FIGURE 5: REPONSE D'UN CAPTEUR LOGIQUE                             | 7  |
| FIGURE 6: FONCTIONNEMENT D'UN ACTIONNEUR                           | 7  |
| FIGURE 7: SCHEMA BLOC DU MOTEUR REDUCTEUR                          | 8  |
| FIGURE 8: ASSERVISSEMENT DE SYSTEME                                | 12 |
| FIGURE 9: LA STABILITE D'UN SYSTEME                                | 12 |
| FIGURE 10: LA PRECISION D'UN SYSTEME                               | 13 |
| FIGURE 11: LA RAPIDITE D'UN SYSTEME                                | 13 |
| FIGURE 12: AOP NON INVERSEUR                                       | 14 |
| FIGURE 13: PROPORTIONNALITE D'ERREUR                               | 14 |
| FIGURE 14: L'ERREUR ENTRE LA CONSIGNE DESIREE ET DE MESURE         | 15 |
| FIGURE 15: AOP DERIVATEUR  | 15 |
| FIGURE 16: LA DERIVEE D'ERREUR                                     | 16 |
| FIGURE 17: STABILITE DE SIGNAL PAR ACTION DERIVEE                  | 16 |
| FIGURE 18: AOP INTEGRATEUR   | 17 |
| FIGURE 19: L'INTEGRATION D'ERREUR                                  | 17 |
| FIGURE 20: LA PRECISION DE SIGNAL PAR ACTION INTEGRAL              | 17 |
| FIGURE 21: LE SYSTEME ASSERVI ANALOGIQUE INSERE PAR LE REGULATEUR. | 18 |
| FIGURE 22: L'ECHANTILLONNAGE D'UN SIGNAL                           | 18 |
| FIGURE 23: SYSTEME ASSERVI NUMERIQUE                               | 19 |
| FIGURE 24: L'INTEGRALE NUMERIQUE                                   | 20 |
| FIGURE 25: LA DERIVE NUMERIQUE.                                    | 21 |
| FIGURE 26: DIAGRAMME SCHEMATIQUE DU SUIVEUR                        | 22 |
| FIGURE 27: SCHEMA ELECTRONIQUE DU CAPTEUR INFRAROUGE               | 23 |
| FIGURE 28: SCHEMA BLOC DE FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR A ULTRASON     | 24 |
| FIGURE 29: STRUCTURE DE LA CARTE ARDUINO UNO                       | 25 |
| FIGURE 30: LE CAPTEUR BLUETOOTH HC-06                              | 27 |
| FIGURE 31: LES PILES DE LITHIUM                                    | 27 |
| FIGURE 32: L'EMPLACEMENT DU DRIVER DANS LA CHAINE.                 | 28 |
| FIGURE 33: DESCRIPTION DIFFERENTE COMPOSANTES DU DRIVER MOTEUR     | 28 |
| FIGURE 34: SCHEMA ELECTRONIQUE DE PONT EN H                        | 29 |
| FIGURE 35: SCHEMA BLOC DE FONCTIONNEMENT DES ENGRENAGES            | 30 |



|   |    |
|---|----|
| FIGURE 36: LA COUPE DU MOTEUR MCC                                       | 31 |
| FIGURE 37: APP INVENTOR ET LANGAGE SCRATCH                              | 32 |
| FIGURE 38: LES PIECES DE ROBOT  | 34 |
| FIGURE 39: LE MONTAGE DE CHASSIS DE ROBOT                               | 34 |
| FIGURE 40: LES CARTES ELECTRONIQUES                                     | 35 |
| FIGURE 41: CAPTEUR INFRAROUGE   | 36 |
| FIGURE 42: SIMULATION SOUS ISIS DU CAPTEUR AVEC UN MOTEUR               | 36 |
| FIGURE 43: LE ROBOT SUIVEUR DE PISTE                                    | 37 |
| FIGURE 44: LE PROBLEME DE CONNEXION DES CAPTEURS INFRAROUGE             | 40 |
| FIGURE 45: CIRCUIT IMPRIME DES CAPTEURS INFRAROUGES                     | 40 |
| FIGURE 46: APPLICATION POUR CONTROLER LE ROBOT PAR BLUETOOTH            | 41 |
| FIGURE 47: ASPECT DE L'APPLICATION ANDROID REALISEE                     | 41 |
| FIGURE 48: ALGORITHME DE L'APPLICATION BLUETOOTH                        | 43 |
| FIGURE 49: LE ROBOT NE DETECTE PAS L'OBSTACLE                           | 43 |
| FIGURE 50: ASPECT ET FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR ULTRASON                 | 43 |
| FIGURE 51: ILLUSTRATION DE FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR                    | 44 |
| FIGURE 52: LA STRUCTURE DE BRANCHEMENT DU CHARGEUR                      | 45 |
| FIGURE 53: LE CHARGEUR DE BATTERIE LITHIUM REALISE                      | 45 |
| FIGURE 54: LA STRUCTURE DE CHARGER DES PILES                            | 46 |
| FIGURE 55: LA CONFIGURATION DE LA BATTERIE REALISEE.                    | 46 |
| FIGURE 56: SCHEMA SYNOPTIQUE DE L'ENSEMBLE DU SUIVEUR DE PISTE          | 48 |
| FIGURE 57: LE BRANCHEMENT DES COMPOSANTS DU ROBOT PAR LOGICIEL FRITZING | 50 |
| FIGURE 58: VUE AU-DESSOUS DE ROBOT                                      | 52 |
| FIGURE 59: VUE AU-DESSUS DE ROBOT                                       | 52 |
| FIGURE 60: LES MULTITACHES DE ROBOT                                     | 53 |

## Introduction générale

Depuis bien longtemps, l'Homme rêve de créer des machines intelligentes capables d'effectuer des tâches à sa place. Ainsi, les humains auraient plus de temps à consacrer pour leurs loisirs, ou prendraient moins de risques pour effectuer des tâches dangereuses dans des endroits inaccessibles et hostiles. La robotique est l'ensemble des techniques permettant la conception et la réalisation de ces machines appelées « robots ». Un robot est un appareil effectuant, grâce à un système de commande automatique à microprocesseur, une tâche précise pour laquelle il a été conçu dans le domaine industriel, domestique ou scientifique.

Dans ce travail on va se focaliser sur les robots mobiles, qui sont largement utilisés dans les environnements industriels, le plus souvent pour effectuer des tâches répétitives et pénibles. L'intérêt principal des robots mobiles est de permettre aux êtres humains d'effectuer des tâches dangereuses dans des endroits inaccessibles. C'est pour cela que l'un des domaines les plus populaires où les robots mobiles sont utilisés est le domaine scientifique.

Afin d'être autonome, un robot mobile doit posséder de nombreuses capacités. Premièrement, il doit être capable de percevoir son environnement et de se localiser dans celui-ci. Pour ce faire, il doit être doté de plusieurs capteurs. Une fois localisé dans son environnement, le robot doit être capable de se déplacer d'un point à un autre en trouvant des chemins dégagés et sécurisés afin d'éviter des collisions avec les obstacles, pour cela les robots mobiles utilisent plusieurs moyens de locomotion selon l'environnement auquel ils sont destinés. De plus, un robot est appelé à communiquer avec son environnement ou avec des agents situés à proximité et cela peut être fait par une interface wifi, Bluetooth...etc.

Le but de ce travail est la conception et réalisation d'un suiveur de piste doté d'une régulation PID en plus télécommandé à distance par Bluetooth et qui a la possibilité de détecteur des obstacles et d'être autonome. Pour le réaliser on a utilisé une carte Arduino UNO qui représente le cerveau du robot munis de différents capteurs qui vont lui permettre la perception, il sera doté de moteurs et roues pour le déplacement, puis un régulateur PID

qui pilote le suiveur de piste afin d'améliorer les performances, ainsi qu'un moyen de communication par voie Bluetooth qui offre une possibilité de contrôle à distance.

Ce travail est organisé de la façon suivante :

- Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les robots mobiles et la structure robotique.
- Le deuxième chapitre présente la notion de système asservi et l'étude de la régulation automatique PID.
- Le troisième chapitre est dédié à la réalisation et conception du robot suiveur de piste.

# Chapitre I : Généralités sur la Robotique

## Introduction

La robotique est une science à la croisée de plusieurs disciplines scientifiques et techniques (informatique, mécanique, automatique et électronique) permettent la conception et la réalisation des robots qui vise à rendre une machine autonome.

## I.1. Généralités sur les robots mobiles

Les robots mobiles sont des robots capables de se déplacer dans leur environnement.

### I.1.1. Définition d'un robot mobile

Un robot est une machine qui est équipée de capacités de perception, de décision et d'action qui lui permettent d'agir de manière autonome dans son environnement en fonction des informations collectées par ses différents capteurs.

L'appellation Robot mobile regroupe aussi un ensemble de programmes associés, dont les mouvements sont synchronisés et commandés numériquement. Il n'est donc qu'une machine programmable qui ne fait qu'exécuter ce que l'homme lui a programmé.

### I.1.2. Classification des robots mobile

La classification des robots mobiles se fait selon plusieurs critères :

- Degré d'autonomie ;
- Système de locomotion ;
- Énergie utilisée.

La classification la plus intéressante et la plus utilisée est selon le degré d'autonomie. Un robot mobile autonome est un appareil capable de se déplacer par ses propres moyens, dotés de capacités décisionnelles et de moyens d'acquisition et de traitement de l'information qui lui permettent d'accomplir, sous un contrôle humain réduit, un certain nombre de tâches dans un environnement complètement inconnu.

### I.1.3. Types de robots :

- Robot télécommandé par un opérateur :

Ces robots sont commandés par un opérateur qui leur impose chaque tâche élémentaire à réaliser.

- Robot télécommandé au sens de la tâche à réaliser :

Le véhicule contrôle automatiquement ses actions.

- Robot semi- autonome :

Ce type de robot réalise des tâches prédéfinies.

- Robot autonome :

Ce type de robot réalise des tâches semi-définies, il pose des problèmes d'un niveau de complexité élevé de représentation des connaissances, de capacité décisionnelle et de génération de plans qui sont résolus à bord dans la mesure du possible.

#### I.1.4. Les applications

Les applications des robots sont diverses et dans plusieurs domaines.

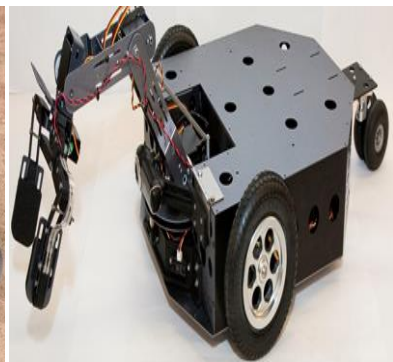
- Véhicules autoguidés ou VAG
- Robot explorateur
- Robot de service
- Robot ludique
- Robot de Surveillance
- Robot mobile de tri
- Robot quadrupède



Robot AVG



Robot explorateur



Robot de tri

*Figure 1: Quelques applications des robots mobiles*

#### I.1.5. Les avantages dans l'utilisation du robot mobile

L'utilisation de robots mobiles présente ces principaux avantages :

- Remplacement de l'homme dans l'exécution des tâches complexes et répétitives.
- Accroissement de la capacité de production.
- Déplacement sans conducteur.

## I.2. La structure mécanique et motricité

Il existe quatre types de structures mécaniques assurant la motricité des robots :

- Les robots à roues.
- Les robots à chenilles.
- Les robots marcheurs.
- Les robots à pattes.

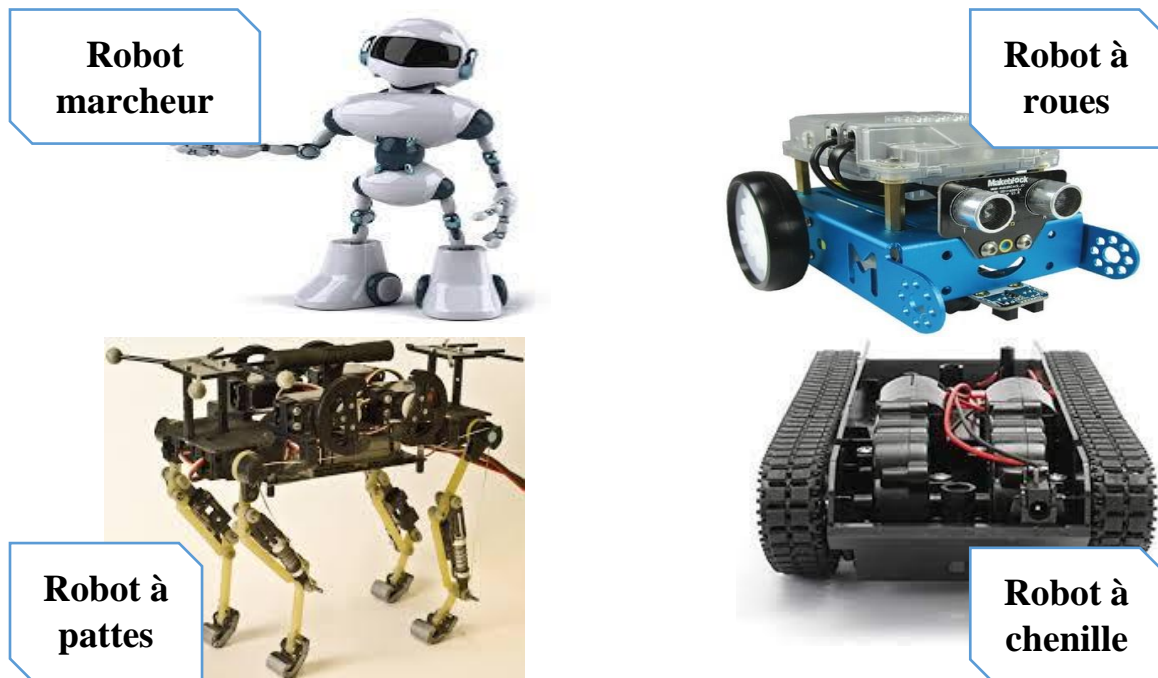


Figure 2: Différentes structures mécaniques des robots

## I.3. Les composants d'un robot

Un robot mobile est constitué de composantes matérielles et logiciels. Parmi ces composants on retrouve les capteurs, les actionneurs, carte de traitement et une source d'énergie.

### I.3.1 Les capteurs

Les capteurs sont des transducteurs qui permettent d'acquérir des données provenant d'environnement pour mesurer une grandeur physique (**température, obstacle,**

vitesse, humidité, pression, niveau, débit, ...) en générale en la transformant en une grandeur électrique.

### *1.3.1.1 Classification des capteurs*

Selon la nature du signal ou l'information de sortie des capteurs on peut les classer en trois catégories :

#### 1.3.1.1.1 Le signal analogique

L'information peut prendre toutes les valeurs possibles entre deux certaines valeurs limites pouvant être courant ou tension, on parle alors d'un **capteur analogique**.

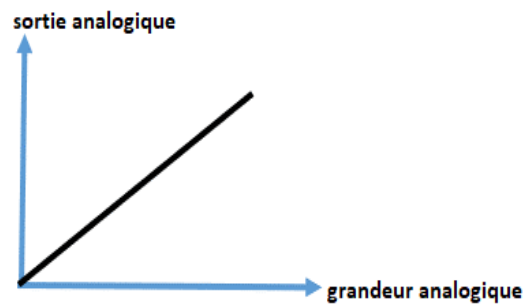


Figure 3: Réponse d'un capteur analogique

#### 1.3.1.1.2 Le signal numérique

L'information fournie par le capteur est un nombre binaire codé sur **n** bits pouvant être un train d'impulsion, code numérique binaire. On parle alors d'un **codeur numérique**.

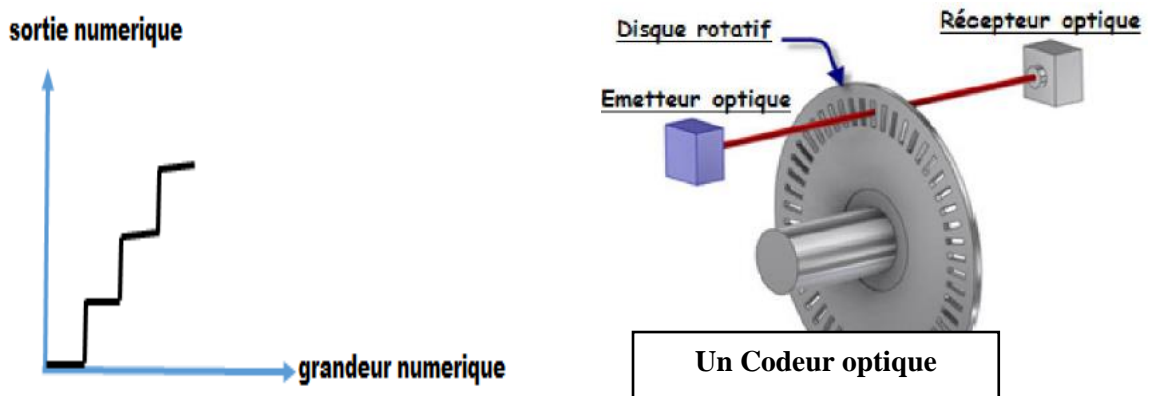


Figure 4: Réponse d'un capteur numérique

### I.3.1.1.3 Le signal logique

L'information ne peut prendre que la valeur **1** ou **0**. On parle alors d'un **détecteur Tout Ou Rien "TOR"**. Il est très répandu dans les systèmes automatisés et est classé en deux familles :

- Capteurs avec contact ou détecteur de position.
- Capteurs sans contact ou détecteurs de proximité.

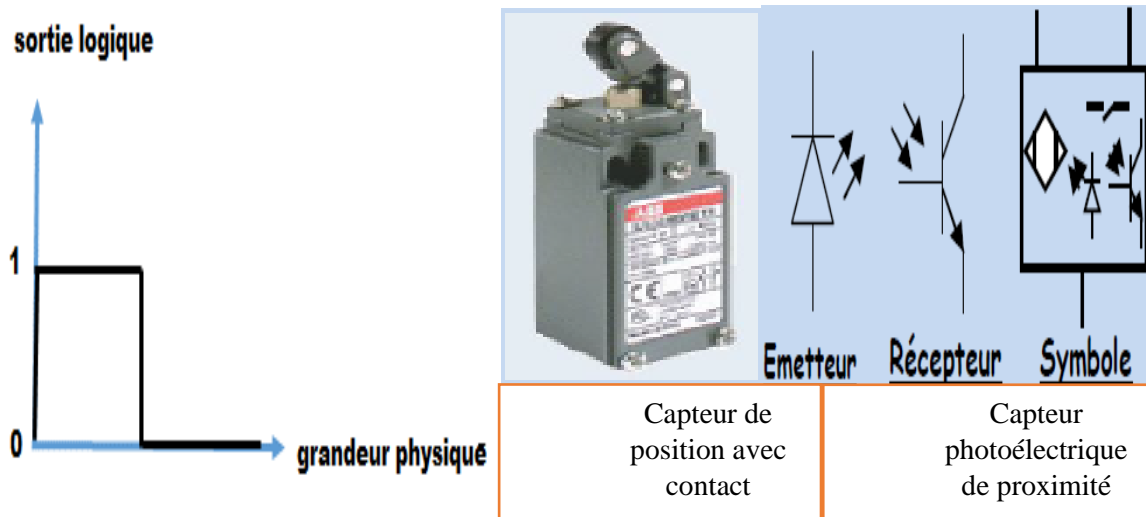


Figure 5: Réponse d'un capteur logique

## **I.3.2 Les actionneurs**

Les actionneurs sont situés dans la partie opérative d'un système automatisé. Ils font partie de la chaîne d'action de ce système. Les actionneurs transforment l'énergie de puissance fournie du système en énergie mécanique pour déplacer une machine.

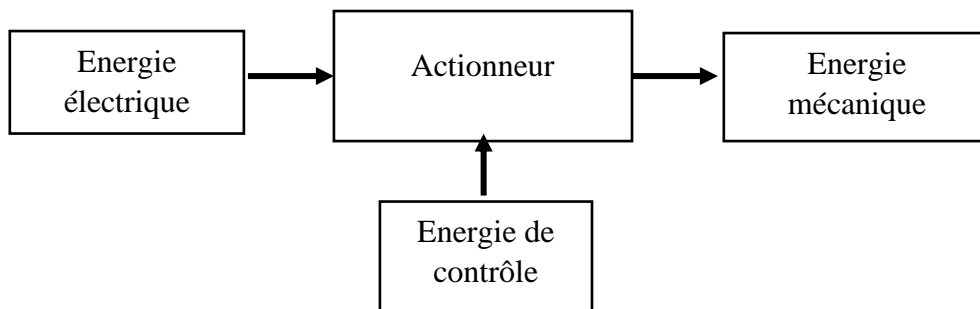


Figure 6: Fonctionnement d'un actionneur

### ***I.3.2.1 Le type d'actionneurs***

#### I.3.2.1.1 Moteur à courant continu

Un moteur continu appelé également moteur DC, transforme une énergie électrique en une énergie mécanique. Il sert notamment à faire tourner les roues d'un système de façon "constante".



Son Inconvénient est son faible couple mécanique. Pour augmenter le couple il faut lui insérer un Réducteur.

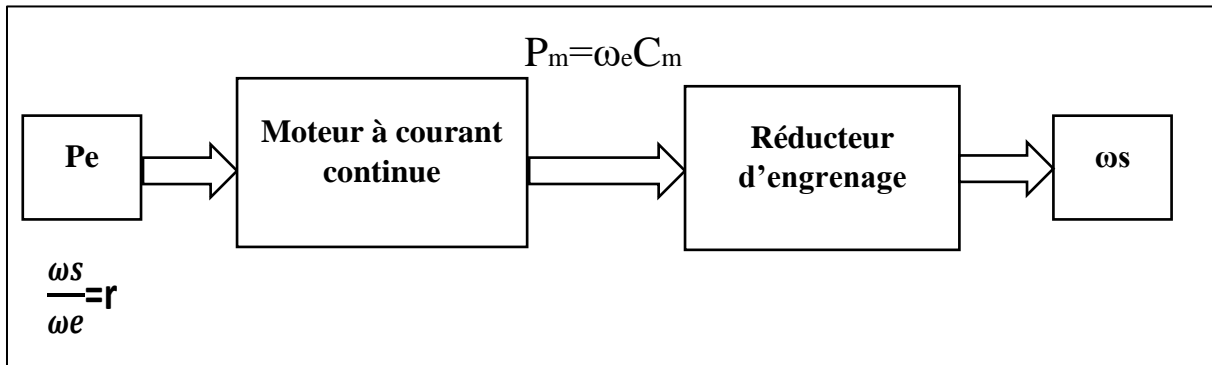


Figure 7: Schéma bloc du moteur réducteur

- $P_e$  : Puissance électrique.
- $P_m$  : Puissance mécanique.
- $R$  : le rapport de réduction.
- $r < 1$  : réduit la vitesse angulaire.
- $r > 1$  : multiplie la vitesse angulaire.
- $P_e = UI = P_m = C_m \omega_e \rightarrow C_m = \frac{P_e}{\omega_e}$

Pour augmenter le couple il faut diminuer la vitesse angulaire.

#### 1.3.2.1.2 Servomoteur

Un servomoteur est un moteur continu équipé d'un réducteur (des engrenages), dont l'objectif est de réduire la vitesse et d'augmenter le couple (la puissance), il est doté d'un potentiomètre qui permet au servomoteur de garder l'angle d'inclinaison choisit. En effet, l'un des intérêts des servomoteurs c'est de leur faire prendre et garder un angle.

Pour contrôler un servomoteur, il suffit de lui envoyer une impulsion de quelques millisecondes qui se répète à intervalle régulier (ce que l'on appelle la période), et dont la durée détermine l'angle de rotation de l'axe du servomoteur.

Par exemple une impulsion de:

- 1,25 ms = 0 degré
- 1,50 ms = 90 degrés
- 1,75 ms = 180 degrés

## **Conclusion**

Dans ce chapitre a été exposé les notions de base de la robotique mobile, quelques types d'applications et de classification ont été présentés. Dans la suite certains points seront détaillés, car ils sont plus étroitement liés au présent projet.

## Chapitre II : L'étude du régulateur PID et description de fonctionnement du suiveur de piste

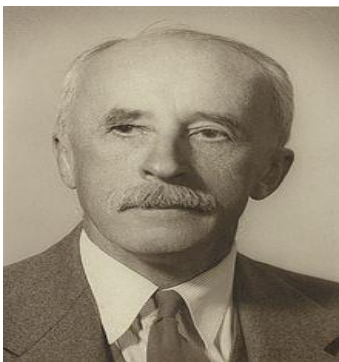
### Introduction

Pour être compétitif, un procédé industriel doit être obligatoirement automatisé. En effet, la compétitivité exige de le maintenir le plus près possible de son optimum de fonctionnement prédéfini par un cahier des charges qui fixe les conditions et performances imposées. La régulation occupe généralement la grande partie de l'automatisation d'un procédé industriel. Actuellement, il est impossible de rencontrer un procédé industriel n'utilisant pas de régulation. Cela veut dire que la régulation industrielle est plus qu'indispensable pour le bon fonctionnement et donc pour la compétitivité de tout procédé industriel. Le contrôle en boucle fermée, régulation ou asservissement, est le plus populaire au sein de la majorité des industriels. Dans le cadre de notre projet de fin d'études, l'objectif du travail qui nous a été proposé est de faire l'étude de la régulation proportionnelle, intégrale, dérivée ou PID sur le suiveur de piste afin d'optimiser les performances du suiveur de piste.

Dans ce chapitre, après un bref historique sur la régulation PID, nous allons donner quelques rappels sur l'asservissement et sur la régulation et leurs objectifs. Nous allons aussi discuter sur la typologie de la régulation qui comprend deux types : régulation analogique et régulation numérique qui ont le même principe de fonctionnement.

### Partie I : Généralités sur la régulation PID : analogique et Numérique

#### II.1 Historique de contrôleur PID



Nicolas Minorsky est né en septembre 1885 à Korcheva, Russie et il est mort à l'âge de 85 ans le 31 juillet 1970, en Italie. Il a fait ses études à l'école navale. Il a fait des études en génie électrique et en sortit en 1914 avec un doctorat en sciences appliquées, il a servi dans la Marine russe et a été pendant un an adjoint et il a immigré vers l'américain et a travaillé dans le domaine de l'électronique et de la physique applique en tant que professeur universitaire. Pendant la guerre il a travaillé en grande

partie sur des problèmes de stabilité, c'est durant cette période qu'il s'intéressé de plus en plus aux systèmes non linéaires. En 1946 il rejoint la division de l'ingénierie mécanique pour continuer à travailler sur les problèmes de stabilisation des navires, sur son article « stabilité directionnelle des corps a direction automatique » Minorsky intervient au croisement de trois domaines : **La mécanique, l'électricité et les mathématiques**. Minorsky a étudié le comportement mathématique des équations différentielles de mécanisme des navires c'est pour trouver des paramètres principaux au domaine d'électricité afin de piloter des navires automatiquement.

## II.2 Définition de l'automatique.

L'automatique est une science qui traite de la modélisation, de l'analyse, de l'identification et de la commande des systèmes dynamiques.

Un automaticien doit être à la fois :

- Mathématicien.
- Electricien.
- Mécanicien.
- Informaticien.

### II.2.1 Système automatisé

Un système automatisé est un système réalisant des opérations et pour lequel l'homme n'intervient que dans la programmation du système et dans son réglage.

### II.2.2 Système linéaire et non linéaire.

Dans les Systèmes linéaires les lois mathématiques entre l'entrée et la sortie sont des équations différentielles linéaires à coefficient constante. Un système linéaire possède les propriétés de superposition et de proportionnalité.

Le principe de superposition permet de décomposer l'étude de systèmes complexes en sous-systèmes plus simples à étudier.

Dans les systèmes non linéaires les lois mathématiques entre l'entrée et la sortie sont des équations différentielles non linéaires, et dans ce cas on ne peut pas appliquer le principe de superposition. Il est difficile de les résoudre en temps continu on peut les simplifier par des approximations numériques en temps discret.

## II.4 Notion de système asservi.

Les Systèmes asservis (contre-réaction) possèdent des entrées qui sont ajustée en réaction aux informations de sortie, comme le schématise le schéma bloc de figure 8.

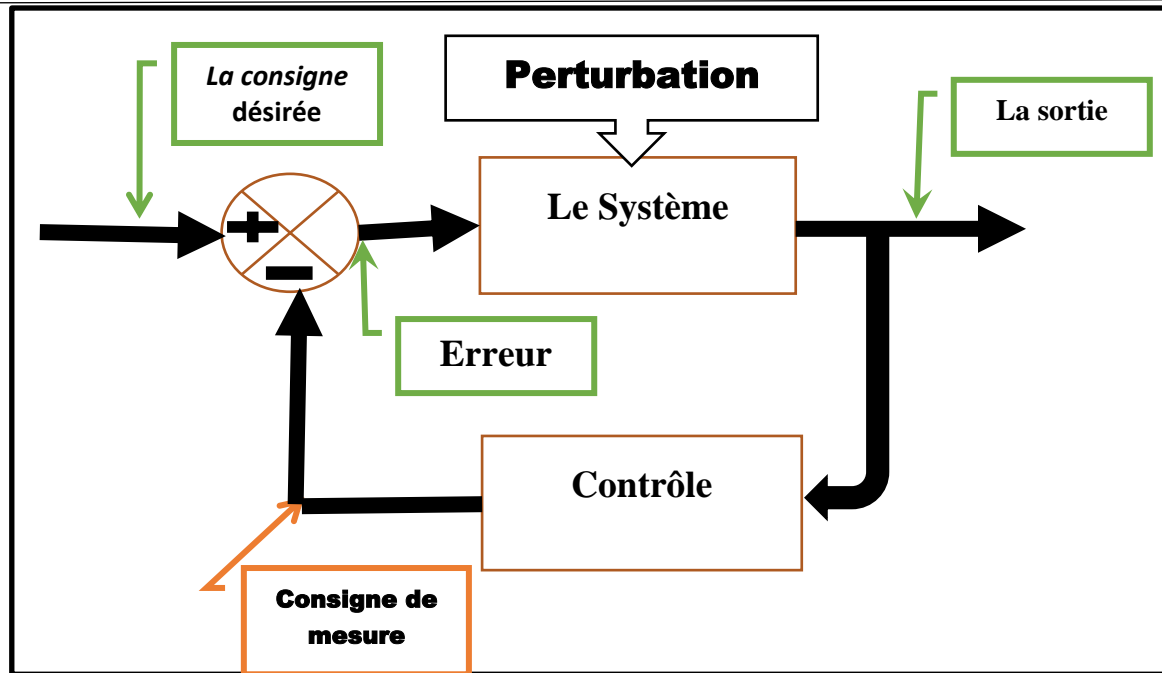


Figure 8: Asservissement de système

Un système asservi a pour objectif de :

- Limiter au mieux l'erreur entre la consigne désirée et la consigne de mesure.
- Diminuer au mieux l'effet de perturbation sur la sortie.

## II.5. La régulation dans l'automatique

La régulation regroupe l'ensemble des techniques qui permettent de contrôler une grandeur physique, afin d'optimiser les performances du système asservi.

### II.5.1. Les performances d'un système asservi :

Stabilité : c'est la faculté de système asservi de revenir à sa position de repos suite à une perturbation de courte durée.

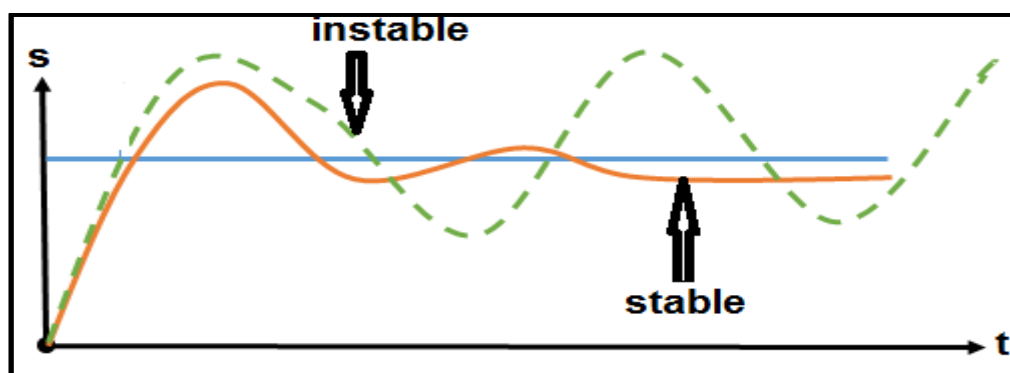


Figure 9: La stabilité d'un système

Précision : c'est l'erreur entre la consigne désirée et la consigne mesurée. Si l'erreur est faible la précision est grande.

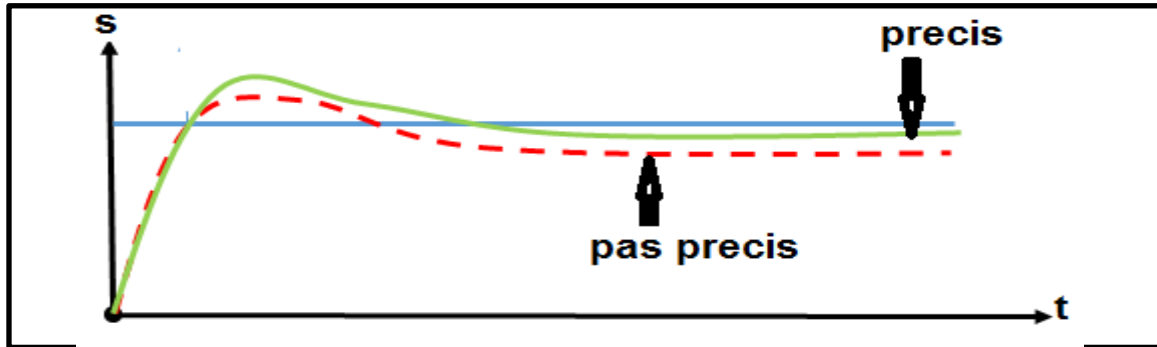


Figure 10: La précision d'un système

Rapidité : elle peut être mesurée par le temps de stabilisation ou de réponse qui est le temps nécessaire pour atteindre le régime final à  $\pm 5\%$  près, suite à une perturbation ou à une variation de la consigne.

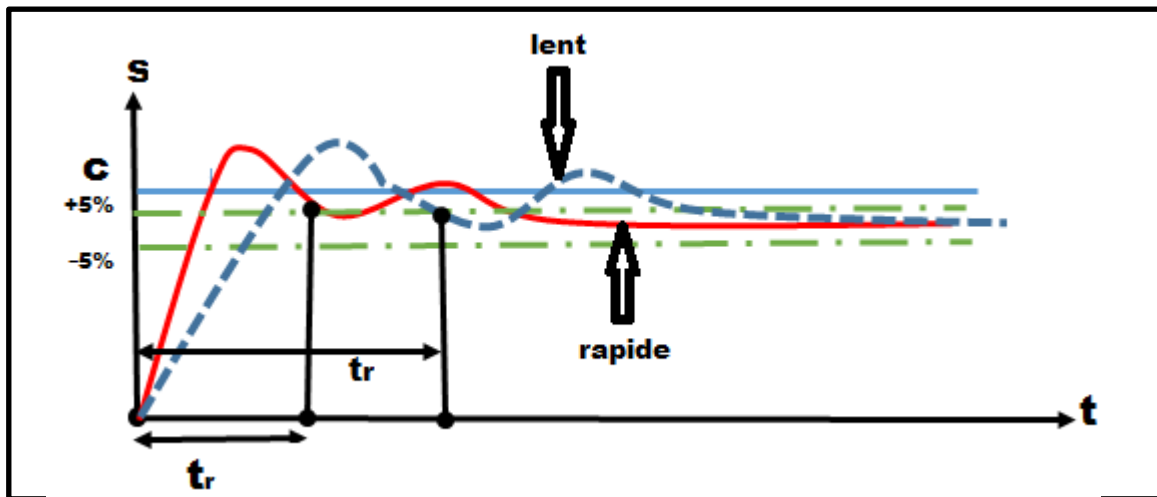


Figure 11: La rapidité d'un système

## II.6. Classification selon le type de régulateur

On peut classer la régulation d'un système en deux catégories ça dépend de la nature du système numérique ou analogique.

### II.6.1. Le Régulateur analogique (d'un système continu).

Un système est dit continu lorsque les grandeurs le caractérisant délivrent une information à chaque instant donc continu dans le temps.

La régulation permet de maintenir une grandeur physique à une valeur constante quelques soient les perturbations extérieures. L'objectif global de la régulation peut se

résumer par ces trois mots clefs : Mesurer, Comparer et Corriger. Généralement Pour améliorer les performances d'un système asservi, on insère dans la chaîne directe du système un correcteur PID.

### II.6.1.1. Le régulateur PID

Généralement il est composé par trois actions pour améliorer le système.

#### i. Action P

C'est une action proportionnelle qui est schématisé par le circuit électronique analogique non inverseur de la figure 14.

**P : l'action proportionnelle** agit de manière instantanée, donc rapide. Afin de diminuer l'écart de réglage et rendre le système plus rapide, on augmente le gain (figure 13) mais, on est limité par la stabilité du système.

Le régulateur p est utilisé lorsqu'on désire régler un paramètre dont la précision n'est pas importante.

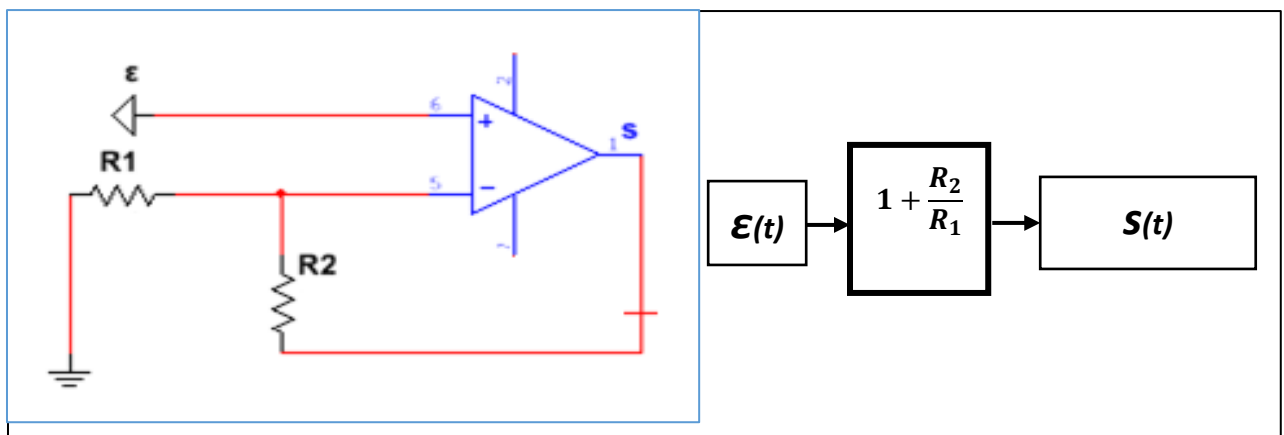


Figure 12:AOP non inverseur

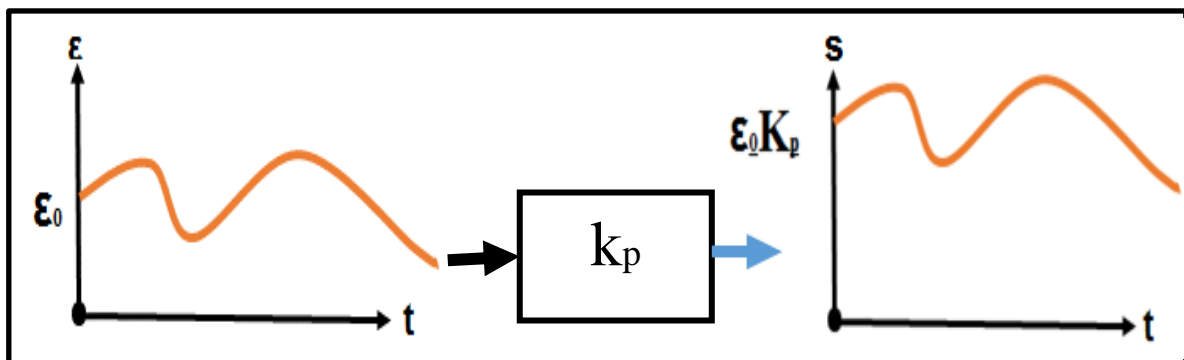


Figure 13:Proportionnalité d'erreur

On remarque que le signal de commande  $S$  évolue par l'action du coefficient correcteur  $K_p$ .

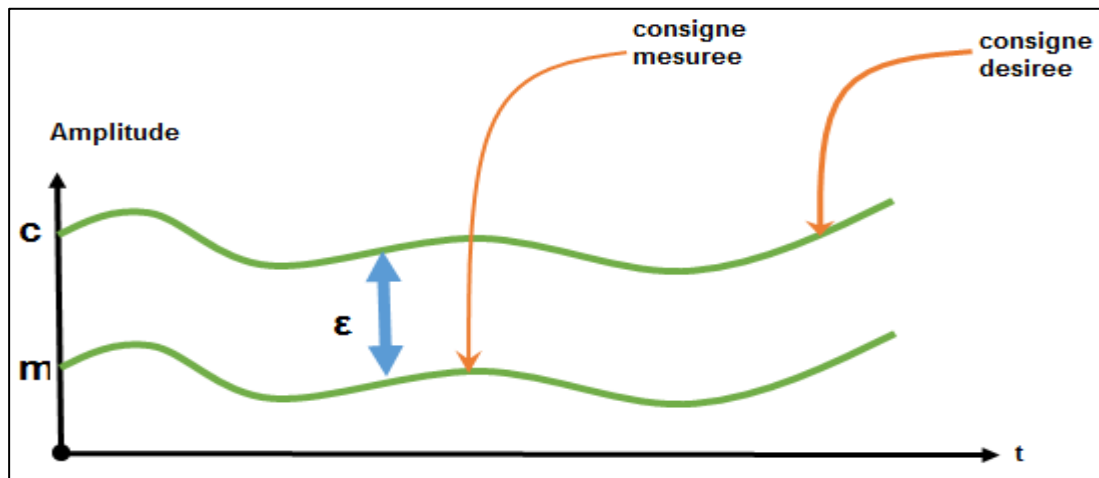


Figure 14: l'erreur entre la consigne désirée et de mesure

Pour corriger erreur il faut multiplier erreur par un coefficient  $K_p$  qui augmente le gain afin d'améliorer la rapidité (la vitesse) du système, et lorsque la vitesse augmente le temps de réponses ( $t_r$ ) diminue.

## ii. Action D

C'est une action de dérivée qui est réalisée par un montage électronique analogique dérivateur (Figure 15).

L'action dérivée permet d'accélérer la réponse du système et améliore la stabilité de la boucle, en permettant notamment un amortissement rapide des oscillations dues à l'apparition d'une perturbation ou à une variation subite de la consigne.

L'action D est utilisée dans l'industrie pour le réglage des variables lentes.

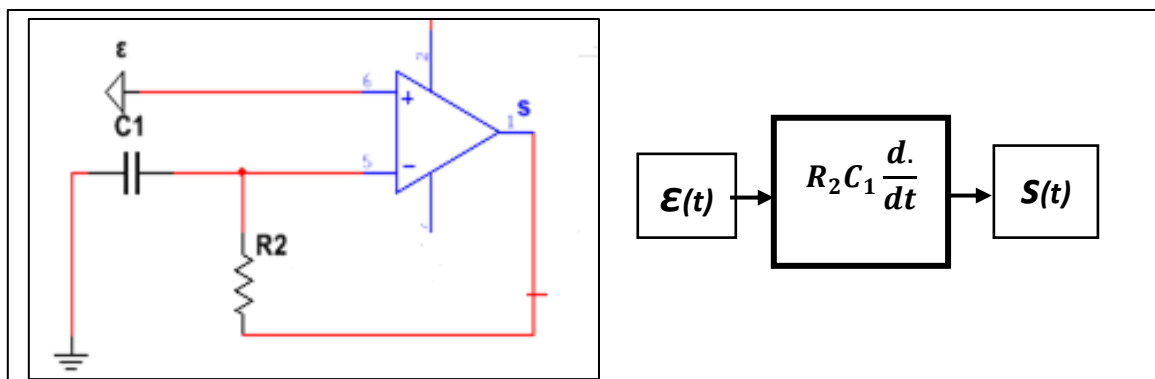


Figure 15: AOP dérivateur



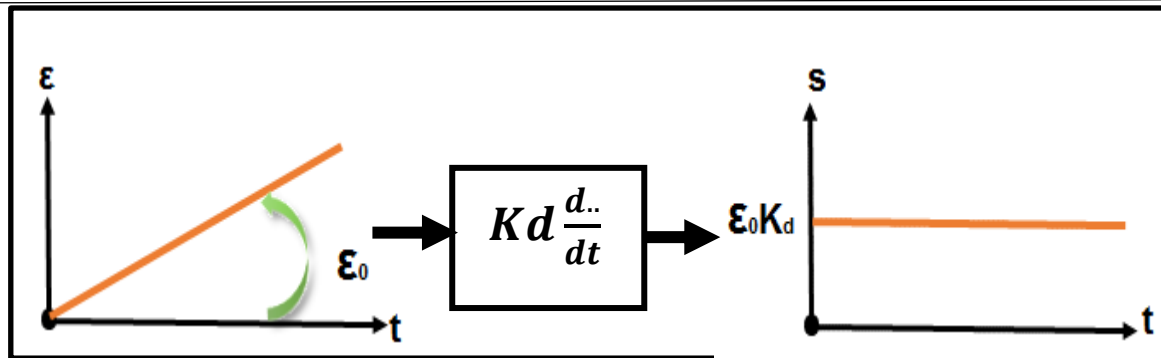


Figure 16: La dérivée d'erreur

Le signal de commande  $s$  de la figure 18 est proportionnel à la dérivée du signal d'erreur ce qui permet de diminuer le dépassement du signal par rapport à la consigne désirée afin de stabiliser le système, cette action qui empêche l'erreur d'évoluer au cours du temps.

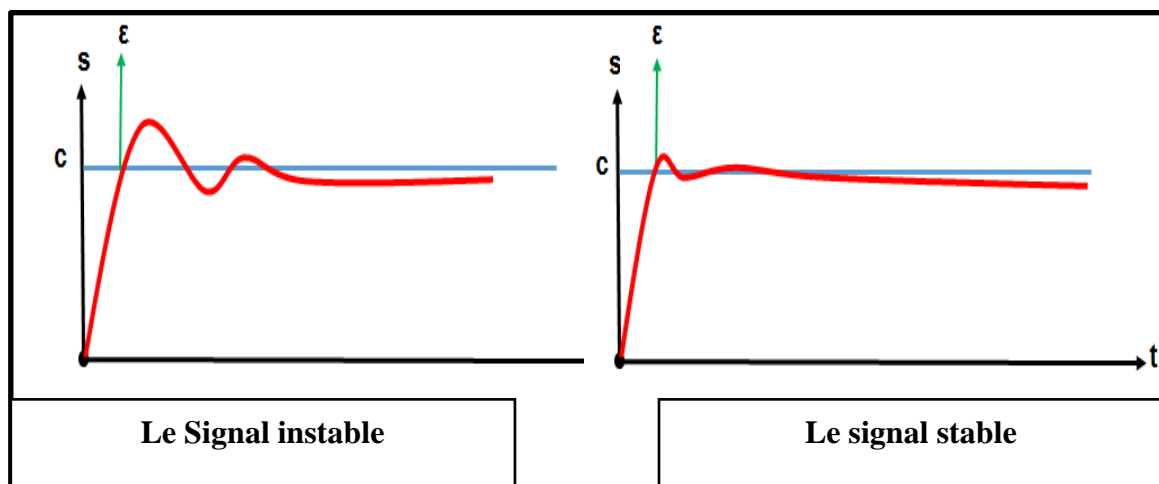


Figure 17: Stabilité de signal par Action dérivée

### iii. Action I

C'est une action intégrale qui est modélisée par un modèle électronique analogique intégrateur (Figure18).

L'action intégrale complète l'action proportionnelle. Elle permet d'éliminer l'erreur résiduel en régime permanent.

L'action intégrale est utilisée lorsque on désire avoir en régime permanent une précision parfaite.

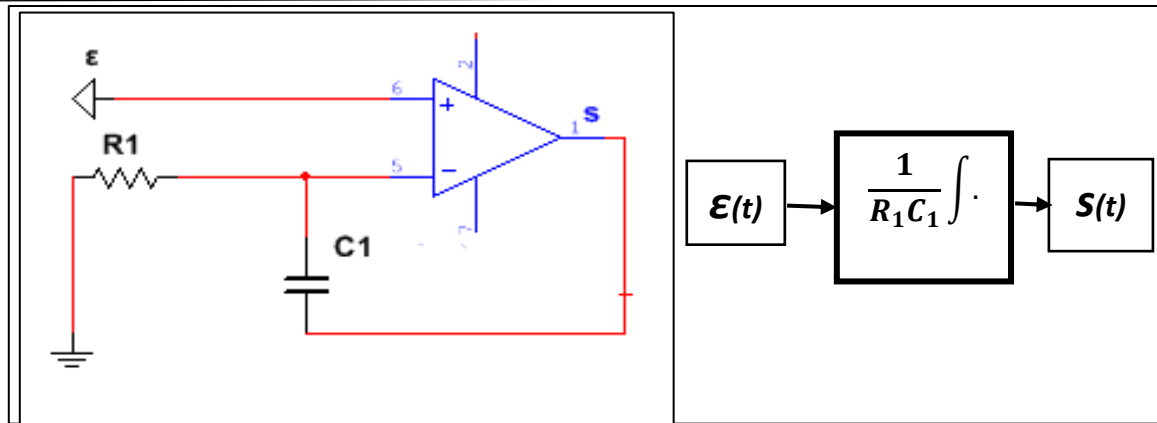


Figure 18: AOP intégrateur

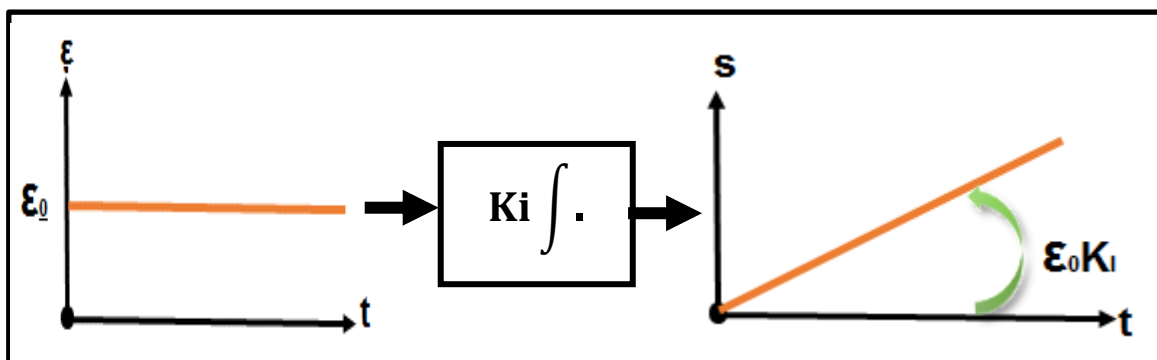


Figure 19: l'intégration d'erreur

La sortie de commande  $S$  c'est l'intégration d'erreur en régime permanent (statique) d'un système multiplié par un coefficient d'intégrale  $K_i$

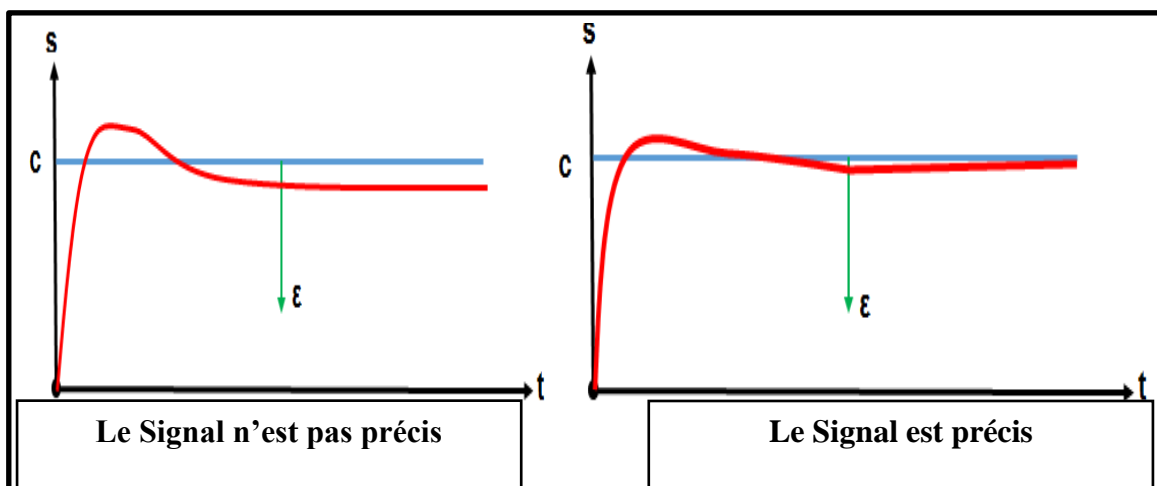


Figure 20: La précision de signal par Action intégral

#### II.6.1.2. Le système asservi continue avec régulateur PID

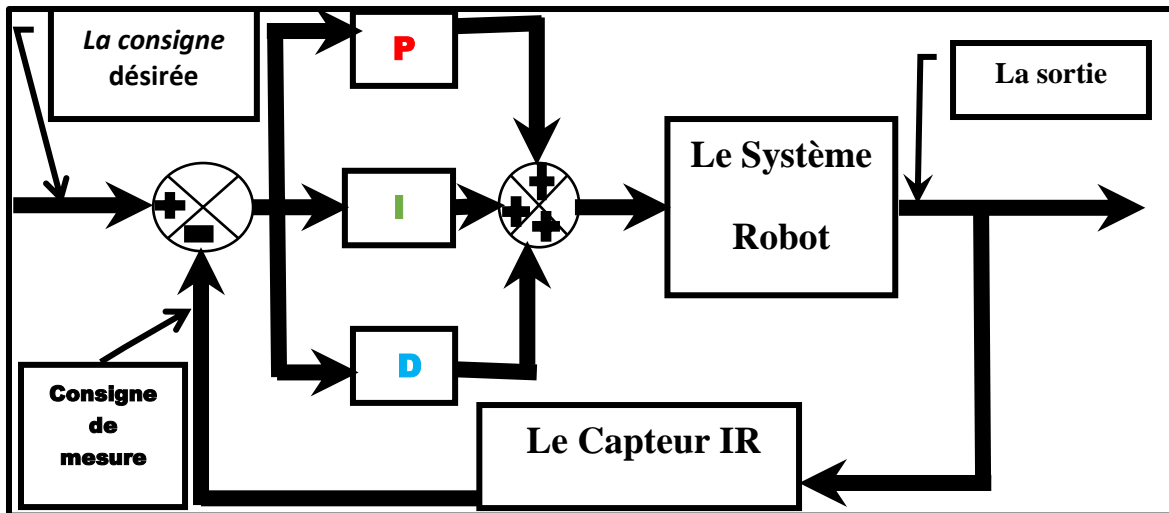


Figure 21: Le système asservi analogique inséré par le régulateur.

La structure la plus utilisée du régulateur PID est une architecture en parallèle pour que les actions P, I et D agissent en même temps ce qui procure au système une grande rapidité.

### II.6.2. Le Régulateur numérique.

Le régulateur numérique est une unité numérique qui agit comme un contrôleur de système. Il est essentiellement utilisé en tant que système de retour d'information. Généralement, il est comme un calculateur numérique qui exécute un algorithme qui permet de réaliser une tâche dans un programme pour optimiser les performances de système.

#### II.6.2.1. Le signal échantillonné

Il s'agit d'un signal continu discrétisé par un pas de temps régulier. Ce pas est appelé période d'échantillonnage.

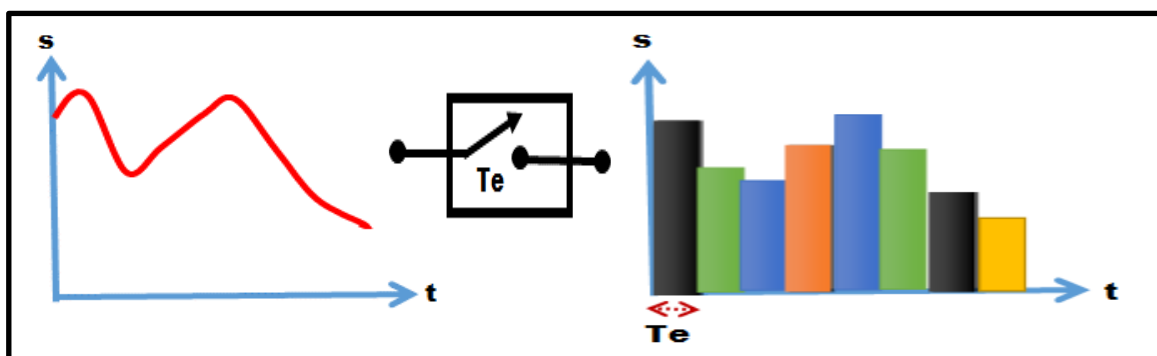


Figure 22: L'échantillonnage d'un signal

### II.6.2.2. Le système asservi numérique avec régulateur PID

Transposition de la fonction de transfert du PID continu en un correcteur numérique pour avoir un algorithme de PID numérique qui s'approche le plus possible du comportement du contrôle numérique.

#### II.6.2.2.1. Structure générale d'un asservissement numérique d'un système analogique

Les Convertisseurs Analogique-Numérique (CAN) et Numérique-Analogique (CNA) sont indispensables au fonctionnement des systèmes asservis par Calculateur Numérique (CN). La liaison du calculateur avec son environnement externe est effectuée par ces convertisseurs. La figure 23 montre un système asservi par un calculateur numérique (CN). Il s'agit d'un asservissement numérique d'un processus analogique.

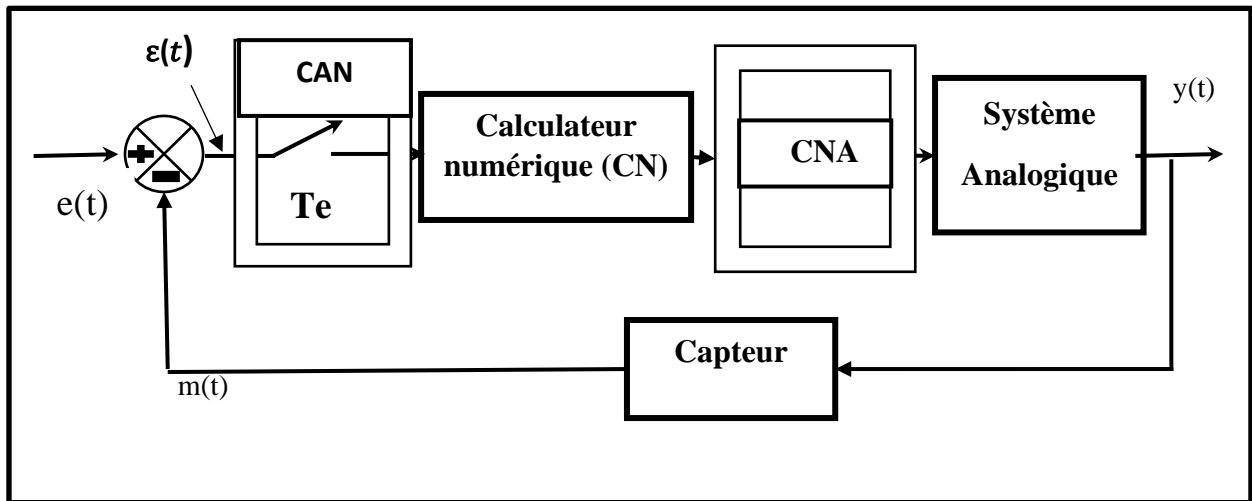


Figure 23: Système asservi numérique

Dans cette structure, on distingue :

- Un calculateur numérique (CN) : tout moyen de calcul automatique permettant d'effectuer des opérations arithmétiques ou analytiques suivant un programme déterminé qui est exécuté pas à pas, comme : un contrôleur numérique PID.
- Un capteur analogique permettant la mesure de la grandeur de sortie. En effet, un capteur permet de convertir une grandeur physique en grandeur électrique.
- Un convertisseur analogique-numérique (CAN) : un CAN permet la transformation d'une grandeur analogique en grandeur numérique.
- Un convertisseur numérique-analogique (CNA) : un CNA permet de transformer une grandeur numérique en grandeur analogique.
- Un système analogique : installation que l'on veut piloter : Robot (suiveur de piste)
- Un comparateur qui permet de produire le signal d'erreur  $\varepsilon(t)$  à partir de l'état actuel et de la valeur de consigne.

### II.6.2.3. Le régulateur PID

- Transposition des contrôleurs PID analogiques.

Afin de pouvoir importer un régulateur PID analogique dans un ordinateur numérique, il faut le transposer (Numériser) en utilisant les différentes techniques de discrétisation.

On fait l'approximation des méthodes numériques de subdiviser le signal analogique par méthode d'échantillonnage en respectant la condition de Nyquist-Shannon pour reconstruire le signal qui est :  $F_e \geq 2F_{max}$

- Approximation numérique d'Intégrale rectangulaire.

Cette méthode numérique consiste à approximer l'aire sous une courbe à l'aide des sommes d'aires de rectangles dont les hauteurs sont calculées.

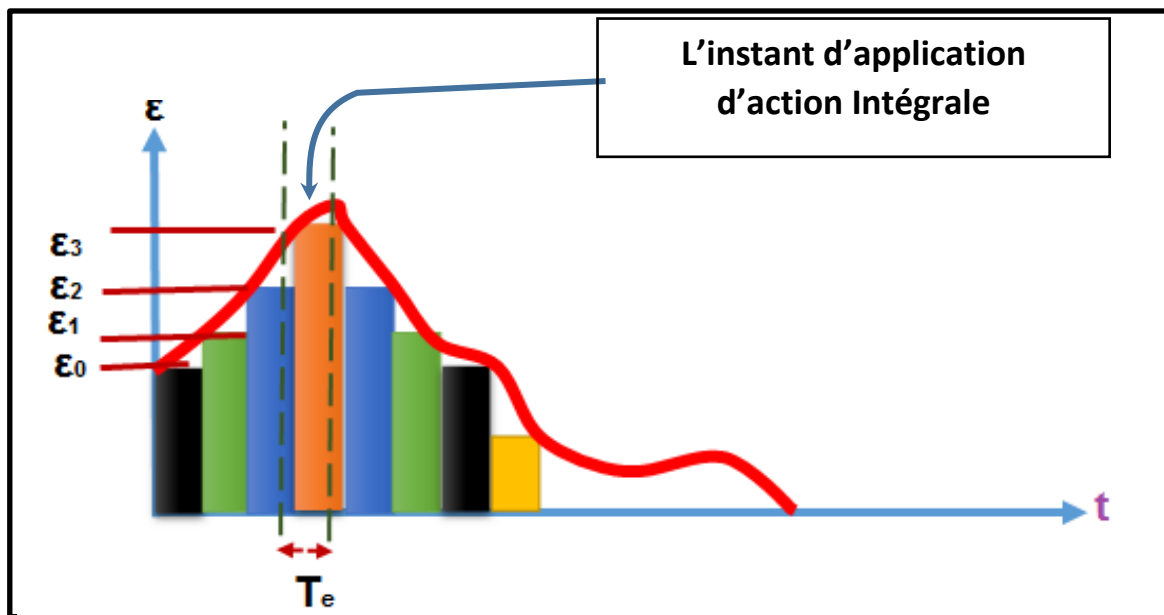


Figure 24: L'intégrale numérique

$$I = I_p + \epsilon_3 \times T_e$$

Action d'intégrale à l'instant  $t$  c'est l'intégrale du passé plus l'intégrale à l'instant présent.

$$I_p = \epsilon_2 \times T_e + \epsilon_1 \times T_e + \epsilon_0 \times T_e$$

- La discrétisation numérique de dérivée par méthode d'Euler arrière.

Cette approche consiste à approximer la dérivée continue entre deux instants d'échantillonnage (principe d'Euler).

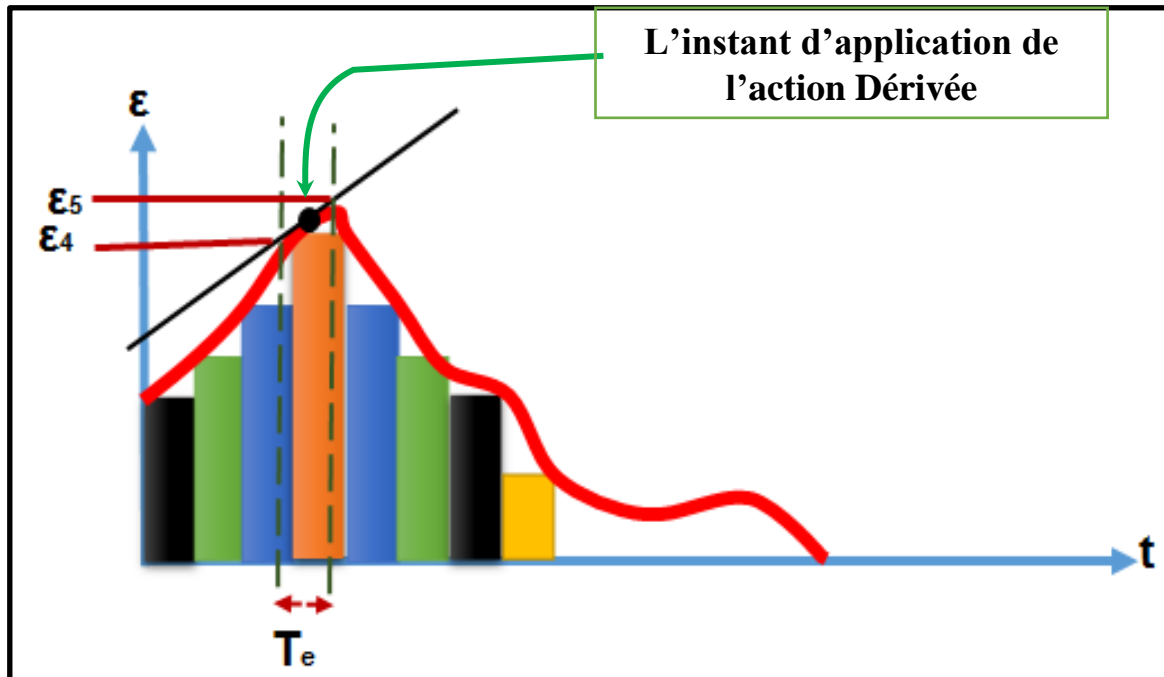


Figure 25: La dérive numérique.

$$D = \frac{\epsilon_5 - \epsilon_4}{T_e}$$

## Conclusion

Dans cette partie on a présenté le principe de la régulation PID des systèmes automatiques. Nous avons établis les formules de calcul I et D par l'approximation numérique par le calculateur numérique et on considère  $T_e$  comme un élément neutre parce qu'il n'a pas des effets sur I et D dans la programmation algorithmique.

Donc  $D = \epsilon(k) - \epsilon(k-1)$  et  $I = I_p + \epsilon(k)$  et  $P = \epsilon(k)$

Les termes de régulateur PID sont :

$$\mathbf{Pterme} = K_p \times P$$

$$\mathbf{Iterme} = K_I \times I$$

$$\mathbf{Dterme} = K_D \times D$$



### II.1.2. 1. Le capteur infrarouge

Le capteur infrarouge est un capteur actif généralement constitué par deux composants électroniques, il intègre l'émetteur qui est une LED qui émet un rayonnement infrarouge et un récepteur qui est le phototransistor qui détecte les rayons infrarouges réfléchis par un corps. Etant donné que la piste suivie par le robot est de couleur noir il n'y a pas de réflexion, pratiquement les rayons qui sont émet par la diode sont absorbés par la piste noire. La piste est placée sur un fond blanc, qui lui, réfléchit pratiquement toute la lumière. Ce qui va permettre de différencier la piste du fond et permettre au microcontrôleur par la suite de déterminer la position du robot par rapport à la piste.

Le schéma électrique du capteur de ligne est schématisé par la figure 27.

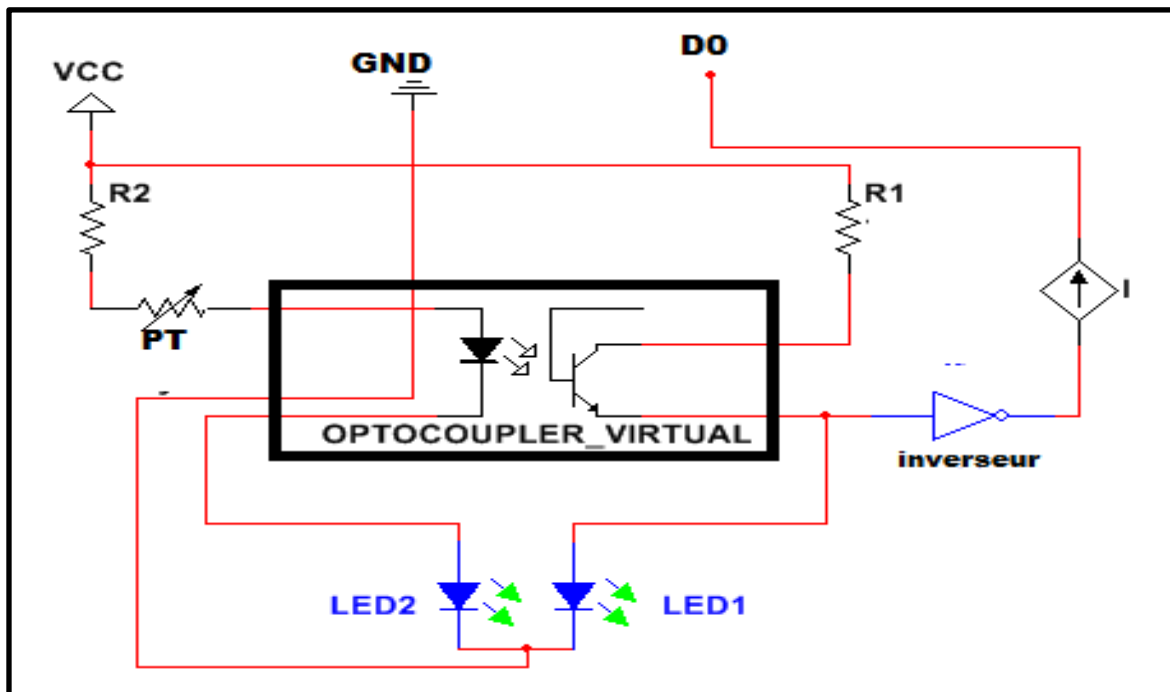


Figure 27: Schéma électronique du capteur infrarouge

**Le potentiomètre permet de faire varier distance** de détection de l'obstacle.

La led LED2 permet de signaler la détection d'un obstacle donc un corps qui réfléchit la lumière c'est le cas du fond blanc de la piste.

### II.1.2.2. Le capteur à ultrason

Le capteur à ultrason est un capteur qui génère des ultrasons qui sont des vibrations acoustiques engendrées à hautes fréquence qui ne sont pas audible.



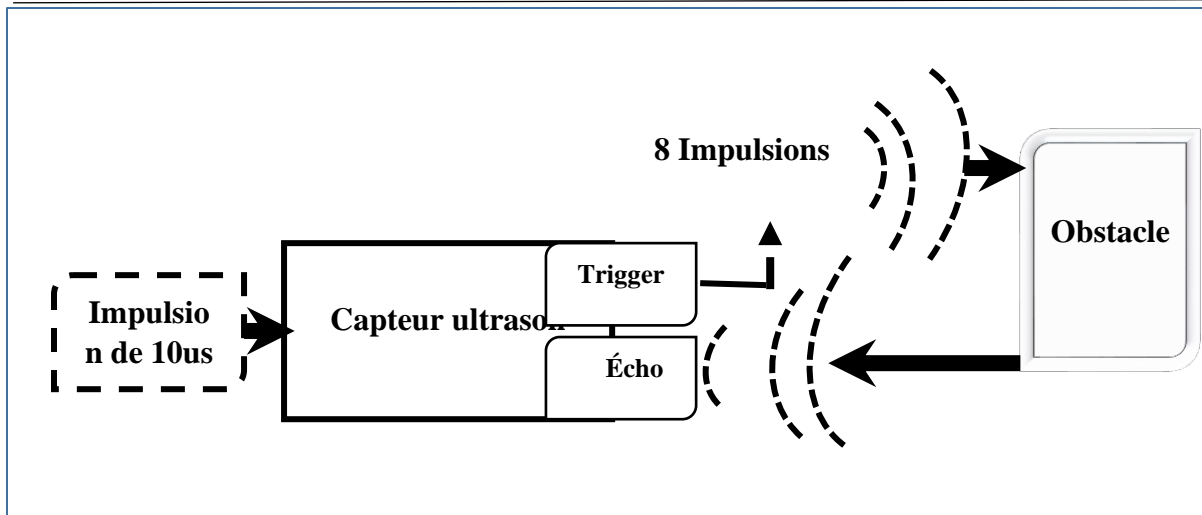


Figure 28: Schéma bloc de fonctionnement du capteur à ultrason

Un générateur au niveau du capteur génère une onde ultrasonique qui va être envoyée par transducteur, l'onde va se propager et lorsqu'elle rencontre un obstacle une partie est réfléchi vers le récepteur du capteur.

On sait que l'expression de la vitesse est :  $v = \frac{D}{t}$  donc la distance mesurée par le capteur est :  $D = v \times t/2$  Telle que :  $t = t_{aller} + t_{retour}$  avec  $t_{aller}$  : c'est le temps d'arriver les ultrasons à l'obstacle.  $t_{retour}$  : C'est le temps de retour au capteur.

La vitesse des ondes ultrasonique dans l'air est :  $v = 340m/s$

Après transformation on obtient :  $D(cm) \sim \frac{1}{58} \times t(us)$

Le principe de fonctionnement du capteur est entièrement basé sur la vitesse du son.

Voilà comment se déroule une prise de mesure :

- On envoie une impulsion high de 10µs sur la broche TRIGGER du capteur.
- Le capteur envoie alors une série de 8 impulsions ultrasoniques à 40kHz.
- Les ultrasons se propagent dans l'air jusqu'à toucher un obstacle et retournent dans l'autre sens vers le capteur.
- Le capteur détecte l'écho et clôture la prise de mesure.

Le signal sur la broche ECHO du capteur reste à HIGH durant les étapes c) et d), ce qui permet de mesurer la durée de l'aller et retour des ultrasons et donc de déterminer la distance.

### II.1.2.3. Unité de traitement

Arduino c'est donc une petite carte électronique équipée d'un microcontrôleur. C'est une plateforme libre qui peut être programmé librement avec C++, il possède plusieurs entrées et sorties numériques et analogiques. La figure 29 schématise la structure de la carte Arduino.

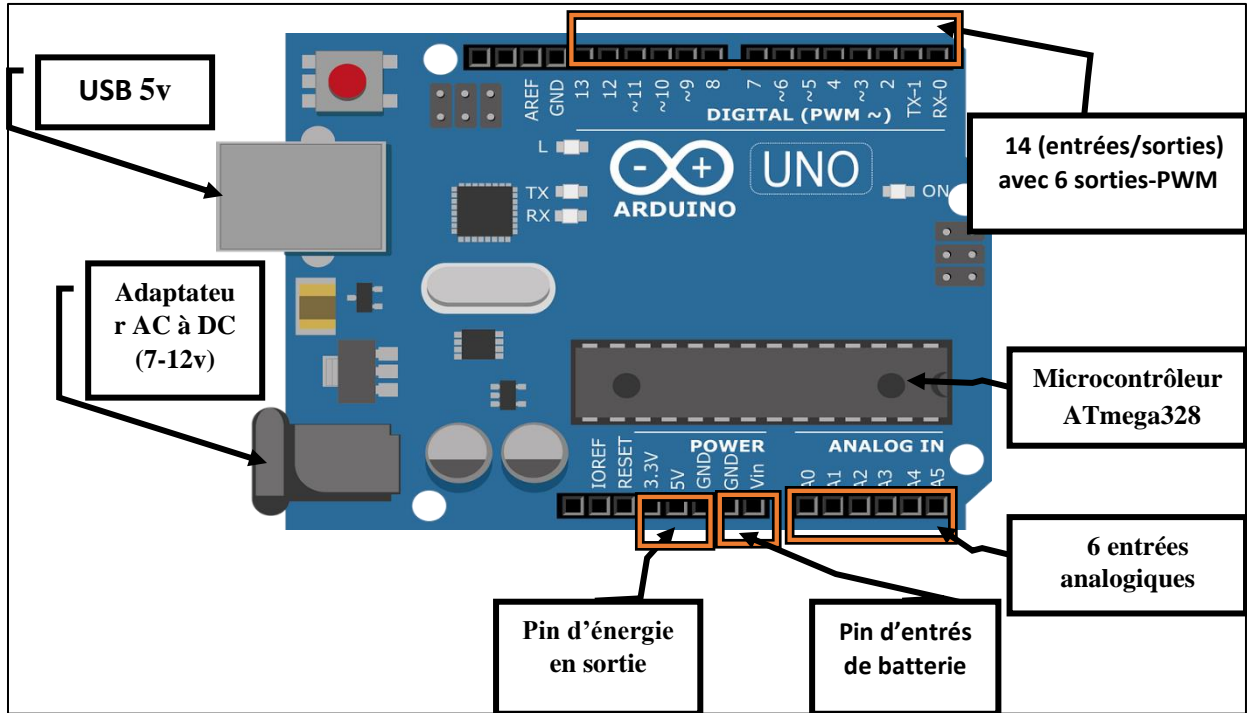


Figure 29: Structure de la carte Arduino Uno

#### a) Alimentation d'Arduino

La carte Arduino Uno peut être alimentée via la connexion USB ou avec une alimentation externe. La source d'alimentation est automatiquement sélectionnée. Une alimentation externe peut provenir soit d'un adaptateur AC-DC ou d'une batterie connectée dans le pin (ou broche) GND et V-IN (alimentation externe). Le processeur peut fonctionner sur une alimentation externe de 6 à 20 volts. Cependant, si la tension est inférieure à 7V, le pin 5V peut fournir moins de cinq volts et le processeur peut devenir instable. Si la tension est supérieure à 12V, le régulateur de tension peut surchauffer et endommager la carte. La plage recommandée est de 7 à 12 volts.

#### b) Les pins d'alimentation sont les suivantes

- VIN. Tension d'entrée à la carte Arduino à l'aide d'une source d'alimentation externe (par opposition à 5 volts de la connexion USB ou une autre source d'alimentation régulée).

- 5V. Ce Pin délivre un 5V régulé par la carte. Le processeur peut être alimenté soit à partir de la prise d'alimentation DC (7-12V), le connecteur USB (5V), ou le pin V-IN de la carte (7-12V).
  - 3.3V. Une alimentation de 3,3 volts générée par le régulateur. La consommation de courant maximale est de 50 mA
  - GND : Masse
- Certaines broches (les pins) ont des fonctions spécialisées :
- Transmission Série : 0 (RX) et 1 (TX), permettent de recevoir (RX) et transmettre (TX) en format TTL les données séries.
  - Interruptions externes : 2 et 3. Ces broches peuvent être configurées pour déclencher une interruption sur une valeur basse, un front montant ou descendant ou un changement d'état.
  - Impulsion PWM : Broches 3, 5, 6, 9, 10 et 11. Fournissent une impulsion PWM (Pulse Width Modulation) c'est des sorties à rapport cyclique variables.

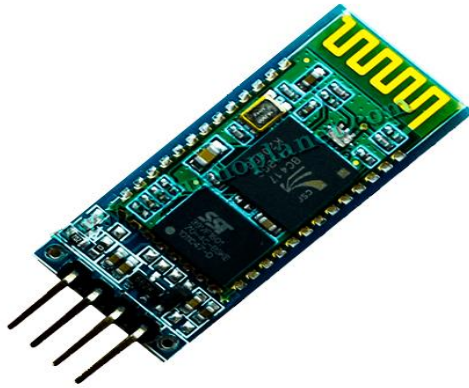
❖ On résume les caractéristiques d'Arduino dans le tableau ci-dessous :

*Tableau 1: caractéristiques de la carte Arduino Uno*

| Microcontrôleur               | ATmega 328                             |
|-------------------------------|--|
| Tension d'entrée (recommande) | 7 – 12v                                |
| Tension d'entrée (limites)    | 6 – 20v                                |
| Broches d'entrée analogique   | 6                                      |
| Broches d'E /S numériques     | 14 (dont 6 fournissent une sortie PWM) |
| Courant CC par broche I/O     | 40mA                                   |
| Courant DC pour Pin 3.3v      | 50mA                                   |
| Mémoire flashe                | 32Ko (ATmega 328)                      |
| Mémoire SRAM                  | 2Ko (ATmega 328)                       |
| Mémoire EEPROM                | 1Ko (ATmega 328)                       |
| Vitesse de l'horloge          | 16MHz                                  |

#### II.1.2.4. Capteur Bluetooth

Le module Bluetooth va permettre d'ajouter une liaison Bluetooth à notre projet. Le capteur choisi c'est HC06 (figure 30) qui permet une communication via une liaison série TTL.



*Figure 30: Le capteur Bluetooth HC-06*

Les caractéristiques techniques de ce capteur sont :

- Alimentation : 3,6 à 6 Vcc (régulateur 3 Vcc intégré)
- Bluetooth : 2.0
- Portée : jusqu'à 10 mètres
- Liaison série : 4800 à 1382400 bauds
- Antenne : 2,4 GHz intégrée
- Configuration via commandes AT.

#### II.1.2.5. Alimentation

Une pile ou un accumulateur électrique est un dispositif électrochimique qui transforme une énergie chimique en énergie électrique. Notre s'est vite porté vers les piles Lipo de lithium qui sont caractérisées par une grande stabilité, elle dure plus longtemps donc une grande et se charge plus vite, cependant se sont les plus chers sur le marché.



*Figure 31: Les Piles de lithium*

#### II.1.2.6. Le module driver de puissance pour alimenter les moteurs (L298N)

Le driver est basé sur le circuit L298N qui permet de contrôler 4 moteurs à courant continu, il peut faire tourner les moteurs en vitesse continue ou en PWM (La modulation de largeur d'impulsions (MLI) ou Pulse Width Modulation). De plus, il inclut des diodes pour protéger le circuit. Des résistances de rappel et un dissipateur de chaleur en cas de forte charge. L298N est un double pont en H c'est à dire qu'il permet de faire tourner les moteurs dans un sens ou dans l'autre.

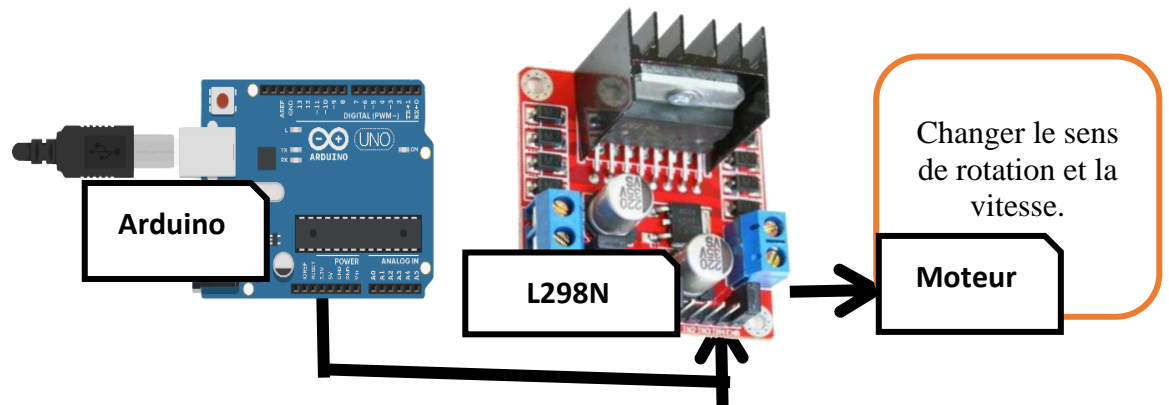


Figure 32: L'emplacement du driver dans la chaîne.

##### a. Présentation du module L298N

La figure 33 permet de donner une idée de l'utilité des éléments constituant le module.

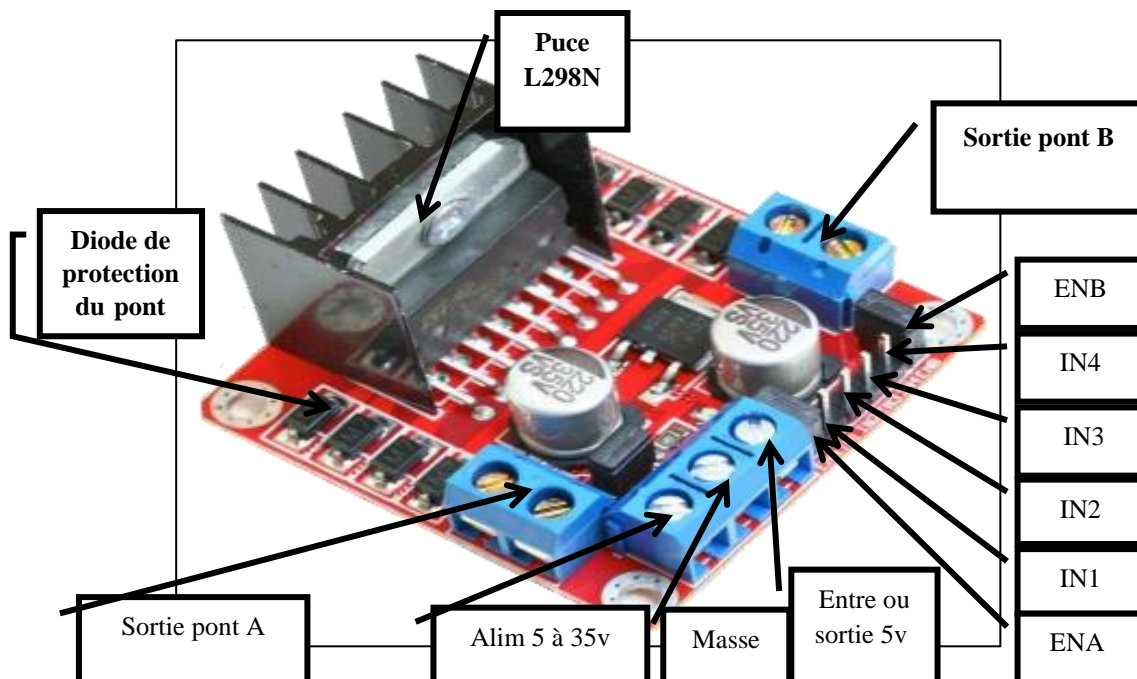


Figure 33: Description différente composantes du driver moteur

Tableau 2:Tableau : Le fonctionnement des broches

| Nom de Broche | Fonctionnement  |
|---------------|---|
| ENA           | Permettre de gérer l'amplitude de la tension délivrée au Moteur A grâce à un signal PWM |
| IN1&IN2       | Permettent de contrôler le pont en H donc le sens du Moteur_A                           |
| ENB           | Permettre de gérer l'amplitude de la tension délivrée au Moteur B grâce à un signal PWM |
| IN3&IN4       | Permettent de contrôler le pont en H par conséquent le sens du Moteur B                 |
| Sortie pont A | Pour connecter le Moteur_A  |
| Sortie pont B | Pour connecter le Moteur_B  |

### b. Schéma interne du pont en H

Le schéma du pont en H de la figure 34 est constitué de quatre transistors NPN fonctionnent en régime de commutation c'est à dire (bloqué ou saturé) ça dépend de l'état de la base de transistor. Le circuit de commande est composé par les ports AND et inverseurs qui permettent de contrôler les bases des transistors. Comme il est montré dans le tableau de vérité ci-dessous.

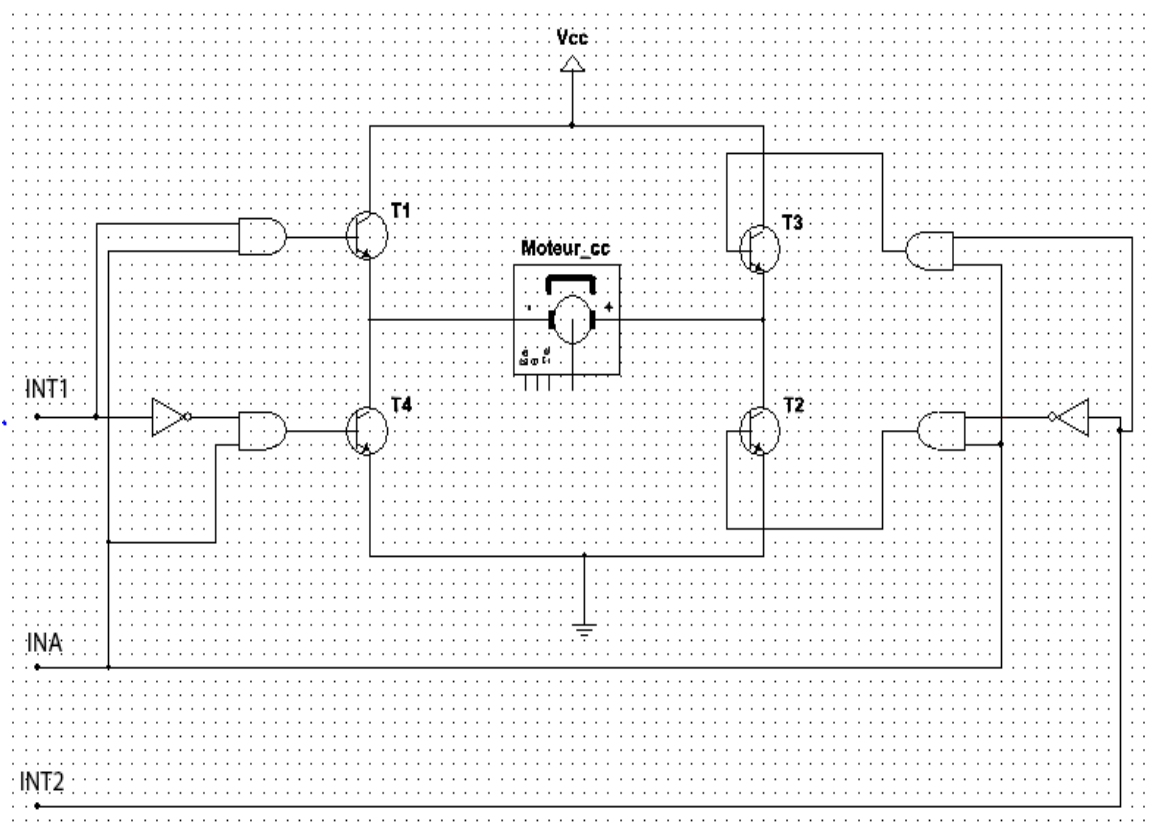


Figure 34: Schéma électronique de pont en H

Tableau 3: La Table de vérité de fonctionnement de contrôle d'un moteur

| INT1 | INT2 | ENA | Etat T1 | Etat T2 | Etat T3 | Etat T4 | L'état d'un moteur |
|------|------|-----|---------|---------|---------|---------|--------------------|
| 0    | 0    | 0   | Bloqué  | Bloqué  | Bloqué  | Bloqué  | Arrêt              |
| 0    | 0    | 1   | Bloqué  | Saturé  | Bloqué  | Saturé  | Arrêt              |
| 0    | 1    | 0   | Bloqué  | Bloqué  | Bloqué  | Bloqué  | Arrêt              |
| 0    | 1    | 1   | Bloqué  | Bloqué  | Saturé  | Saturé  | Marche en avant    |
| 1    | 0    | 0   | Bloqué  | Bloqué  | Bloqué  | Bloqué  | Arrêt              |
| 1    | 0    | 1   | Saturé  | Sature  | Bloqué  | Bloqué  | Marche en arrière  |
| 1    | 1    | 0   | Bloqué  | Bloqué  | Bloqué  | Bloqué  | Arrêt              |
| 1    | 1    | 1   | Saturé  | Bloqué  | Saturé  | Bloqué  | Arrêt              |

De ce tableau qui généralise les différents cas possibles pour commander les quatre transistors qui permutent le sens de rotation du moteur CC. On résume les cas possibles dans le tableau récapitulatif ci-dessous :

| INT1 | INT2 | ENA | Le sens d'un moteur |
|------|------|-----|---------------------|
| 0    | 1    | 1   | Avant               |
| 1    | 0    | 1   | Arrière             |

### c. Le moteur a courant continue

Les engrenages c'est l'ensemble des deux roues dentées s'engrenant l'une avec l'autre et permettant de transmettre un mouvement ou une puissance avec un rapport de vitesse invariable. Leur fonctionnement comme le montre le schème de bloc ci-dessous.

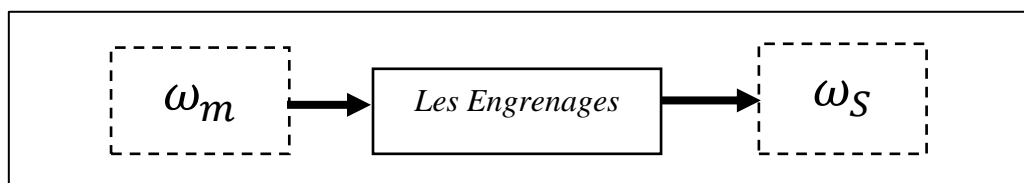


Figure 35: Schéma bloc de fonctionnement des engrenages

La figure 36 montre une coupe d'un motoréducteur qui regroupe un moteur à courant continue et un réducteur à engrenages.

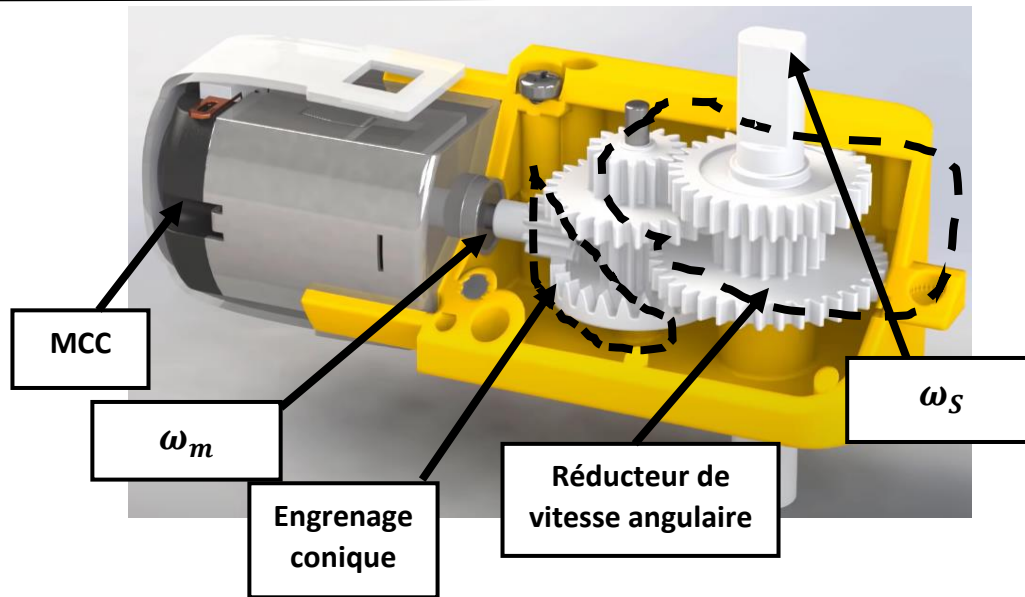


Figure 36: La coupe du moteur Mcc

Le rapport de transmission est donné par la relation suivante :

$$r = \frac{\omega_s}{\omega_m} = \frac{C_m}{C_s} < 1$$

**r** : le rapport de transmission.

**C<sub>m</sub>, C<sub>s</sub>** : sont découples respectivement, moteur et récepteur.

**ω<sub>s</sub>** : La vitesse de rotation angulaire de sortie.

**ω<sub>m</sub>** : La vitesse de rotation angulaire de moteur Mcc.

**Mcc** : moteur à courant continue.

## II.2 Appinventor

App Inventor est un outil qui propose aux développeurs d'applications Android une plateforme pour la conception facile des applications Android. Pour cela l'outil propose un code de programmation schématique en déplaçant uniquement des blocs préprogrammés. C'est le langage scratch c'est un langage graphique comme le montre la figure 37.





Figure 37: App inventor et langage scratch

Cet outil nous permettra par la suite de réaliser une application Android pour communiquer avec le capteur Bluetooth.

## Conclusion

Dans cette partie nous avons étalé le cahier de charge de notre projet et pour sa réalisation nous avons présenté les différents composants qui seront la base pour la réalisation du robot suiveur. Ces composants nécessitent pour leurs utilisations une connaissance profondes et une maitrise parfaite de son fonctionnement ce qui a nécessité beaucoup de temps.

## Chapitre III : Conception, Simulation et Réalisation

### Introduction

Le sujet de notre projet c'est un suiveur de piste avec PID permettant d'amortir les oscillations et les perturbations au cours du déplacement. Et durant la période de réalisation de notre projet on a rencontré un certain nombre de problèmes techniques que nous avons résolus ou bien proposer d'autres alternatives. En cite par exemple le problème causé par la roue libre qui perturbait le mouvement du robot pour éliminer ce problème nous avons proposé un robot à quatre roues motrices. Le problème d'une alimentation s'est fortement posé lors des essais sur piste ce qui nous a poussé à bidouiller une alimentation à piles rechargeables pour résoudre le problème.

On a développé notre projet afin d'éviter les problèmes mécanique et technique qui ont influencé sur le système du robot, c'est pour ça notre projet prend beaucoup du temps, de recherche, de travail et des essais pour optimiser les performances et l'amélioration d'intelligence de robot.

Ce chapitre entame en premier lieu la partie matérielle qui nous permettra de comprendre l'usage et le fonctionnement des organes de notre robot. On abordera aussi la stratégie de fonctionnement qui élabore l'évolution d'erreur des capteurs IR par rapport à la position de la piste et le régulateur PID qui permet de minimiser l'erreur par la modification de vitesse des moteurs et de même l'optimisation des performances du robot suiveur de piste. Et par la suite on va étaler les différents problèmes rencontrés durant la phase de réalisation et les solutions que nous avons proposé, et enfin une présentation finale d'un schéma synoptique globale de suiveur de piste avec PID intelligent qui réalise plusieurs modes.

### III.1. Présentation matérielle de robot

Le travail que nous avons réalisé, se compose de deux parties : la partie mécanique et électronique/programmation.

#### III.1.1. La partie mécanique

Généralement le robot constitue par deux roues motrices indépendantes qui permettent d'avancer, de reculer, de tourner à gauche ou à droite. Ainsi que d'une roue libre permettant de maintenir l'équilibre de robot.

- Avant montage

Les pièces et matérielles qu'on a besoin pour faire le montage de notre robot.

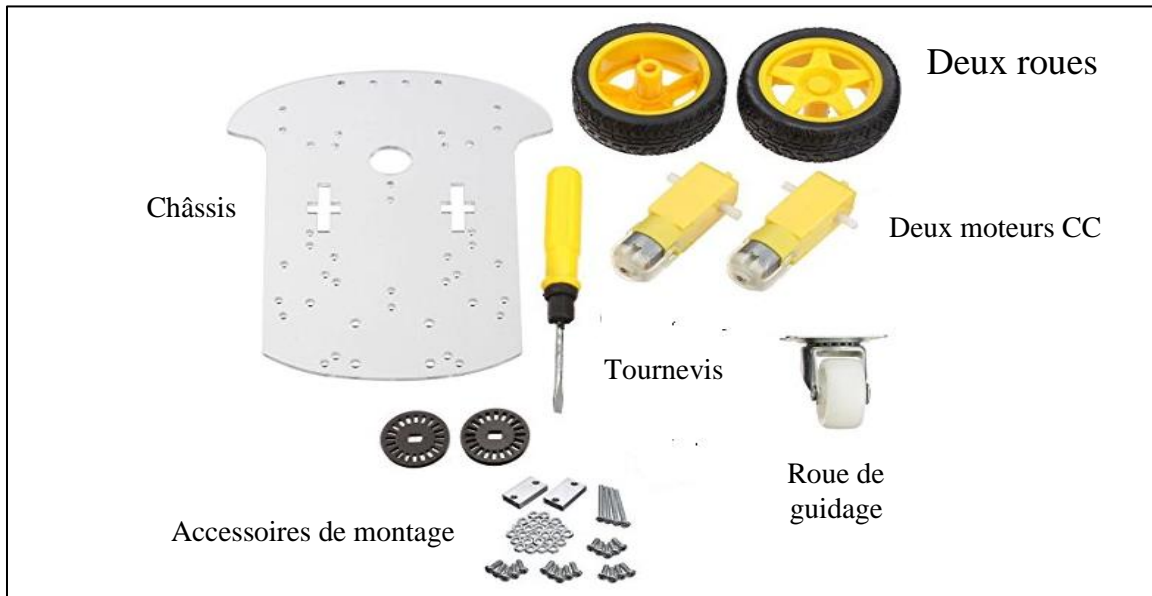


Figure 38: Les pièces de robot

- Après montage

Après avoir assemblé toutes les pièces citées dans la figure 38 à l'aide d'un tournevis, on obtient notre châssis comme il est présenté dans la figure 39.



Figure 39: Le montage de châssis de robot

### III.1.2. La partie électronique

#### III.1.2.1. Les cartes électroniques

Pour la partie électronique nous avons utilisé deux cartes électroniques, la première c'est la carte de commande Arduino Uno et la deuxième est la carte de puissance.

- La carte Arduino :

Notre carte contient l'algorithme responsable de traiter les informations des capteurs infrarouge et exécute l'algorithme du régulateur PID que nous avons mis au point en utilisant IDE Arduino.

- La carte de puissance :

Il s'agit d'un Shield « L298N » qu'on emboîte directement sur notre carte pour commander nos deux moteurs à courant continu avec la puissance nécessaire et la possibilité de réglage de la vitesse et du sens de leurs rotations.

Nous montrons sur la figure ci-dessous nos deux cartes électroniques :

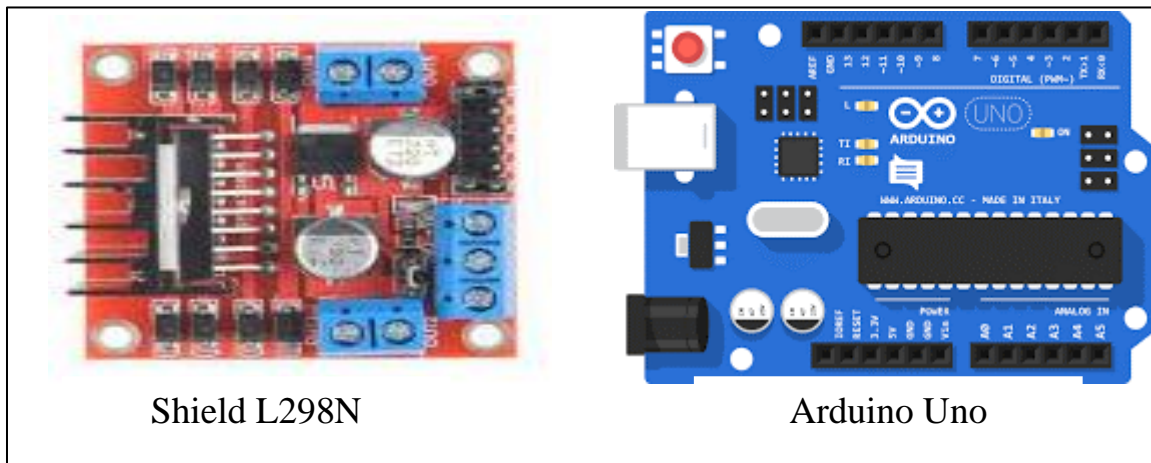


Figure 40: Les cartes électroniques

#### III.1.2.1.1. Les capteurs infrarouge tct5000

Le rôle de ces capteurs pour capter une piste noire et ils envoient l'information logique Tout ou Rien à Arduino Uno, l'image de ce type de capteur cite ci-dessous. Nous avons utilisé cinq capteurs infrarouge mis côte à côte devant le repos et situés le plus près du sol pour détecter la piste. En position normale le capteur du milieu doit être positionné sur la piste les deux de part et d'autre sont placés sur le fond blanc. Le choix de ce nombre de capteurs permet une meilleur précision et stabilité.

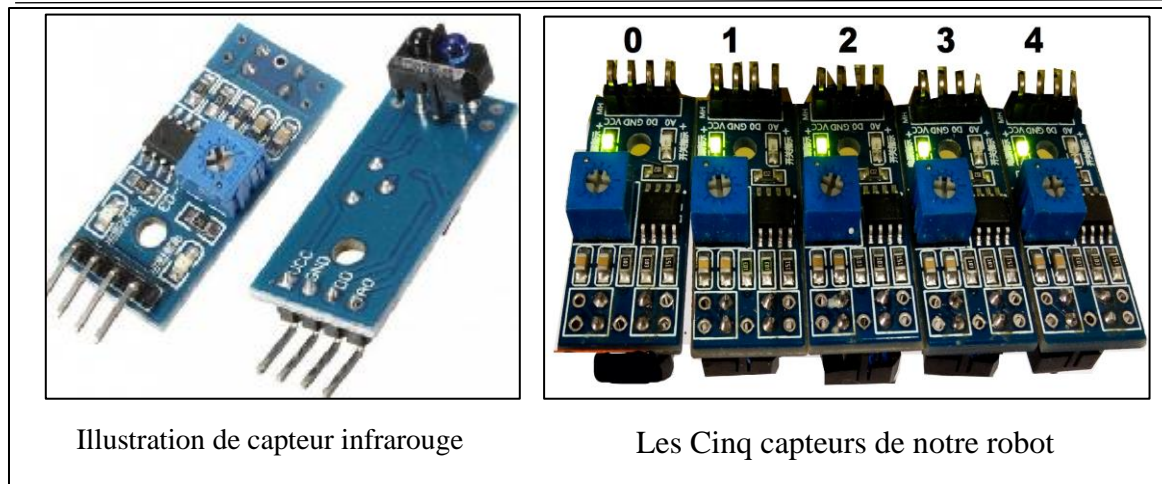


Figure 41: Capteur infrarouge

La simulation sous Proteus ISIS nous a permis de comprendre le fonctionnement de ce capteur avec la carte Arduino, comme le montre la figure 42.

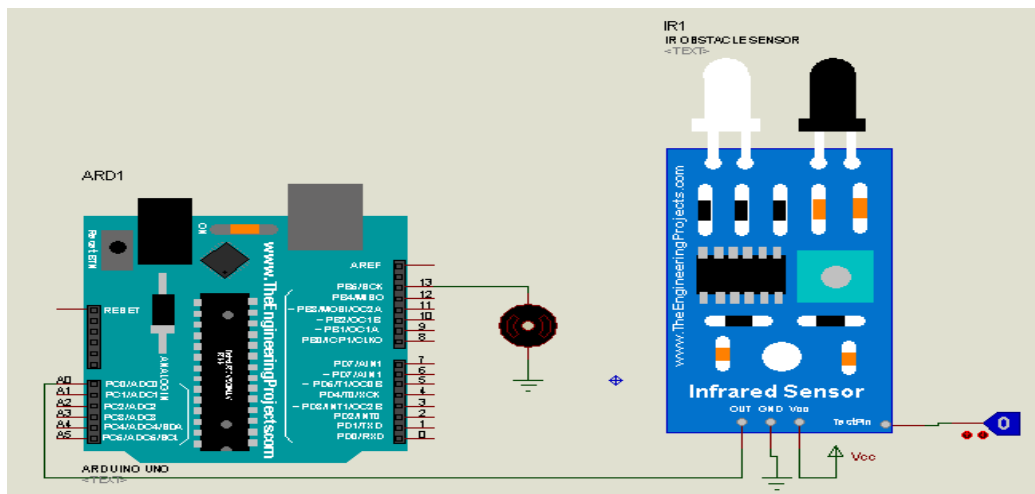
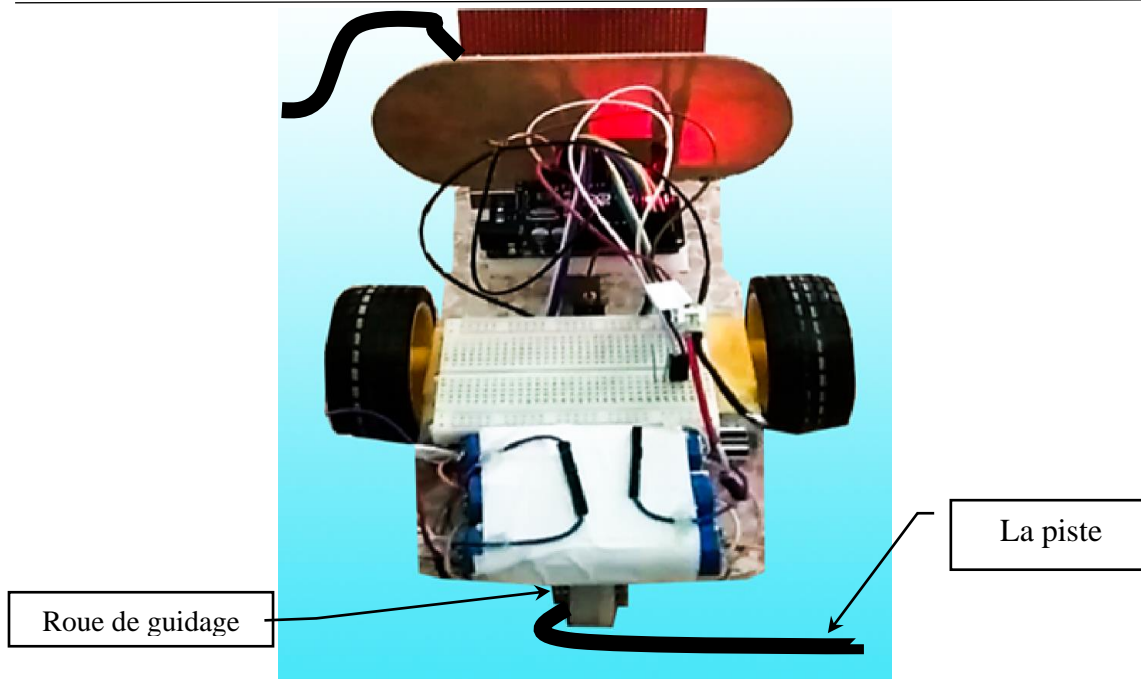


Figure 42: Simulation sous ISIS du capteur avec un moteur

## III.2. Le fonctionnement de suiveur de piste

Après avoir écrit le programme sur la plateforme Arduino le robot est positionné sur la piste comme le montre la figure 43.


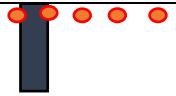
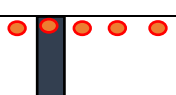
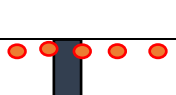
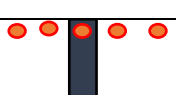
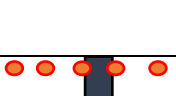

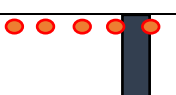


*Figure 43: Le robot suiveur de piste*

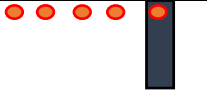
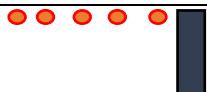

Tout d'abord les Cinq capteurs infrarouge place devant le robot chaque capteur a une réponse TOR (Tout ou Rien) s'il détecte la piste noir il génère la réponse discrète (1) sinon il fournit un état (0), le capteur du milieu N°2 comme un référence d'erreur, s'il capte tout seul la piste noir c'est la position normale dans ce cas il n'y a pas d'erreur par contre si les capteurs N°3 ou N°4 captent tous les deux la piste c'est à dire que notre robot diverge à gauche alors l'unité de traitement donne l'ordre sur les moteurs afin de régler le robot sur la piste, de même pour les capteurs N°0, N°1.

Bref, on distingue deux signes d'erreurs c'est uniquement pour régler la vitesse des moteurs par l'exécution d'algorithme du régulateur PID qui est traité par (Arduino uno), Le tableau 5 regroupe et explique brièvement le fonctionnement et les différentes possibilités du suiveur de piste. Plus on s'écarte de la piste plus l'erreur en valeur absolue augmente.

Tableau 4: Fonction de suiveur de piste

| La Position de<br>piste   | Etat des capteurs : 1 =actif , 0 = inactif |                  |                  |                  |                  | La valeur de<br>l'erreur : $\varepsilon$ | Action du robot   |
|---|--|------------------|------------------|------------------|------------------|--|---|
|   | N <sup>0</sup> 0                           | N <sup>0</sup> 1 | N <sup>0</sup> 2 | N <sup>0</sup> 3 | N <sup>0</sup> 4 |  |   |
|    | 1  | 0                | 0                | 0                | 0                | -4                                       | Aller tout à droit(V <sub>4</sub> )<br>Tourner à droite (V <sub>4</sub> )<br><b>Tourner à gauche (V<sub>4</sub>)</b><br>S'arrêter   |
|    | 1  | 1                | 0                | 0                | 0                | -3                                       | Aller tout à droit (V <sub>3</sub> )<br>Tourner à droite(V <sub>3</sub> )<br><b>Tourner à gauche(V<sub>3</sub>)</b><br>S'arrêter    |
|    | 0  | 1                | 0                | 0                | 0                | -2                                       | Aller tout à droite (V <sub>2</sub> )<br>Tourner à droite (V <sub>2</sub> )<br><b>Tourner à gauche (V<sub>2</sub>)</b><br>S'arrêter |
|  | 0  | 1                | 1                | 0                | 0                | -1                                       | Aller tout adroit(V <sub>1</sub> )<br>Tourner à droite(V <sub>1</sub> )<br><b>Tourner à gauche (V<sub>1</sub>)</b><br>S'arreter     |
|  | 0  | 0                | 1                | 0                | 0                | 0  | <b>Aller tout à droit(V<sub>0</sub>)</b><br>Tourner à droite (V <sub>0</sub> )<br>Tourner à gauche (V <sub>0</sub> )<br>S'arrêter   |
|  | 0  | 0                | 1                | 1                | 0                | 1  | Aller tout à droit (V <sub>1</sub> )<br><b>Tourner à droite (V<sub>1</sub>)</b><br>Tourner a gauche (v <sub>1</sub> )<br>S'arrêter  |
|  | 0  | 0                | 0                | 1                | 0                | 2  | Aller tout à droit (V <sub>2</sub> )<br><b>Tourner à droite (V<sub>2</sub>)</b><br>Tourner a gauche (v <sub>2</sub> )<br>S'arrêter  |
|  | 0  | 0                | 0                | 1                | 1                | 3  | Aller tout adroit (V <sub>3</sub> )<br><b>Tourner à droite (V<sub>3</sub>)</b><br>Tourner à gauche (V <sub>3</sub> )<br>S'arrêter   |
|   |  |                  |                  |                  |                  |  |   |



|   |   |   |   |   |   |   |  |
|---|---|---|---|---|---|---|--|
|  | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | <div> <div> Aller tout à droit(<math>V_4</math>) </div> <div> Tourner à droite (<math>V_4</math>) </div> <div> Tourner à gauche(<math>V_4</math>) </div> <div> S'arrêter </div> </div> |
|  | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |   | <div> <div> Tourne 180° </div> </div>  |
|  | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |   | <div> <div> S'arrêter </div> </div>  |

La vitesse des moteurs est modulée en fonction de la valeur PID qui dépende de l'erreur et des coefficients du régulateur PID qui sont  $K_p$  (action P),  $K_i$  (action intégrale) et  $K_d$  (action dérivée) déjà traité dans le chapitre II.

$$\text{La vitesse de moteur à droite : } V_n = V_0 + PID$$

$$\text{La vitesse de moteur à gauche : } V_n = V_0 - PID$$

$V_n$  : La vitesse réglable par le régulateur numérique PID

$V_0$ : La vitesse initiale d'un moteur

Telle que  $n = \{0, 1, 2, 3, 4\}$  ce sont des indices des différentes vitesses réglables dépendent de la position de piste (Tableau 5).

$$V_4 > V_3 > V_2 > V_1 > V_0$$

Le régulateur PID dépend de l'erreur et l'erreur change son signe car elle dépende de la position par rapport à la piste donc la vitesse ( $V_n$ ) change en fonction du signe et de la valeur d'erreur.

### III.3. Les problèmes et solutions

#### III.3. 1. Les problèmes techniques

##### III.3.1.1. La connexion des capteurs

- Le Problème : la connexion des capteurs infrarouge

Initialement on a connecté les capteurs avec la carte Arduino en utilisant des fils électriques (figure 44) ce qui introduit de temps à autre des dysfonctionnements de la réponse du suiveur.



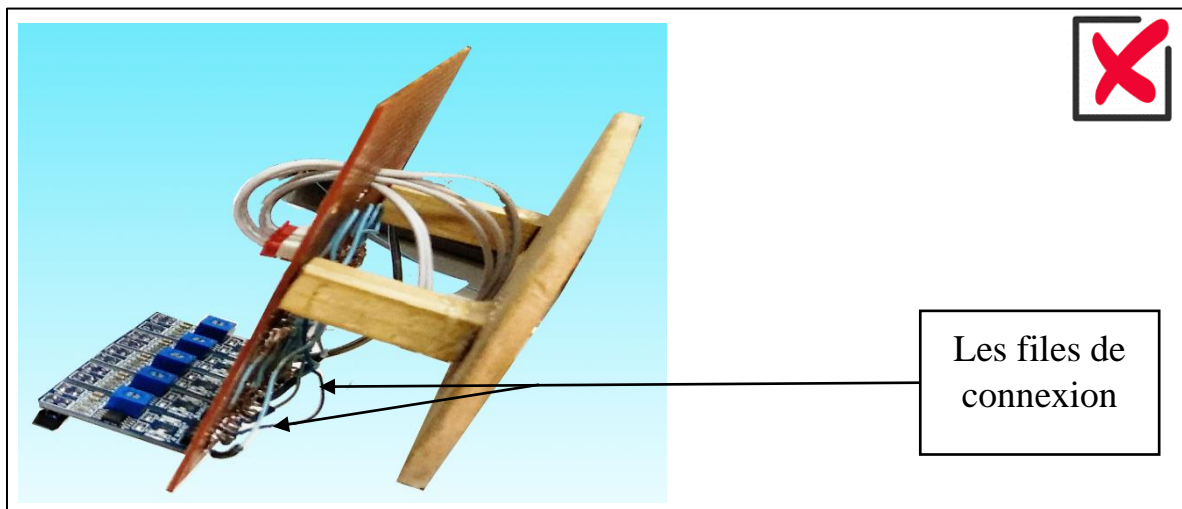


Figure 44: Le problème de connexion des capteurs infrarouge

- La Solution : carte imprimée pour la connexion des capteurs

La solution optimale qu'on a fait c'est de tracer le circuit dans logiciel TCI après on a imprimé le typon et par suite on a fait l'opération de fabrication de la carte dans l'atelier de circuit imprimé en respectant les conditions et des étapes à suivre (figure 45).

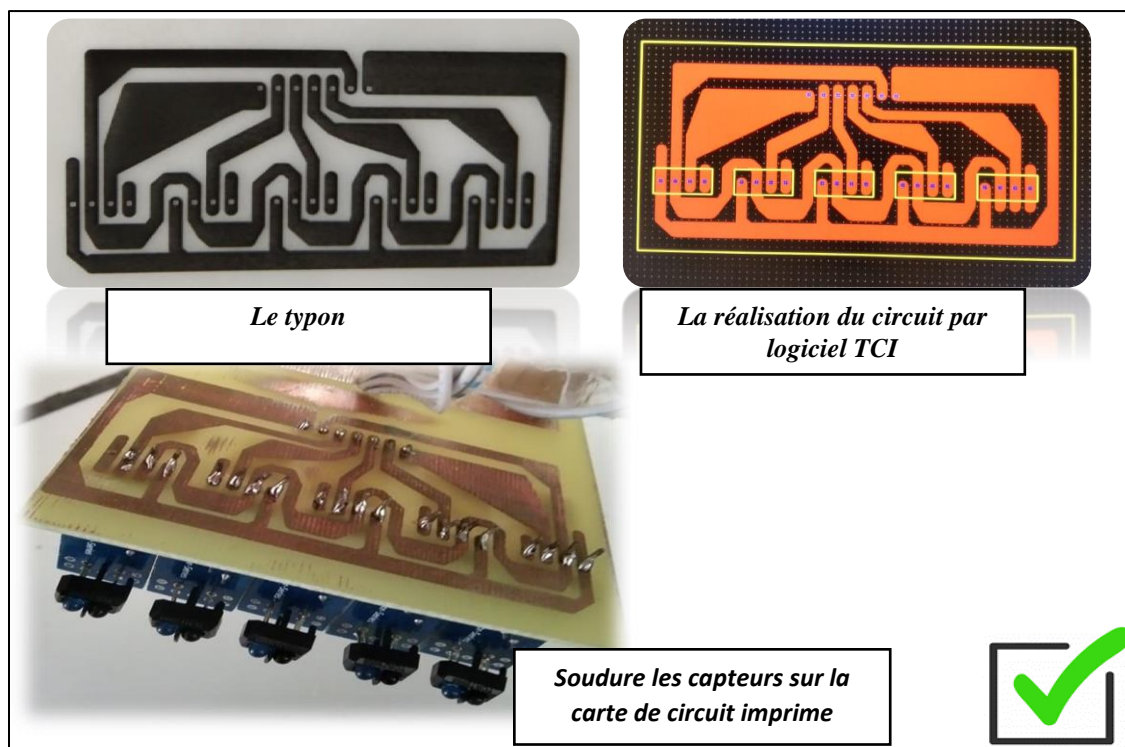


Figure 45: circuit imprimé des capteurs infrarouges

### III.3.2. Installation du robot manuellement sur une piste et réglage des coefficients du régulateur PID à distance.

- Le problème : installation manuellement du robot et réglage des coefficients PID à distance ce qui va permettre de diminuer le temps des essais et de réglage.
- La solution : commande par Bluetooth via une application et un smartphone.

Le Bluetooth est un système de transmission de données sans fil à courte portée par liaison radio. Le but initial du Bluetooth est de commander à distance notre robot. Donc Le module qu'on a utilisé c'est HC-06 : Il permet d'établir une liaison Bluetooth (liaison série) entre une carte Arduino et le smartphone qui possède une connexion Bluetooth. Le module HC-06 est un module "esclave".

Ce module Bluetooth va nous permettre aussi de contrôler les coefficients du régulateur PID dans le programme Arduino Uno.

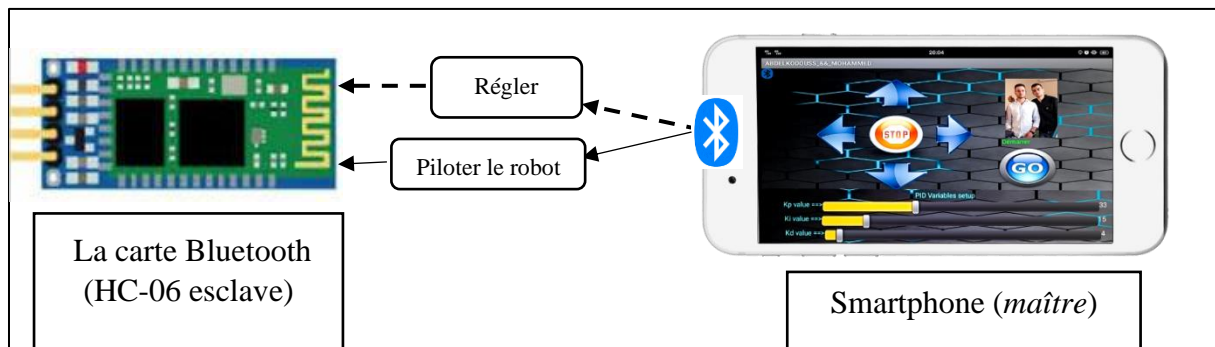


Figure 46: Application pour contrôler le robot par Bluetooth

On a d'abord créé une application qui va gérer les instructions des boutons de commande et des coulissiers de niveau pour les coefficients du régulateur App Inventor. L'algorithme de création de l'application (figure47) est donné sur la figure 48.



Figure 47: Aspect de l'application Android réalisée

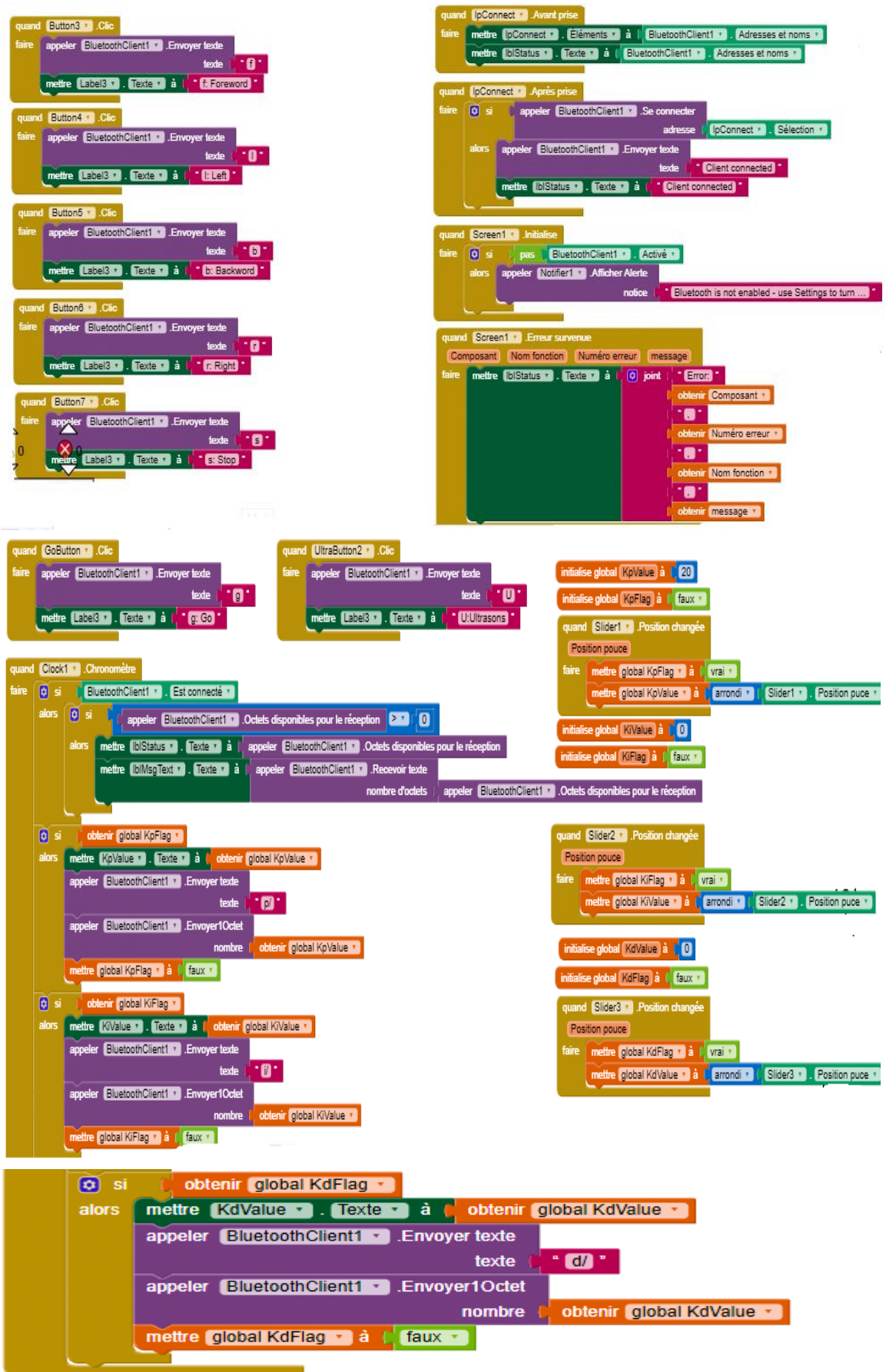


Figure 48: Algorithme de l'application Bluetooth

### III.3.2.1. Le robot ne détecte pas l'obstacle sur la piste

- Le problème : détection d'obstacle

Lors de déplacement du robot sur une piste, le suiveur de piste ne détecte pas l'obstacle.

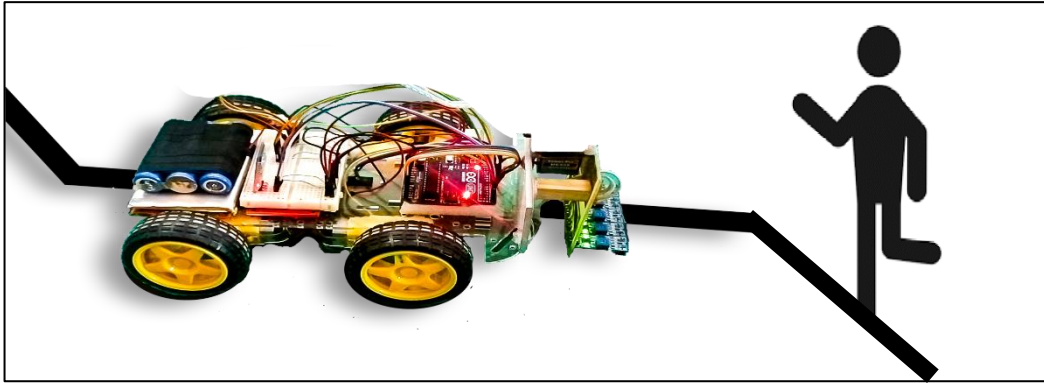


Figure 49: Le robot ne détecte pas l'obstacle

- La solution : ajouter un capteur qui détecte l'obstacle.

L'élément qui détecte les obstacles qu'on a utilisé c'est un *capteur ultrason HC-SR04* (figure 50).

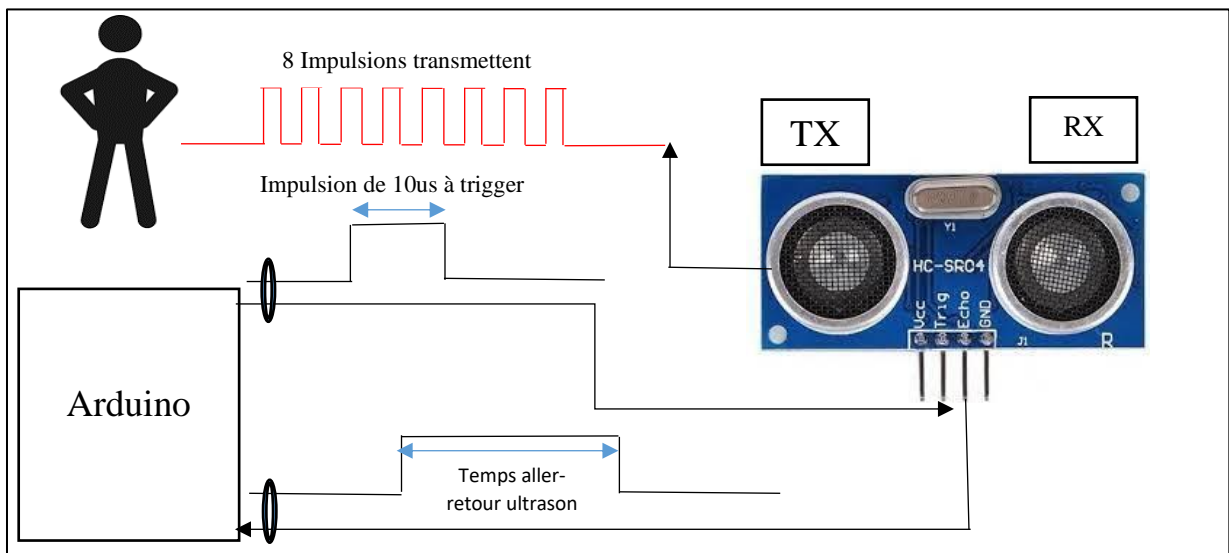


Figure 50: Aspect et fonctionnement du capteur ultrason

On a fait des essais pour tester le fonctionnement du capteur et la réaction du robot, une illustration est donnée sur la figure 51.

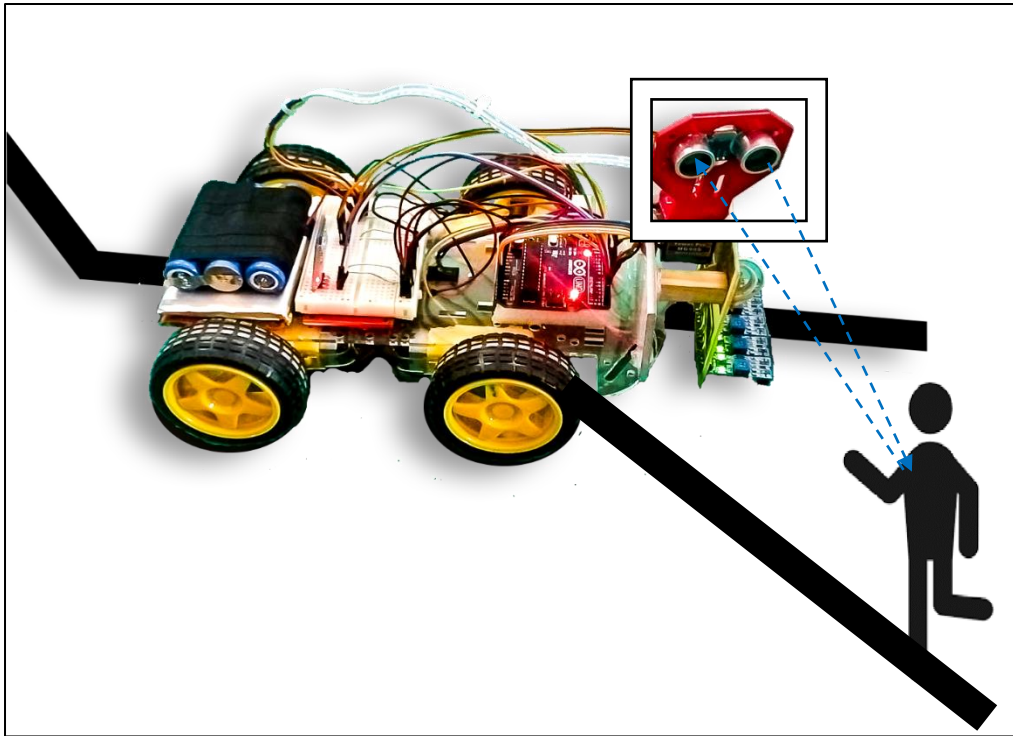


Figure 51: Illustration de fonctionnement du capteur

#### **III.3.2.2. Le chargeur de batterie lithium**

- Le Problème : chargeur spécial de batterie pour alimenter le robot.

Nous avons récupéré trois piles de lithium de 3,7V chacune (à partir d'une batterie d'un pc-portable. Mais il reste à réaliser le chargeur adéquat pour charger ces piles.

- La Solution : régulateur de tension

On a conçu un chargeur en assemblant trois régulateurs récupérés des batteries portables (Power Bank) ce qui permet d'obtenir une tension 3,7V stable et coupe automatiquement l'alimentation si les piles sont chargées, la structure et le branchement sont montrés sur la figure 52.



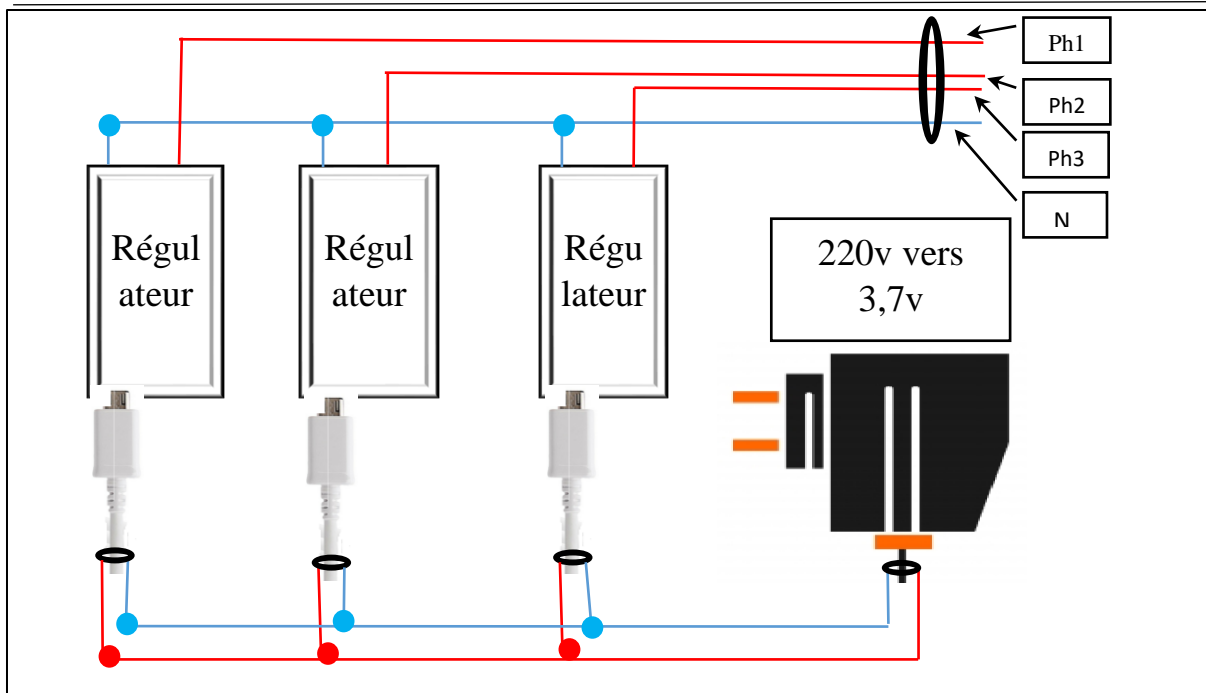


Figure 52: la structure de branchement du chargeur

Le chargeur réalisé est montré sur la figure 53.

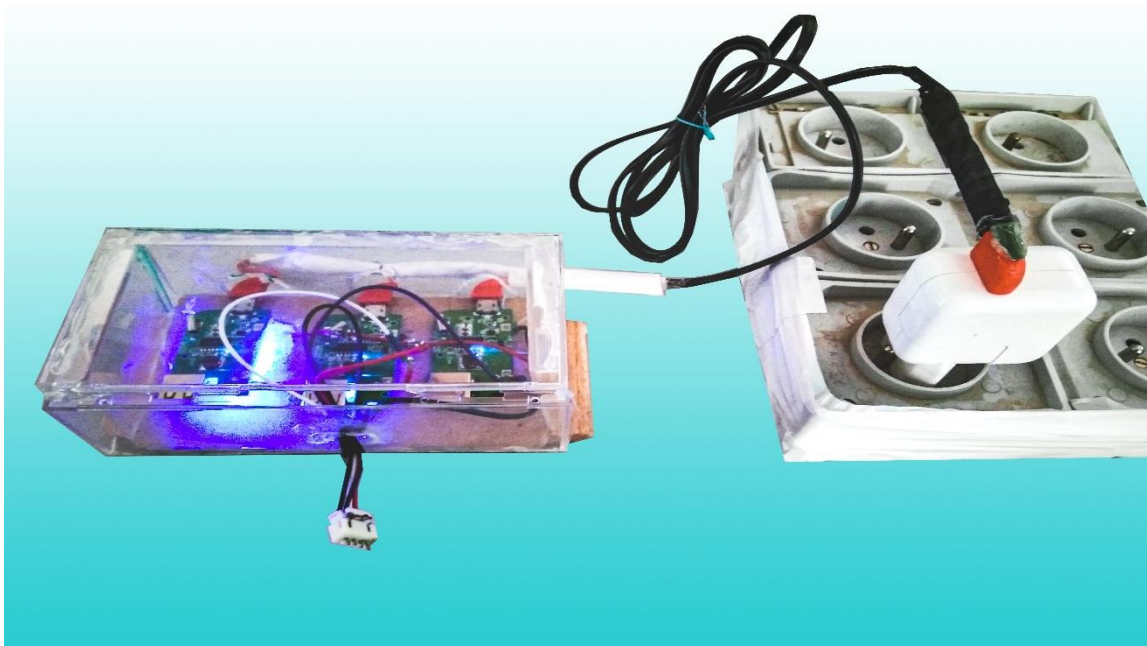
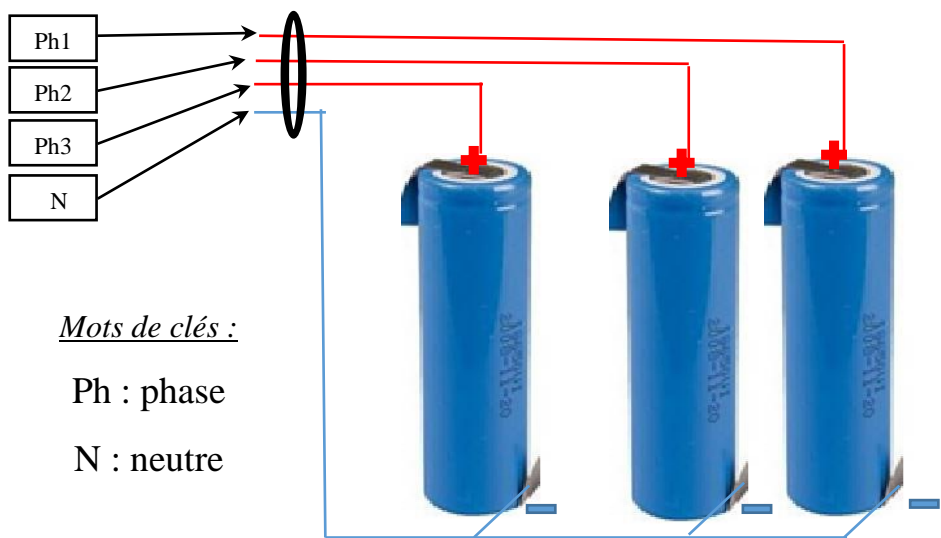


Figure 53: Le chargeur de batterie lithium réalisé

Le branchement des trois piles sur le chargeur est indiqué sur la figure 54.



*Mots de clés :*

Ph : phase

N : neutre

Figure 54: La structure de charger des piles

Pour réaliser la batterie du robot nous avons relié les trois piles avec une configuration série ce qui va permettre d’avoir une tension de l’ordre de 11V (figure 55).

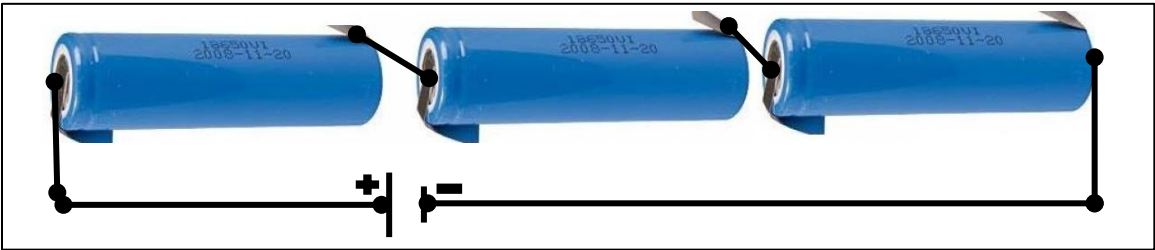


Figure 55: La configuration de la batterie réalisée.

### III.3.2. Les problèmes mécaniques

#### III.3.2.1. Roues de guidage : roue décentré orientable et roue à bille


- Le Problème : l’oscillation du robot

Le tableau ci-dessous résume les défauts de roue de guidage causés.

Tableau 5:Les défauts de roue de guidage

| Type de robots                                       | Avantages   | Inconvénients   | Symbole de roue de guidage |
|--|---|---|----------------------------|
| Suiveur de piste tricycle à Roue décentré orientable | <ul style="list-style-type: none"><li>• Economise la consommation d’énergie</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Instable</li><li>• Orientation pas précis</li></ul> |                            |
| Suiveur de piste tricycle à Roue à bille             | <ul style="list-style-type: none"><li>• Economise la consommation d’énergie</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Glissement non roulement (frottement)</li></ul>     |                            |

- La Solution : utilisation deux roues motrices

| Type de robot                            | Avantages  | Inconvénients  | Symbole des roues de guidage  |
|--|--|--|---|
| Suiveur de piste à quatre roues motrices | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stable</li> <li>• La réponse précise</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Consomme l'énergie</li> </ul> |  |

Donc pour éliminer les oscillations et perturbations causées par la roue libre nous l'avons remplacé par deux roues motrices, donc aux finales nous avons utilisé quatre roues motrices commandées deux par deux c'est-à-dire que la roue de devant et la roue d'arrière correspondante sont commandées en parallèle. Ce qui permet une très bonne stabilité du robot.

### III.3.2.2. La vitesse des quatre moteurs n'est pas identique

- Le problème : la vitesse du moteur à gauche différent de celle du moteur à droite

Au départ des tests le fonctionnement de notre robot sur une piste noire, on a constaté un déséquilibre du fonctionnement du robot, ce problème nous a pris beaucoup de temps pour le résoudre.

- La Solution : réglage la vitesse expérimentalement

En faisant plusieurs essais on a diminué la vitesse des moteurs à gauches pas à pas jusqu'à l'équilibre du robot. Le but de cette expérience c'est d'éliminer l'offset de la vitesse des moteurs à gauche.

## III.4. Le Schéma global de suiveur de piste avec PID intelligent

Le schéma synoptique du suiveur de piste que nous avons réalisé est représenté sur la figure 56, il fait ressortir les différents composants qui constituent le projet ainsi que leurs interconnexions.



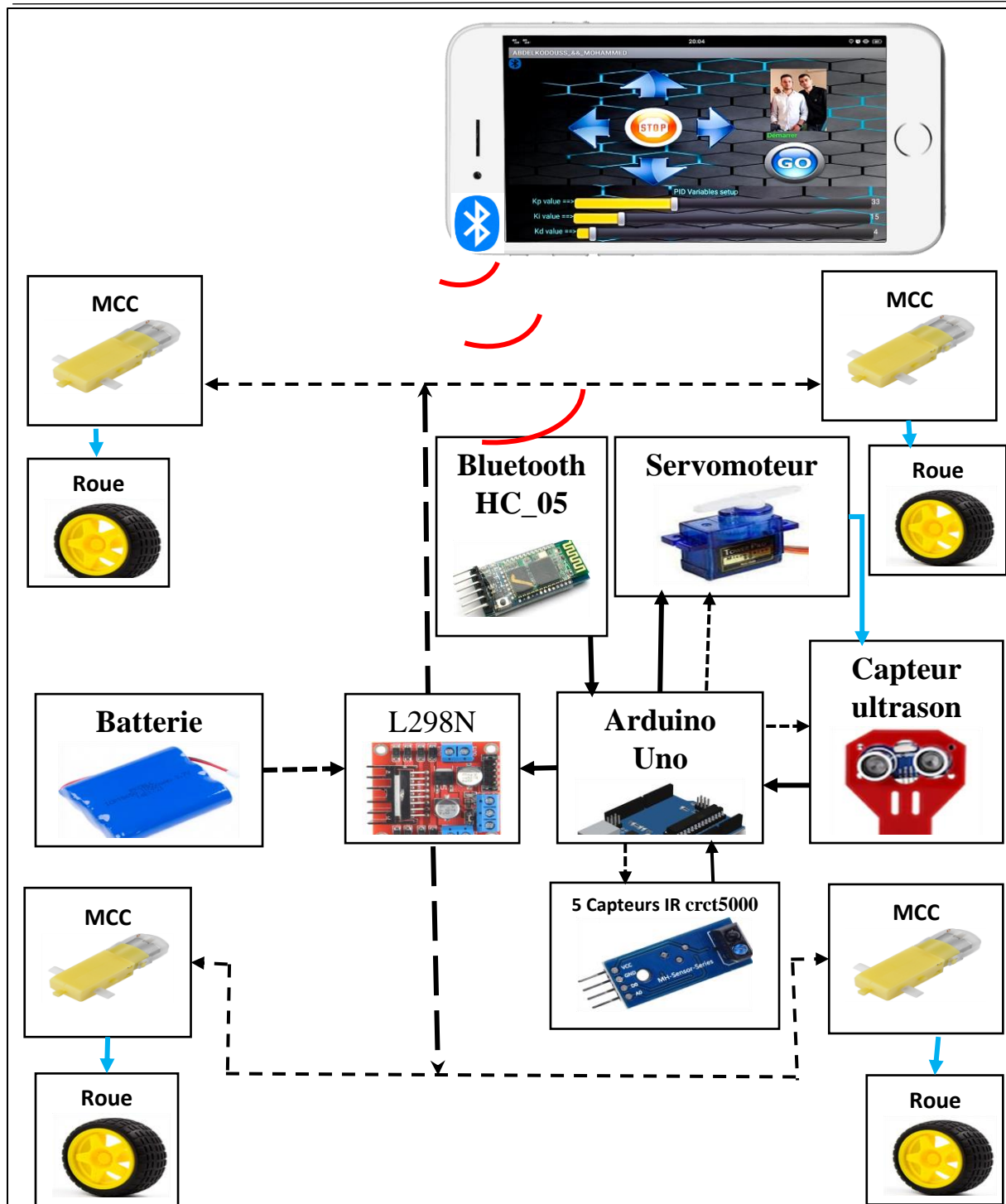


Figure 56: Schéma synoptique de l'ensemble du suiveur de piste

Tableau 6: Description les différents types de communication

| Le symbole de liaison | Le genre d'énergie                                |
|-----------------------|---|
| ---                   | Energie électrique d'alimentation.                |
| —                     | Signal d'information de commande                  |
| —                     | Energie mécanique                                 |
| )                     | Information émise par des ondes électromagnétique |

Pour rappel, la structure globale du robot suiveur de piste ainsi que ses interfaces de commandes, sont présentées ci-dessus :

- La batterie génère 11,1v, qui permet d'alimenter directement le module L298N.
- Le module Bluetooth permet la communication entre le Smartphone et le suiveur de piste.
- Le capteur ultrason permet au robot d'éviter les obstacles.
- Les capteurs infrarouges, situés sous le robot, assurent le suivi d'une piste noir continue.
- Le servomoteur permet au capteur ultrason de baliser la zone dans laquelle le robot évolue.
- Les moteurs à courant continu (MCC) permettent le déplacement du robot.
- Le module L298N permet de contrôler le sens de rotation et la vitesse des moteurs (MCC).
- La carte Arduino Uno est l'élément qui fait le traitement et le contrôle des données, et elle joue le rôle de distributeur d'énergie aux différents éléments de robot.

### **III.5. La connexion entre les composants de suiveur de piste avec PID intelligent**

Le montage de la figure 57, réalisé sous le logiciel Fritzing, montre les différents éléments du suiveur et leurs connections.

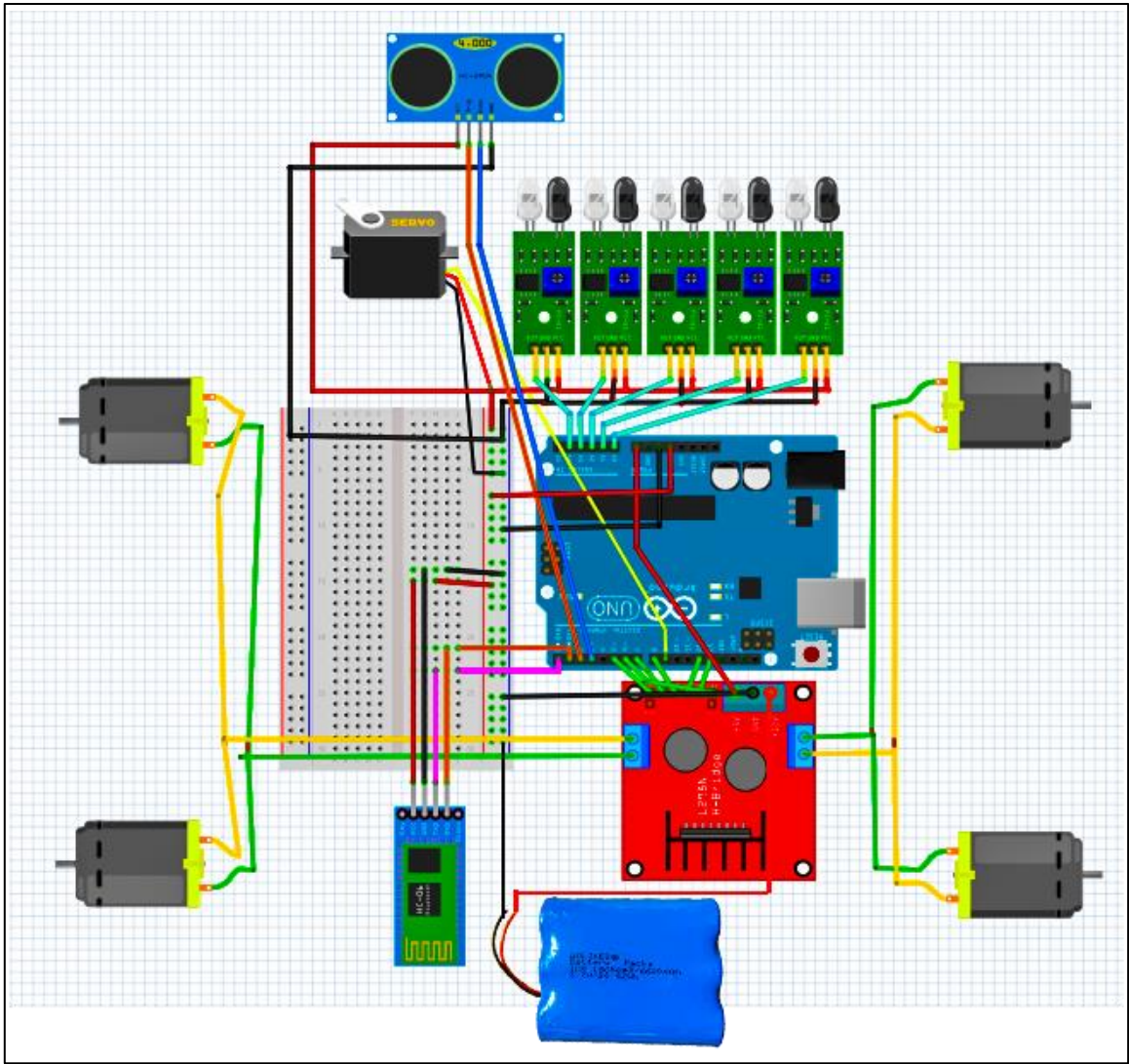


Figure 57: Le branchement des composants du robot par logiciel Fritzing

Les branchements de chaque composant sont regroupés dans les tableaux de 8 à 12.

Tableau 7:Les capteurs infrarouges IR

| Numéro des capteurs de<br>pine {D <sub>0</sub> } | Les pines d'Arduino |
|--|---------------------|
| N <sup>o</sup> 0 de                              | A <sub>0</sub>      |
| N <sup>o</sup> 1                                 | A <sub>1</sub>      |
| N <sup>o</sup> 2                                 | A <sub>2</sub>      |
| N <sup>o</sup> 3                                 | A <sub>3</sub>      |
| N <sup>o</sup> 4                                 | A <sub>4</sub>      |

Tableau 8:Les broches de capteur ultrason :

| Capteur | Arduino |
|---------|---------|
| Trigger | 2       |
| Écho    | 3_pwm   |

Tableau 9:Les broches de capteur ultrason :

| Servomoteur  | Arduino |
|--------------|---------|
| Pulse signal | 9       |

Tableau 10: Les broches de carte Bluetooth

| Carte Bluetooth | Arduino        |
|-----------------|----------------|
| T <sub>X</sub>  | R <sub>X</sub> |
| R <sub>X</sub>  | T <sub>X</sub> |

Les broches des moteurs :

Les deux moteurs à droite sont en parallèle, de même manière pour les moteurs à gauche.

Les moteurs à gauche sont branchés dans le pont A et les moteurs à droite sur le pont B du module driver moteur.

Tableau 11: La connexion entre Arduino et driver moteur du pont H

| Arduino   | Driver moteur    |                  |
|-----------|------------------|------------------|
| Les pines | Moteurs à gauche | Moteurs à droite |
| 5pwm      | X                | ENB              |
| 7         | X                | IN4              |
| 8         | X                | IN3              |
| 6pwm      | ENA              | X                |
| 13        | IN1              | X                |
| 12        | IN2              | X                |

### III.6. Localisation des composants sur le robot suiveur de piste

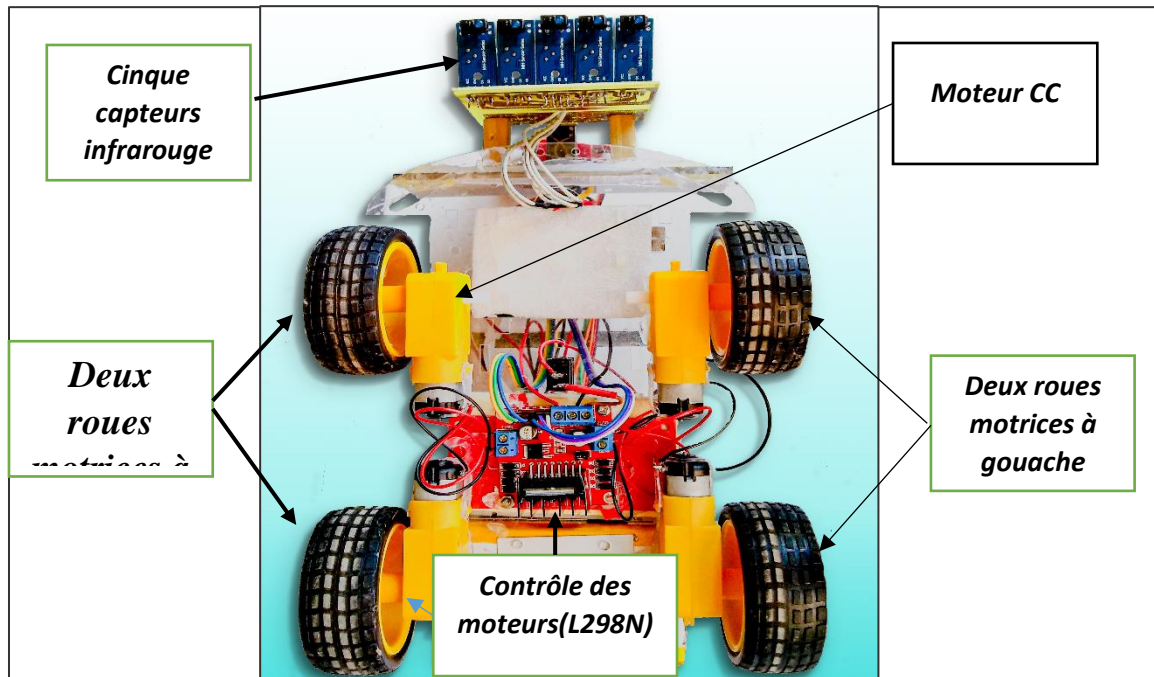


Figure 58: Vue au-dessous de robot

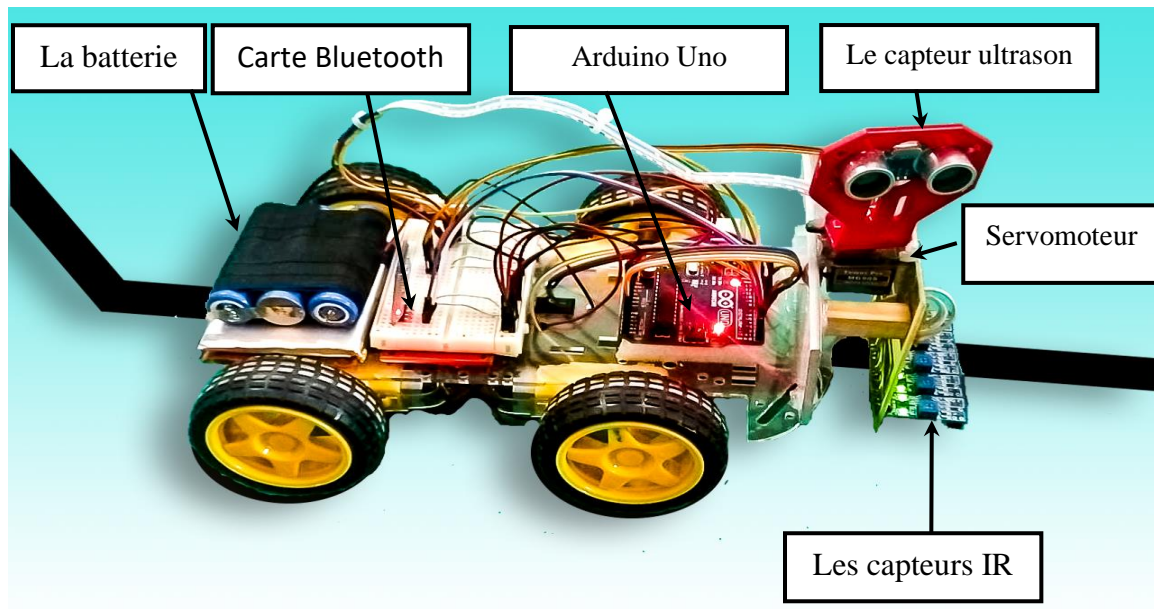


Figure 59: Vue au-dessus de robot



### III.7. Les modes de suiveur de piste avec PID intelligent

On a ajouté des modes pour donner à notre robot la fonction de multitâches, comme le schématise la figure 60. Les tâches sont décrites dans le tableau 12.

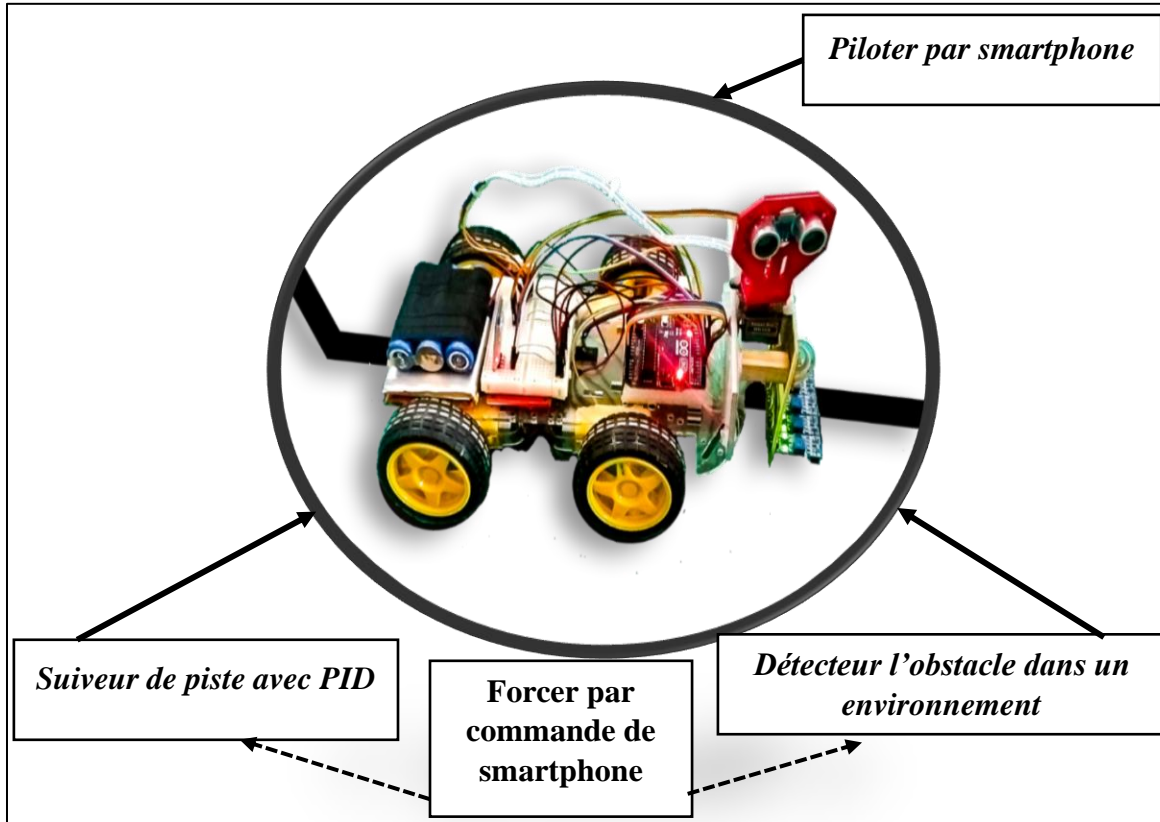


Figure 60: Les multitâches de robot

Tableau 12: Description de différentes tâches de robot

| Les tâches     | Le fonctionnement de robot                         | Le but   | La structure de commande   |
|----------------|--|--|----------------------------|
| <b>Tache 1</b> | Suiveur de piste avec PID.                         | Le robot suit une piste.   | <i>Automatique</i>         |
| <b>Tache 2</b> | Suiveur de piste avec PID commande par smartphone. | Le robot suit une piste mais on peut changer sa direction pour le déplacer dans une autre piste. | <i>Semi maître-esclave</i> |
| <b>Tache 3</b> | Détecteur l'obstacle dans un environnement         | Le robot détecte l'obstacle et le contourne et continue son trajet.                              | <i>Automatique</i>         |

|                |   |   |                                   |
|----------------|---|---|-----------------------------------|
| <b>Tache 4</b> | Détecteur l'obstacle dans un environnement et contrôle par le smartphone. | Le robot contourne les obstacles et il est orientable à distance. | <i><b>Semi maître-esclave</b></i> |
| <b>Tache 5</b> | Piloter par un smartphone.  | Le robot est guidé à distance.                                    | <i><b>Maître-esclave</b></i>      |

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons explicité les différentes étapes et câblage des composants qui nous ont permis de réaliser le robot suiveur de piste. Nous avons aussi évoqué les problèmes techniques rencontrés et les solutions que nous avons proposées. Nous avons doté notre d'un certains nombres de capteurs qui lui permettent un fonctionnement multitâche.

## Conclusion générale

Ce projet de fin d'étude est le résultat d'un travail de recherche dans le domaine de la robotique et l'automatique. Il est consacré à la commande d'un robot mobile à distance avec évitement d'obstacles automatique basé sur une carte Arduino UNO, cinq capteurs infrarouges lui indiquant son emplacement par rapport à la piste, il est aussi doté d'un capteur à ultrason comme moyen de perception et permet au robot de contourner les obstacles, quatre roues motrices entraînées par des moteurs à courant continu commandés par un driver de puissance basé sur le pont H double L298N. Un module HC-06 permettant d'avoir une liaison Bluetooth afin de pouvoir télécommander à distance le robot par une application Android que nous avons développée par l'intermédiaire de la plateforme App Inventor.

Pour aboutir à cela nous avons partagé le travail en deux étapes. La conception du robot mobile, où nous avons étudié les spécifications des différents composants utilisés et étudié leurs caractéristiques et leur fonctionnement. La réalisation, où nous avons donné les étapes à suivre pour construire le robot.

Notre projet permet la possibilité d'améliorer les performances du suiveur de piste à distance, car une fois le robot est opérationnel on peut modifier son algorithme de PID par le mode Bluetooth et la possibilité de plusieurs tâches.

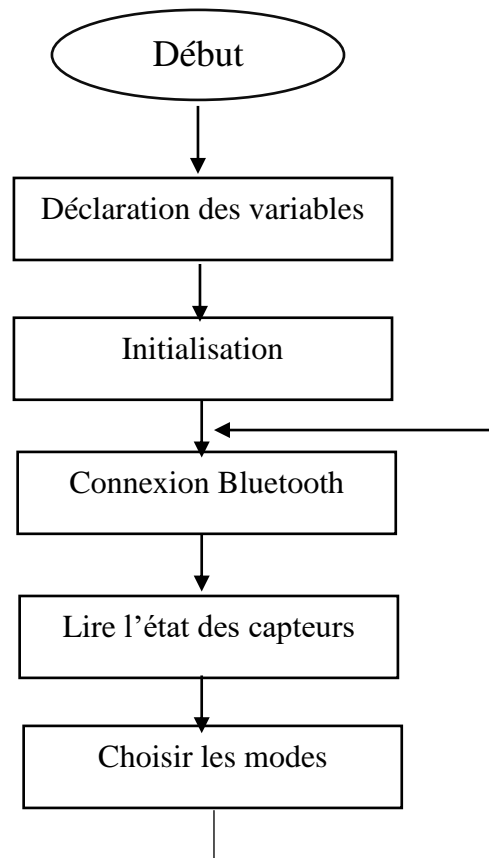
Ce projet nous a apporté énormément d'informations et d'enseignement dans plusieurs domaines mécanique, électronique, informatique et automatique. Ce qui nous a permis d'élargir nos connaissances dans ces domaines.



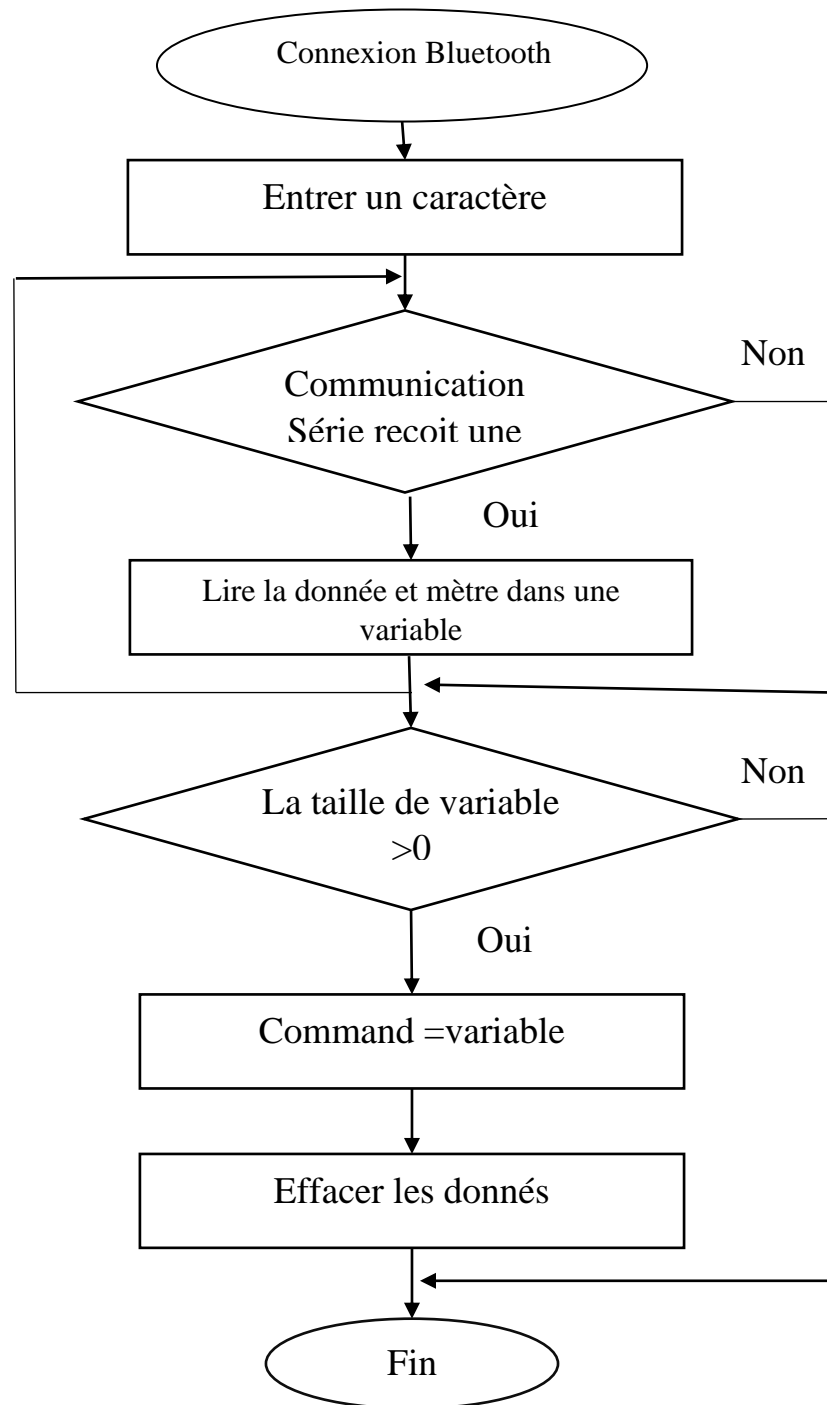
# Annexe

## ➤ Les organigrammes du programme de suiveur de ligne :

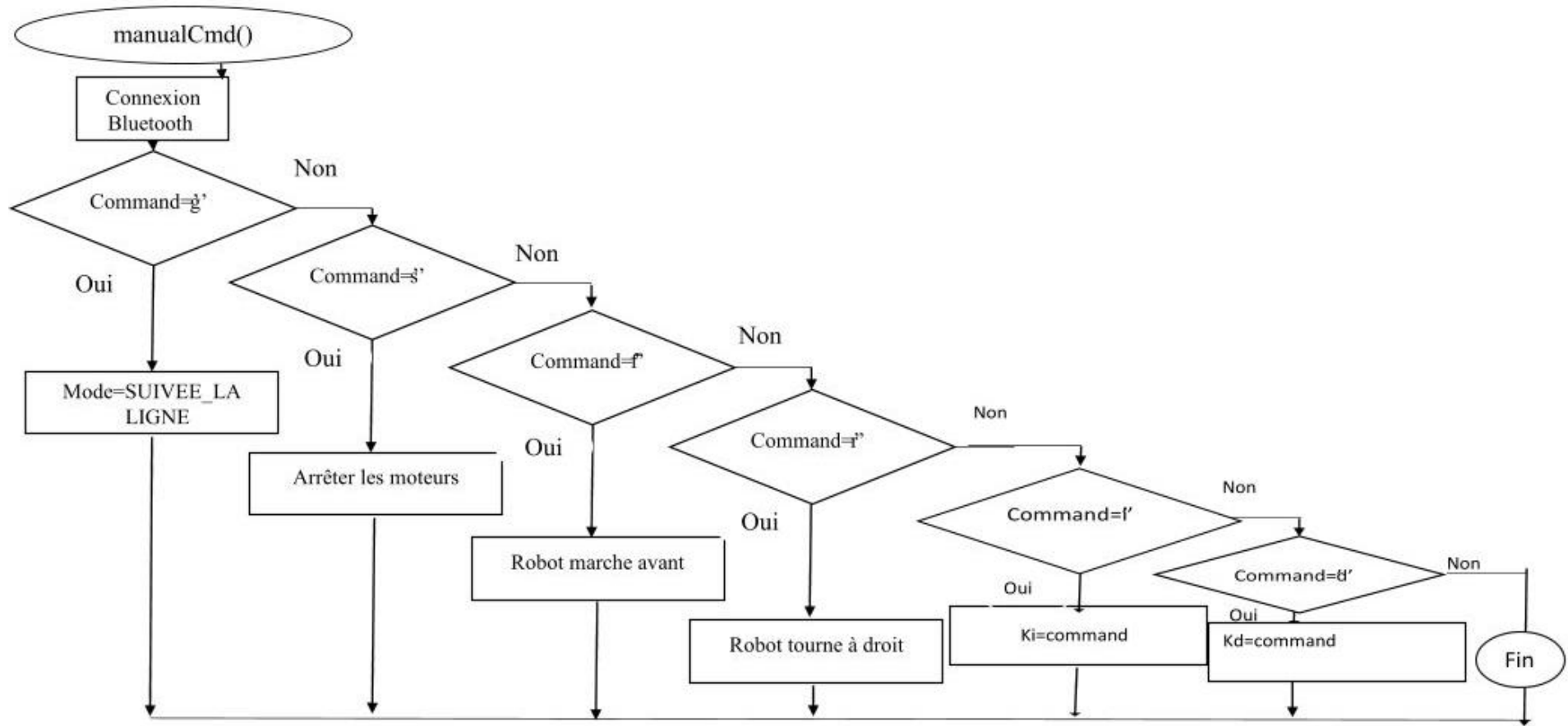
### 1) Organigramme du programme principal :



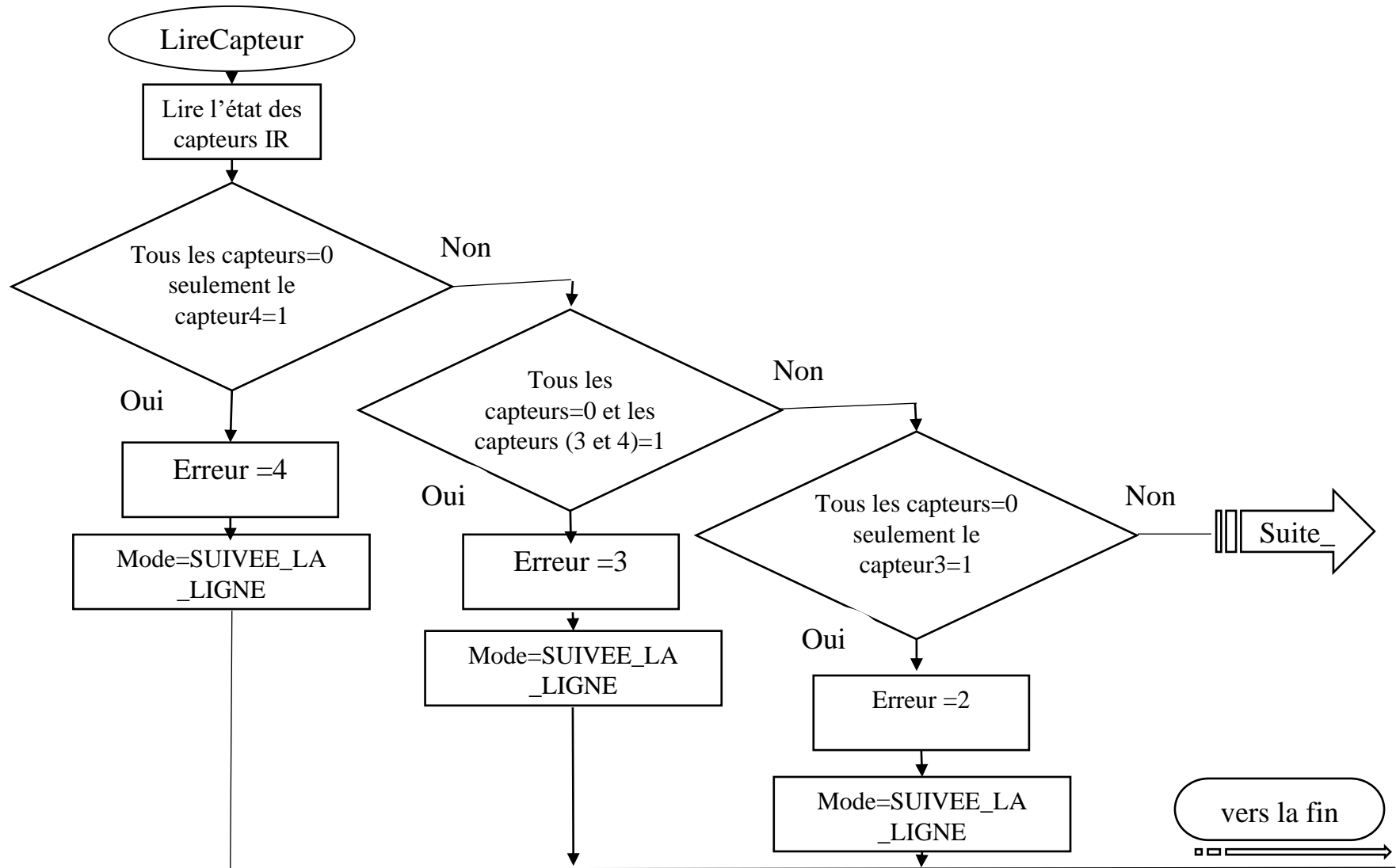
2) Organigramme du programme de connexion Bluetooth :

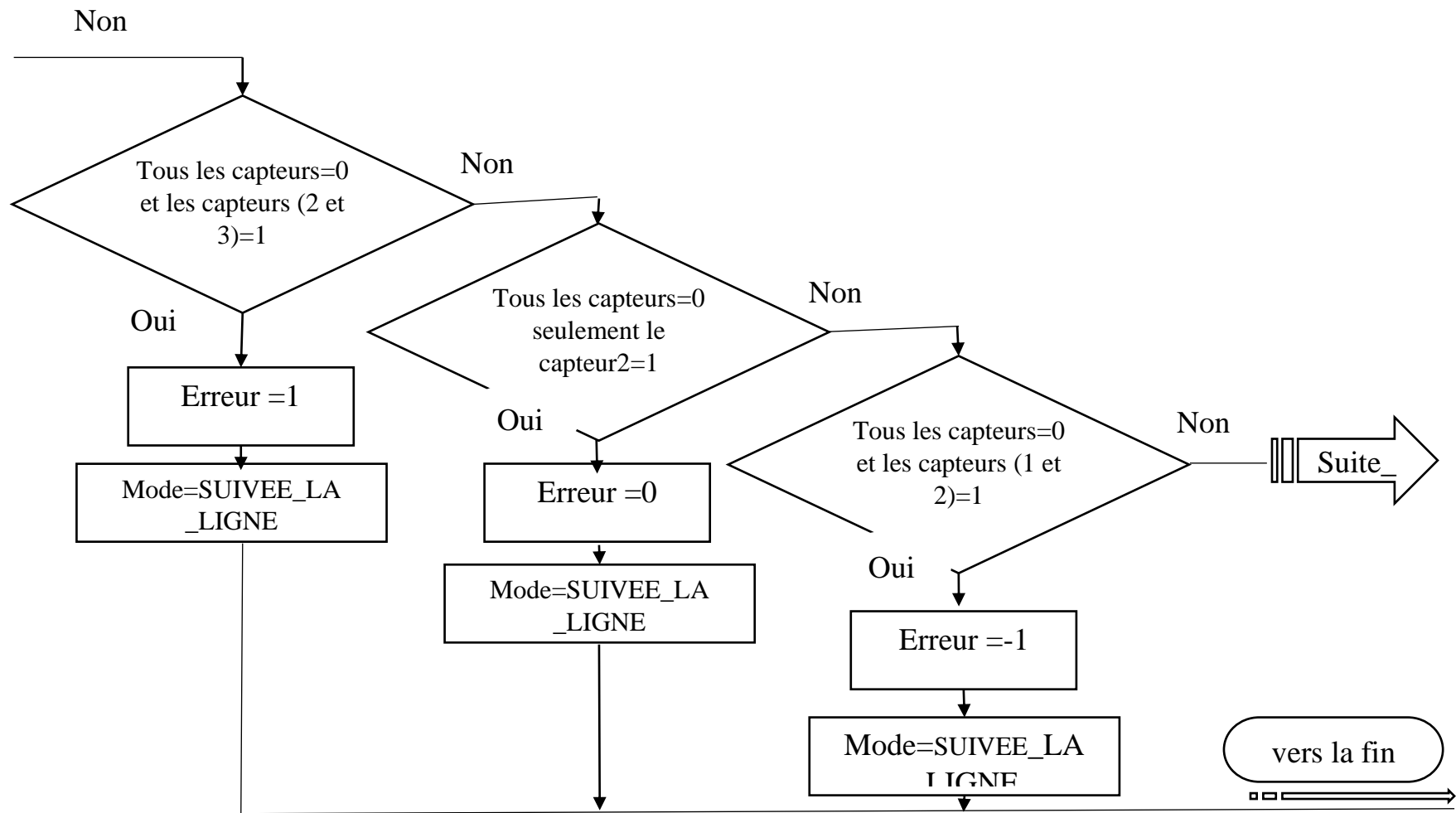


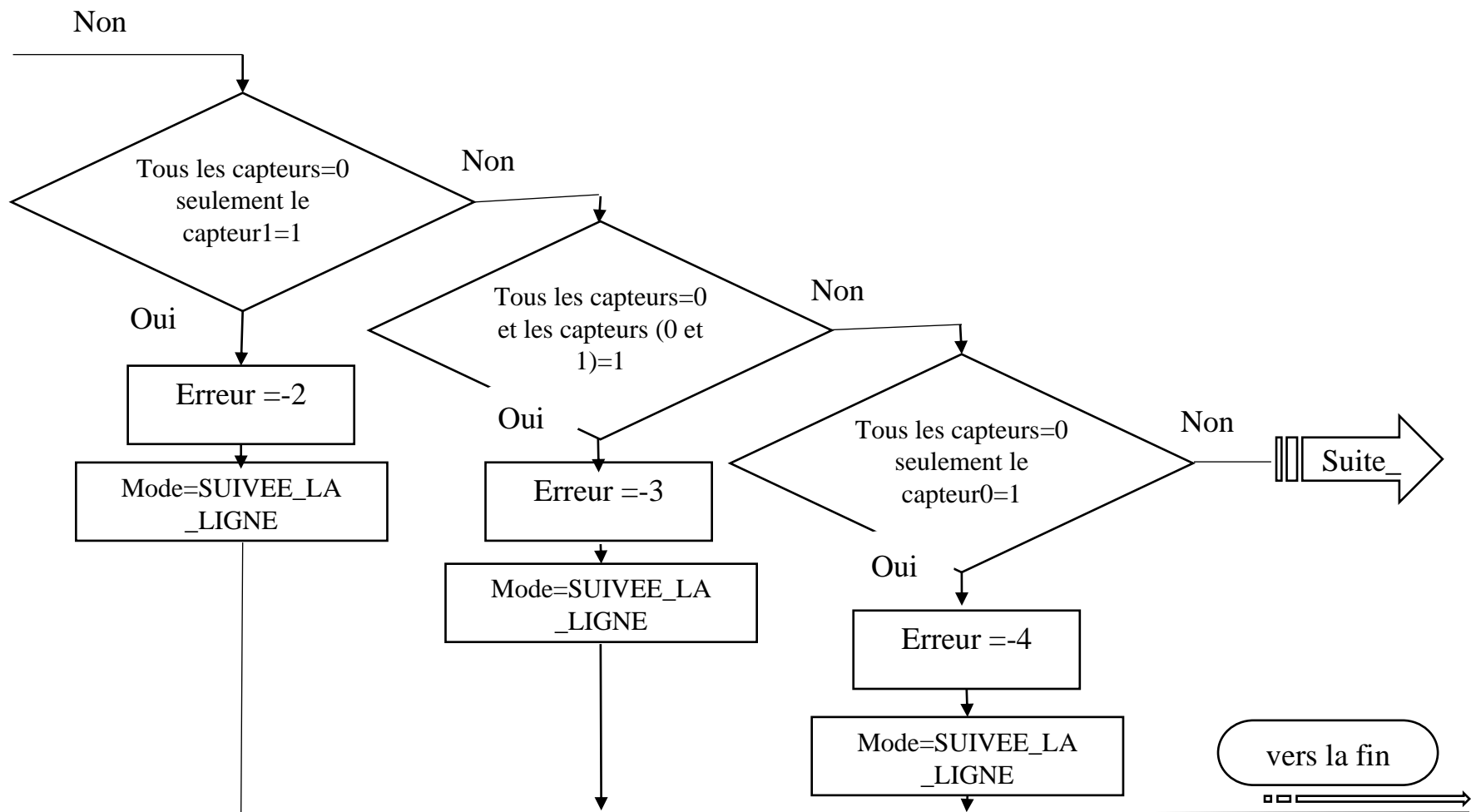
### 3) Organigramme du programme de choix des modes :

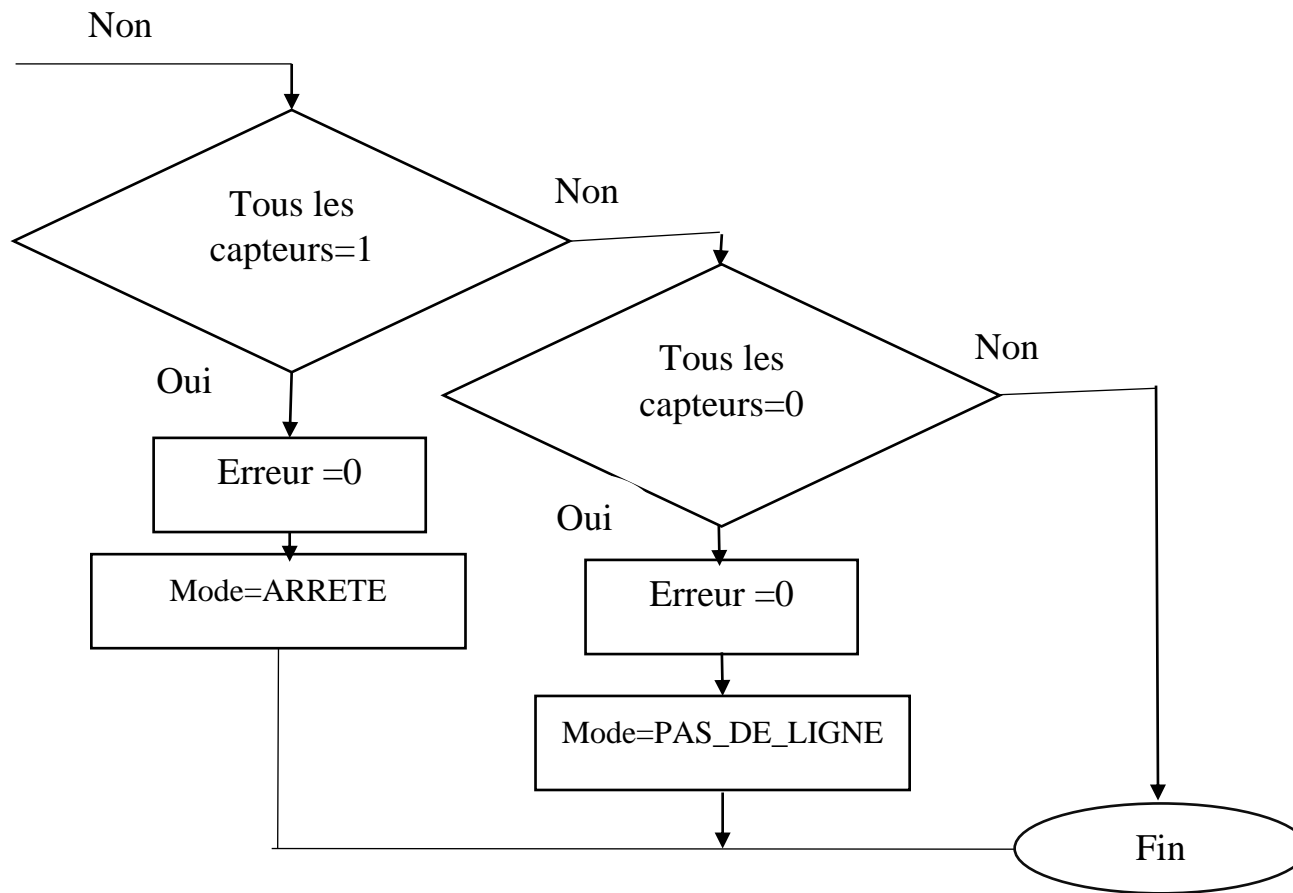


4) Organigramme du programme pour lire les états des capteurs Infrarouge :

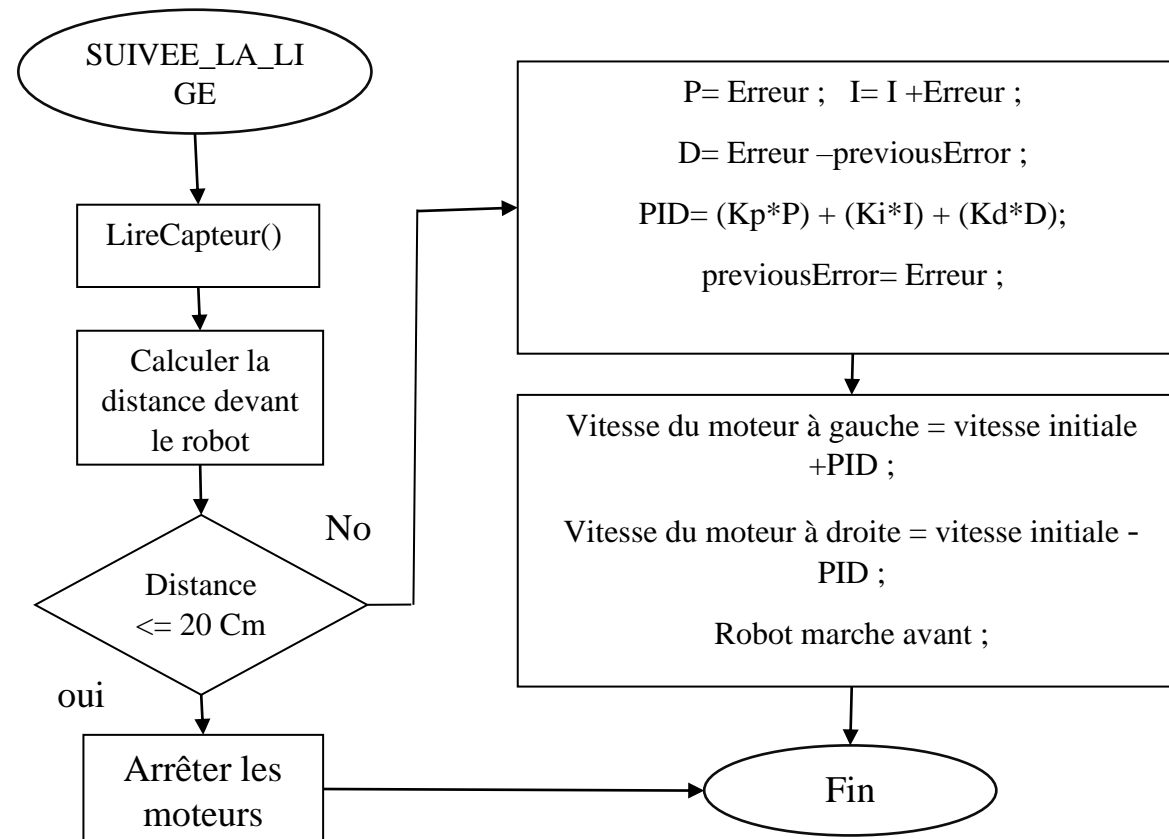






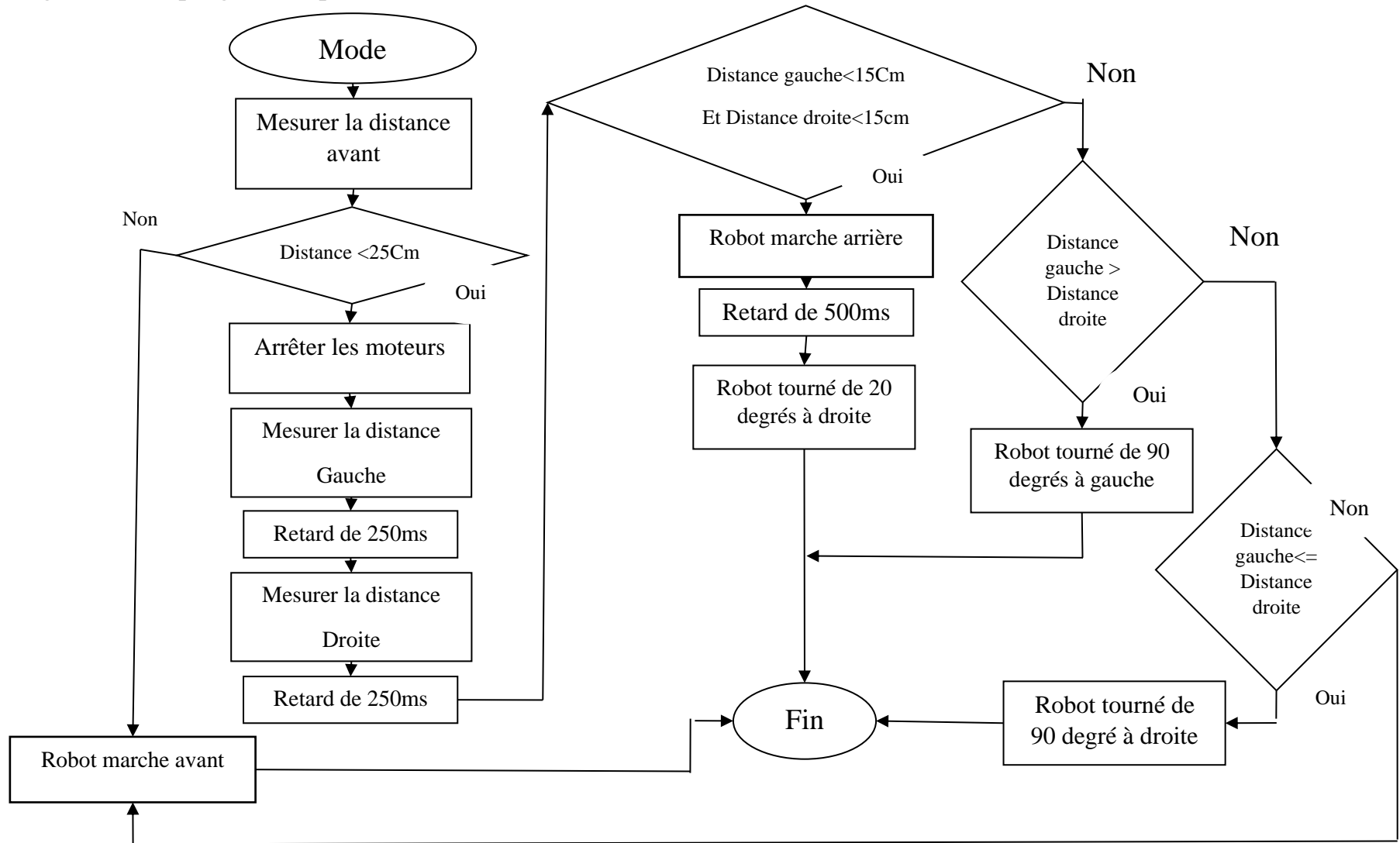


### 5) Mode Suiveur de ligne avec PID





6) Organigramme du programme pour détecter les obstacles dans l'environnement :



## Webographie

- <http://www.isetn.rnu.tn/archives/fr/index.php?id=41>
- <https://www.positron-libre.com/electronique/arduino/arduino.php>
- [http://fabrice.sincere.pagesperso-orange.fr/gestion\\_projet.htm](http://fabrice.sincere.pagesperso-orange.fr/gestion_projet.htm)
- <http://profge.free.fr/cours.html>
- <https://sites.google.com/site/stetanger/2ste/cours>
- <https://fr.calameo.com/read/003183492b504ba8cf987>
- [https://www.enib.fr/~kerhoas/asserv\\_mcc\\_correcteur.html](https://www.enib.fr/~kerhoas/asserv_mcc_correcteur.html)
- <http://prive.iutenligne.net/ghLxeOc3vnR15NUq/automatique-et-automatismes-industriels/konn/asnum/numA/index.html>
- <https://www.tubefr.com/linusbot-robot-suiveur-de-ligne.html>
- <https://www.memoireonline.com/01/19/10544/Realisation-d-un-robot-mobile-avec-evitement-d-obstacle-et-trajectoire-programmee.html>
- <https://www.electronique-mixte.fr/projet-electronique-18-wattmetre-avec-arduino/>
- <http://maximefarin.weebly.com/robot-eacuteviteur-dobstacles.html>
- <http://users.polytech.unice.fr/~pmasson/Enseignement-arduino.htm>
- <https://ardwinner.jimdofree.com/arduino/ix-les-modules-de-communication-bluetooth/>
- <http://tpil.projet.free.fr/2017/robot1.h>

