

## Véhicule auto-balancé de type Segway® (d'après Centrale PSI 2005)

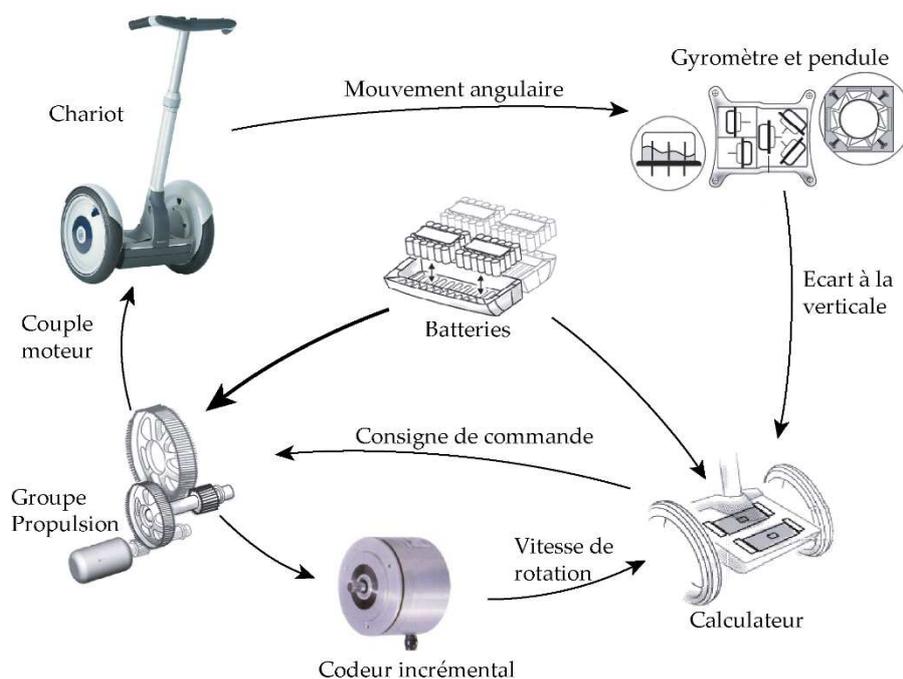


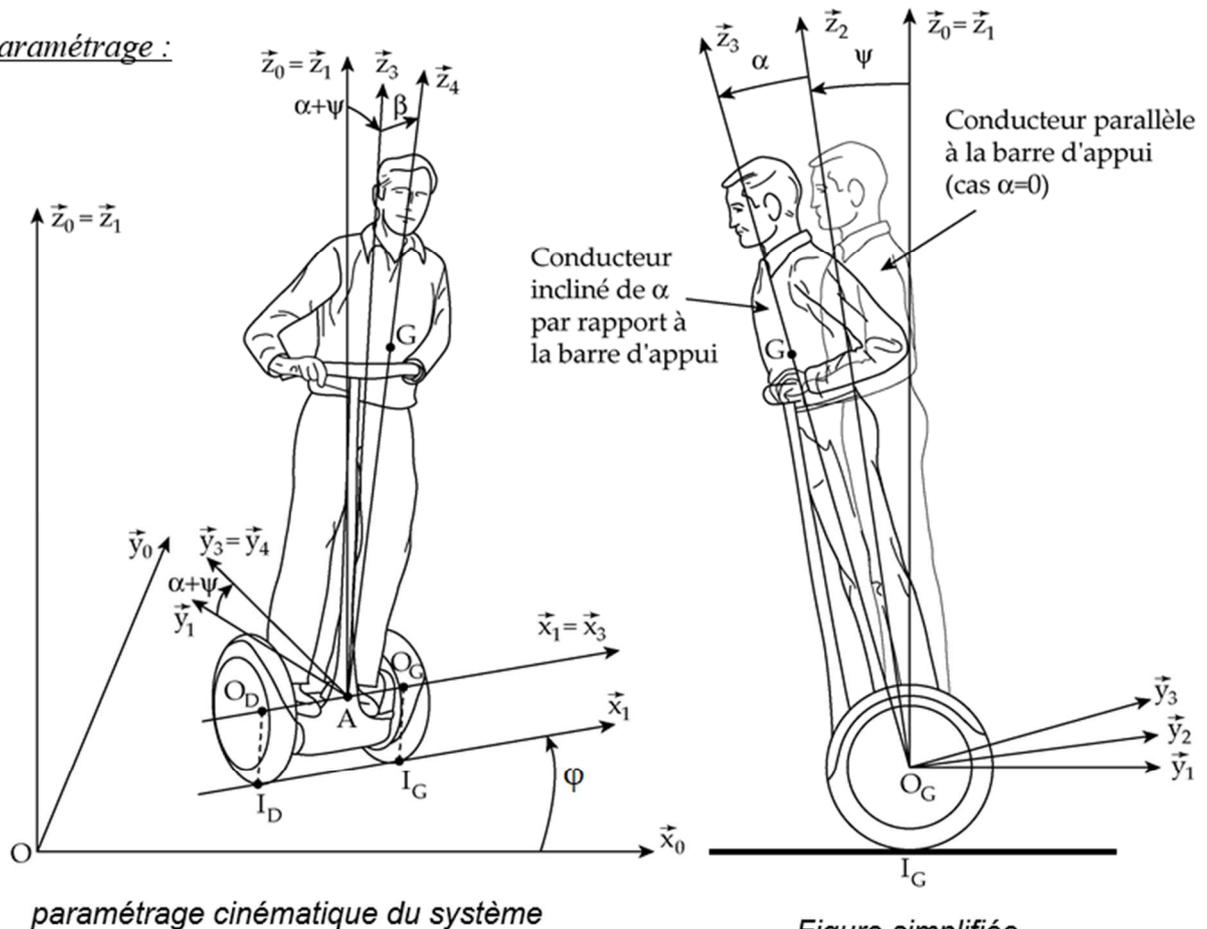
Le support de l'étude est le véhicule auto balancé Segway®. Il s'agit d'un moyen de transport motorisé qui permet de se déplacer en ville. En termes de prestations, il est moins rapide qu'une voiture ou qu'un scooter, plus maniable, plus écologique, moins encombrant et nettement plus moderne.

La conduite du Segway® se fait alors par inclinaison du corps vers l'avant ou vers l'arrière, afin d'accélérer ou freiner le mouvement (comme pour la marche à pied dans laquelle le piéton s'incline vers l'avant pour débiter le mouvement). Les virages à droite et à gauche sont quant à eux commandés par la rotation de la poignée directionnelle située sur la droite du guidon.

La spécificité de ce véhicule est d'avoir deux roues qui ont le même axe de rotation, avec son centre de gravité situé au-dessus de l'axe commun des roues, si bien qu'on se demande comment rester à l'équilibre une fois monté sur la plate-forme. Tout comme le cerveau permet à l'homme de tenir debout sans tomber grâce à l'oreille interne, le système comporte un dispositif d'asservissement d'inclinaison, maintenant la plateforme du véhicule à l'horizontale ou encore la barre d'appui, supposée orthogonale à cette plateforme, à la verticale.

Le Segway® comporte à cet effet des capteurs et des microprocesseurs transmettant des consignes aux deux moteurs électriques équipant les deux roues.



Modèle et paramétrage :

**Objectif :** Vérifier les performances de l'asservissement d'inclinaison par rapport à la verticale afin de répondre aux fonctions *Donner au conducteur une sensation de stabilité et Rester insensible aux perturbations provenant de la route*

Pour une utilisation confortable et sûre, le Segway® doit satisfaire les performances énoncées dans le tableau ci-dessous extrait du Cahier des Charges.

Fonction de Service	Critère	Niveau
FS2 : Donner au conducteur une sensation de stabilité	Temps de réponse de 0 à 5 km/h	1 s maximum
	Dépassement d'inclinaison	<30%
	Inclinaison du châssis par rapport à la verticale	Nulle à convergence $\lim_{t \rightarrow \infty} \psi(t) = 0$
FS3 : Rester insensible aux perturbations provenant de la route	Hauteur de la marche de trottoir franchissable à 5 km/h	5 cm maximum
	Perturbations dues à la route, nature du sol (Pavés, franchissement d'un trottoir, ...)	Plage de fréquences de 0 à 300 Hz

La régulation d'inclinaison du Segway® est réalisée par :

- Un moto-réducteur qui permet de délivrer un couple  $C_m(t) = K_m u(t)$  où  $u(t)$  est une grandeur de commande et  $K_m = 24 N.m.V^{-1}$

- Le système mécanique dont les équations, dans le cas où l'angle  $\alpha(t)$  n'est pas supposé constant, peuvent se mettre sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{V}(t) = \frac{1}{D} \left( B \ddot{\chi}(t) + 2 \frac{C_m(t)}{R} \right) \\ (DA - B^2) \ddot{\chi}(t) = 2 \left( \frac{B}{R} + D \right) C_m(t) + DC \chi(t) \end{cases} \quad \text{où : } \begin{cases} A = 90 \text{ kg.m}^2 \\ B = 75 \text{ kg.m} \\ C = 750 \text{ kg.m}^2 \text{s}^{-2} \text{ et } \chi(t) = \alpha(t) + \psi(t) \\ D = 125 \text{ kg} \\ R = 240 \text{ mm} \end{cases}$$

$\alpha(t)$  est l'angle que le conducteur impose entre lui-même et la barre d'appui du Segway® .

$\psi(t)$  est l'angle que fait le Segway® avec la verticale.

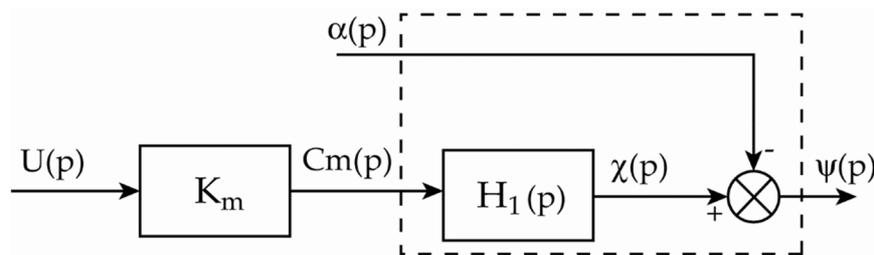
$\chi(t)$  est la somme  $\alpha(t) + \psi(t)$ , c'est à dire l'angle de l'homme avec la verticale.

$V(t)$  est la vitesse du Segway®.

Les conditions initiales sont toutes nulles.

## I- Stabilisation du système

- Q1 - Montrer que** le schéma bloc du système peut se mettre sous la forme présentée ci-dessous en déterminant l'expression littérale de  $H_1(p)$  .



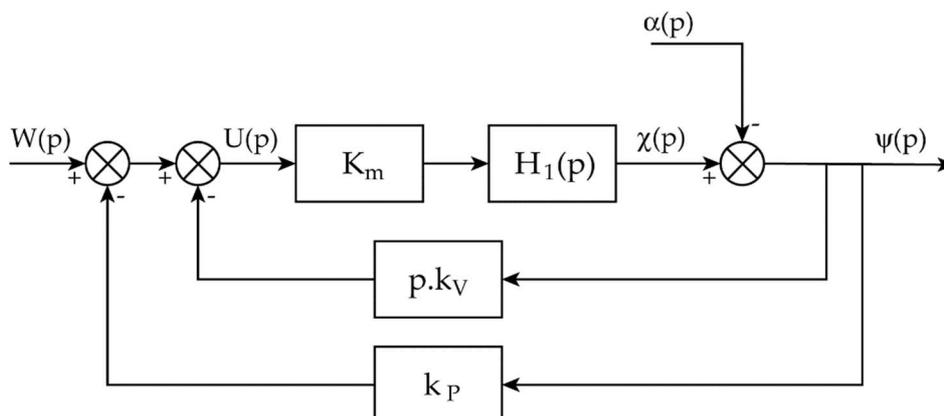
- Q2 - Analyser** la stabilité du système d'entrée  $u(t)$  et de sortie  $\psi(t)$  ( $\alpha = 0$ ) en étudiant la fonction de

transfert  $F_1(p) = \frac{\Psi(p)}{U(p)}$  . Pouvait-on s'attendre à ce résultat (considérations physiques) ?

On note alors  $H_1(p) = \frac{K_1}{\frac{p^2}{\omega_1^2} - 1}$  .

Les valeurs numériques utilisées par la suite seront :  $\omega_1 = 4,1 \text{ rad/s}$  et  $K_s = K_m K_1 = 0,24 \text{ rad V}^{-1}$  .

Afin de stabiliser le système, la grandeur de commande  $U(p)$  est élaborée à partir des mesures de  $\dot{\psi}$  (réalisée par le gyromètre), et de  $\psi$  (réalisée par combinaison de la mesure du gyromètre et du pendule). Le schéma bloc obtenu est celui ci-dessous :



**Q3** - Dans le cas où  $\alpha = 0$ , **déterminer**  $F_2(p) = \frac{\psi(p)}{W(p)}$ , en fonction de  $K_S$ ,  $k_p$ ,  $k_v$  et  $\omega_1$ .

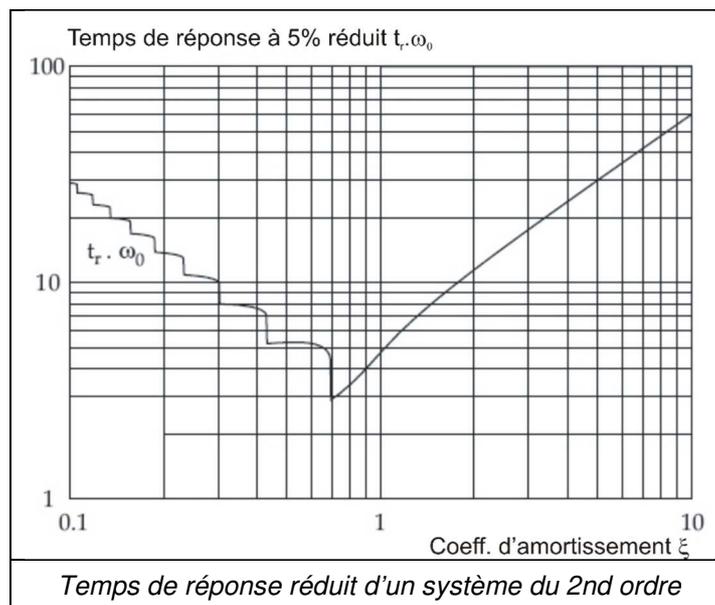
$F_2(p)$  est une fonction de transfert du second ordre pouvant se mettre sous la forme :

$$F_2(p) = \frac{\psi(p)}{W(p)} = \frac{K_2}{1 + \frac{2\xi}{\omega_0}p + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$$

**Q4** - **Déterminer**, en fonction de  $K_S$ ,  $k_p$ ,  $k_v$  et  $\omega_1$  les expressions de  $K_2$ ,  $\xi$ ,  $\omega_0$ .

On choisit une pulsation propre  $\omega_0$  proche de celle du système mécanique :  $\omega_0 = 1,5\omega_1 = 6,15 \text{ rad/s}$ .

**Q5** - A l'aide de l'abaque donné ci-dessous, **déterminer** les valeurs de  $k_v$  et de  $k_p$  telles que le temps de réponse à 5%  $t_r$  soit minimal. **En déduire** le pourcentage de dépassement attendu pour une entrée en échelon.



## II- Asservissement d'inclinaison du chariot

La consigne de la régulation de l'inclinaison  $\psi(t)$  du châssis par rapport à la verticale est notée  $\psi_c(t)$ . On introduit un correcteur de fonction de transfert  $C(p)$  qui élabore le signal  $w(t)$  (de transformée de Laplace  $W(p)$ ) à partir de l'écart  $\varepsilon(t) = \psi_c(t) - \psi(t)$ .

**Q6** - **Compléter** le schéma bloc de l'asservissement, fourni en annexe1, en faisant apparaître la régulation de l'inclinaison.

**Q7** - **Déterminer** la FTBO de cet asservissement.

La régulation d'inclinaison du Segway® consiste à maintenir la consigne  $\psi_c(t)$  nulle. Cette régulation est réalisée, si quelle que soit l'inclinaison  $\alpha(t)$  du conducteur, la sortie  $\psi(t)$  converge vers  $\psi_c(t) = 0$  ici.

Le conducteur agit directement sur la valeur de  $\alpha(t)$  pour accélérer ou décélérer. Pour le système Segway®, conducteur exclu, le paramètre  $\alpha(t)$  peut être considérée comme une perturbation.

On donne :

$$F_3(p) = \frac{\psi(p)}{\alpha(p)} = \frac{-1}{1 + K_m \cdot H_1(p) \cdot (C(p) + k_p + k_v \cdot p)}$$

Un correcteur proportionnel  $C(p) = K_C$  est envisagé.

Un compromis entre la rapidité et la stabilité du système en boucle fermée impose une pulsation de coupure à 0dB en boucle ouverte égale à 10 rad/s.

**Q8** - Le diagramme de Bode en boucle ouverte étant donné en annexe 2 pour  $K_C = 1$ , **déterminer** la valeur de  $K_C$  tel que  $\omega_{BO\ 0dB} = 10\text{rad/s}$ .

**Q9** - **Mettre** la fonction  $F_3(p) = \frac{\psi(p)}{\alpha(p)}$  sous forme canonique et **en déduire** le gain statique en fonction de  $K_C$ .

**Q10** - **Calculer** l'inclinaison  $\psi(t)$  du châssis en régime permanent, lorsque la perturbation  $\alpha(t)$  est un échelon d'amplitude  $\alpha_0$ . Le cahier des charges est-il satisfait ?

Un correcteur proportionnel intégral  $C(p) = K_i \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot p} \right)$  est envisagé.

**Q11** - **Montrer que** ce correcteur permet de satisfaire le cahier des charges vis-à-vis de l'écart en régime permanent pour une perturbation en échelon.

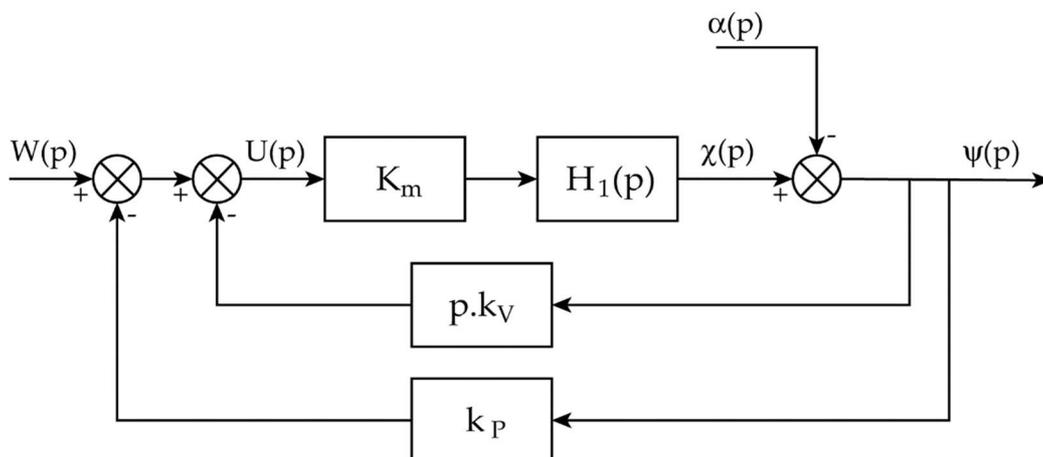
### Vérification graphique des performances attendues

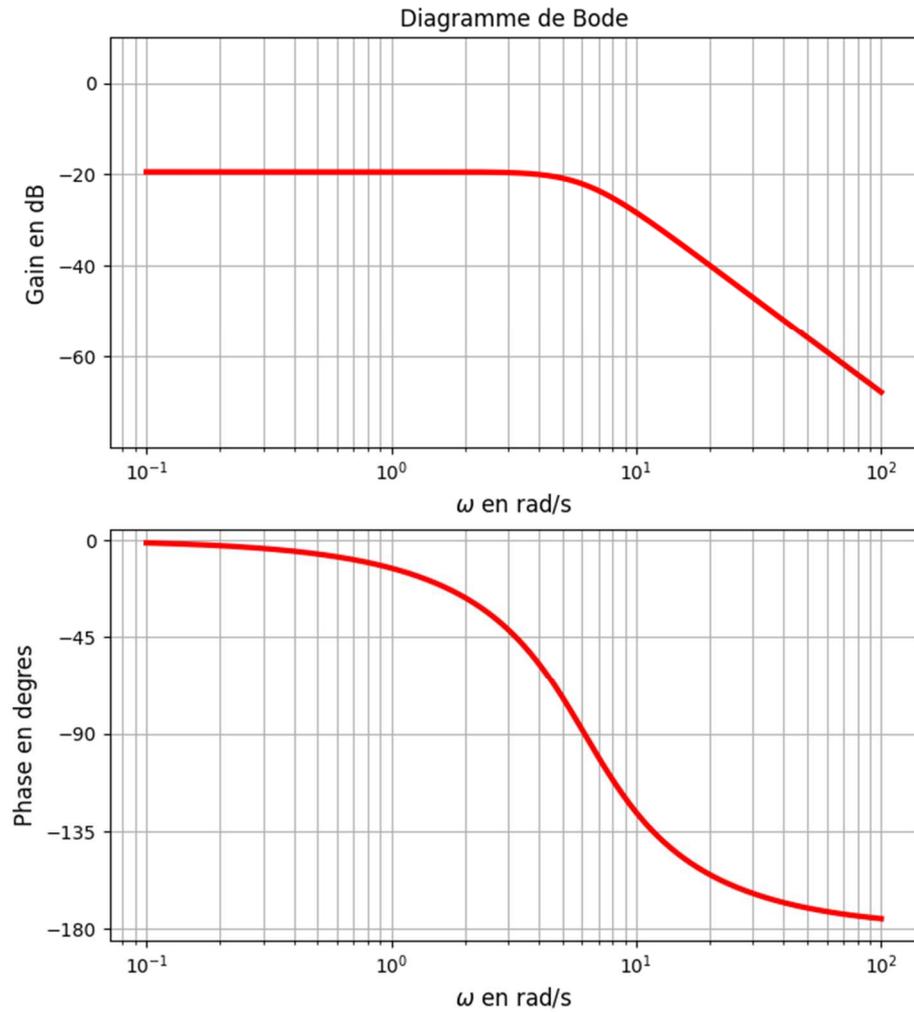
Le modèle de comportement précédent est utilisé en simulation pour vérifier le pré-dimensionnement. Les performances de la correction sont étudiées grâce aux évolutions de  $\chi(t) = \alpha(t) + \psi(t)$ , qui représente l'angle d'inclinaison du conducteur par rapport à la verticale. La consigne  $\alpha(t)$ , imposée par le conducteur, est un échelon d'amplitude  $20^\circ$ .

Après réglages définitifs, l'évolution temporelle est obtenue sur la courbe donnée en annexe 3.

**Q12** - **Conclure** quant au respect des critères de dépassement et de précision associés à la fonction de service FS2. **Justifier** votre réponse par des tracés graphiques sur la figure de l'annexe 3.

Annexe 1- Schéma bloc de l'asservissement



Annexe 2- Diagramme de Bode en Boucle Ouverte pour  $K_c = 1$ Annexe 3- Réponse à une consigne  $\alpha(t)$  en échelon d'amplitude  $20^\circ$ 