

Synthèse technique

Détection de franchissement de pylône – Pylon Racing RC

1. Contexte et objectif

Les courses de **Pylon Racing RC** mettent en jeu des avions de grande taille (≈ 3 m, moteurs 75 cc) évoluant à très haute vitesse (jusqu'à 200 km/h), avec des trajectoires très variables :

- passages à 0,5 m comme à 10 m du pylône,
- avion à plat ou sur la tranche.

Objectif du système :

Déterminer de façon fiable et reproductible si un avion a franchi le pylône **par l'extérieur ou par l'intérieur**, afin de :

- compter les tours,
- appliquer une pénalité éventuelle.

Il ne s'agit **pas** de faire du tracking continu ni de la localisation fine, mais de détecter un **événement de passage**.

2. Contraintes clés

Dynamiques

- Vitesse max : ≈ 200 km/h (≈ 55 m/s)
- Temps de passage au pylône : 100 à 300 ms
- Jusqu'à 4 avions simultanés

Géométriques

- Distance au pylône très variable (0,5 m à 10 m)
- Orientation imprévisible (avion sur la tranche)
- Pylônes en gouttière **PVC** (non métalliques)

Terrain

- Installation temporaire
 - Fiabilité > précision théorique
 - Décision explicable en cas de contestation
 - Juges situés à ~25 m du pylône
-

3. Approches écartées

RSSI / puissance reçue (Wi-Fi, ESP-NOW, LoRa...)

- Dépend fortement de l'orientation
- Très sensible au multipath (sol, environnement)
- Non déterministe
- Peu défendable en arbitrage

Vision (caméra)

- Dépendante de la lumière et de la météo
 - Complexité de calibration
 - Non retenue par choix de projet
-

4. Principe retenu

Utiliser une **mesure temporelle** (temps d'arrivée radio), et non une mesure de puissance.

Technologie retenue : **UWB (Ultra Wide Band)**

Utilisée comme **capteur de franchissement**, pas comme un GPS.

5. Architecture générale

5.1 Avions (Tags)

- 1 module par avion
- ESP32 + module UWB (DW1000 ou DW3000)
- Alimentation dédiée (LiPo)
- Poids cible < 15 g

Fonction :

- Émission périodique de trames UWB (« blinks »)
 - Fréquence cible : 20 à 40 Hz
 - Trame : ID avion + compteur + CRC
 - Aucun dialogue radio
-

5.2 Pylône (Ancres)

- 3 ancres UWB minimum (4 recommandé)
- Disposées autour du pylône (triangle), à différentes hauteurs
- Chaque ancre : UWB + microcontrôleur (ESP32)

Fonction :

- Réception des blinks
 - Horodatage précis **au niveau matériel**
 - Envoi des timestamps vers la base
-

5.3 Lien pylône → juges

- Distance : ≈ 25 m
- Support : **RJ45**
- Données : **RS485**
- Alimentation : **pseudo-PoE** (12 V ou 24 V injecté sur RJ45)

Avantages :

- Un seul câble
 - Très robuste au bruit
 - Pas de radio supplémentaire
 - Pas de 230 V sur le terrain
-

5.4 Base juges (Raspberry Pi)

Rôle du Raspberry Pi :

- Collecte des données des ancres
- Alignement temporel
- Calcul géométrique
- Décision intérieur / extérieur
- Logs (CSV / JSON)
- Affichage temps réel (tours, pénalités)

Le Pi **ne fait pas l'horodatage RF**.
Les timestamps sont produits dans les ancrés.

6. Logique de décision

- Définition d'un **plan vertical** représentant le pylône
- Calcul du côté (intérieur / extérieur) à chaque blink

Règle anti-contestation

- Zone morte configurable (ex : ± 1 m)
- Pénalité uniquement si :
 - ≥ 3 blinks consécutifs côté intérieur
 - marge suffisante
- Sinon : passage validé ou « no call »

Objectif : robustesse sportive avant précision absolue.

7. Fréquence et dynamique

À 200 km/h (≈ 55 m/s) :

- 20 Hz \rightarrow 2,75 m entre mesures
- 40 Hz \rightarrow 1,4 m

Sur une zone de contrôle ± 5 m :

- 4 à 8 mesures exploitables
 - Suffisant pour une décision fiable
-

8. Alimentation

Choix retenu

- Pseudo-PoE sur RJ45
- Tension recommandée : **24 V**
- Conversion locale vers 5 V au pylône

Avantages :

- Sécurité

- Simplicité
 - Robustesse terrain
-

9. Démarche projet

- Deux concepts testés en parallèle
 - Validation par essais terrain réels
 - Décision finale basée sur :
 - stabilité des résultats
 - taux d'ambiguïté
 - acceptation par les pilotes
-

10. Conclusion

L'architecture **ESP32 + UWB + collecte filaire + Raspberry Pi** permet :

- une décision basée sur le temps, pas la puissance,
- une robustesse compatible avec 200 km/h,
- des logs exploitables en cas de litige,
- une mise en œuvre réaliste sur terrain d'aéromodélisme.

La pertinence finale sera tranchée par les **tests**, pas par les hypothèses

11. Liste de matériel

Cette section détaille le matériel nécessaire pour une installation complète avec **2 pylônes** et **4 avions**.

11.1 Tags embarqués (avions)

Par tag (x4 minimum, 5-6 recommandés pour spare) :

Composant	Référence suggérée	Prix unitaire	Quantit é	Total
-----------	--------------------	------------------	--------------	-------

Module UWB	DWM3000 (Qorvo) ou DWM1000	20-30€	4-6	80-180 €
Microcontrôleur	ESP32-C3 Mini / ESP32-PICO-D4	3-5€	4-6	12-30€
Batterie LiPo	1S 150-250mAh (type 25C)	5-8€	4-6	20-48€
PCB custom	Fabrication 5 pcs mini (JLCPCB/PCBWay)	15-25€	1 lot	15-25€
Connectique/boîtier	JST-PH 2.0, gaine thermorétractable	10€	1 lot	10€

Sous-total tags : 137-293€

11.2 Ancres UWB (pylônes)

Par ancre (x8 : 4 ancres × 2 pylônes) :

Composant	Référence suggérée	Prix unitaire	Quantité	Total
Module UWB	DWM3000 ou DWM1000	20-30€	8	160-240 €
Microcontrôleur	ESP32 DevKit C ou WROOM-32	5-8€	8	40-64€
Module RS485	MAX485 / MAX3485 breakout	2-4€	8	16-32€

Convertisseur DC-DC	LM2596 24V→5V (3A)	2-3€	8	16-24€
Boîtier étanche	IP65 ABS 100x68x50mm	5-8€	8	40-64€
Connectique RJ45	Embase RJ45 étanche + câble	3-5€	8	24-40€
Support mécanique	Colliers, platines alu, visserie	15€	2 lots	30€

Sous-total ancrage : 326-494€

11.3 Liaison RS485 (pylône → base)

Par liaison (x2 pylônes) :

Composant	Référence suggérée	Prix unitaire	Quantité	Total
Câble RJ45 extérieur	Cat5e/Cat6 FTP - 30m	15-25€	2	30-50€
Injecteur PoE custom	Adaptateur RJ45 + borniers 24V	5-8€	2	10-16€
Module RS485 (côté Pi)	USB vers RS485 (FTDI/CH340)	8-12€	2	16-24€

Sous-total liaison : 56-90€

11.4 Base juges (Raspberry Pi)

Composant	Référence suggérée	Prix unitaire	Quantité	Total
Raspberry Pi	Pi 4 Model B 4GB ou Pi 5	60-80€	1	60-80€
Carte SD	32GB Class 10 (SanDisk/Samsung)	10-15€	1	10-15€
Alimentation Pi	USB-C 5V 3A officielle	10-12€	1	10-12€
Boîtier Pi	Boîtier avec ventilation	10-15€	1	10-15€

Sous-total base : 90-122€

Note : L'affichage se fera sur un écran standard 220V fourni par le site de course.

11.5 Outillage et consommables

Élément	Estimation
Fer à souder + étain + flux	30-50€
Multimètre	20-30€
Pince à sertir RJ45	15-25€
Mètre ruban / télémètre laser	20-40€
Visserie, colliers, gaine thermo	30€

Câbles dupont, breadboards 20€
test

Sous-total outillage : 135-195€

11.6 Récapitulatif budgétaire

Poste	Fourchette basse	Fourchette haute
Tags embarqués (4-6 avions)	137€	293€
Ancres UWB (8 unités)	326€	494€
Liaison RS485	56€	90€
Base Raspberry Pi	90€	122€
Outillage et consommables	135€	195€
TOTAL MATÉRIEL	744€	1 194€

11.7 Notes complémentaires

Options d'optimisation :

- Les modules **DWM1000** sont moins chers mais moins performants que les **DWM3000** (portée, consommation).
- Prévoir 1-2 tags et ancres de spare pour incidents terrain.

Fournisseurs recommandés :

- **Modules UWB** : Makerfabs, Seeed Studio, Mouser
- **ESP32** : AliExpress (ESP32-C3), Amazon (DevKit)
- **Câblage/connectique** : RS Components, Farnell, Amazon
- **PCB custom** : JLCPCB, PCBWay, Aisler

Budget prévisionnel réaliste : **900-1 000€** pour une installation complète et fonctionnelle.

Alimentation terrain : Le système nécessite une alimentation 24V pour les pylônes (via pseudo-PoE) et 230V pour la base juges (Raspberry Pi + écran). Les batteries et chargeurs seront fournis par le site de course selon leurs moyens existants.

Points d'attention et réponses techniques

Cette section répond aux questions clés soulevées concernant la synchronisation temporelle, la géométrie des ancrs et la gestion de plusieurs avions simultanés.

1. Synchronisation temporelle entre ancrs

Problématique

Dans une architecture UWB de type TDoA (Time Difference of Arrival), les ancrs doivent partager une référence temporelle commune afin que les timestamps puissent être comparés. Chaque ancre dispose de sa propre horloge, sujette à une dérive (clock drift) sur la durée d'une manche.

Principe retenu

L'objectif n'est pas d'obtenir une synchronisation absolue au nanoseconde près, mais une cohérence temporelle suffisante sur quelques centaines de millisecondes, durée du passage d'un avion au pylône.

Solution proposée : synchronisation maître / esclaves

- Une ancre est définie comme **maître temporel**.
- Les autres ancrs fonctionnent en **esclaves**.
- Le maître émet périodiquement un événement de synchronisation (trame dédiée ou impulsion).
- Chaque esclave mesure l'écart entre son horloge locale et la référence, puis applique une correction d'offset et de dérive.

Ce mécanisme peut être implémenté :

- soit via une ligne dédiée dans le câble RJ45,

- soit via le bus de communication (RS485) à intervalle régulier (par exemple toutes les 500 ms à 1 s).

Un modèle simple du type $t_{\text{corrigé}} = a \times t_{\text{local}} + b$ est suffisant à l'échelle d'une course.

Alternative possible

Utiliser un **tag UWB fixe de référence**, placé à proximité du pylône, dont les blinks servent de base commune de recalage pour toutes les ancrs. Cette option évite une ligne de synchronisation dédiée, au prix d'un tag supplémentaire.

2. Géométrie et calibration des ancrs

Principe

Les ancrs sont disposées autour du pylône selon une géométrie non colinéaire (triangle), avec au moins une différence de hauteur. Cette configuration permet de rester robuste face aux variations d'altitude et d'orientation de l'avion (avion à plat ou sur la tranche).

Calibration terrain

Le système ne cherche pas une localisation absolue au centimètre près, mais une décision de **côté par rapport à un plan vertical**. La calibration peut donc rester simple :

- Les ancrs sont montées sur un support mécanique fixe (colliers, platines, support dédié sur la gouttière PVC ou piquets adjacents).
- Les positions relatives des ancrs sont mesurées une fois (mètre ou télémètre simple) et enregistrées.
- Tant que le support mécanique est reproduit à l'identique, la géométrie reste valide d'une manche à l'autre.

Tolérance aux écarts

Deux mécanismes limitent l'impact de petits déplacements (quelques centimètres) :

1. Une **zone morte** autour du plan du pylône (par exemple ± 1 m), dans laquelle aucune pénalité n'est appliquée.
 2. Un **test de cohérence en début de session**, consistant à faire passer un tag de référence dans des positions connues (extérieur clair), afin de valider le signe du calcul.
-

3. Gestion de 4 avions simultanés

Coexistence des blinks UWB

Avec 4 avions, les émissions UWB peuvent coexister à condition de limiter les collisions radio. La perte ponctuelle d'un blink n'est pas critique si la décision repose sur plusieurs échantillons consécutifs.

Stratégies anti-collision

Plusieurs mécanismes simples peuvent être combinés :

- **Décalage temporel par ID** : chaque avion démarre ses émissions avec un décalage de phase différent dans la période (slotting).
- **Jitter contrôlé** : ajout d'un léger jitter pseudo-aléatoire (± 1 à 2 ms) sur chaque émission pour éviter les synchronisations accidentelles.
- **Fréquence suffisante** : une fréquence de 20 à 40 Hz garantit plusieurs blinks exploitables dans la zone du pylône, même en cas de pertes ponctuelles.

Identification des avions

Chaque trame UWB contient au minimum :

- un identifiant unique d'avion,
- un compteur de trames,
- un CRC.

Il est recommandé d'ajouter un identifiant de session afin d'éviter toute pollution par des tags non concernés.

Conclusion de cette section

Les points d'attention identifiés (synchronisation, géométrie, coexistence multi-avions) sont adressables avec des mécanismes simples, compatibles avec une installation terrain temporaire. Les choix retenus privilégient la robustesse, la répétabilité et l'acceptabilité sportive, plutôt que la complexité ou la précision excessive.