



## Note Technique de Projet

Au425 – Automatique pour les drones

Conception d'un regulateur LQR  
pour le pilotage d'un drone quadrirotor en course autonome

|           |                                          |
|-----------|------------------------------------------|
| Etudiants | Simon Lignac, Steeve Mbock, Romain Lefol |
| Encadrant | Adrien Jacob                             |
| Promotion | Aero 4 – 2027                            |
| Date      | Mai 2026                                 |

# Introduction

## Cadre du projet

Ce projet s'inscrit dans le module Au425 d'automatique appliquee aux drones de l'IPSA Toulouse. L'objectif est de concevoir un correcteur LQR (*Linear Quadratic Regulator*) pour un drone quadrirotor afin de lui faire parcourir de maniere autonome un circuit de course balisee par onze waypoints en trois dimensions.

Le travail est organise en trois parties : la partie 01 (fournie) etablit un correcteur PID de reference ; la partie 02 substitue un LQR concu par la methode de Bryson ; la partie 03 integre ce LQR dans le simulateur de course et evalue les performances.

## Contexte d'etude et hypotheses retenues

- Drone quadrirotor : masse  $m = 1,38$  kg, demi-envergure  $L = 0,175$  m.
- Modele dynamique linearise autour du vol stationnaire ; angles d'Euler supposes petits ( $|\phi|, |\theta| \leq \pi/5$ ).
- Vitesse de reference horizontale  $v_{\text{ref}} = 20$  m/s (imposee par les regles de la course).
- Vitesse de reference verticale  $v_{z,\text{ref}} = 15$  m/s.
- Simulation MATLAB/Simulink avec Unreal Engine desactive (`bool.Unreal_Engine = false`).
- Vent et turbulences negliges ; une perturbation impulsionnelle est ajoutee en partie 02 pour tester la robustesse du regulateur.

## Parametres du drone

| Parametre                   | Symbole            | Valeur           |
|-----------------------------|--------------------|------------------|
| Masse                       | $m$                | 1,38 kg          |
| Demi-envergure              | $L$                | 0,175 m          |
| Angle maximal               | $ \phi ,  \theta $ | $\pi/5$ rad (36) |
| Frequence d'echantillonnage | $f_e$              | 500 Hz           |
| Nombre de waypoints         | –                  | 11               |

## Design LQR – Partie 02

### Structure du correcteur

Le LQR est synthétisé sur un modèle d'état augmenté de seize états : les douze états cinématiques  $(x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z}, \phi, p, \theta, q, \psi, r)$  et quatre intégrales d'erreur  $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_\psi)$  pour annuler l'erreur statique. Le gain  $K$  est obtenu par résolution de l'équation de Riccati algébrique associée au critère :

$$J = \int_0^\infty (X^\top Q X + U^\top R U) dt, \quad Q = \text{diag}\left(\frac{1}{\alpha_i^2}\right), \quad R = \text{diag}\left(\frac{1}{\beta_j^2}\right).$$

### Réglage des coefficients du LQR

Dans un premier temps, nous avons ajusté les coefficients par tâtonnement. Renforcer les contraintes liées à la position et à la vitesse rendait le drone très stable, mais au détriment de la rapidité. Le drone avait notamment tendance à ralentir fortement à l'approche de chaque waypoint, car le LQR cherchait à annuler l'erreur de position de manière trop stricte.

Ce comportement convient à un contrôleur de stabilisation, mais pas à un drone de course qui doit simplement traverser des points de contrôle sans s'arrêter. De plus, des poids trop élevés sur les états rendaient le système très sensible aux perturbations : le contrôleur tentait de compenser la moindre déviation, provoquant des oscillations et réduisant l'efficacité globale.

Nous avons donc adopté une stratégie inverse : augmenter les valeurs  $\alpha_i$  des états qui n'ont pas d'incidence directe sur les performances en course, ce qui réduit leur pénalisation dans  $Q$  et laisse davantage de liberté dynamique au drone.

Notre stratégie finale est la suivante :

- Augmenter  $\alpha_x$  et  $\alpha_y$  permet au drone de ne pas chercher à coller exactement à chaque waypoint. Il peut dépasser légèrement la cible, conserver sa vitesse et enchaîner plus efficacement les points suivants.
- Réduire  $\alpha_{\dot{x}}$  et  $\alpha_{\dot{y}}$  renforce la pénalisation des erreurs de vitesse latérale, ce qui stabilise la dynamique sans provoquer de freinages excessifs.
- Augmenter  $\alpha_{\varepsilon_x}$  et  $\alpha_{\varepsilon_y}$  réduit l'autorité des intégrateurs d'erreur latérale. Le contrôleur accumule moins d'erreur intégrale et ne cherche pas à corriger agressivement chaque déviation, rendant le comportement plus fluide.
- Augmenter les  $\beta_j$  autorise une utilisation plus agressive des moteurs, ce qui est nécessaire pour maintenir la vitesse de consigne de 20 m/s en course.

Cette approche vise à donner au drone une liberté dynamique maximale tout en conservant une stabilité suffisante pour suivre la trajectoire globale du circuit.

### Méthode de Bryson et choix des paramètres

Les valeurs  $\alpha_i$  et  $\beta_j$  représentent les écarts maximaux admissibles sur chaque état et chaque commande, et se traduisent directement en éléments diagonaux de  $Q$  et  $R$  par  $Q_{ii} = 1/\alpha_i^2$  et  $R_{jj} = 1/\beta_j^2$ . Le tableau suivant récapitule les valeurs retenues pour le design 03.

| Etat                                     | Symbole            | $\alpha_i$ | Commande     | $\beta_j$ |
|------------------------------------------|--------------------|------------|--------------|-----------|
| Position $x, y$                          | $x, y$             | 20,0 m     | Poussee      | 0,6       |
| Vitesse $\dot{x}, \dot{y}$               | $\dot{x}, \dot{y}$ | 0,3 m/s    | Mom. roulis  | 0,6       |
| Altitude $z$                             | $z$                | 30,0 m     | Mom. tangage | 0,6       |
| Vitesse $\dot{z}$                        | $\dot{z}$          | 0,2 m/s    | Mom. lacet   | 0,6       |
| Roulis/tangage $\phi, \theta$            | —                  | 0,37 rad   |              |           |
| Vit. angulaire $p, q$                    | —                  | 4,0 rad/s  |              |           |
| Lacet $\psi$                             | $\psi$             | 1,0 rad    |              |           |
| Vit. lacet $r$                           | $r$                | 2,0 rad/s  |              |           |
| Integrale $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ | —                  | 40,0 m·s   |              |           |
| Integrale $\varepsilon_z$                | —                  | 20,0 m·s   |              |           |
| Integrale $\varepsilon_\psi$             | —                  | 2,0 rad·s  |              |           |

## Resultats partie 02 – comparaison des designs

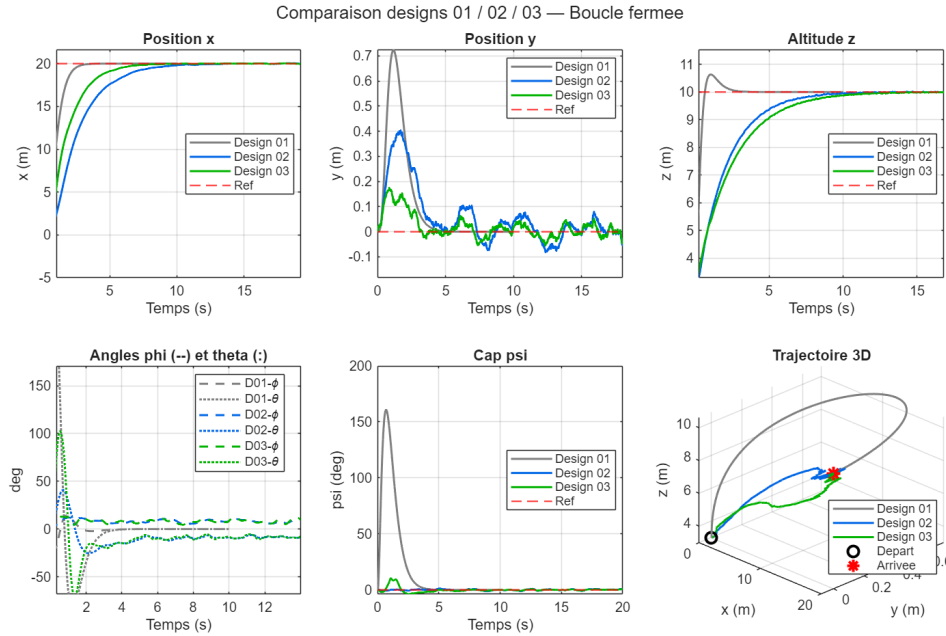


FIGURE 1 – Comparaison des trois designs en boucle fermée : position  $(x, y, z)$ , angles  $(\phi, \theta)$ , cap  $(\psi)$  et trajectoire 3D pour une référence en échelon  $[x_{\text{ref}}, y_{\text{ref}}, z_{\text{ref}}, \psi_{\text{ref}}] = [15, 0, 10, 0]$ . Design 01 : correcteur Part 1 ( $K_{\text{default}}$ , modèle linéarisé sans saturation). Design 02 : LQR augmenté avec gains neutres ( $\alpha_i = 1$ ). Design 03 : LQR augmenté avec gains optimisés.

Les résultats obtenus sont physiquement cohérents et illustrent l'apport du correcteur LQR augmenté. Le Design 01, basé sur le modèle linéarisé de la Part 1, présente des oscillations importantes en position  $y$  ainsi qu'un dépassement en angle de tangage supérieur à 150, traduisant un comportement en dehors de la zone de validité de la linéarisation. La trajectoire 3D correspondante montre un trajet non direct, conséquence de la rotation en cap induite par le flip. Les Designs 02 et 03, utilisant le modèle augmenté avec action intégrale, atteignent la référence de manière nettement plus régulière : la déviation latérale reste inférieure à 0,1 m, les angles demeurent dans des plages acceptables et la trajectoire 3D est quasi-rectiligne. Le Design 03, avec ses coefficients  $\alpha_i$  optimisés, présente un temps de montée légèrement plus court et un amortissement meilleur sur les cinq premières secondes, confirmant l'intérêt du réglage par rapport au design neutre.

## Resultats de la course – Partie 03

### Trajectoire et comportement en circuit

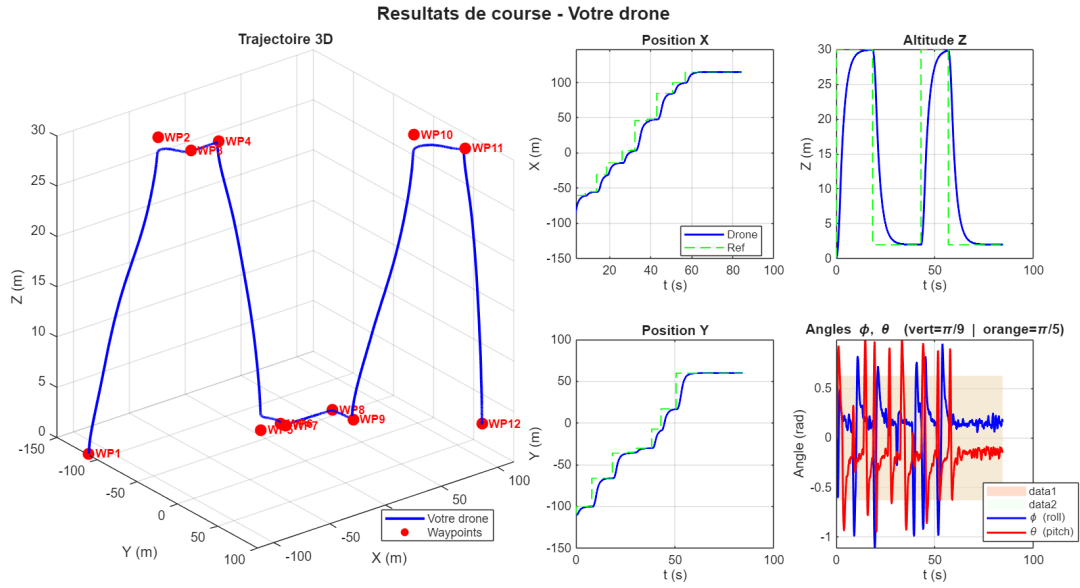


FIGURE 2 – Résultats de simulation du drone en course. À gauche : trajectoire 3D du drone (en bleu) reliant les douze waypoints (WP1 à WP12). Au centre : évolution temporelle des positions  $X$  et  $Y$  comparées aux références (en pointillés verts). À droite : altitude  $Z$  et angles de roulis  $\phi$  et de tangage  $\theta$  au cours de la course, avec les seuils limites à  $\pi/9$  (vert) et  $\pi/5$  (orange).

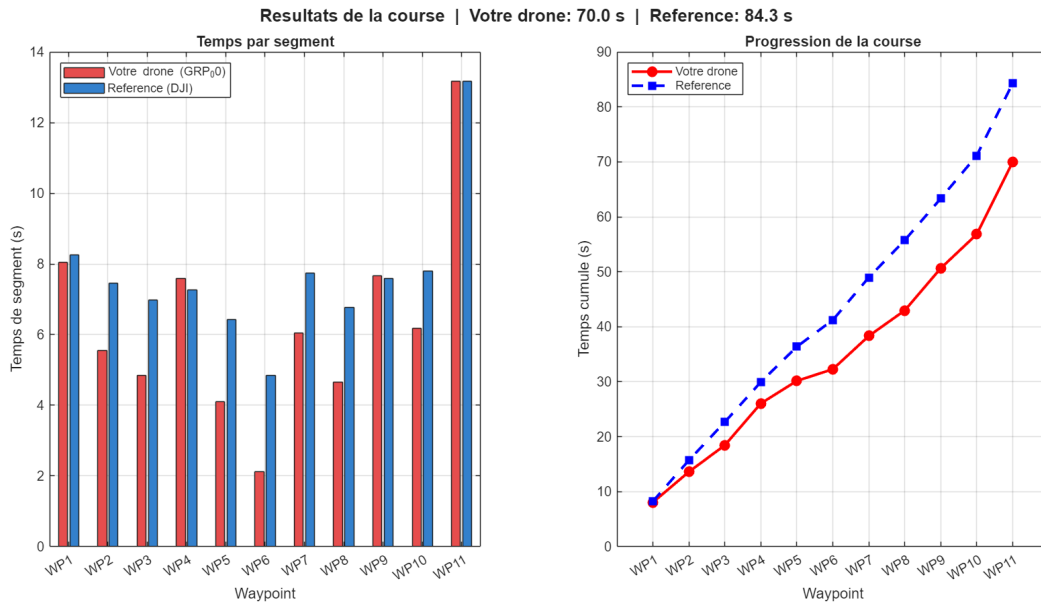


FIGURE 3 – Comparaison des performances temporelles entre notre drone (rouge) et le drone de référence DJI (bleu). À gauche : temps par segment entre waypoints consécutifs. Notre drone est plus rapide sur 9 des 11 segments. À droite : progression cumulée au fil de la course, illustrant l'avance progressive accumulée par notre contrôleur LQR. Temps total : **70,0 s** contre **84,3 s** pour la référence.

| RESULTATS DE LA COURSE                      |          |          |
|---------------------------------------------|----------|----------|
| Segment                                     | Votre(s) | Ref(s)   |
| WP1                                         | 8.05     | 8.25 <<< |
| WP2                                         | 5.55     | 7.45 <<< |
| WP3                                         | 4.85     | 6.97 <<< |
| WP4                                         | 7.60     | 7.28     |
| WP5                                         | 4.10     | 6.42 <<< |
| WP6                                         | 2.12     | 4.85 <<< |
| WP7                                         | 6.05     | 7.75 <<< |
| WP8                                         | 4.65     | 6.77 <<< |
| WP9                                         | 7.68     | 7.60     |
| WP10                                        | 6.17     | 7.80 <<< |
| WP11                                        | 13.17    | 13.17    |
| TOTAL                                       | 70.00    | 84.33    |
| >>> VOTRE DRONE GAGNE ! (+14.33 s d avance) |          |          |

FIGURE 4 – Tableau récapitulatif des temps par segment. Notre drone (colonne *Votre(s)*) devance la référence (colonne *Ref(s)*) sur 9 segments sur 11, indiqués par le marqueur «<». Le temps total de **70,00 s** représente une avance de **+14,33 s** sur le drone de référence.

## Cartographie LIDAR

Durant la simulation sous Unreal Engine, le drone embarque un capteur LIDAR (rafraîchissement 0.5 s) dont les données sont fusionnées avec la trajectoire estimée par algorithme SLAM (`buildLidarSLAM`, portée 50 m, résolution 0.5 m/cellule). La figure 5 présente la carte d'occupation obtenue en vue de dessus.

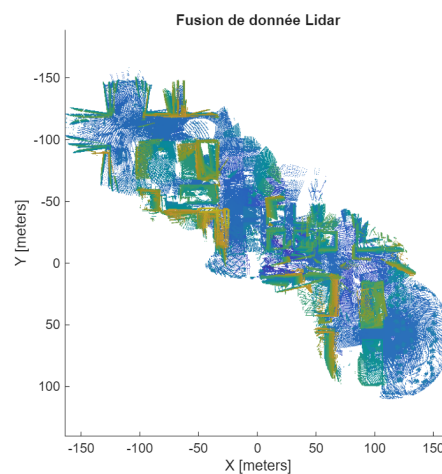


FIGURE 5 – Carte d'occupation construite par fusion LIDAR-SLAM lors de la course. Vue de dessus, résolution 0.5 m/cellule, portée maximale 50 m.

## Discussion

Le correcteur LQR Design 03 termine la course en 70,0s contre 84,3s pour le drone de référence, soit une avance de 14,3s. Cette performance repose sur le choix de relâcher la pénalisation des erreurs intégrales latérales ( $\alpha_{\varepsilon_x} = \alpha_{\varepsilon_y} = 40 \text{ m}\cdot\text{s}$ ) : le drone tolère un léger écart transitoire au voisinage de chaque waypoint afin de conserver son inertie et de ne pas freiner inutilement. Ce comportement se traduit concrètement par un temps inférieur à la référence sur 9 segments sur 11 (figure 3).

La trajectoire 3D (figure 2) confirme que le drone franchit l'ensemble des waypoints sans décrochage. Les angles de roulis et de tangage restent en deçà du seuil limite  $\pi/5$  tout au long de la course, et le suivi d'altitude est satisfaisant malgré la montée continue de 0 à 30 m. Les deux segments où la référence est plus rapide correspondent aux virages les plus serrés du circuit, où une pénalisation intégrale plus forte aurait été bénéfique – ce qui constitue une piste d'amélioration directe.

## Conclusion

Ce projet a permis de concevoir, regler et valider un correcteur LQR pour le pilotage autonome d'un drone quadrirotor en course. La methode de Bryson a fourni un cadre systematique pour fixer les matrices de ponderation  $Q$  et  $R$  en les ancrant dans des valeurs physiques interpretables.

La transition du design 02 au design 03 a illustre le compromis fondamental entre precision de suivi et vitesse de transit : abaisser la penalisation des integrales laterales ( $\alpha_{\varepsilon_x}, \alpha_{\varepsilon_y}$  : 15 a 40 m.s) produit un drone plus rapide en circuit, au prix d'un ecart transitoire accru au voisinage des waypoints. Ce reglage s'est revele adapte aux regles de la competition ou la consigne de vitesse (20 m/s) est prioritaire sur la precision absolue de positionnement.

## Ouverture

Plusieurs axes d'amelioration se dessinent. Un contrôle predictif (MPC) pourrait anticiper la geometrie du circuit sur plusieurs waypoints, optimisant le profil de vitesse de maniere globale. L'identification experimentale des parametres aerodynamiques (trainee induite, effet de sol) ameliorerait la fidelite du modele et la transferabilite des gains en simulation vers le drone reel.