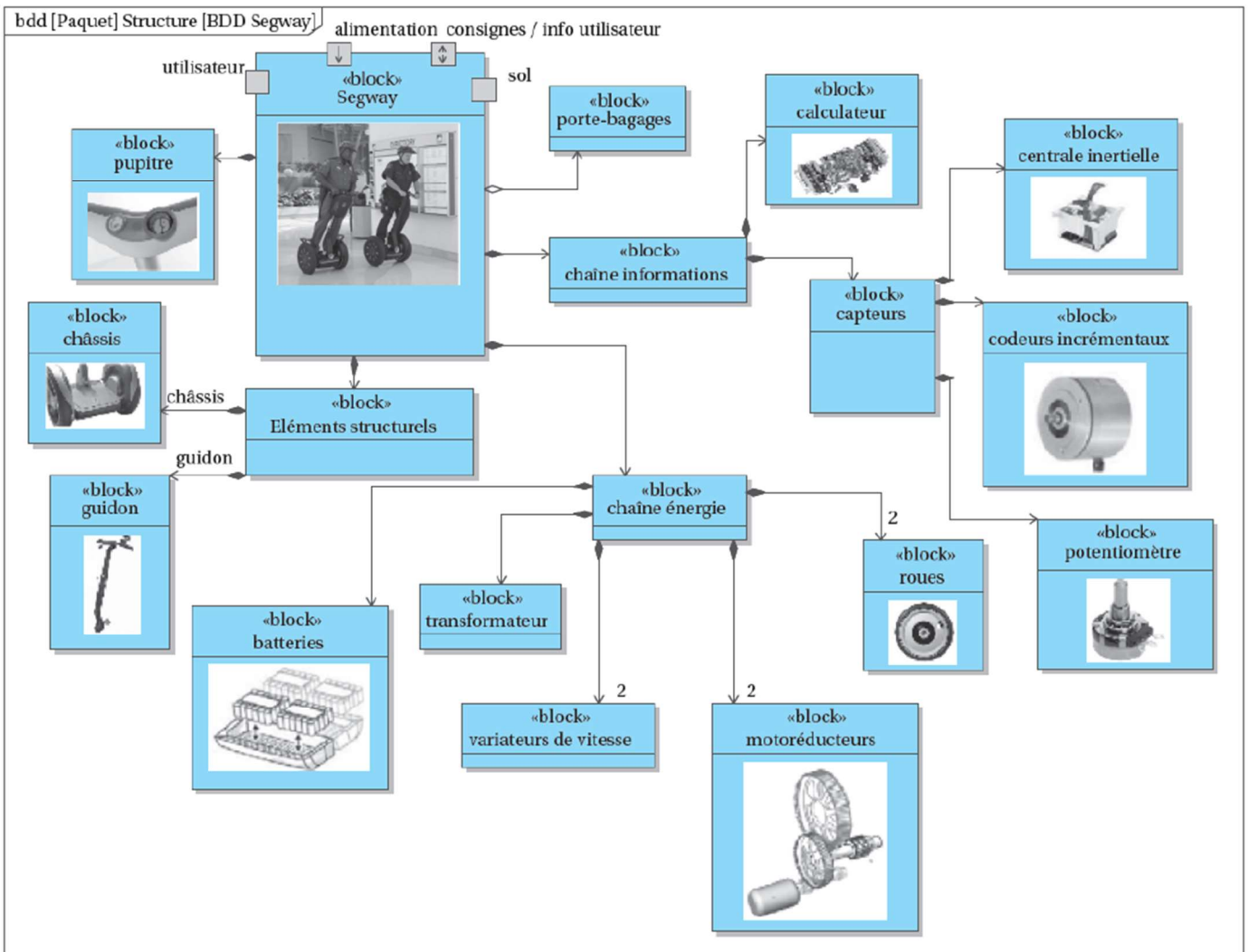
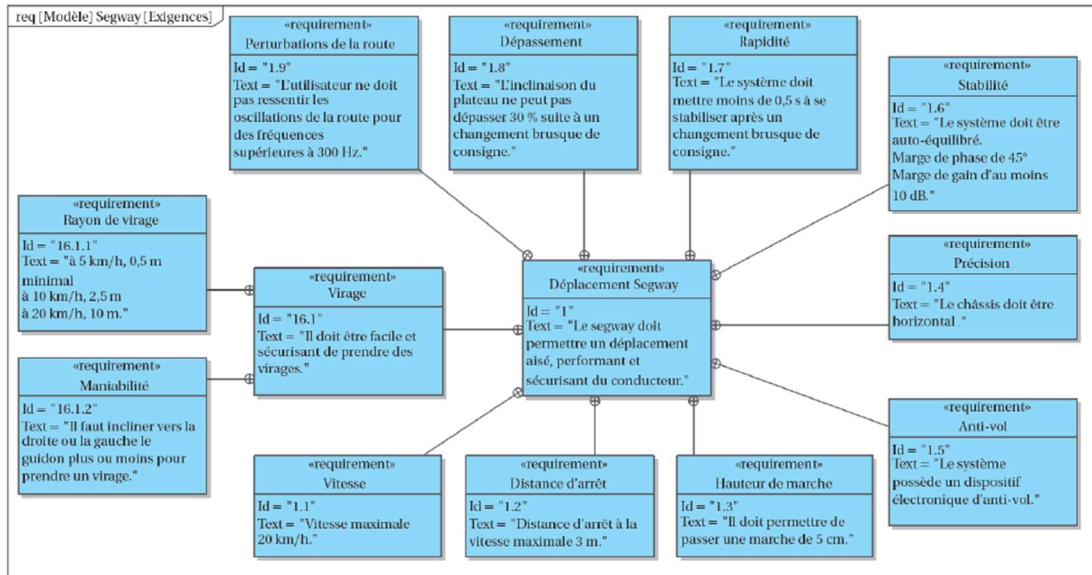




La conduite du Segway® se fait par inclinaison du corps vers l'avant ou vers l'arrière, afin d'accélérer ou freiner le mouvement. Les virages à droite et à gauche sont commandés par la rotation de la poignée directionnelle.

Ce véhicule possède deux roues qui ont le même axe de rotation, avec un centre de gravité situé au-dessus de l'axe commun de ces roues, si bien qu'on se demande comment rester à l'équilibre une fois monté sur sa plate-forme.

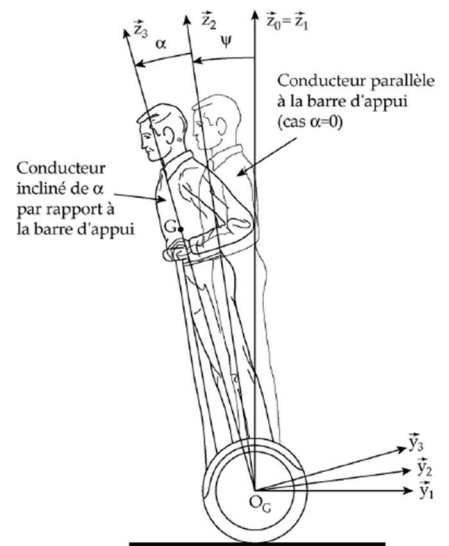
Tout comme l'homme, qui comporte cerveau, membres, oreille interne... lui permettant de tenir debout sans tomber, le Segway® comporte différents éléments, lui permettant de maintenir sa plate-forme à l'horizontale. Nous pouvons retrouver des capteurs (gyromètre, pendule, codeur incrémental) et des microprocesseurs transmettant des commandes aux préactionneurs. Ces derniers alimentent le groupe de propulsion (deux motoréducteurs électriques équipant les deux roues).



**Objectif :** La difficulté essentielle de ce système est d'être capable de maintenir le chariot stable tout en ayant de bonnes performances. L'objectif du travail proposé est de vérifier qu'un asservissement correctement réglé permet de respecter les critères de stabilité, précision et rapidité définis dans le diagramme des exigences.

La chaîne de puissance permettant de réguler l'inclinaison  $\psi(t)$  du SEGWAY®, est réalisée par :

- un ensemble **amplificateur et motoréducteur** qui permet de délivrer un couple  $C_m(t)$  proportionnel à  $u(t)$ , tension de commande de l'amplificateur
- l'ensemble **chariot et conducteur**. Les équations du comportement dynamique dépendent de l'angle  $\beta(t) = \psi(t) + \alpha(t)$  où :
  - $\psi(t)$  est l'inclinaison du châssis par rapport à la verticale ;
  - $\alpha(t)$  est l'inclinaison du conducteur par rapport au guidon ;
  - $\beta(t)$  est l'inclinaison du conducteur par rapport à la verticale.



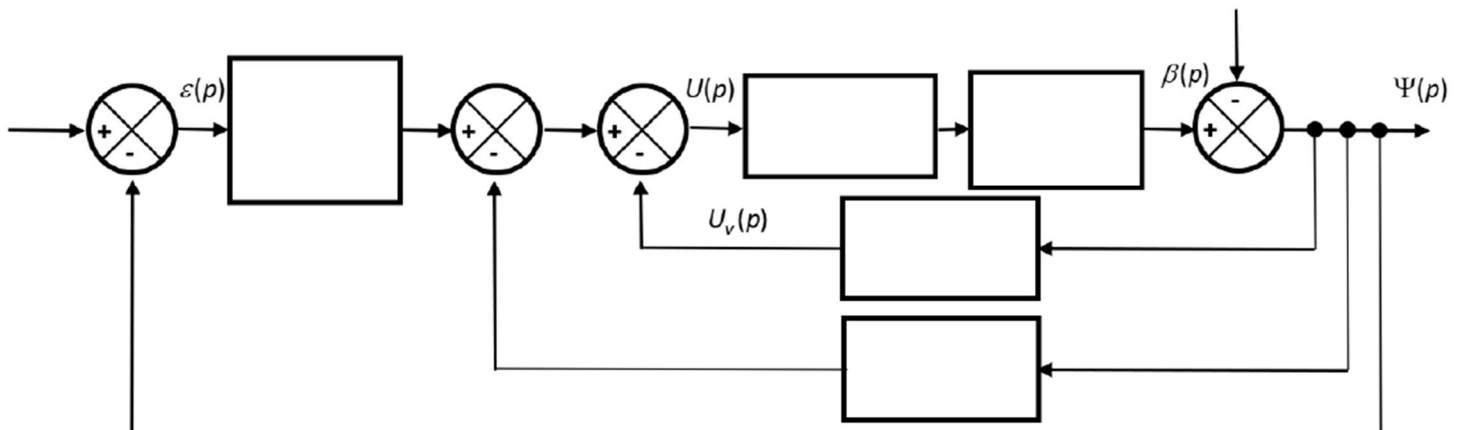
Afin de stabiliser le système, l'unité de commande comprend :

- un **comparateur** qui élabore une tension image de l'erreur (ici l'erreur est identique à l'image de l'erreur)  $\varepsilon(t) = \psi_c(t) - \psi(t)$  où :
  - $\psi(t)$  est l'inclinaison du châssis par rapport à la verticale ;
  - $\psi_c(t)$  est la position angulaire de consigne de la plate-forme.
- un **correcteur** qui adapte l'image de l'erreur pour commander le système avec une tension  $u_{cor}(t)$
- des soustracteurs qui élaborent la **tension de commande**  $u(t)$  de amplificateur à partir de :
  - $u_v(t)$ , tension proportionnelle à la variation de l'angle  $\psi(t)$  obtenue par un **gyromètre** ;
  - $u_p(t)$ , tension proportionnelle à la position angulaire  $\psi(t)$  obtenue par un **pendule**.

Les équations des modèles de connaissance sont :

- correcteur: fonction de transfert  $C(p)$
- amplificateur et motoréducteur : modèle proportionnel de gain statique  $K_m$
- chariot et conducteur :  $\frac{1}{\omega_1^2} \frac{d^2 \beta(t)}{dt^2} = K_1 C_m(t) + \beta(t)$  avec  $\omega_1$ ,  $K_1$  des constantes positives, et  $\beta(t) = \psi(t) + \alpha(t)$
- gyromètre :  $u_v(t) = K_v \frac{d\psi(t)}{dt}$
- pendule : modèle proportionnel de gain statique  $K_p$

1. Compléter le schéma-bloc de l'asservissement d'inclinaison. Pour cela, indiquer le nom des constituants sous les blocs, les fonctions de transfert à l'intérieur des blocs, ainsi que les grandeurs manquantes en entrée et en sortie des blocs et leur unité.



- Justifier que l'ensemble (chariot + conducteur) seul est instable.
- Déterminer en fonction des paramètres  $K_m, K_1, \omega_1, K_v$  et  $K_p$ , la fonction de transfert  $F(p)$  telle que

$$F(p) = \frac{\psi(p)|_{\alpha(p)=0}}{U_{cor}(p)}.$$

Une application numérique donne :  $F(p) = \frac{0,12}{1 + 0,23p + 0,026p^2}.$

On a  $H_{BO}(p) = \frac{\psi(p)|_{\alpha(p)=0}}{\varepsilon(p)} = C(p)F(p).$

On choisit un correcteur proportionnel  $C(p) = K_c.$

- Déterminer la valeur à prendre pour  $K_c$  afin de respecter le cahier des charges vis-à-vis de la marge de phase.
- Déterminer la marge de gain en fonction de  $K_c.$

Afin d'assurer l'asservissement, la régulation d'inclinaison du Segway® délivre une consigne  $\psi_c(t)$  nulle. Cette régulation est satisfaisante si, quelle que soit l'inclinaison  $\alpha(t)$  du conducteur, la sortie  $\psi(t)$  converge vers  $\psi_c(t)$ , de valeur nulle ici. Le paramètre  $\alpha(t)$  peut donc être considéré comme une perturbation.

- Déterminer la fonction de transfert  $H_{regul}(p) = \frac{\psi(p)|_{\psi_c(p)=0}}{\alpha(p)}.$
- Déterminer l'expression de l'inclinaison  $\psi(+\infty)$  du châssis en régime permanent, lorsque la perturbation  $\alpha(t)$  est un échelon d'amplitude  $\alpha_0 = 20^\circ$  pour le correcteur proportionnel  $K_c$  défini précédemment. Le cahier des charges est-il satisfait ?

On utilise alors un correcteur proportionnel intégral de la forme  $C(p) = K_i \left( \frac{1 + T_i p}{T_i p} \right)$  (le réglage d'un tel correcteur sera vu en seconde année) avec  $K_i = 31,7 \text{ V/rad}$  et  $T_i = 0,93 \text{ s}.$

Après calcul de la nouvelle fonction de transfert, on obtient :

$$H_{regul}(p) = \frac{\psi(p)|_{\psi_c(p)=0}}{\alpha(p)} = \frac{-1}{1 - \underbrace{\left( -K_v p - K_p - K_i \left( \frac{1 + T_i p}{T_i p} \right) \right)}_{\text{blocs en parallèle}} \times K_m \frac{K_1}{\left( \frac{p^2}{\omega_1^2} - 1 \right)}} = \frac{-T_i p \left( \frac{p^2}{\omega_1^2} - 1 \right)}{T_i p \left( \frac{p^2}{\omega_1^2} - 1 \right) + \left( (K_v p + K_p) T_i p + K_i (1 + T_i p) \right) K_m K_1}$$

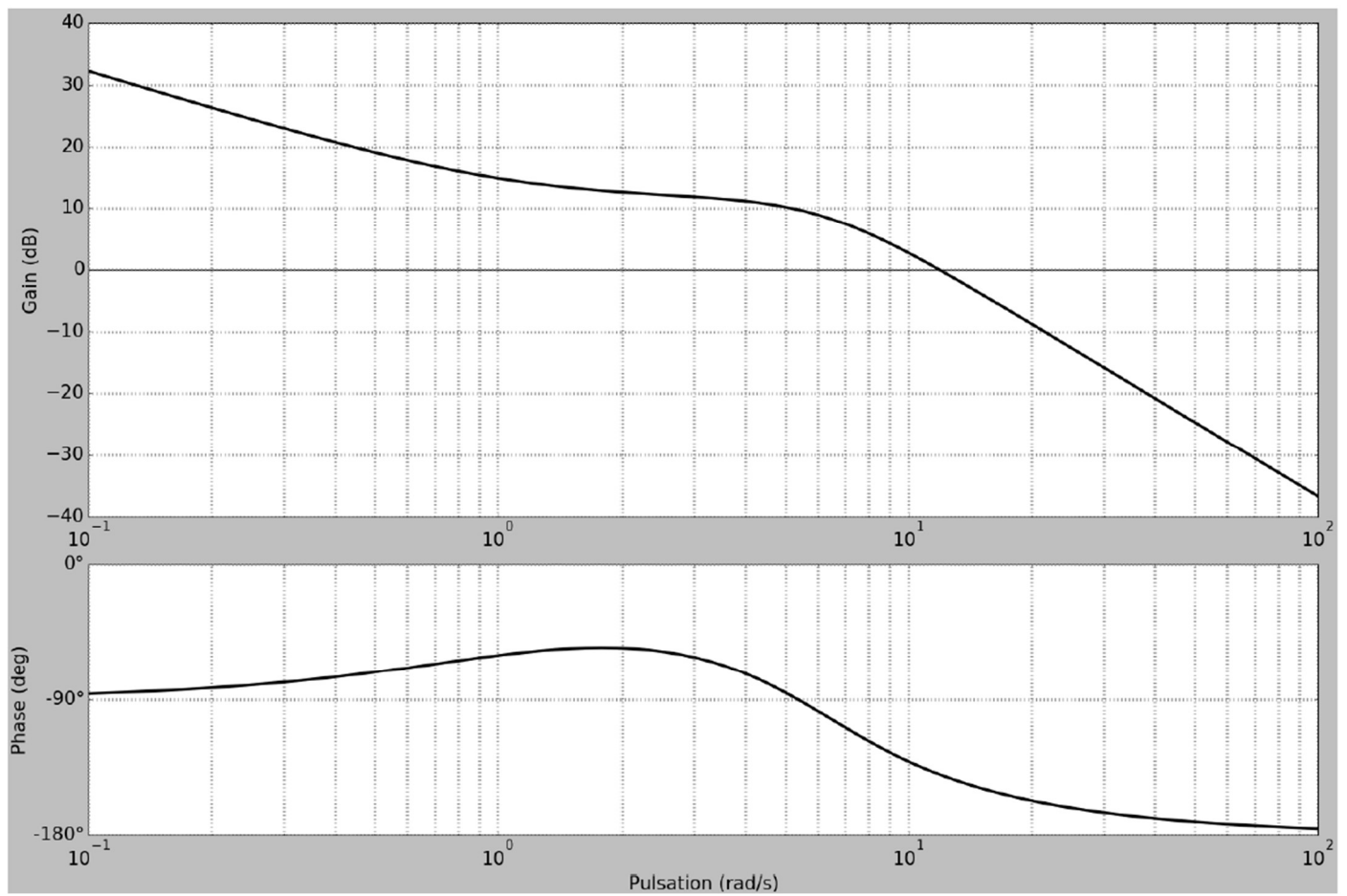
$$\Rightarrow H_{regul}(p) = \frac{\psi(p)|_{\psi_c(p)=0}}{\alpha(p)} = \frac{T_i p \left( 1 - \frac{p^2}{\omega_1^2} \right)}{(K_i K_m K_1) + T_i \left[ -1 + (K_i + K_p) K_m K_1 \right] p + K_v T_i K_m K_1 p^2 + \frac{T_i}{\omega_1^2} p^3}$$

- Justifier que ce correcteur améliore la précision.

Les diagrammes de Bode de la nouvelle FTBO sont donnés sur la figure suivante.

- À l'aide des valeurs numériques précédentes, tracer les diagrammes asymptotiques.





10. Vérifier que la stabilité est toujours respectée avec ce réglage de correcteur.