

Fiche: Pilote automatique - voilier ≈ 9 m

Généré automatiquement

November 9, 2025

Résumé rapide

Valeurs initiales recommandées pour un voilier d'environ 9 m, mesures à $T_s = 0.05$ s (20 Hz). Un contrôleur en cascade est utilisé : boucle interne PD (vitesse de lacet r) et boucle externe PI (cap ψ).

Notations et symboles

$\delta(t)$ angle de gouvernail (rad).

$r(t) = \dot{\psi}(t)$ vitesse de lacet (rad/s).

$\psi(t)$ cap (rad).

$r_{\text{ref}}(t)$ consigne de vitesse de lacet (rad/s).

$e_r(t) = r_{\text{ref}}(t) - r(t)$ erreur de vitesse de lacet (rad/s).

$e_\psi(t) = \psi_{\text{ref}}(t) - \psi(t)$ erreur de cap (rad).

$K_{p,r}$ gain proportionnel boucle interne (numérique).

τ_d constante de temps du filtre dérivé (s).

$K_{d,\text{eff}} = K_{p,r} \tau_d$ gain dérivé effectif (numérique).

$K_{p,\psi}$ gain proportionnel boucle externe (s^{-1}).

$K_{i,\psi}$ gain intégral boucle externe (s^{-2}).

K_{ff} gain feed-forward sur r_{ref} (numérique).

T_s période d'échantillonnage (s).

Correcteurs (formes continues)

Boucle interne – PD filtré

$$\delta(t) = K_{p,r} e_r(t) + K_{d,\text{eff}} \frac{de_r}{dt},$$

$$\text{avec } K_{d,\text{eff}} = K_{p,r} \tau_d,$$

$$\text{et filtrage du dérivé } \frac{\tau_d s}{1 + \tau_d s} E_r(s).$$

Boucle externe – PI

$$r_{\text{ref}}(t) = K_{p,\psi} e_\psi(t) + K_{i,\psi} \int e_\psi(t) dt.$$

Valeurs initiales recommandées (chargées telles quelles)

Boucle interne (PD)

$$\begin{aligned}K_{p,r} &= 4.5, \\ \tau_d &= 0.20 \text{ s}, \\ K_{d,\text{eff}} &= K_{p,r} \tau_d = 0.9.\end{aligned}$$

Saturations : $|\delta| \leq 0.52 \text{ rad}$ (30°), $|\dot{\delta}| \leq 0.87 \text{ rad/s}$ ($50^\circ/\text{s}$).

Boucle externe (PI)

$$\begin{aligned}K_{p,\psi} &= 0.06 \text{ s}^{-1}, \\ K_{i,\psi} &= 0.01 \text{ s}^{-2}.\end{aligned}$$

Deadband cap : $\pm 0.0087 \text{ rad}$ (0.5°). Limite $|r_{\text{ref}}| \leq 0.14 \text{ rad/s}$.

Feed-forward (optionnel)

$$\delta(t) += K_{ff} r_{\text{ref}}(t), \quad K_{ff} \approx 0.4.$$

Discrétisation (échantillonnage $T_s = 0.05 \text{ s}$)

Terme dérivé filtré (discret)

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{\tau_d}{\tau_d + T_s}, \\ d_{\text{filtre}}[n] &= \alpha d_{\text{filtre}}[n-1] + (1-\alpha) \frac{e_r[n] - e_r[n-1]}{T_s}, \\ \delta[n] &= K_{p,r} e_r[n] + K_{p,r} \tau_d d_{\text{filtre}}[n].\end{aligned}$$

Intégrateur PI (discret)

$$\begin{aligned}I_\psi[n] &= I_\psi[n-1] + K_{i,\psi} T_s e_\psi[n], \\ r_{\text{ref}}[n] &= K_{p,\psi} e_\psi[n] + I_\psi[n].\end{aligned}$$

Anti-windup : appliquer un clamp sur I_ψ si r_{ref} dépasse sa limite.

Procédure d'optimisation sur l'eau (sûre)

1. Préparation : vérifier capteurs et sécurité, imposer limites conservatrices : $|\delta| \leq 15^\circ$, $|r_{\text{ref}}| \leq 0.05 \text{ rad/s}$.
2. Réglage boucle interne (r):
 - (a) Désactiver $K_{i,\psi}$.
 - (b) Appliquer des pas de consigne $r_{\text{ref}} = \pm 0.05 \text{ rad/s}$.
 - (c) Augmenter $K_{p,r}$ par pas de 10–20% jusqu'à atteindre 90% de la consigne en $< 1 \text{ s}$ sans oscillation notable.
 - (d) Ajuster τ_d si dépassement ou bruit excessif.

3. Réglage boucle externe (psi):

- (a) Réactiver $K_{i,\psi}$ (valeur initiale donnée).
- (b) Faire un pas de cap d'environ 10° (≈ 0.17 rad).
- (c) Ajuster $K_{p,\psi}$ pour obtenir une correction douce (durée cible 60–120 s).
- (d) Ajuster $K_{i,\psi}$ pour annuler la dérive en 1–3 min sans pompage.

4. Validation : remettre limites nominales, activer feed-forward, tester en différentes conditions et logger abondamment.

Critères mesurables

- Temps de réponse interne : T90 pour un pas de $r_{\text{ref}} < 1$ s.
- Taux de saturation du gouvernail : idéalement $< 1\%$ en croisière.
- Absence d'oscillations rapides ou lentes non désirées.
- Dérive d'erreur nulle après intégration (test de 2–5 min).

Notes : Emportez cette fiche imprimée, les logs et un bouton “disengage” accessible. Bon essais !