

- Énoncer les théorèmes aux limites.
- Quelles sont les fonctions de transfert d'un premier et d'un deuxième ordre.

EXERCICE : Pilote automatique de voilier

Un pilote automatique de voilier est un dispositif chargé de barrer un voilier automatiquement, permettant au skipper de s'occuper des réglages des voiles ou de se reposer. Le système régule le cap du voilier à la valeur consigne définie par le pilote. Le schéma-blocs fonctionnel est décrit figure 4.32.

Le skipper entre le cap consigne dans le pupitre de gain K_{pu} qui traduit l'information sous forme d'une variable N_c transmise au calculateur. Le correcteur $C(p)$ élabore la commande U_c du groupe motorisation qui entraine le safran d'un angle θ_s . La fonction de transfert du groupe motorisation vaut $H_m(p) = K_m/p$ et le correcteur est, en première approximation, choisi comme une constante $C(p) = K_p$.

La rotation du safran génère une action X_s entrainant le voilier en rotation. Le gain du safran vaut $K_s = 1/L$ où L est une distance caractéristique du voilier. Diverses perturbations (vagues, vent, etc.) exercent d'autres actions X_{ext} perturbant le mouvement du voilier. Le comportement du voilier est modélisé par la fonction de transfert $H_b(p) = \frac{V}{p}$ où V est la vitesse du voilier.

Le compas de gain K_c mesure le cap réel du voilier et transmet l'information au calculateur sous forme d'une variable N .

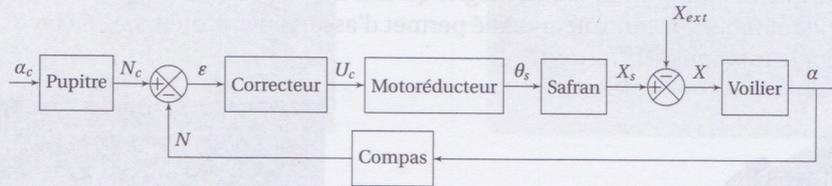


Figure 4.32. Première architecture du pilote automatique de voilier.

On considère ici $X_{ext}(p)=0$

- 1) Quelle valeur doit prendre le gain K_{pu} pour que l'écart ϵ soit nul lorsque la valeur consigne est atteinte : $\alpha = \alpha_c$? Cette valeur est admise pour la suite.
- 2) Proposer un schéma-blocs du système asservi.
- 3) Déterminer la fonction de transfert en boucle ouverte ainsi que la fonction de transfert globale $FTG(p) = \frac{\alpha(p)}{\alpha_c(p)}$.

Un second capteur de gain K_a est implanté sur le système, permettant de tenir compte de l'angle du safran dans la commande du système. La figure 4.33 précise l'architecture retenue.

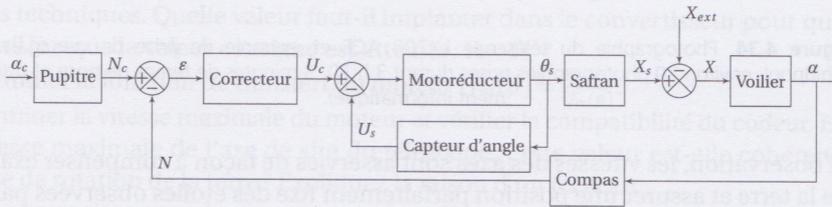


Figure 4.33. Seconde architecture du pilote automatique de voilier.

- 5) Déterminer la fonction de transfert $H_i(p) = \frac{\theta_s}{U_c}$. Refaire un schéma-blocs à une seule boucle en modélisant le comportement $\frac{\theta_s}{U_c}$ par un seul bloc.
- 6) Déterminer la nouvelle fonction de transfert en boucle ouverte ainsi que la nouvelle fonction de transfert globale.

- 8) Déterminer si le système est précis pour une entrée en échelon $\alpha_c(t) = \alpha_0 U(t)$. Conclure sur l'architecture proposée.

- Énoncer les théorèmes aux limites.
- Quelles sont les fonctions de transfert d'un premier et d'un deuxième ordre.

EXERCICE

Régulation de vitesse

Un régulateur de vitesse est un dispositif électronique permettant au conducteur de ne plus se soucier d'ajuster en permanence la vitesse de son véhicule : le calculateur prend en charge l'accélérateur afin de maintenir la vitesse $V(t)$ au plus près de la vitesse consigne $V_c(t)$ demandée par le conducteur.

Les performances attendues de la part du client sont (cahier des charges) :

- un système stable et non oscillant (sans dépassements) ;
- un système précis ;
- un système suffisamment rapide (un temps de réponse à 5 % de 20 s maximum).

La figure 4.28 montre l'architecture de l'asservissement.

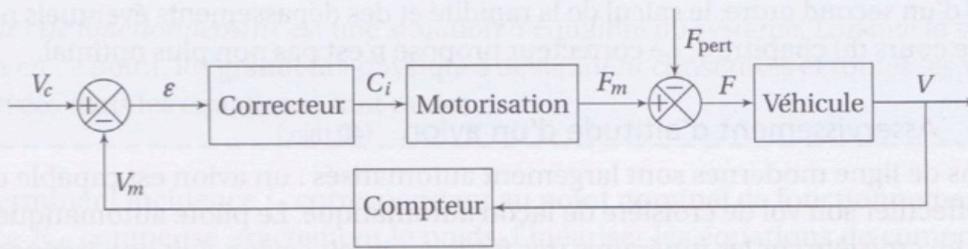


Figure 4.28. Architecture du régulateur de vitesse.

L'ensemble de la motorisation est modélisée par un gain $K_m = 25 \text{ N}$ liant la commande des injecteurs $C_i(t)$ à la force de traction exercée par les roues sur le véhicule $F_m(t)$. Une perturbation due au vent ou aux côtes applique un effort F_{pert} non prévisible sur le véhicule.

L'application du principe fondamental de la dynamique au véhicule conduit à l'équation liant la force totale $F(t)$ à la vitesse $V(t)$: $m \frac{dV}{dt}(t) = F(t) - fV(t)$ où $m = 900 \text{ kg}$ est la masse et $f = 30 \text{ N s m}^{-1}$ un facteur de frottement aérodynamique.

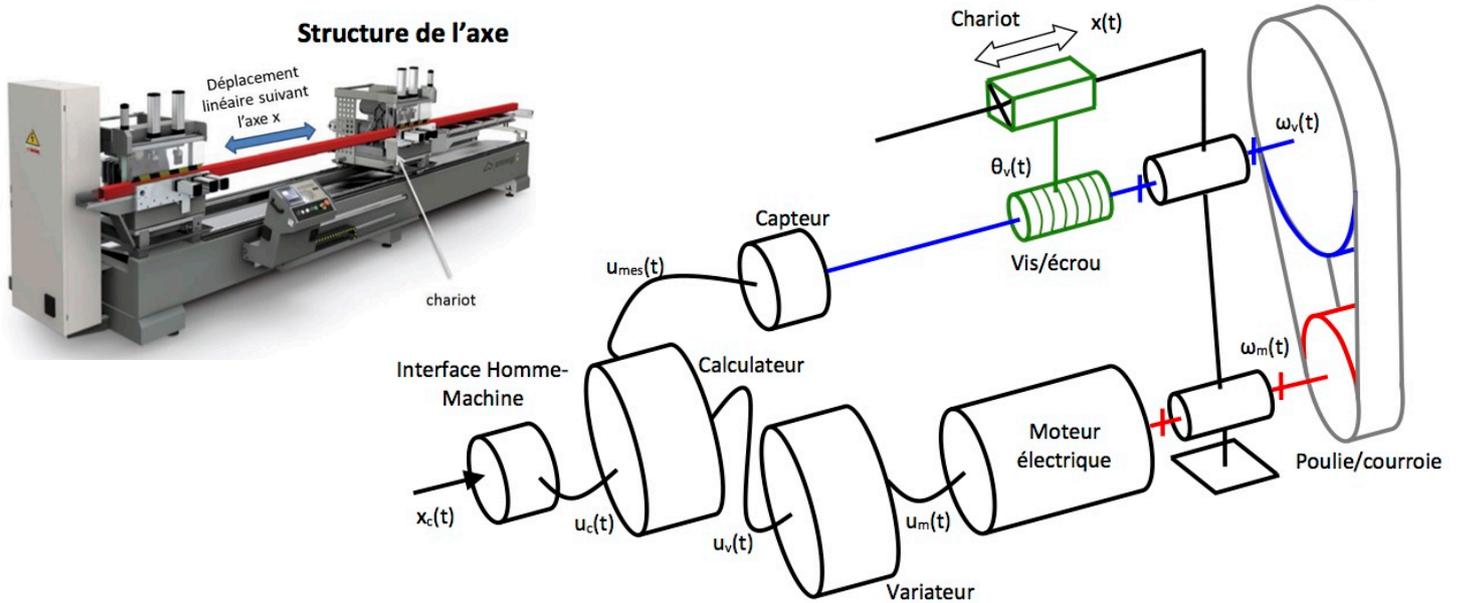
Un compteur de vitesse, de gain unitaire $K_c = 1$, mesure la vitesse $V(t)$ et fournit l'information $V_m(t)$ qui est comparée à la vitesse consigne. Le correcteur $C(p)$ est établi à partir de l'écart ϵ la commande $C_i(t)$. Dans une première approximation, la carte de commande est modélisée par un gain $C(p) = K_p = 5 \text{ s m}^{-1}$.

- 1) L'asservissement est-il régulateur ou suiveur dans ce cas ?
- 2) Transformer dans le domaine de Laplace l'équation de comportement du véhicule, dans l'hypothèse des conditions de Heaviside (conditions initiales nulles).
- 3) Recopier le schéma-blocs figure 4.28 du système asservi en remplaçant chaque mot par une fonction de transfert (ou une constante).
- 4) Déterminer la fonction de transfert en boucle ouverte $\frac{V_m(p)}{\epsilon(p)}$ ainsi que la fonction de transfert en boucle fermée $\frac{V(p)}{V_c(p)}$, en considérant la perturbation nulle $F_{\text{pert}}(p) = 0$.
- 5) Mettre la fonction de transfert en boucle fermée sous la forme canonique : $\frac{K}{1 + \tau p}$ où K et la constante de temps τ sont à déterminer. En déduire l'ordre et la classe du système.
- 6) Pour une consigne de vitesse en échelon d'amplitude V_0 , déterminer si le système est précis.

- Énoncer les théorèmes aux limites.
- Quelles sont les fonctions de transfert d'un premier et d'un deuxième ordre.

EXERCICE : Axe linéaire de machine outil

L'étude porte sur un axe linéaire que l'on peut retrouver sur des machines-outils à commande numérique. On donne la description de sa chaîne fonctionnelle :



La chaîne d'énergie-puissance est constituée :

- d'un variateur (pré-actionneur), contrôlant la tension d'alimentation du moteur, notée $u_m(t)$ en V, à partir de la tension de commande, notée $u_v(t)$ en V ;
- d'un moteur électrique de vitesse angulaire $\omega_m(t)$ en rad/s ;
- d'un réducteur poulie courroie de vitesse angulaire de sortie $\omega_v(t)$ en rad/s ;
- d'un vis écrou qui permet de transformer le mouvement de rotation continue de la vis (position angulaire $\theta_v(t)$ en rad) en un mouvement de translation continue du chariot (position linéaire $x(t)$ en mm).

La chaîne d'information est constituée :

- d'une interface Homme-Machine qui traduit la consigne de position $x_c(t)$ en mm, en une tension image $u_c(t)$ en V ;
- d'un capteur qui mesure la position linéaire du chariot $x(t)$ en mm et en informe le calculateur avec la grandeur $u_{mes}(t)$ en V ;
- d'un calculateur qui compare ensuite cette mesure $u_{mes}(t)$ avec l'image de la consigne de position $u_c(t)$, puis corrige l'image de l'erreur $\varepsilon(t) = u_c(t) - u_{mes}(t)$ issue de cette comparaison, pour élaborer un signal de commande en tension $u_v(t)$ en V pour le variateur.

Modèle de connaissance des composants et de l'axe

Le correcteur est un amplificateur : $u_v(t) = K_c \varepsilon(t)$.

Le variateur est modélisé par : $u_m(t) = K_v u_v(t)$.

Le moteur électrique est modélisé par : $\tau_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + \omega_m(t) = K_m u_m(t)$.

Le réducteur poulie-courroie a un rapport de réduction $r < 1$.

Le gain du transmetteur vis-écrou est noté K_{VE} en mm/rad.

Le gain du capteur est noté K_{cap} en V/mm.

On suppose que toutes les conditions initiales sont nulles et que toutes les constantes sont positives.

À l'aide de la description ci-dessus, réaliser le schéma bloc de l'axe linéaire

- Énoncer les théorèmes aux limites.
- Quelles sont les fonctions de transfert d'un premier et d'un deuxième ordre.

EXERCICE

Asservissement de vitesse d'un télescope

Le télescope LX200 ACF 14" (figure 4.34) est un télescope Schmidt-Cassegrain semi-professionnel (10 000 euros) permettant des prises de vue exceptionnelles tout en restant relativement transportable (40 kg). Les prises de vue du ciel avec un fort grossissement (x 850) nécessitent des temps de pose long. Dans ces conditions, il est nécessaire de compenser la rotation de la terre pour obtenir des images nettes.

La monture azimutale, plus pratique à régler qu'une monture équatoriale, est motorisée sur les deux axes de rotation. Un contrôleur dédié permet d'asservir les moteurs de façon à compenser parfaitement la rotation de la terre.

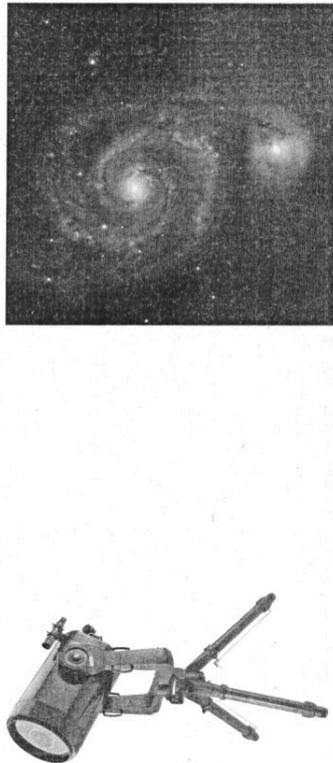


Figure 4.34. Photographie du télescope LX200 ACF et exemple de prise de vue (galaxie Whirlpool, environ 70 photographies prises durant 3 h 30, 3 minutes de temps de pose et traitement informatique).

Lors de l'observation, les vitesses des axes sont asservies de façon à compenser exactement la rotation de la terre et assurer une position parfaitement fixe des étoiles observées par rapport à l'observatoire.

La photographie figure 4.35 montre le moteur à courant continu associé à un premier réducteur à axes parallèles et un second réducteur à roue et vis sans fin. Un codeur, de gain K_c , à 30 fentes par tour est installé sur l'arbre moteur, permettant la mesure de la vitesse (et de la position). La carte de commande est équipée d'un micro-contrôleur PIC, détectant 4 impulsions par fente du codeur à 2,5 MHz maximum, et d'un hacheur, de gain K_h , alimenté sous 12 V et commandé par un générateur PWM 20 kHz sur 10 bits.

Les caractéristiques du moteur sont les suivantes : résistance $R = 2 \Omega$, inductance négligeable, inertie du rotor $J = 4 \times 10^{-6} \text{ kg m}^2$, constante de couple $K_m = 40 \times 10^{-3} \text{ N mA}^{-1}$. Le réducteur à axes parallèles a pour rapport de réduction $k = 1/50$, la roue présente $Z = 180$ dents et la vis, un seul filet, c'est-à-dire qu'à chaque tour de vis, la roue se décale d'une dent.



Figure 4.35. Motorisation de l'angle de site (ou de déclinaison) et carte de commande du moteur.

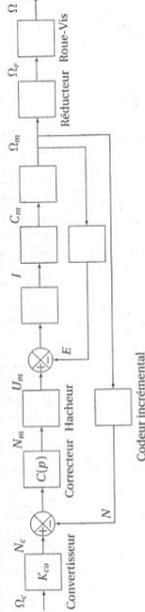


Figure 4.36. Schéma-blocs de l'asservissement en vitesse du télescope.

- 1) Compléter le schéma-blocs de l'asservissement proposé figure 4.36 à l'aide des caractéristiques techniques. Quelle valeur faut-il implanter dans le convertisseur pour que l'écart ε soit nul lorsque la valeur consigne est atteinte : $\Omega = \Omega_c$?
- 2) Déterminer la fonction de transfert du moteur $H_m(p) = \frac{\Omega_m(p)}{U_m(p)}$.
- 3) Déterminer la vitesse maximale du moteur et vérifier la compatibilité du codeur. En déduire la vitesse maximale de l'axe de site du télescope. Cette valeur est-elle cohérente avec la vitesse de rotation de la terre ? Expliquez la raison d'un tel écart.
- 4) Dans un premier temps, le correcteur est modélisé par un simple gain $C(p) = K_p$. Déterminer la fonction de transfert globale de l'axe de site.
- 5) Déterminer si le système est stable, s'il est précis et s'il présente des dépassements pour une consigne de vitesse en échelon. Calculer le temps de réponse à 5 % en supposant que $K_p = 1$.
- 6) Afin d'améliorer les performances, une correction intégrale est implantée dans le micro-contrôleur. Le bloc correcteur est modélisé par une fonction de transfert $C(p) = \frac{1}{p}$. En admettant que système est toujours stable, déterminer s'il est précis.

- Énoncer les théorèmes aux limites.
- Quelles sont les fonctions de transfert d'un premier et d'un deuxième ordre.

EXERCICE

Motorisation d'un axe vertical de radar

La parabole (3) est en rotation par rapport au carter principal (1) selon l'axe vertical z'_1 . Le moteur d'axe (2) est associé à un

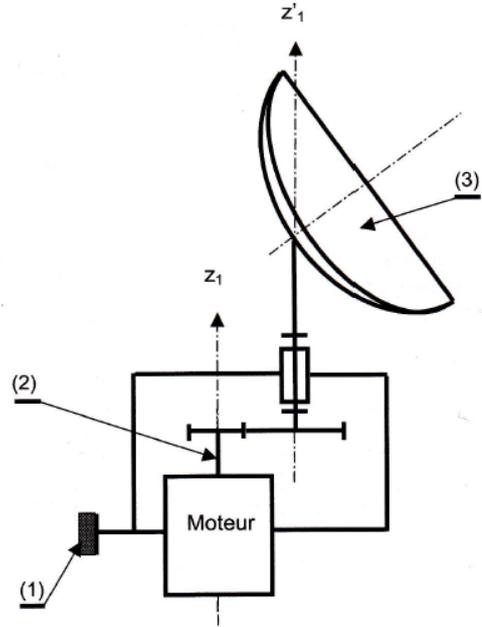
réducteur de rapport de réduction $\frac{\omega_{(3/1)}}{\omega_{(2/1)}} = r$.

Les équations de l'électricité appliquées au moteur à courant continu sont :

- $u(t) = R.i(t) + e(t)$ où $u(t)$ est la tension d'induit (Volts), R la résistance de ce dernier (Ohms), $i(t)$ l'intensité du courant d'induit (Ampères), $e(t)$ la force électromotrice (Volts), (on néglige l'inductance de l'induit).
- $e(t) = K_e.\omega_2(t)$ où ω_2 est la vitesse de rotation de l'axe moteur (rad/s) et K_e la constante de force électromotrice (Volts)/(rad/s).
- $C_m(t) = K_c.i(t)$ où $C_m(t)$ est le couple moteur (N.m) et K_c la constante de couple (N.m/A).

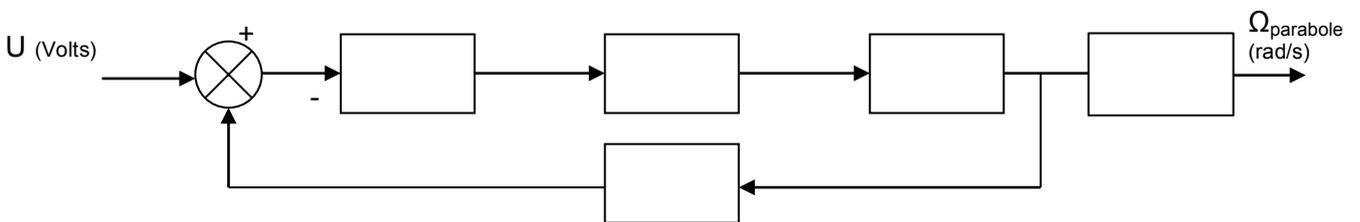
Le principe fondamental de la dynamique appliqué à l'ensemble de solides de moment d'inertie ramené à l'axe moteur J (kg.m²) donne :

- $C_m(t) = J.\frac{d\omega_2(t)}{dt}$.



Questions :

- 1- A partir des équations précédentes, après transformation de Laplace, compléter les différents blocs du schéma de la figure ci-dessous.
 - Indiquer, pour chacun d'eux, la fonction de transfert,
 - Préciser, entre chaque bloc, la variable et son unité.



- 2- Déterminer la fonction de transfert du moteur $H_m(p) = \frac{\Omega_2(p)}{U(p)}$. Préciser son ordre, son gain statique et sa constante de temps.
- 3- Déterminer la fonction de transfert de l'ensemble moto-réducteur.

- 1) L'asservissement est régulateur car la consigne de vitesse est constante en fonctionnement normal. Le rôle de l'asservissement est de lutter contre les perturbations. Lors d'une modification...
- 2) La transformée de Laplace à l'équation de comportement du véhicule $m \frac{dV}{dt}(t) = F(t) - fV(t)$ conduit, dans les conditions de Heaviside, à :

$$mpV(p) = F(p) - fV(p) \implies (mp + f)V(p) = F(p) \implies \frac{V(p)}{F(p)} = \frac{1}{mp + f}.$$

- 3) Le schéma-blocs est celui de la figure 4.37.

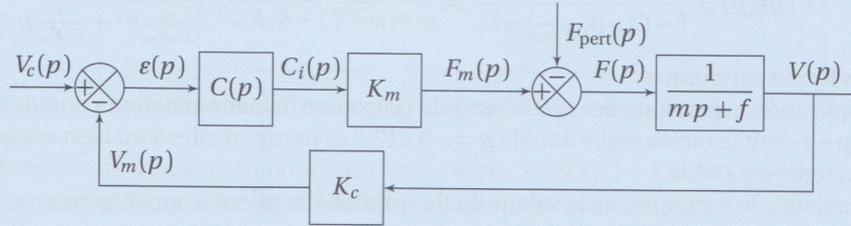


Figure 4.37. Schéma-blocs du régulateur de vitesse.

- 4) $FTBO(p) = \frac{V_m(p)}{\varepsilon(p)} = C(p)K_m \frac{1}{mp+f} K_c$. En considérant que $C(p) = K_p$ et $K_c = 1$, la FTBO devient : $FTBO(p) = \frac{K_p K_m}{mp+f}$.

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit par la formule de Black :

$$FTBF(p) = \frac{C(p)K_m \frac{1}{mp+f}}{1 + C(p)K_m \frac{1}{mp+f} K_c} = \frac{K_p K_m}{(mp + f) + K_p K_m}.$$

- 5) Pour mettre la fonction de transfert sous forme canonique, il faut une constante unitaire au dénominateur : $FTBF(p) = \frac{\frac{K_p K_m}{f + K_p K_m}}{1 + \frac{m}{f + K_p K_m} p}$. Par identification, les constantes sont : $K = \frac{K_p K_m}{f + K_p K_m}$ et $\tau = \frac{m}{f + K_p K_m}$. Il s'agit d'une fonction de transfert d'ordre 1 (degré du polynôme du dénominateur) et de classe 0 (pas de p en facteur au dénominateur).

- 8) Le système étant stable, le théorème de la valeur finale peut s'appliquer. L'entrée en échelon s'exprime dans le domaine de Laplace $V_c(p) = V_0 \frac{1}{p}$. La sortie vaut alors dans le domaine de Laplace : $V(p) = FTBF(p)V_c(p) = \frac{K}{1 + \tau p} \frac{V_0}{p}$. La valeur à convergence s'obtient alors par le théorème de la valeur finale :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p V(p) = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{K}{1 + \tau p} \frac{V_0}{p} = K V_0 \neq V_0 \quad \text{car } K \neq 1.$$

Le système n'est donc pas précis : il ne converge pas vers la valeur consigne.

- 1) Le gain K_{pu} doit être égal au gain K_c du capteur de façon à ce que lorsque $\alpha_c = \alpha$, alors $\varepsilon = 0$ ($\varepsilon = N_c - N = K_{pu}\alpha_c - K_c\alpha$).
- 2) Le schéma-blocs s'obtient en remplaçant chaque mot par la fonction de transfert associée : voir figure 4.39.

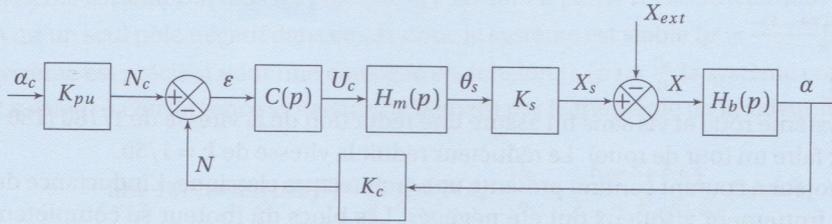


Figure 4.39. Schéma-blocs de la première architecture du pilote automatique de voilier.

- 3) La fonction de transfert en boucle ouverte vaut $FTBO(p) = C(p)H_m(p)K_sH_b(p)K_c$ (le pupitre n'est pas dans la boucle qui commence à l'écart ε et se termine à la grandeur N). La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit par la formule de Black :

$$FTG(p) = K_{pu} \times \frac{C(p)H_m(p)K_sH_b(p)}{1 + C(p)H_m(p)K_sH_b(p)K_c} = \frac{K_{pu}K_pK_mK_sV}{p^2 + K_pK_mK_sVK_c}$$

- 4) Les racines du dénominateur sont imaginaires pures ! Les parties réelles des pôles sont nulles donc le système est *quasi-stable*, c'est à dire qu'il oscille indéfiniment sans converger. Cette situation n'est pas acceptable pour un pilote automatique donc l'architecture ne convient pas.
- 5) La fonction de transfert de la boucle interne s'écrit $H_i(p) = \frac{H_m(p)}{1 + H_m(p)K_a} = \frac{K_m}{p + K_mK_a}$. Le schéma-blocs est décrit figure 4.40.

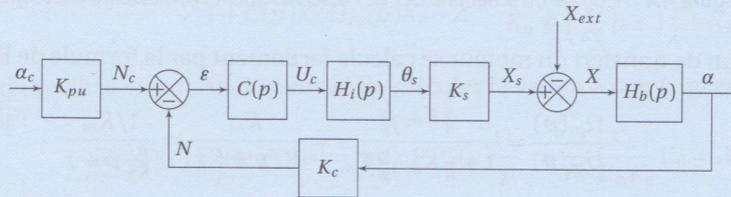


Figure 4.40. Schéma-blocs de la seconde architecture du pilote automatique de voilier.

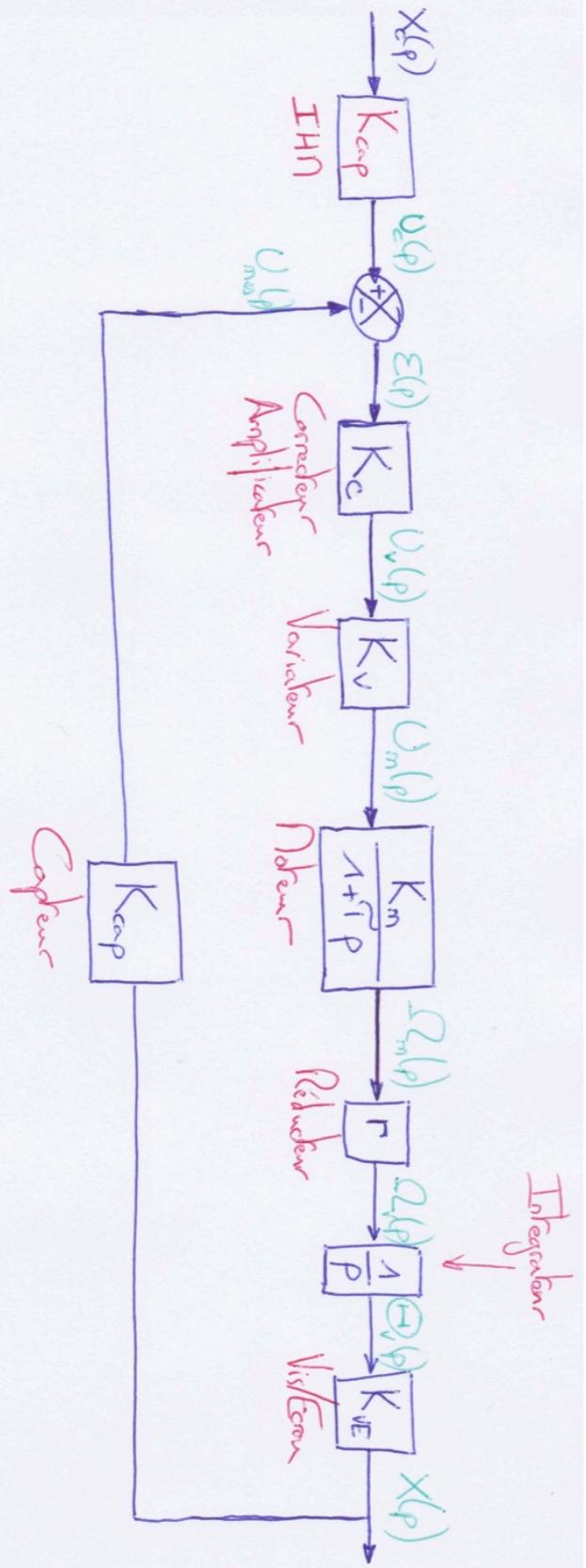
- 6) La fonction de transfert en boucle ouverte vaut désormais $FTBO(p) = C(p)H_i(p)K_sH_b(p)K_c$ et la fonction de transfert globale s'écrit (en choisissant $K_{pu} = K_c$) :

$$FTG(p) = K_{pu} \frac{C(p)H_i(p)K_sH_b(p)}{1 + C(p)H_i(p)K_sH_b(p)K_c} = \frac{K_pK_mK_sVK_c}{p(p + K_mK_a) + K_pK_mK_sVK_c}$$

- 8) La précision se calcule par le théorème de la valeur finale. Pour une consigne en échelon $\alpha_c(t) = \alpha_0 U(t)$, dont l'expression dans le domaine de Laplace s'écrit $\alpha_c(p) = \frac{\alpha_0}{p}$, la valeur à convergence de la sortie vaut :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \alpha(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \alpha(p) = \lim_{p \rightarrow 0} p FTG(p) \frac{\alpha_0}{p} = \alpha_0$$

Le système est donc précis. L'architecture proposée semble prometteuse.



* Le gain de l'IHN est égal au gain du capteur car lorsque $X(p) = X_c(p)$, il faut que l'écart $E(p)$ doit nul

* L'intégrateur $\left[\frac{1}{p}\right]$ permet d'intégrer la vitesse $\omega_s(t)$ en sortie du réducteur afin d'obtenir $\theta_s(t)$, position angulaire en sortie du réducteur, c'est à dire la position angulaire de la vis du transmetteur vis/écrou. En effet, intégrer dans le domaine temporel revient à multiplier par $\frac{1}{p}$ dans le domaine symbolique.

- 1) Le système roue et vis sans fin assure une réduction de la vitesse de 1/180 (180 tour de vis pour faire un tour de roue). Le réducteur réduit la vitesse de $k = 1/50$.
 Le moteur à courant continu présente une architecture classique. L'inductance du bobinage et le frottement visqueux ont été négligés. Les blocs du moteur se complètent de façon similaire à la description faite paragraphe 1.1, page 175.
 Le hacheur dose la tension d'alimentation entre 0 et 12 V à partir d'une consigne codée sur 10 bits, c'est-à-dire un entier entre 0 et $2^{10} - 1 = 1023$. Le gain du hacheur vaut alors $K_h = \frac{12}{1023} \text{ V inc}^{-1}$.
 Le codeur détecte 4 impulsions par fente, avec 30 fentes par tour de moteur, soit $K_c = \frac{30 \times 4}{2\pi} \text{ inc s rad}^{-1}$.
 Le convertisseur est tel que l'écart doit être nul si $\Omega = \Omega_c$. Le gain vaut alors $K_{co} = K_c \frac{Z}{k} = \frac{30 \times 4}{2\pi} \times \frac{Z}{k} \text{ inc s rad}^{-1}$

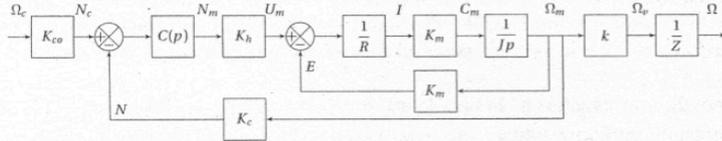


Figure 4.41. Corrigé du schéma-blocs de l'asservissement en vitesse du télescope.

- 2) La fonction de transfert du moteur se calcule facilement par la formule de Black :

$$\frac{\Omega_m(p)}{U_m(p)} = \frac{\frac{1}{R} K_m \frac{1}{p}}{1 + \frac{1}{R} K_m \frac{1}{p} K_m} = \frac{K_m}{R J p + K_m^2} = \frac{1/K_m}{\frac{R J}{K_m^2} p + 1}$$

- 3) Vitesse maximale atteinte à convergence pour une tension d'alimentation maximale de $U_{max} = 12 \text{ V}$:

$$\Omega_{max} = \lim_{t \rightarrow +\infty} \Omega(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p H_m(p) \frac{U_{max}}{p} = \frac{U_{max}}{K_m} = 300 \text{ rad s}^{-1} = 2870 \text{ tr min}^{-1}$$

Cette vitesse conduit à une fréquence d'évènements détectés par le codeur de $30 \times 4 \times 2870/60 = 5730 \text{ Hz} \ll 25 \text{ MHz}$. Le codeur est bien compatible.

La vitesse maximale de l'axe vaut alors $\Omega_{max} k \frac{1}{Z} = 0,32 \text{ tr min}^{-1}$, ce qui est tout d'abord bien supérieur à la vitesse de rotation de la terre et par ailleurs suffisant pour pouvoir pointer vers une nouvelle région du ciel en quelques dizaines de secondes.

- 4) La fonction de transfert globale s'écrit par la formule de Black :

$$FTG(p) = \frac{K_c \cdot K_p \cdot K_h}{(K_m + K_p \cdot K_h \cdot K_c)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R \cdot J}{K_m(K_m + K_p \cdot K_h \cdot K_c)} \cdot p}$$

Le système est précis si pour une consigne en échelon $\Omega_c(p) = \frac{\Omega_0}{p}$ le système converge vers Ω_0 . La valeur à convergence se calcule facilement par le théorème de la valeur finale :

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \Omega(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \Omega(p) = \lim_{p \rightarrow 0} p FTG(p) \frac{\Omega_0}{p} = \frac{K_c K_p K_h \frac{k}{Z}}{K_m + K_p K_h K_c} \Omega_0 \neq \Omega_0$$

Le système n'est donc pas précis.

La FTG étant du premier ordre, il n'y aura aucun dépassement et le temps de réponse à 5 % vaut trois fois la constante de temps. En mettant la FTG sous la forme canonique (en considérant $K_{co} = K_c \frac{Z}{k}$), il apparaît la constante de temps τ :

$$FTG(p) = \frac{K_p K_h K_c}{K_m \left(\frac{R J}{K_m^2} p + 1 \right) + K_p K_h K_c} = \frac{\frac{K_p K_h K_c}{(K_m + K_p K_h K_c)}}{\frac{R J}{K_m(K_m + K_p K_h K_c)} p + 1} = \frac{K}{\tau p + 1}$$

Le temps de réponse à 5 % vaut alors $t_{r5\%} = 3\tau = \frac{3 R J}{K_m(K_m + K_p K_h K_c)} = 2,3 \text{ ms}$, ce qui est extrêmement court pour l'application.

- 6) Avec un correcteur intégrale $C(p) = \frac{1}{p}$, la fonction de transfert en boucle fermée devient (en considérant $K_{co} = K_c \frac{Z}{k}$) :

$$FTG(p) = K_{co} \frac{C(p) K_h H_m(p)}{1 + C(p) K_h H_m(p) K_c} k \frac{1}{Z} = \frac{K_h K_c}{K_m p \left(\frac{R J}{K_m^2} p + 1 \right) + K_h K_c}$$

Le théorème de la valeur finale permet de calculer la valeur à convergence de la réponse indicielle :

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \Omega(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \Omega(p) = \lim_{p \rightarrow 0} p FTG(p) \frac{\Omega_0}{p} = \frac{K_h K_c}{0 + K_h K_c} \Omega_0 = \Omega_0$$

Donc le système est précis cette fois. L'amélioration de la précision par une correction intégrale est très classique et vous pourrez utilement mémoriser cette bonne propriété. Toutefois, il est fort probable que des dépassements apparaissent.