

# Fiche: Pilote automatique - voilier $\approx 9$ m

Généré automatiquement

November 14, 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  $\psi$ ).

## 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).

$\tau_d$  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  $r_{\text{ref}}$  (numérique).

$T_s$  période d'échantillonnage (s).

## Correcteurs (formes continues)

### Boucle interne – PD filtré

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

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

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

### 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 :  $\pm 0.0087 \text{ rad (}0.5^\circ\text{)}.$  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  $I_\psi$  si  $r_{\text{ref}}$  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  $\tau_d$  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  $10^\circ$  ( $\approx 0.17$  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 !