

Rapport de Projet

Conception d'une
Voiture Autonome

NXP CUP

2025

Présenté par
Youness TALEB



Table des Matières

Table des Matières	2
I - Introduction.....	3
II - Description du Matériel	3
2.1. Carte MCXN947	3
2.2. Caméra Linéaire TSL1401	4
2.3. Contrôle Moteur : ESC et Servo	5
III - Traitement de la Ligne.....	6
3.1. Principe du Capteur Linéaire	6
3.2. Calcul de la Position de la Ligne.....	6
3.3. Pilotage Élémentaire (Erreur et Direction).....	7
IV - Approche IA : Modèle sans Données Étiquetées	7
4.1. Concept Général	7
4.2. Réseau de Neurones et Algorithme Génétique.....	8
4.3. Bénéfices pour la NXP Cup	8
V - Méthodologie	8
5.2. Développement Logiciel	9
5.3. Tests et Validation	9
VI - Résultats et Analyse	9
6.1. Fonctionnement Individuel des Composants	9
6.2. Tentatives d'Intégration Globale	9
6.3. Évaluation des Performances	10
VII - Difficultés Rencontrées.....	11
VIII - Conclusion.....	12
IX - Annexes	13
X - Bibliographie	14

I - Introduction

Dans le cadre de notre troisième année du cycle ingénieurs en Robotique et systèmes autonomes, nous devons réaliser un projet de 4 mois nous permettant de mettre en pratique nos connaissances et nos compétences professionnelles. C'est dans ce contexte que j'ai choisi de me lancer dans un projet ambitieux et stimulant qui m'a été proposé par monsieur Guillaume Ducard.

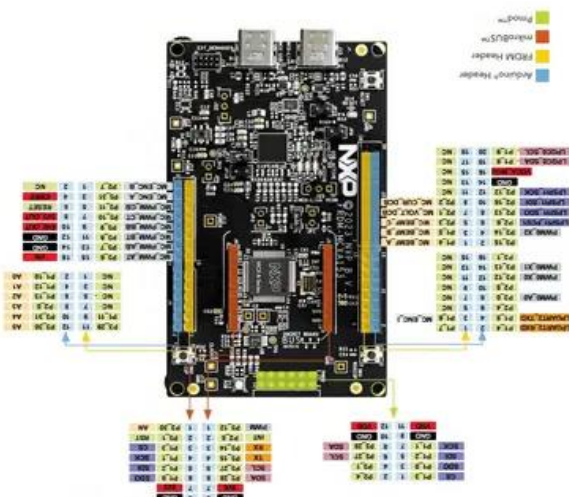
Je vais vous présenter un projet de voiture autonome développé pour la compétition NXP Cup. Cette compétition automobile est destinée à des équipes d'étudiants venus de plusieurs pays, dans laquelle des voitures autonomes montées et développées par ces étudiants s'affrontent. Le principe est assez simple : la voiture doit rouler à bonne allure sur une piste blanche délimitée par deux bandes noires, et surtout garder une trajectoire stable malgré les virages.



Pour ce projet, j'ai utilisé une carte FRDM-MCXN947 (qui est au cœur du système), une caméra linéaire TSL1401 pour repérer la piste, des moteurs pilotés via des contrôleurs de vitesse (ESC) et un servo-moteur pour la direction. J'ai également eu recours à un petit volet d'intelligence artificielle basé sur l'apprentissage par renforcement (Reinforcement Learning, ou RL). L'avantage de cette méthode, c'est qu'elle n'exige pas de disposer d'un gros jeu de données pré-étiquetées.

Dans ce qui suit, je détaillerai d'abord le matériel utilisé, puis le processus de la détection de la piste par la caméra. Je passerai ensuite à la partie IA, en expliquant comment le RL peut optimiser le pilotage de la voiture. Enfin, je vous ferai un retour sur les difficultés majeures rencontrées et les optimisations encore possibles.

II - Description du Matériel



La conception d'une voiture autonome efficace nécessite une sélection judicieuse des composants matériels. Chaque élément joue un rôle crucial dans le fonctionnement global du véhicule.

2.1. Carte MCXN947

La carte MCXN947 est le cerveau du système. Basée sur un microcontrôleur ARM Cortex-M9, elle offre une puissance de calcul suffisante pour gérer la caméra, les moteurs, et exécuter les algorithmes d'IA.

Caractéristiques :

- Microcontrôleur : ARM Cortex-M9
- Fréquence : 300 MHz
- Mémoire : 1 MB Flash, 512 KB RAM
- Interfaces : ADC, PWM, UART, SPI, I2C
- Connectivité : USB, Ethernet

Avantages :

- Performance : Capable de traiter simultanément plusieurs tâches.
- Flexibilité : Diverses interfaces pour une intégration facile des composants.
- Support IA : Communication avancée facilitant l'implémentation de modèles d'IA.

Inconvénients :

- Documentation Limitée : Rares ressources disponibles, compliquant l'implémentation.
- Configuration ADC : Configuration complexe avec des pins inactifs nécessitant des solutions alternatives.

La MCXN947 gère la lecture des capteurs, le calcul des commandes de pilotage, et la communication avec le module d'IA. Elle contrôle également les ESC et le servo-moteur via des signaux PWM.

2.2. Caméra Linéaire TSL1401

Pour la détection de la ligne, j'ai opté pour une caméra linéaire TSL1401, composée de 128 pixels en une seule rangée.

Caractéristiques :

- Type : CCD linéaire
- Pixels : 128 x 1
- Interface : Analogique

Avantages :

- Traitement Léger : Génère peu de données, idéal pour un microcontrôleur.
- Réactivité : Détection rapide des variations de luminosité.



Fonctionnement : La caméra scanne la piste en générant des signaux SI et CLK pour activer chaque pixel séquentiellement. La sortie analogique est convertie en valeurs numériques par l'ADC, produisant un tableau de 128 valeurs d'intensité lumineuse.

La TSL1401 perçoit visuellement la ligne noire sur la piste blanche, fournissant des données essentielles pour ajuster la trajectoire du véhicule en temps réel.

2.3. Contrôle Moteur : ESC et Servo

Le système de propulsion et de direction repose sur deux composants principaux : les ESC et le servo-moteur.

Electronic Speed Controllers (ESC) :

- **Fonction** : Contrôler la vitesse des moteurs DC.
- **Caractéristiques** : Tension 12 V, signal PWM standard (1 à 2 ms).



Servo-Moteur :

- **Fonction** : Contrôler l'angle des roues avant pour diriger la voiture.
- **Caractéristiques** : Fréquence 50 Hz, angle $\pm 90^\circ$, signal PWM standard.

Avantages :

- **Précision** : Contrôle fin de la vitesse et de la direction.
- **Réactivité** : Ajustements en temps réel basés sur les données des capteurs.
- **Compatibilité** : Facilement intégrables avec la carte MCXN947.

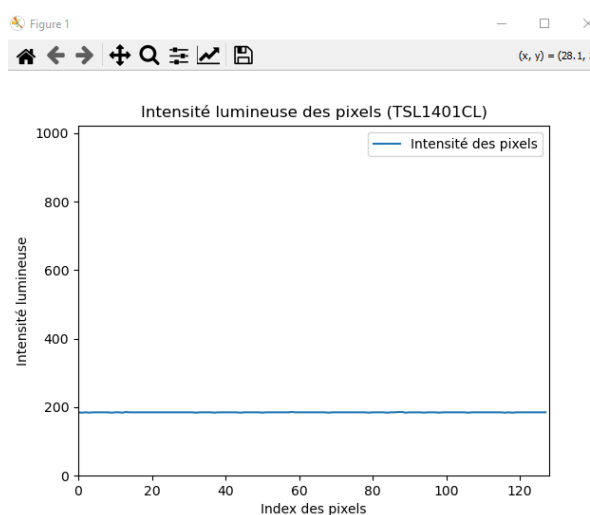
Les ESC régulent la vitesse des moteurs DC, tandis que le servo-moteur ajuste la direction de la voiture, permettant ainsi un suivi précis de la ligne détectée.

III - Traitement de la Ligne

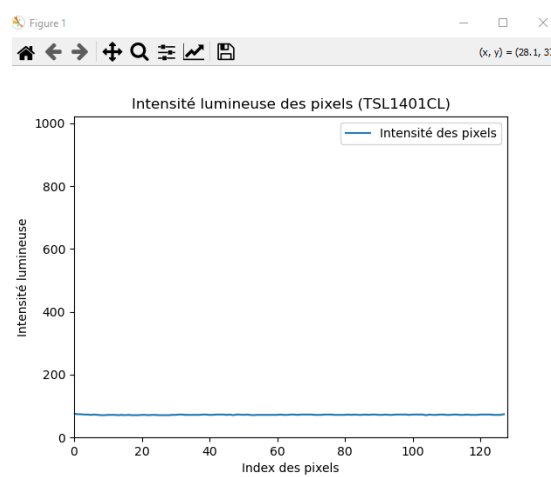
Le suivi précis de la ligne est essentiel pour la performance de la voiture autonome. Cette section décrit le processus de détection et de pilotage basé sur les données de la caméra linéaire.

3.1. Principe du Capteur Linéaire

Le TSL1401 génère un tableau de 128 valeurs représentant les intensités lumineuses détectées par chaque pixel. Les zones blanches renvoient des valeurs élevées, tandis que les zones noires donnent des valeurs faibles.



Zones Blanches



Zones Noires

3.2. Calcul de la Position de la Ligne

Après acquisition des données, un seuil de 150 est appliqué pour distinguer le blanc du noir. Les transitions entre les zones sombres et claires identifient les bords de la piste. Le centre de la piste est calculé comme la moyenne des indices des deux bords.

Exemple : Si les bords de la piste sont aux indices 40 et 88, le centre est à 64. Un décalage du centre détecté (par exemple, 70) indique un éloignement vers la droite, nécessitant une correction.

3.3. Pilotage Élémentaire (Erreur et Direction)

L'erreur est définie par la différence entre la position détectée de la ligne et le centre idéal (64).

$$\text{erreur} = \text{position_ligne} - 64$$

Erreur Positive : Tourner à gauche.

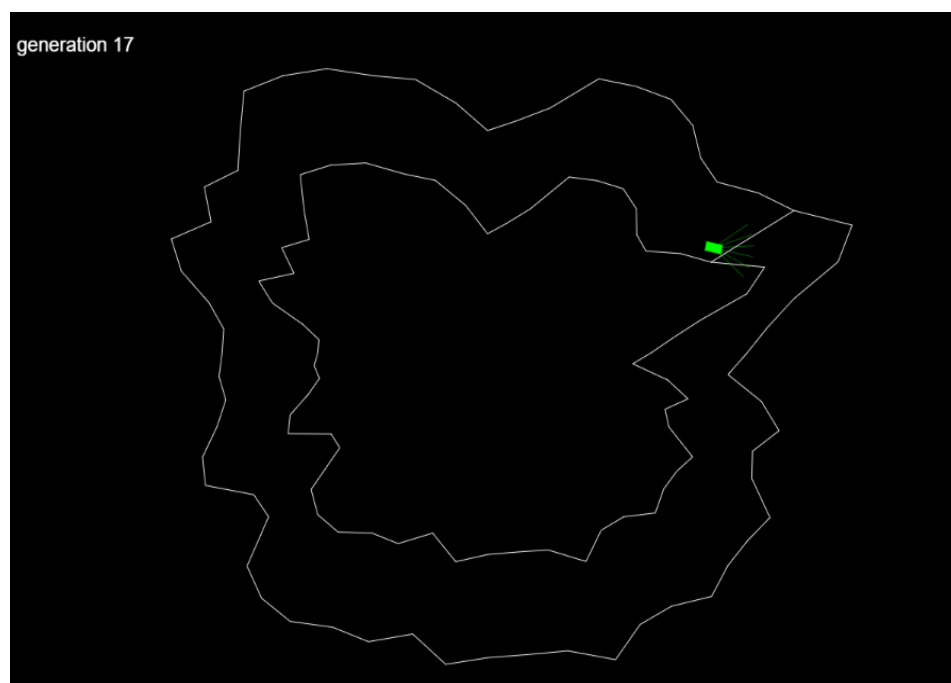
- **Erreur Négative** : Tourner à droite.
- **Erreur Nulle** : Maintenir la direction.

Un contrôleur proportionnel (P) ajuste le servo en fonction de l'erreur pour corriger la trajectoire.

IV - Approche IA : Modèle sans Données Étiquetées

L'intégration de l'IA vise à optimiser le pilotage en adaptant dynamiquement les commandes en fonction des conditions du circuit.

4.1. Concept Général



Le Reinforcement Learning (RL) permet à la voiture d'apprendre par essais et erreurs, recevant des récompenses pour un bon suivi de la piste sans nécessiter de données étiquetées.

4.2. Réseau de Neurones et Algorithme Génétique

Réseau de Neurones :

- **Entrée** : Données des capteurs (128 valeurs de la caméra, vitesse).
- **Sortie** : Commandes de direction et de vitesse.

Algorithme Génétique :

- **Processus** : Évolution d'une population de réseaux de neurones par sélection, croisement et mutation.
- **Objectif** : Optimiser les paramètres du réseau pour améliorer les performances.

4.3. Bénéfices pour la NXP Cup

- **Adaptation Rapide** : S'ajuste aux changements de tracé sans reprogrammation.
- **Robustesse** : Gère mieux les situations imprévues.
- **Innovation** : Utilisation d'une technique d'IA moderne offrant un avantage compétitif.
- **Optimisation continue** : Amélioration progressive des performances.

V - Méthodologie

Le développement de la voiture autonome a suivi une approche structurée en plusieurs étapes :

5.1. Conception et Intégration des Composants

Sélection : Choix des composants adaptés (MCXN947, TSL1401, ESC, servo).

Intégration Physique : Montage des composants sur la plateforme mobile avec un câblage optimisé.

Configuration : Programmation initiale de la carte MCXN947 pour gérer ADC et PWM, calibration des capteurs.

Pin	Pin name	Label	Identifiant	mikroBUS(TM)	LPCXpresso V3 (...)	GPIO	FLEXIO	LPFLEXCOMM	CTIMER	PWM	ADC
✓ A1	FC4_P0	P1_8/J9[32]	DEBUG_UART_RX			GPIO1:GPIO,8	FLEXIO0:TRG_C...	LP_FLEXCOMM...	CTIMER0:CAPTU...	PWM0:EXTA,0[...]	ADC0:TRG_CH,0...
✓ B1	FC4_P1	P1_9/J9[30]	DEBUG_UART_TX			GPIO1:GPIO,9	FLEXIO0:TRG_C...	LP_FLEXCOMM...	CTIMER0:CAPTU...	PWM0:EXTA,0[...]	ADC0:TRG_CH,0...
✓ D1	PIO1_13	P1_13/J9[27]				GPIO1:GPIO,13	FLEXIO0:TRG_C...	LP_FLEXCOMM...	CTIMER2:MATC...	PWM0:EXTA,0[...]	ADC0:TRG_CH,0...
✓ F1	PIO1_30	P1_30/XTAL/Y1[1]				GPIO1:GPIO,30	FLEXIO0:TRG_C...	LP_FLEXCOMM...	CTIMER0:CAPTU...	PWM0:EXTA,2[...]	ADC0:TRG_CH,0...
✓ P3	ADC0_A0	ADC0_A0/ARD_A...			J4[2] (A0)						ADC0_A,0

5.2. Développement Logiciel

Algorithmes de Traitement : Développement des routines de lecture et de traitement des données de la caméra.

Contrôle Moteur et Servo : Fonctions pour ajuster la vitesse et la direction en fonction des erreurs de position.

Intégration IA : Implémentation du réseau de neurones et de l'algorithme génétique pour l'optimisation.

5.3. Tests et Validation

Tests Unitaires : Validation individuelle des composants (caméra, moteurs, servo).

Tests d'Intégration : Vérification du fonctionnement global du système, ajustements des interférences et de la synchronisation.

Validation de l'IA : Évaluation de la performance du réseau de neurones et de l'algorithme génétique à travers des simulations et des tests sur le terrain.

VI - Résultats et Analyse

6.1. Fonctionnement Individuel des Composants

- **MCXN947** : La carte dispose d'une bonne puissance de traitement, même si sa documentation reste incomplète. Toutefois, l'absence de tension sur le pin ADC0, malgré son activation logicielle, a empêché la caméra de fonctionner sur cette plateforme, ce qui nous a bloqués pour l'intégration globale.
- **TSL1401** : Sur d'autres configurations (par exemple la carte FRDM K22F d'un autre groupe), le capteur s'est avéré efficace pour détecter la ligne. Cela confirme qu'il fonctionne bien, mais il n'a pas pu être exploité sur la MCXN947 dans notre projet.
- **ESC et Servo** : Après un certain temps de calibration, ces dispositifs offrent un contrôle précis de la vitesse et de l'angle de braquage. Testés de façon isolée, ils répondaient correctement aux commandes PWM.

6.2. Tentatives d'Intégration Globale

Étant donné le problème sur le pin ADC0, je n'ai pas pu relier la caméra TSL1401 à la MCXN947 pour des essais complets. J'ai donc dû me limiter à des tests partiels :

- **Interférences Électriques** : Les moteurs génèrent toujours des perturbations, mais, faute de la caméra pleinement fonctionnelle sur la carte MCXN947, je n'ai pas pu valider la résistance du système de détection à ce bruit.
- **Synchronisation des Données** : En l'absence des données caméra sur cette carte, la question de la synchro en temps réel s'est posée mais n'a pas pu être approfondie.

- **Gestion de la Latence** : L'optimisation logicielle prévue pour diminuer les délais de calcul n'a pas vraiment pu être testée en conditions réelles, faute de signaux caméra exploitables.

Solutions Possibles à l'Avenir

- **Diagnostic Matériel et Logiciel** : Il serait nécessaire de résoudre le souci du pin ADC0 (ou d'utiliser un autre canal ADC) afin de permettre la lecture des signaux de la TSL1401 sur la MCXN947.
- **Isolation Électrique** : Même sans les tests finaux, l'ajout de filtres et de circuits de protection reste pertinent pour protéger le système.
- **Tests Progressifs** : Reprendre l'intégration étape par étape, en validant chaque brique dès que le problème ADC sera réglé.

6.3. Évaluation des Performances

Faute de pouvoir raccorder la TSL1401 à la MCXN947, les performances finales en suivi de ligne n'ont pas été évaluées sur ce montage précis. Cependant, quelques observations peuvent être faites :

- **Précision du Suivi (sur d'autres plateformes)** : Sur la FRDM K22F, la TSL1401 s'est montrée tout à fait efficace, indiquant qu'en théorie, la précision pourrait être similaire sur la MCXN947 une fois le problème ADC résolu.
- **Réactivité de la Direction** : Les tests réalisés (en utilisant le servo et l'ESC) démontrent une bonne réactivité si le signal est correctement traité, bien que la performance à haute vitesse reste à valider en conditions réelles.
- **Stabilité de l'IA (hypothétique)** : S'il avait été possible de faire communiquer la caméra et la carte, l'algorithme d'apprentissage par renforcement aurait pu être testé. À ce stade, on ignore encore la réactivité et la stabilité réelles d'un tel système sur la MCXN947.

Analyse Générale :

Sur le papier, chaque composant (carte, caméra, ESC, IA) présente un potentiel intéressant. Néanmoins, l'impossibilité de faire fonctionner la TSL1401 avec la MCXN947 a empêché les tests d'intégration complète. Le système reste donc à valider en situation réelle une fois le souci ADC résolu ou contourné.

VII - Difficultés Rencontrées

1. Documentation Limitée sur la Carte MCXN947

- **Problème** : Difficile de comprendre pourquoi le pin ADC0 ne renvoyait aucune tension, faute de ressources claires.
- **Solution Envisagée** : Continuer à creuser dans les forums, vérifier le hardware (résistances de pull-up/down, configuration interne du microcontrôleur).

2. Problèmes sur la Lecture de la Caméra

- **Problème** : La TSL1401 ne récupérait aucun signal ADC, malgré le même code qui fonctionnait ailleurs (FRDM K22F).
- **Solution** : Tester d'autres canaux ADC, remplacer la carte, ou envisager un module intermédiaire pour la conversion.

3. Calibration des ESC

- **Problème** : Les interférences électriques ont rallongé la mise au point.
- **Solution** : Utilisation de filtres (condensateurs, ferrites) et optimisation des câbles de liaison.

4. Retard de Livraison

- **Problème** : Le matériel (nouvelle carte, caméra) est arrivé tard, réduisant le temps disponible pour des tests avancés.
- **Solution** : Ajustement du planning et priorisation des tâches urgentes.

5. Gestion des Interférences Électriques

- **Problème** : Perturbations des signaux logiques par les moteurs DC, qui impactent souvent l'ADC.
- **Solution** : Blindage, câblage soigné, filtres, et séparation des alimentations si possible.

6. Optimisation de l'IA

- **Problème** : Sans données issues de la caméra sur la MCXN947, l'algorithme d'apprentissage par renforcement n'a pas pu être testé concrètement.
- **Solution** : Récupérer des données réelles une fois la question ADC résolue et effectuer plusieurs cycles d'entraînement.

Leçons Apprises :

- L'importance de bien vérifier la compatibilité matérielle avant de se lancer dans des configurations complexes.
- La nécessité de documentations techniques claires pour gagner du temps et limiter les blocages.
- Même un composant validé (la TSL1401) peut rencontrer des problèmes inattendus selon la carte ou le pin choisi.

VIII - Conclusion

Dans l'état actuel, ce projet visait à concevoir une voiture autonome pour la compétition NXP Cup, en utilisant la carte MCXN947, la caméra TSL1401, et un module d'IA basé sur le Reinforcement Learning. Toutefois, un problème matériel sur le pin ADC0 de la MCXN947 a empêché la caméra de fonctionner sur cette carte, rendant impossible l'intégration finale de tous les éléments.

Réussites Partielles :

- **Validation Isolée des Composants** : La TSL1401 fonctionne sur d'autres cartes (FRDM K22F), et la MCXN947 montre une capacité de calcul suffisante pour des tâches complexes.
- **Bon Contrôle Moteur** : Les ESC et le servo, une fois calibrés, répondent efficacement aux signaux de commande.

Limitations Majeures :

- **Intégration Non Aboutie** : L'absence de signaux caméra a bloqué la mise au point du suivi de ligne et l'entraînement de l'IA sur la MCXN947.
- **Pas de Validation Globale** : Impossible de confirmer la réactivité et la précision à haute vitesse sans données réelles de la TSL1401.

Malgré cette contrainte, le potentiel du projet reste évident, et des solutions existent pour résoudre le problème ADC. Une fois ce dernier levé, la suite logique serait de finaliser l'intégration, d'optimiser les algorithmes, et d'exploiter pleinement l'IA pour la compétition.

IX - Annexes

9.1. Effet Hall et Mesure de la Vitesse

L'effet Hall est utilisé pour mesurer la vitesse de rotation des roues du véhicule autonome, fournissant des informations cruciales pour l'algorithme d'IA.

Principe : Dans un matériau conducteur traversé par un courant, un champ magnétique perpendiculaire dévie les électrons, créant une tension de Hall proportionnelle à l'intensité du champ et à la vitesse de rotation.

Capteurs Bipolaires (ex. SS41F) : Commutent leur sortie en présence d'un champ magnétique, agissant comme des interrupteurs numériques (HIGH/LOW).

Application : Un aimant placé sur une roue génère des impulsions chaque fois qu'il passe devant le capteur Hall. En comptant ces impulsions sur un intervalle de temps, la vitesse de rotation et donc la vitesse du véhicule peuvent être calculées.

Utilisation dans le Pilotage : La vitesse mesurée est intégrée dans l'algorithme d'IA pour ajuster dynamiquement la vitesse et assurer une conduite stable et optimisée.

X - Bibliographie

1. **NXP Semiconductors.** (2023). MCXN947 User Manual. Disponible sur : <https://www.nxp.com/document/guide/getting-started-with-frdm-mcxn947:GS-FRDM-MCXNXX>.
2. **Texas Instruments.** (2022). TSL1401 Linear CCD Sensor Datasheet.
3. **Arduino Documentation.** (2021). Electronic Speed Controllers (ESC). Disponible sur : <https://forum.arduino.cc/t/esc-electronic-speed-control-brushless-motor/84442>.
4. **Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A.** (2016). Deep Learning. Disponible sur: <https://www.deeplearningbook.org/>.
5. **Sutton, R. S., & Barto, A. G.** (2018). Reinforcement Learning: An Introduction. MIT Press. Disponible sur: [https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=uWV0DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Sutton,+R.+S.,+%26+Barto,+A.+G.+\(2018\).+Reinforcement+Learning:+An+Introduction.+MIT+Press&ots=mjqLt-W0m6&sig=wCx-VyGvQnR8v1YR_JEQ6b2pEWI#v=onepage&q=Sutton%2C%20R.%20S.%2C%20%26%20Barto%2C%20A.%20G.%20\(2018\).%20Reinforcement%20Learning%3A%20An%20Introduction.%20MIT%20Press&f=false](https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=uWV0DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Sutton,+R.+S.,+%26+Barto,+A.+G.+(2018).+Reinforcement+Learning:+An+Introduction.+MIT+Press&ots=mjqLt-W0m6&sig=wCx-VyGvQnR8v1YR_JEQ6b2pEWI#v=onepage&q=Sutton%2C%20R.%20S.%2C%20%26%20Barto%2C%20A.%20G.%20(2018).%20Reinforcement%20Learning%3A%20An%20Introduction.%20MIT%20Press&f=false).
6. **Franklin, G., Powell, J., & Emami-Naeini, A.** (2014). Feedback Control of Dynamic Systems. Pearson. Disponible sur: <https://miamagazine.com/sample/SciencePhysics/SCPH100-200/SCPH797/sample-Feedback%20Control%20of%20Dynamic%20Systems%207th%20E%20Gene%20Franklin.pdf>.
7. **OpenAI.** (2020). Reinforcement Learning Algorithms Overview.
8. **Electronics Tutorials.** (2021). Understanding the Hall Effect.
9. **MCUXpresso IDE Documentation.** (2023). MCUXpresso IDE User Guide. Disponible sur : https://community.nxp.com/pwmxy87654/attachments/pwmxy87654/mcuxpresso/5269/1/MCUXpresso_IDE_User_Guide.pdf.
10. **Pixy Cam Documentation.** (2022). Pixy2 Camera Developer Guide. Disponible sur : <https://docs.pixycam.com/wiki/doku.php?id=wiki:v2:start>.