SAE3 – Conception et réalisation d'un robot suiveur de ligne

BUT2 GEII

H. Hadj-Abdelkader, P. Hoppenot, R. Chalard & D. Chevreau

Objectif

L'objectif de cette SAE est de concevoir progressivement un système robotique mobile capable de détecter puis de suivre de manière autonome une ligne noire sur fond blanc (ou inversement). Le projet conduit l'étudiant depuis l'étude et la réalisation des capteurs jusqu'à la commande asservie des moteurs et au suivi de trajectoire.

Le travail est organisé en six étapes : architecture fonctionnelle, capteurs CNY70, conversion analogique-numérique, réalisation d'un circuit imprimé, commande des moteurs avec encodeurs et PID, puis intégration complète pour le suivi de ligne. Les références exactes de certains composants pourront être adaptées par les enseignants en fonction du matériel disponible.

Compétences mobilisées

— analyser une documentation technique et extraire les caractéristiques utiles ;
— dimensionner et valider un montage électronique ;
— réaliser et tester un prototype sur plaque à trous ;
— acquérir et interpréter une grandeur analogique à l'aide d'un CAN ;
— concevoir un schéma et un circuit imprimé sous WinSchem / WinTypon ;
— mettre en œuvre une commande PWM, des encodeurs et un asservissement PID ;
— développer un algorithme de suivi de ligne et valider le système complet ;
— documenter les choix, mesures, essais et résultats obtenus.

Cahier des charges fonctionnel

Le robot doit être capable de suivre de manière autonome une piste noire de largeur $L_{\text{piste}} = 20$ mm tracée sur un fond clair. Le suivi de la trajectoire est assuré par quatre capteurs optiques disposés transversalement à l'avant du robot.

La disposition des quatre capteurs devra respecter les contraintes suivantes :

— les deux capteurs centraux sont utilisés principalement pour le suivi de la trajectoire. Leur écartement doit être inférieur à la largeur L_{piste} de la ligne noire, de manière à permettre au robot de déterminer sa position par rapport à celle-ci ;
— les deux capteurs extérieurs permettent de détecter une déviation plus importante du robot vers la gauche ou vers la droite. Leur position devra être choisie de manière cohérente avec la largeur de la piste et avec l'écart retenu pour les capteurs centraux ;
— les quatre capteurs sont également utilisés pour détecter les transitions entre les différentes tâches du parcours. Ces transitions sont matérialisées par une courte bande noire perpendiculaire à la piste principale. La largeur de cette bande sera suffisante pour être détectée simultanément par les quatre capteurs.

Ainsi, la détection simultanée de la ligne noire par les quatre capteurs constitue un **marqueur de transition**. Lorsqu'une telle configuration est détectée, le programme embarqué considère que le robot a atteint la fin de la tâche en cours et déclenche le passage à la tâche suivante.

La géométrie et l'écartement des capteurs devront donc être déterminés dès la phase de conception afin de satisfaire à la fois les contraintes de suivi de ligne, de détection des déviations et de reconnaissance des transitions du parcours, dont les caractéristiques complètes seront présentées au semestre 4.

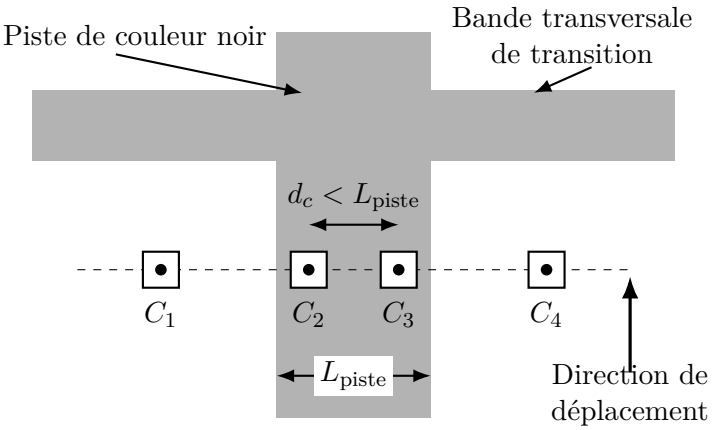
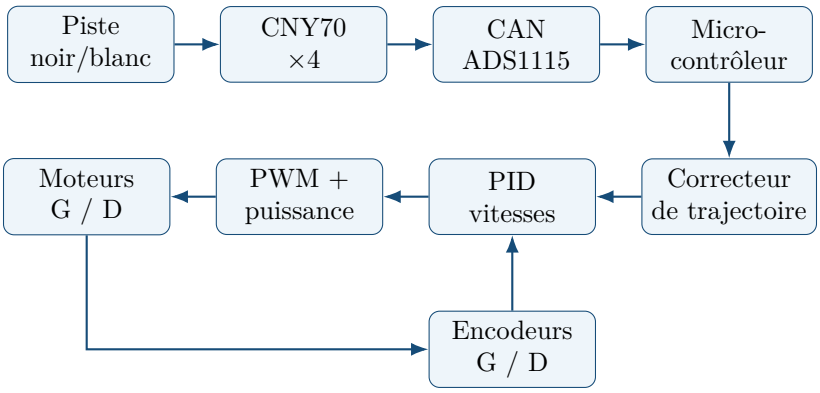


FIGURE 1 – Principe de disposition des quatre capteurs de ligne. Les capteurs centraux C_2 et C_3 assurent principalement le suivi de la piste, tandis que C_1 et C_4 permettent notamment de détecter des déviations plus importantes. Une bande noire transversale détectée simultanément par les quatre capteurs constitue un marqueur de transition vers la tâche suivante.

1. Vue d'ensemble de l'architecture

La figure suivante donne une vue d'ensemble de la chaîne fonctionnelle qui sera construite progressivement pendant la SAE. Elle servira de fil conducteur : chaque tâche permet de concevoir, tester puis valider un ou plusieurs blocs avant l'intégration finale.



2. T0 – Analyse fonctionnelle et architecture du système

Avant toute réalisation, proposer une architecture fonctionnelle globale du robot. Le schéma-blocs devra faire apparaître au minimum : capteurs optiques, conditionnement, CAN, microcontrôleur, algorithme de suivi, commande PWM, étage de puissance, moteurs et encodeurs.

Pour chaque bloc, préciser les entrées, les sorties, la nature des signaux (analogique, numérique, PWM, I^2C, impulsions encodeur) et sa fonction. Cette architecture sera mise à jour au cours de la SAE.

Validation attendue

Schéma fonctionnel commenté et première stratégie de tests bloc par bloc.

3. T1 – Capteur de ligne à base de CNY70 sur plaque à trous

Cahier des charges

Le capteur doit être conçu à partir de CNY70 alimentés par l'alimentation disponible sur le robot (valeur communiquée ou mesurée en séance). Le groupe devra déterminer lui-même, à partir de la documentation constructeur, le courant de fonctionnement pertinent de la LED infrarouge, la résistance de limitation et la résistance de conversion du phototransistor. Aucune valeur de résistance n'est imposée dans le sujet : tout choix doit être calculé, vérifié puis justifié expérimentalement. La sortie devra rester compatible avec l'entrée du CAN retenu en T2.

3.1 Étude et dimensionnement

Étude du composant

Étudier la documentation technique du CNY70 et expliquer son principe : diode électroluminescente infrarouge, réflexion par la surface et phototransistor de réception. Identifier les broches et les grandeurs électriques importantes : tension directe, courant de LED, courant du phototransistor, conditions de mesure et distance de fonctionnement.

Mettre en évidence l'influence de la couleur et de la réflectivité de la surface ainsi que de la distance entre le capteur et le sol. Expliquer pourquoi le composant peut être utilisé pour distinguer une ligne noire d'un fond blanc.

Schéma et dimensionnement

Proposer le schéma d'une voie de détection. Calculer et justifier les valeurs des composants auxiliaires, notamment :

— la résistance de limitation du courant de la LED infrarouge ;

— la résistance associée au phototransistor permettant d'obtenir une tension mesurable ;

— le cas échéant, les composants de filtrage ou de visualisation nécessaires.

Les calculs devront partir des caractéristiques de la documentation technique et des tensions d'alimentation réellement utilisées.

3.2 Réalisation

Réaliser d'abord une voie, puis l'ensemble des voies nécessaires au suivi de ligne sur une plaque à trous.

Une LED visible devra permettre de constater directement la différence de comportement entre surface claire et surface sombre.

3.3 Validation expérimentale

Effectuer des mesures au multimètre et/ou à l'oscilloscope. Pour chaque capteur, relever la tension obtenue sur fond blanc et sur ligne noire. Répéter les mesures pour plusieurs distances capteur-sol afin de déterminer une zone de fonctionnement robuste.

Capteur	**Distance**	V_{blanc}	V_{noir}	**Écart / conclusion**
C1				
C2				
C3				
C4				

Comparer les résultats expérimentaux aux valeurs attendues d'après le dimensionnement. Identifier les dispersions entre capteurs et proposer, si nécessaire, une méthode de calibration.

Validation attendue

Chaque voie doit distinguer de façon reproductible les deux surfaces. Le compte rendu comportera le schéma, les calculs, les valeurs retenues, les mesures noir/blanc et une conclusion sur la plage de fonctionnement du capteur.

4. T2 – Conversion analogique-numérique – CAN

Cahier des charges

Le CAN doit acquérir les quatre voies du capteur sans saturation et avec une résolution suffisante pour séparer les niveaux correspondant au noir et au blanc. Le groupe devra déterminer la plage de conversion adaptée, le quantum théorique, la fréquence d'acquisition pertinente et les paramètres de configuration nécessaires. L'utilisation du convertisseur analogique-numérique **ADS1115** avec l'environnement Arduino nécessite l'installation préalable de la bibliothèque `DFRobot_ADS1115`. Cette bibliothèque peut être installée de deux manières :

— **Depuis le gestionnaire de bibliothèques de l'IDE Arduino** : rechercher `DFRobot_ADS1115`, puis procéder à son installation.

— **Depuis un fichier ZIP** : télécharger la bibliothèque depuis la page web https://www.ibisc.univ-evry.fr/~hhadjabdelkader/#teaching, puis l'installer dans l'IDE Arduino via le menu `Croquis > Inclure une bibliothèque > Ajouter la bibliothèque .ZIP`.

Une fois la bibliothèque installée, elle pourra être utilisée dans le programme Arduino pour communiquer avec l'ADS1115 via le bus **I²C**.

4.1 Étude et dimensionnement

Étude du composant

Étudier le CAN utilisé dans la SAE (la référence ADS1115). Identifier sa résolution, ses voies d'entrée, ses plages de mesure, son alimentation et son interface de communication. Expliquer le principe de la conversion analogique-numérique et la relation entre tension d'entrée et code numérique.

Pour l'ADS1115, étudier également l'adressage I²C et les paramètres nécessaires à une conversion. Calculer le quantum correspondant à la plage retenue et établir les relations permettant de passer d'une tension au code numérique et réciproquement. Les bibliothèques pourront être utilisées uniquement dans les limites précisées par les enseignants ; l'objectif reste de comprendre la configuration et les données échangées.

4.2 Réalisation – câblage sur plaque à trous

— Valider dans un premier temps le fonctionnement du CAN à l'aide d'un potentiomètre permettant de générer une tension variable entre 0 V et V_{CC}. Acquérir cette tension avec le CAN et vérifier que la valeur numérique obtenue évolue correctement sur toute la plage de conversion.

— Relier le CAN aux capteurs réalisés en T1 et au microcontrôleur. Vérifier soigneusement les niveaux d'alimentation, les masses communes et les connexions du bus I²C avant mise sous tension.

4.3 Validation expérimentale – affichage et exploitation du mot numérique

Développer un programme permettant d'acquérir successivement les différentes voies. Pour une mesure donnée, afficher au minimum :

— le mot binaire issu de la conversion ;

— sa valeur décimale ;

— la tension reconstruite à partir du code numérique.

Comparer cette tension à la valeur mesurée au multimètre. Réaliser plusieurs acquisitions sur le noir et le blanc et déterminer des valeurs ou seuils permettant de discriminer les deux surfaces. Discuter l'intérêt de conserver une information analogique plutôt qu'une simple information logique.

Voie	**Surface**	**Code CAN**	V_{CAN} calculée	$V_{multimètre}$
0	Blanc			
0	Noir			
1	Blanc			
1	Noir			
2	Blanc			
2	Noir			
3	Blanc			
3	Noir			

Calculer pour chaque voie l'écart entre tension reconstruite et tension mesurée. Proposer ensuite un seuil de décision, global ou individualisé par capteur, et justifier ce choix à partir des mesures.

Validation attendue

Les valeurs numériques des différents capteurs doivent être cohérentes avec les tensions mesurées. Le groupe doit être capable d'expliquer la conversion tension/code et de justifier la méthode choisie pour distinguer noir et blanc.

5. T3 – Conception et réalisation d'un circuit imprimé

L'objectif est de transformer le prototype validé en une carte électronique robuste et intégrable au robot. Les contraintes dimensionnelles seront précisées par les enseignants lors des séances de SAE.

5.1 Schéma sous WinSchem

Saisir le schéma électrique complet sous WinSchem. Vérifier les références, les alimentations, les connecteurs et la cohérence entre schéma théorique et prototype validé. Prévoir des points de test utiles au dépannage.

5.2 Typon sous WinTypon

Réaliser le placement puis le routage sous WinTypon. Une attention particulière sera portée :

— à la position et à l'espacement des CNY70 par rapport à la piste ;

— aux dimensions réelles et empreintes des composants ;

— à la largeur et à la longueur raisonnable des pistes ;

— à l'alimentation, la masse, et aux connecteurs ;

— à l'accessibilité des composants et des points de mesure.

5.3 Fabrication, perçage et soudage

Après validation du typon par l'enseignant référent pour cette partie (généralement M. Chevreau), la fabrication du circuit imprimé sera réalisée par ce dernier selon le procédé disponible au département.

Réaliser ensuite le perçage puis contrôler le circuit **avant implantation des composants** : continuité des pistes, absence de court-circuit, dimensions et orientation des empreintes.

Implanter et souder les composants progressivement. Effectuer un contrôle visuel des soudures et un nouveau contrôle électrique avant alimentation.

5.4 Recette de la carte (validation et tests de la carte)

Reprendre le protocole de validation utilisé en T1 et T2. Les performances du circuit imprimé seront comparées à celles du prototype sur plaque à trous.

Validation attendue

Carte réalisée, contrôlée et fonctionnelle. Les mesures noir/blanc et les valeurs CAN doivent être cohérentes avec celles obtenues lors du prototypage.

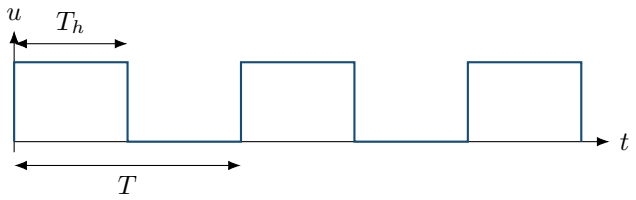
6. T4 – Commande PWM, encodeurs et asservissement des moteurs

6.1 Étude et caractérisation de la commande PWM

Étudier le principe de la modulation de largeur d'impulsion (PWM) et son utilisation pour commander la vitesse d'un moteur à courant continu via l'étage de puissance disponible sur le robot. Identifier les paramètres du timer nécessaires : fréquence, période, résolution et rapport cyclique. Lorsque demandé, la configuration des timers sera réalisée par accès aux registres plutôt que par une fonction de haut niveau.

Avant de connecter les moteurs, générer puis observer le signal PWM à l'oscilloscope. Mesurer sa fréquence et son rapport cyclique pour plusieurs consignes et comparer les valeurs mesurées aux valeurs programmées. On rappelle :

$$\alpha = \frac{T_h}{T}.$$



Travail demandé. Déterminer une fréquence PWM adaptée au système, justifier ce choix et développer une commande permettant de piloter indépendamment chaque moteur. Identifier expérimentalement la valeur minimale de commande permettant le démarrage de chaque moteur et discuter l'existence éventuelle d'une zone morte.

Commande PWM (%)	Fréquence mesurée	ω_G	ω_D	Observations
0				
25				
50				
75				
100				

Tracer ensuite les caractéristiques expérimentales $\omega_G = f(\alpha)$ et $\omega_D = f(\alpha)$. Appliquer la même commande aux deux moteurs, comparer les vitesses et expliquer les écarts constatés.

6.2 Mise en œuvre et validation des encodeurs

Étudier les encodeurs associés aux moteurs. À partir de leur documentation et de la chaîne mécanique, déterminer le nombre d'impulsions correspondant à un tour de roue. Le procédé permettant d'effectuer cette détermination sera précisé par les enseignants lors des séances de SAE.. En déduire une relation permettant de calculer la vitesse angulaire puis, si les dimensions de la roue sont connues, la vitesse linéaire.

Choisir une période d'échantillonnage T_e adaptée et justifier le compromis entre réactivité et résolution de mesure. Développer l'acquisition des deux encodeurs et vérifier son fonctionnement à différentes vitesses.

Moteur	PWM (%)	T_e	Impulsions	Vitesse calculée	Commentaire
G					
G					
D					
D					

6.3 Asservissement de vitesse : démarche de réglage

Mettre en œuvre une boucle fermée indépendante pour chaque moteur :

$$e(t) = \omega_c(t) - \omega_m(t),$$

avec ω_c la consigne et ω_m la vitesse mesurée. Le correcteur fournit la commande appliquée au PWM. La démarche devra être progressive : fonctionnement en boucle ouverte, correcteur P, ajout éventuel d'une action intégrale, puis action dérivée uniquement si elle est justifiée par les observations.

Pour chaque réglage, appliquer un échelon de consigne et relever au minimum : temps de montée, dépassement, temps d'établissement, erreur statique et présence éventuelle d'oscillations. Les valeurs de K_P, K_I et K_D ne sont pas fournies : elles doivent être proposées, testées et justifiées.

Essai	K_P	K_I	K_D	Erreur statique	Dépassement	Conclusion
1						
2						
3						
4						

6.4 Validation sur le robot : ligne droite et courbes

Commander simultanément les deux moteurs. Dans un premier temps, imposer une même consigne de vitesse aux deux roues et vérifier que le robot conserve une trajectoire rectiligne. Mesurer l'écart latéral après une distance définie par l'enseignant et comparer le comportement en boucle ouverte et en boucle fermée.

Pour un robot différentiel de voie L, on pourra exploiter :

$$v = \frac{v_D + v_G}{2}, \qquad \omega = \frac{v_D - v_G}{L}.$$

Réaliser ensuite plusieurs trajectoires courbes en imposant des consignes différentes aux roues. Interpréter physiquement l'effet de v_G et v_D sur le rayon de courbure.

Essai	v_G^*	v_D^*	Trajectoire observée	Écart / remarque
Ligne droite				
Courbe 1				
Courbe 2				

Validation attendue

La tâche T4 est validée lorsque les deux moteurs sont commandables indépendamment, que les encodeurs fournissent une mesure cohérente, que les deux boucles de vitesse sont stables et que le robot réalise une ligne droite régulée ainsi qu'au moins une trajectoire courbe reproductible.

7. T5 – Suivi de ligne autonome

Cette tâche constitue l'intégration des travaux précédents. Le robot doit exploiter les mesures des capteurs pour estimer la position de la ligne et modifier en temps réel les consignes de vitesse des deux roues.

Définition de l'erreur latérale de suivi de ligne

Pour permettre au robot de suivre la trajectoire, il est nécessaire de définir une grandeur représentant la position de la ligne par rapport au centre du robot. On introduit pour cela l'erreur latérale de suivi de ligne, notée e_L.

Cette erreur peut être définie de manière générale par :

$$e_L = x_{\text{ligne}} - x_{\text{robot}},$$

où x_{ligne} représente la position latérale estimée de la ligne et x_{robot} la position de référence correspondant à l'axe longitudinal du robot.

Ainsi :

— $e_L = 0$ signifie que la ligne est centrée par rapport au robot ;

— $e_L < 0$ signifie que la ligne est détectée d'un côté du robot ;

— $e_L > 0$ signifie qu'elle est détectée de l'autre côté.

Le signe associé à la gauche et à la droite dépend de la convention choisie. Cette convention devra être clairement définie par le groupe et conservée dans la suite du projet.

Estimation à partir des capteurs L'erreur e_L doit être estimée à partir des mesures fournies par les différents capteurs de ligne. Une méthode possible consiste à associer à chaque capteur une position latérale, ou un poids w_i, puis à calculer une position moyenne pondérée de la ligne :

$$e_L = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i s_i}{\sum_{i=1}^{N} s_i},$$

où :

— N est le nombre de capteurs utilisés ;

— s_i représente la mesure délivrée par le capteur i ;

— w_i représente la position latérale, ou le poids, associé à ce capteur.

Par exemple, pour quatre capteurs disposés symétriquement de gauche à droite, des poids de la forme

$$w_1 = -3, \qquad w_2 = -1, \qquad w_3 = +1, \qquad w_4 = +3$$

peuvent être envisagés. Ces valeurs sont données à titre d'exemple et ne constituent pas une solution imposée.

Travail demandé

À partir de la disposition réelle des capteurs et des mesures obtenues expérimentalement :

1. proposer une méthode permettant d'estimer la position de la ligne ;
2. définir précisément l'erreur latérale e_L utilisée par votre système ;
3. préciser la convention de signe retenue ;
4. vérifier expérimentalement que e_L est proche de zéro lorsque le robot est centré sur la ligne ;
5. vérifier que le signe et l'amplitude de e_L évoluent de manière cohérente lorsque le robot se déplace vers la gauche ou vers la droite de la ligne.

Remarque

La grandeur s_i utilisée pour calculer e_L ne correspond pas nécessairement directement à la valeur brute délivrée par le CAN. Selon le câblage du CNY70, le niveau mesuré peut augmenter ou diminuer lorsque le capteur se trouve au-dessus de la ligne noire.
Les mesures devront donc être préalablement analysées et, si nécessaire, normalisées ou transformées afin que s_i représente de manière cohérente le niveau de détection de la ligne par le capteur i.

7.1 Caractérisation de la perception de ligne

Avant de déplacer le robot, enregistrer les valeurs des différents capteurs pour plusieurs positions connues de la ligne : fortement à gauche, légèrement à gauche, centrée, légèrement à droite, fortement à droite et absente. Les mesures doivent permettre de vérifier que la géométrie du capteur et les seuils déterminés précédemment sont exploitables.

Position de la ligne	C1	C2	C3	C4	Décision / erreur e_L
Fortement à gauche					
Légèrement à gauche					
Centrée					
Légèrement à droite					
Fortement à droite					
Ligne absente					

7.2 Commande de trajectoire : du tout-ou-rien au correcteur proportionnel

La mise au point sera réalisée progressivement afin de distinguer les problèmes de perception des problèmes de commande :

1. robot à l'arrêt : validation de e_L pour différentes positions de ligne ;
2. vitesse réduite : commande gauche/droite simple afin de vérifier le sens des corrections ;
3. commande proportionnelle : $\Delta v = K_L e_L$;
4. augmentation progressive de la vitesse nominale v_0 ;
5. si nécessaire, amélioration de la loi de commande après analyse des défauts observés.

Les consignes sont alors :

$$v_G^* = v_0 - \Delta v, \qquad v_D^* = v_0 + \Delta v.$$

Elles alimentent les deux asservissements de vitesse réalisés en T4.

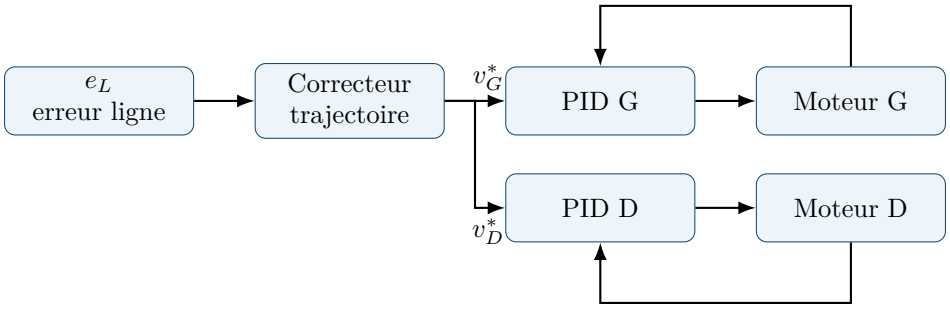
Remarque pédagogique

La mise en œuvre et le réglage d'un correcteur PID seront étudiés plus en détail au moment de la réalisation de cette tâche. Les éléments théoriques, la méthode de réglage ainsi que la procédure expérimentale correspondante seront présentés dans un document complémentaire ou ajoutés au présent document au moment opportun.

7.3 Architecture en cascade

La boucle externe corrige l'erreur de position de la ligne et fournit les consignes de vitesse ; les deux boucles internes régulent les vitesses des roues à partir des encodeurs :

$$\boxed{\text{Capteurs}} \rightarrow \boxed{\text{CAN}} \rightarrow \boxed{e_L} \rightarrow \boxed{\text{Correcteur trajectoire}} \rightarrow \boxed{v_G^*, v_D^*} \rightarrow \boxed{\text{PID moteurs}} \rightarrow \boxed{\text{PWM}}.$$



7.4 Protocole d'essais du suivi de ligne

Les performances seront évaluées sur une piste définie par les enseignants. Les essais doivent être reproductibles : pour chaque réglage, noter la vitesse nominale, le gain de trajectoire, le comportement dans les lignes droites et les courbes, ainsi que les pertes éventuelles de ligne.

Essai	v_0	K_L / réglage	Ligne droite	Courbes	Observations / pertes de ligne
1					
2					
3					
4					

On cherchera notamment à identifier les phénomènes suivants : oscillation autour de la ligne, correction trop lente, saturation des moteurs, perte de ligne dans une courbe, sensibilité à la vitesse et influence du contraste. Pour chaque défaut observé, proposer une cause probable et une modification de réglage ou d'algorithme.

7.5 Recette finale

Le groupe réalise plusieurs tours ou parcours successifs sans intervention humaine. Le protocole exact (nombre de tours, vitesse minimale, type de courbes) sera fixé par les enseignants en fonction de la piste disponible. Les étudiants doivent présenter les réglages retenus et justifier les compromis entre vitesse, stabilité et robustesse.

Validation attendue

Le robot doit suivre de manière autonome la piste définie par les enseignants. La validation porte à la fois sur la réussite du parcours et sur la capacité du groupe à expliquer la chaîne de mesure, le calcul de e_L, la loi de commande, les réglages des boucles et les limites observées.

8. Méthode de travail et validations intermédiaires

La SAE repose sur une démarche incrémentale. Une tâche ne doit pas être considérée comme terminée uniquement parce que le montage ou le programme "semble fonctionner". Chaque étape doit faire l'objet d'un protocole de test, de mesures et d'une conclusion.

Étape	Production principale	Preuve de validation
T0	Architecture fonctionnelle	Schéma-blocs commenté
T1	Capteurs CNY70 sur plaque à trous	Mesures noir/blanc + LEDs
T2	Acquisition CAN	Codes binaires/décimaux + tensions
T3	PCB capteur	Contrôles électriques + recette
T4	Commande moteurs	PWM, encodeurs, PID, ligne droite/courbe
T5	Robot complet	Démonstration du suivi de ligne

9. Planning indicatif et jalons

Le tableau suivant propose une progression sur **10 séances**. Il pourra être adapté au volume horaire réel, au matériel disponible et au rythme de chaque groupe. Une validation intermédiaire conditionne autant que possible le passage à l'étape suivante.

Séance	Tâche	Travail principal	Jalon / production
1	T0–T1	Architecture, datasheet CNY70, schéma et dimensionnement	Schéma-blocs + calculs
2	T1	Réalisation plaque à trous, mesures noir/blanc, LEDs	Validation capteurs
3	T2	Étude CAN, I^2C, câblage et premières conversions	Lecture d'une voie
4	T2	Acquisition multivoies, affichage binaire, calibration	Validation CAN + seuils
5	T3	WinSchem, implantation et WinTypon	Typon validé
6	T3	Fabrication, perçage, soudage, contrôle et recette	Carte capteur fonctionnelle
7	T4	PWM indépendant et caractérisation des moteurs	Courbes PWM/vitesse
8	T4	Encodeurs, calcul de vitesse, réglage P/PI/PID	Deux boucles vitesse
9	T4–T5	Ligne droite, courbes, estimation de l'erreur de ligne	Robot mobile régulé
10	T5	Réglage du suivi, essais piste et démonstration	Recette finale + bilan

Jalons conseillés

J1 : capteurs validés sur plaque à trous ; **J2 :** acquisition CAN validée ; **J3 :** PCB fonctionnel ; **J4 :** deux moteurs asservis ; **J5 :** suivi de ligne autonome démontré.

10. Livrables

Le travail demandé devra être documenté au fur et à mesure. Les livrables comprendront au minimum :

— les schémas fonctionnels et électriques ;

— les calculs de dimensionnement ;

— les protocoles de test et tableaux de mesures ;

— les fichiers WinSchem et WinTypon ;

— les programmes sources commentés ;

— les courbes ou relevés utilisés pour le réglage des moteurs et des correcteurs ;

— un rapport technique synthétique présentant la démarche, les résultats, les problèmes rencontrés et les solutions retenues ;

— une démonstration finale du robot sur la piste définie.

Le rapport ne devra pas être une simple chronologie des séances. Il devra permettre à un lecteur de comprendre les choix techniques, de reproduire les essais et de vérifier les résultats annoncés.