

Barrières de Vitesse

Système intelligent de mesure de performance sportive

ESP32-C6

NRF24L01

VL53L0X

Supabase

Streamlit

Random Forest

Aïssata BA · Ulrich KEKO · Mohamed SANON

GEN37524 — Conception mécatronique | Nouredine BARKA, Ing.

Université du Québec à Rimouski · Département des sciences de la santé · Avril 2026

Résumé du projet

Un système mécatronique complet — entièrement conçu, réalisé et validé

5 barrières électroniques autonomes mesurent en temps réel la vitesse, et le temps de réaction d'un athlète sur une distance choisie. Les données sont stockées dans le cloud (Supabase) et analysées par un modèle d'IA (Random Forest) via une interface Streamlit.

< 1 ms

Précision
temporelle

> 5 h

Autonomie
batterie

630 \$

Coût total
des composants

- Prototype entièrement assemblé, programmé, testé et livré au client (UQAR — CGC0671)
- Architecture matérielle : ESP32-C6 Mini · VL53L0X (ToF) · NRF24L01 · RFID MFRC522
- Pipeline cloud : ESP32 → Supabase (PostgreSQL) → Streamlit → Classification IA Random Forest
- Boîtier nylon impression 3D avec couvercle incliné à 30° et fenêtre PMMA 3 mm

Contexte & Problématique

Pourquoi concevoir ce système ?

Problèmes des méthodes actuelles

Erreur humaine

Chronomètre manuel → données imprécises et non reproductibles

Pas de synchronisation

Résultats incohérents entre les segments de course

Équipement lourd

Systèmes commerciaux non portables, installation longue

Coût prohibitif

3 000 \$ – 15 000 \$ pour les solutions commerciales équivalentes

Aucune analyse auto

Analyse difficile et lente

Notre solution

Précision < 1 ms

Méthode avec des compteurs dans le code, capteurs ToF laser VL53L0X

Sans fil & autonome

NRF24L01 2,4 GHz · batterie 4S1P · autonomie > 5 h

Portable — 5 modules

Boîtier nylon léger < 500 g · tripied réglable

630 \$ de matériel

5 à 25× moins qu'un système commercial équivalent

Analyse IA automatique

Random Forest · Élite / Bon / À améliorer en temps réel

Architecture globale du système

Pipeline de données — de la détection physique à l'analyse IA



ESP32-C6 → JSON / Wi-Fi → Supabase (cloud) → API REST → Streamlit + Random Forest

Module / Élément	Barrière principale	Barrières secondaires (×4)
Microcontrôleur	ESP32-C6 N4 Mini	ESP32-C6 N4 Mini
Communication radio	NRF24L01 (2,4 GHz)	NRF24L01 (2,4 GHz)
Capteur de passage	VL53L0X ToF (I2C)	VL53L0X ToF (I2C)
Identification	RFID MFRC522 (SPI)	—
Afficheur	OLED M154 / TFT 1.77"	OLED M154
Boutons / Buzzer	5 boutons + buzzer	1 bouton
Batterie	USE-18500-4S1P + BMS	USE-18500-4S1P + BMS

Composants électroniques

Sélection après comparaisons multicritères et essais expérimentaux



ESP32-C6 N4 Mini

Microcontrôleur principal

160 MHz · Wi-Fi 802.11 b/g/n
4 MB flash · 512 KB RAM
Stable multi-modules — aucun blocage



NRF24L01

Communication radio 2,4 GHz

Portée 100 m · < 1 ms latence
Taux de perte < 8 % à 30 m
Retransmission automatique



VL53L0X (ToF)

Capteur de détection

Laser · cycle 8 ms
Portée 2 m



RFID MFRC522

Identification athlètes

13,56 MHz · portée 2,5–4 cm
0 erreur / 200 lectures validées
UID unique par badge



Écran OLED M154

Affichage local

128×64 px · interface I2C
~20 mA · contraste élevé
Lisible en intérieur et extérieur

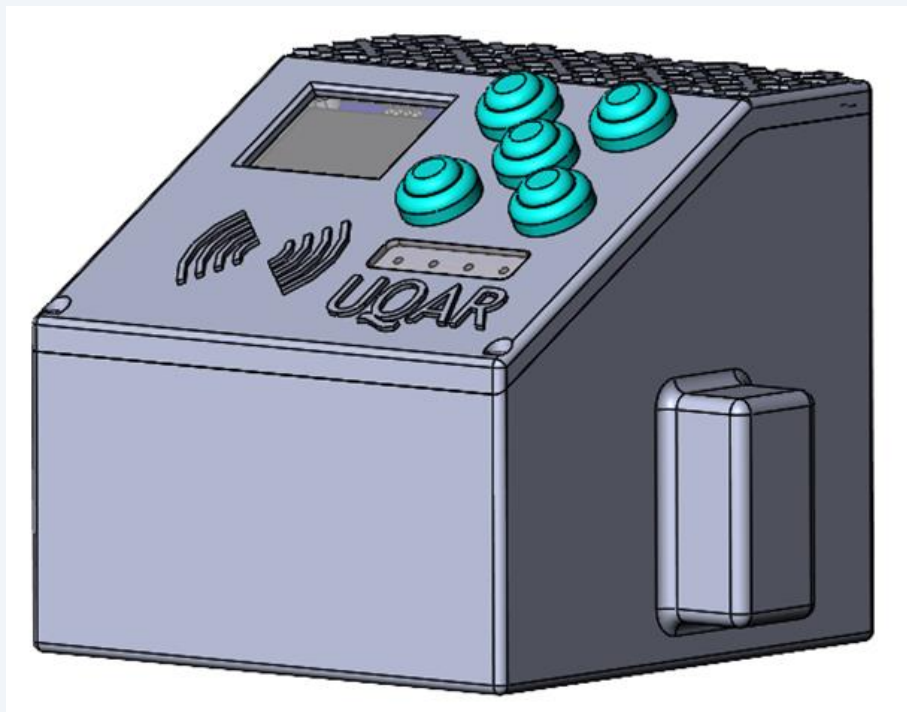


Batterie 4S1P

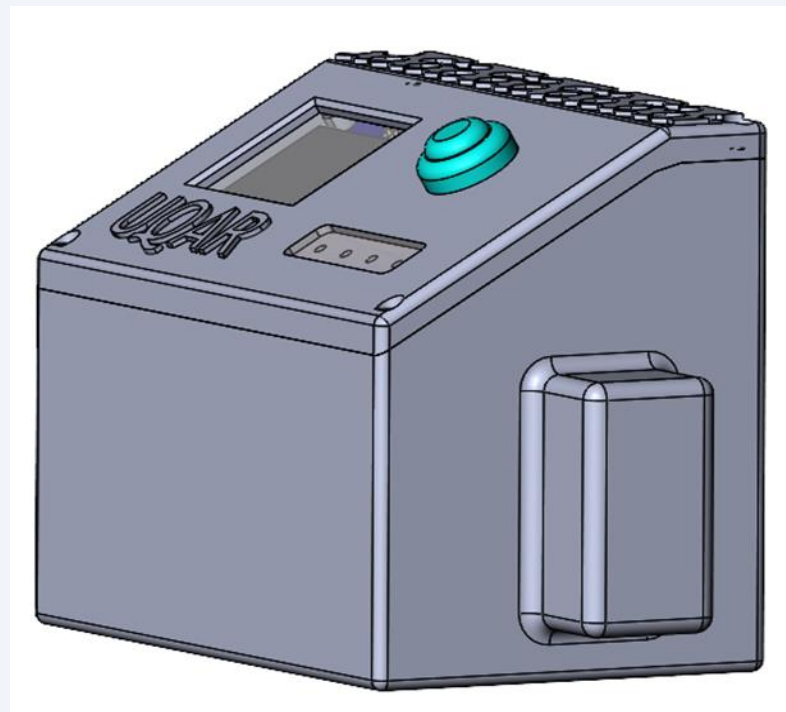
Alimentation autonome

14,8 V · 1900 mAh · BMS intégré
Autonomie > 5 h validée en test
Recharge USB-C

Conception mécanique



Boîtier barrière principale



Boîtier barrière secondaire

Conception mécanique

Boîtier nylon 3D · couvercle incliné 30° · fenêtre PMMA 3 mm

Boîtier — nylon impression 3D

Résistance aux chocs · stabilité thermique -10 à +80 °C · matériau non métallique (transparent aux ondes RF et IR) · léger < 500 g · Compatible FDM et SLS.

Innovation — couvercle incliné 30°

Confort visuel debout amélioré · réduction des reflets soleil · protection IP65 maintenue (double couvercle) · drainage naturel de la pluie.

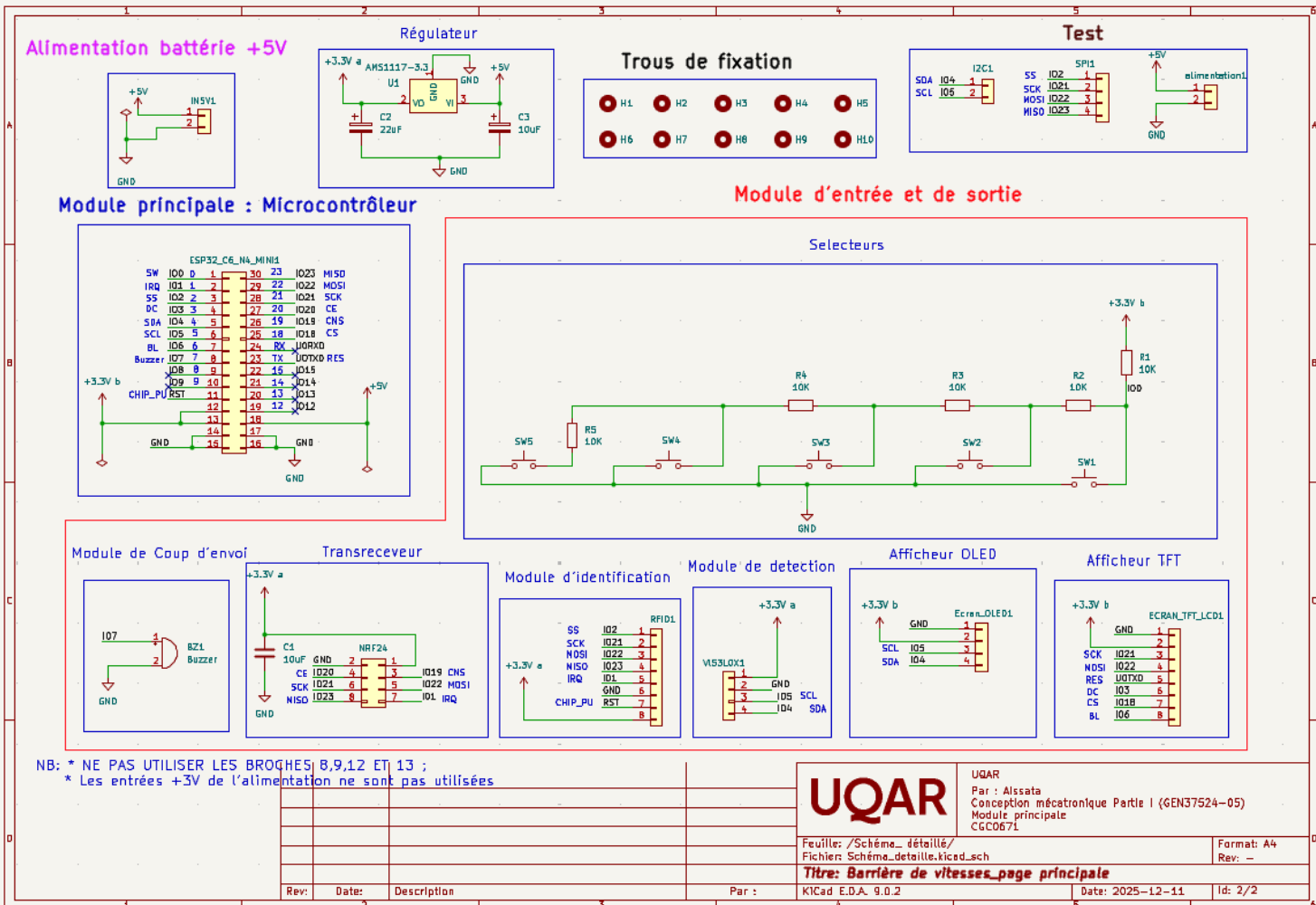
Fenêtre optique — PMMA 3 mm

Transparence quasi totale à 940 nm (VL53L0X) et 2,4 GHz (NRF24L01). Optimum entre 2 et 4 mm. Découpe laser précise, isolation électrique efficace.

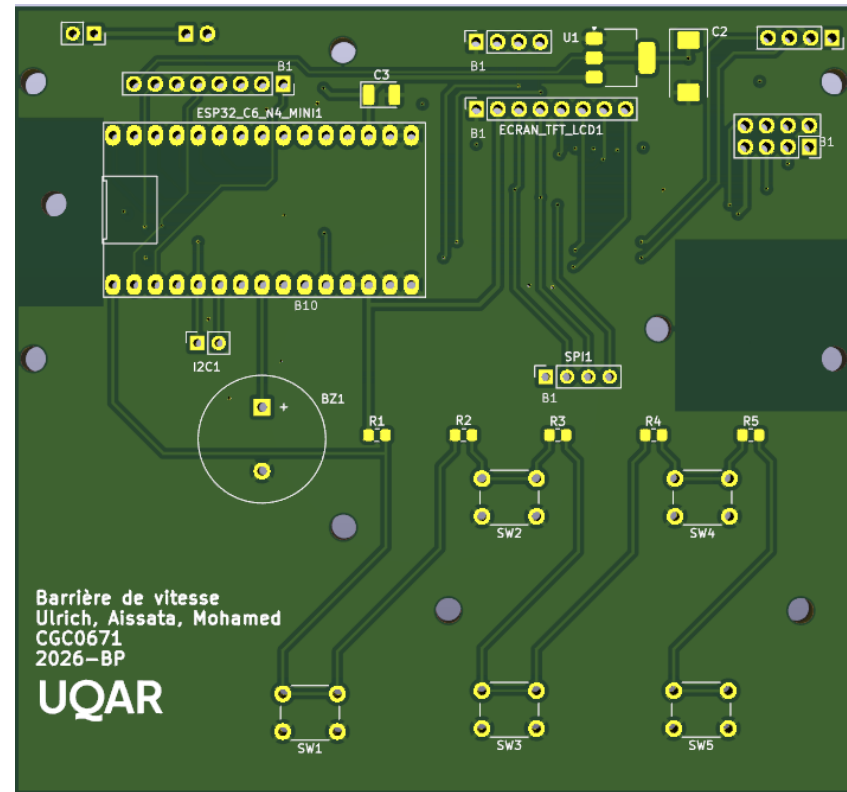
Spécifications dimensionnelles

Paramètre	Barrière principale	Barr. secondaires
Dimensions (mm)	119,5 × 92 × 111,5	123,5 × 95 × 78,6
Taille PCB (mm)	103 × 68	100 × 48
Inclinaison couvercle	30°	30°
Matériau boîtier	Nylon 3D	Nylon 3D
Fenêtre capteur	PMMA 3 mm	PMMA 3 mm
Protection IP	IP65	IP65
Fixation PCB	Vis M3 × 4 entretoises	Vis M3 × 4 entretoises
Masse estimée	< 500 g	< 350 g
Support terrain	Trépied standard	Trépied standard

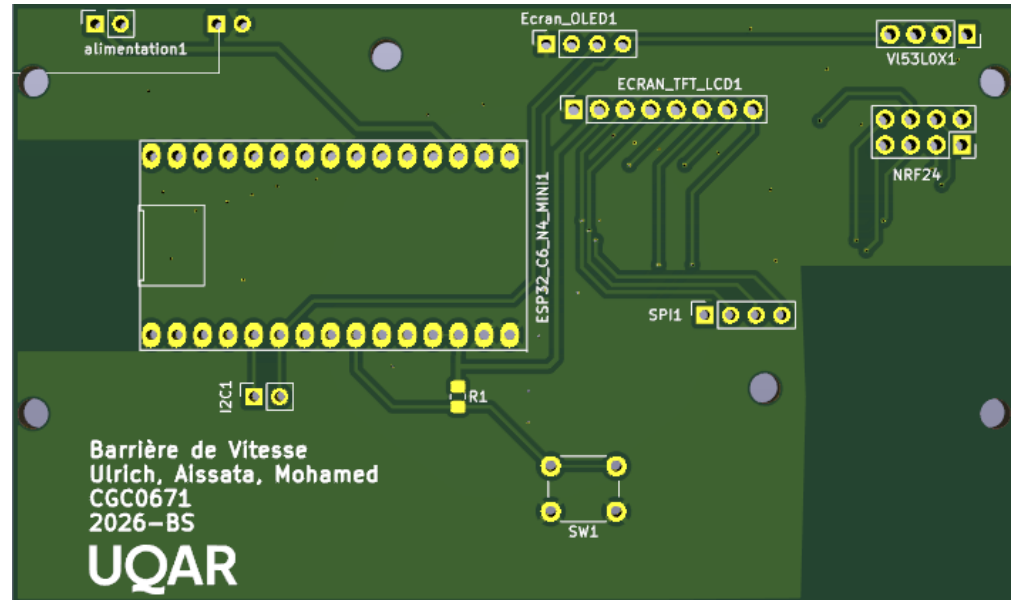
Architecture électrique de la barrière principale



PCB



PCB de la barrière principale



PCB d'une barrière secondaire

Base de données & Intelligence Artificielle

Supabase · Streamlit · Random Forest — classification automatique

1

Acquisition ESP32

JSON via Wi-Fi → Supabase. Délai total acquisition → affichage < 5 s. Refresh interface 0,5 s.

2

Supabase PostgreSQL

Stockage cloud structuré. Traçabilité par RFID. API REST auto. Temps réel WebSocket.

3

Dashboard Streamlit

Graphiques de vitesse · heatmap · tableau des essais · export CSV et PDF.

4

IA Random Forest

Entraîné sur l'historique Supabase. Classifie chaque essai : Élite / Bon / À améliorer.

Score de performance composite

$$\text{Score} = 0,4 \times (1 / \text{Tr}) + 0,6 \times \text{Vmax}$$

Classification automatique par quantiles (Q1 = 33 % · Q2 = 66 %)



Élite

Vmax : ≥ Q2 (très élevée)

Tr : ≤ Q1 (très court)

Performant sur toutes les dimensions



Bon

Vmax : Intermédiaire

Tr : Intermédiaire

Bon niveau global, en progression



À améliorer

Vmax : < Q2 (faible)

Tr : > Q1 (élevé)

Cibler les points de faiblesse



À vérifier

Vmax : Incohérentes

Tr : Données manquantes

Essai invalide — re-collecter

Budget & Planification

Estimation des coûts — composants et ressources humaines

Composants & matériaux		
Composant	Qté	Total
NRF24L01 (module radio 2,4 GHz)	5	15,95 \$
Ecran OLED M154_4P (1.54")	5	43,60 \$
Buzzer piézoélectrique	5	5,25 \$
Capteur VL53L0X (Time-of-Flight)	5	19,56 \$
BMS 18650	6	98,10 \$
Batteries USE-186540	12	269,52 \$
ESP32-C6 N4 Mini	5	35,60 \$
Bouton	10	7,92 \$
Interrupteur glissière	6	72,60 \$
TOTAL COMPOSANTS		630 \$

5 à 24x moins qu'un système commercial équivalent (3 000 – 15 000 \$)

Ressources humaines (coûts en nature)		
Activité	Heures	Total
Assemblage mécanique	10 h · 30 \$/h	300 \$
Câblage électrique	20 h · 30 \$/h	600 \$
Programmation (firmware)	150 h · 30 \$/h	4500 \$
Intégration système	100 h · 30 \$/h	3000 \$
Tests et validation terrain	20 h · 30 \$/h	600 \$
Encadrement professeur	64 h · 45 \$/h	2880 \$
Support technicien labo	5 h · 45 \$/h	225 \$
TOTAL RH (102 h)		12 105 \$
TOTAL GÉNÉRAL DU PROJET		12 735,00 \$

Validation expérimentale & Résultats

Prototype entièrement testé et validé en conditions réelles d'utilisation



Précision < 1 ms

Méthode cinq temps validée. Erreur distance < 0,3 % (3 cm/10 m mesuré).



Communication fiable

< 5 % perte en espace ouvert à 30 m. Retransmission automatique opérationnelle.



RFID : 0 erreur

200 lectures consécutives validées. Plage stable entre 2,5 et 4 cm confirmée.



IA Random Forest validée

Précision satisfaisante. Matrice de confusion validée sur jeu de test réel.



Autonomie > 5 heures

Mesurée en conditions réelles, toutes barrières actives en continu simultanément.



Zéro faux positif

VL53L0X : aucun faux déclenchement observé sur l'ensemble des essais terrain.



Streamlit < 3,2 s

Délai acquisition → affichage complet mesuré. Rafraîchissement toutes 0,5 s.



Conclusion

Le projet est entièrement terminé. Prototype assemblé, validé en conditions réelles et remis au client (UQAR — CGC0671, avril 2025).

Architecture matérielle

ESP32-C6 · VL53L0X · NRF24L01 · RFID MFRC522
Validée en multi-modules — aucun blocage

Pipeline cloud complet

ESP32 → Supabase → Streamlit
Délai < 3,2 s validé en conditions réelles

Mécanique optimisée

Nylon 3D · couvercle 30° · PMMA 3 mm
IP65 · < 500 g · trépied réglable

IA Random Forest

Élite / Bon / À améliorer
Précision validée · matrice de confusion

RTT méthode 5 temps

< 1 ms de précision · erreur < 0,3 %
0 faux positif sur tous les essais terrain

Impact économique

606,90 \$ en composants
5 à 25× moins cher qu'une solution commerciale

630,00\$ de composants · 102 h de travail · 5 barrières fonctionnelles · Projet livré avril 2026 · UQAR CGC0671