

Le Système de Récupération de l'Énergie Cinétique (SREC)

Tous documents interdits – Calculatrice autorisée – Durée : 2h

L'augmentation de performances est un souci perpétuel dans le monde de la course automobile. L'une des pistes récentes, en cohérence avec les besoins actuels d'économie d'énergie, est de récupérer l'énergie cinétique de la voiture lors de phases de freinages pour réutiliser cette énergie lors de phases d'accélération.



Ainsi en 2009, la réglementation de la Formule 1 autorisa ce type de système en course. Le système ne devait alors pas délivrer une énergie supérieure à $E_{MAX} = 400 \text{ kJ}$ par tour et avec une puissance inférieure à $P_{MAX} = 60 \text{ kW}$ (équivalente à environ 80 chevaux).

Le SREC est apparu en Formule 1 au cours de la saison 2009. Il équipe en 2011 des voitures conventionnelles hybrides telles que la Mercedes Classe S ou la Porsche 911 GT3-R Hybride.

Le système élaboré par l'écurie Williams en 2009 est basé sur le stockage de l'énergie cinétique par volant d'inertie. Lors d'un freinage, une partie de l'énergie cinétique du véhicule est utilisée pour entraîner en rotation un volant d'inertie. Lors d'une phase d'accélération du véhicule et sur ordre du pilote, le volant d'inertie est alors lié aux roues et contribue avec le moteur thermique classique à l'accélération de la voiture.

Le système est composé d'un :

- premier moteur à courant continu M1 monté sur l'essieu arrière de la voiture,
- second moteur à courant continu M2 monté sur la boîte de vitesses,
- volant d'inertie,
- variateur de vitesse toroïdal
- système de commande et de contrôle. (voir Figure 1).

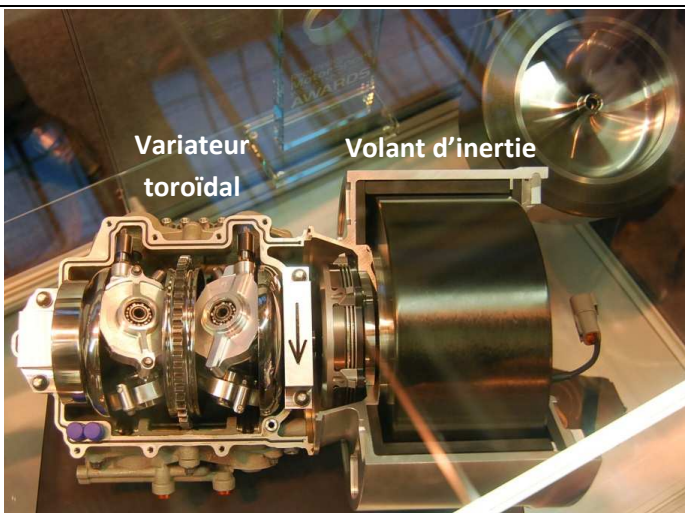
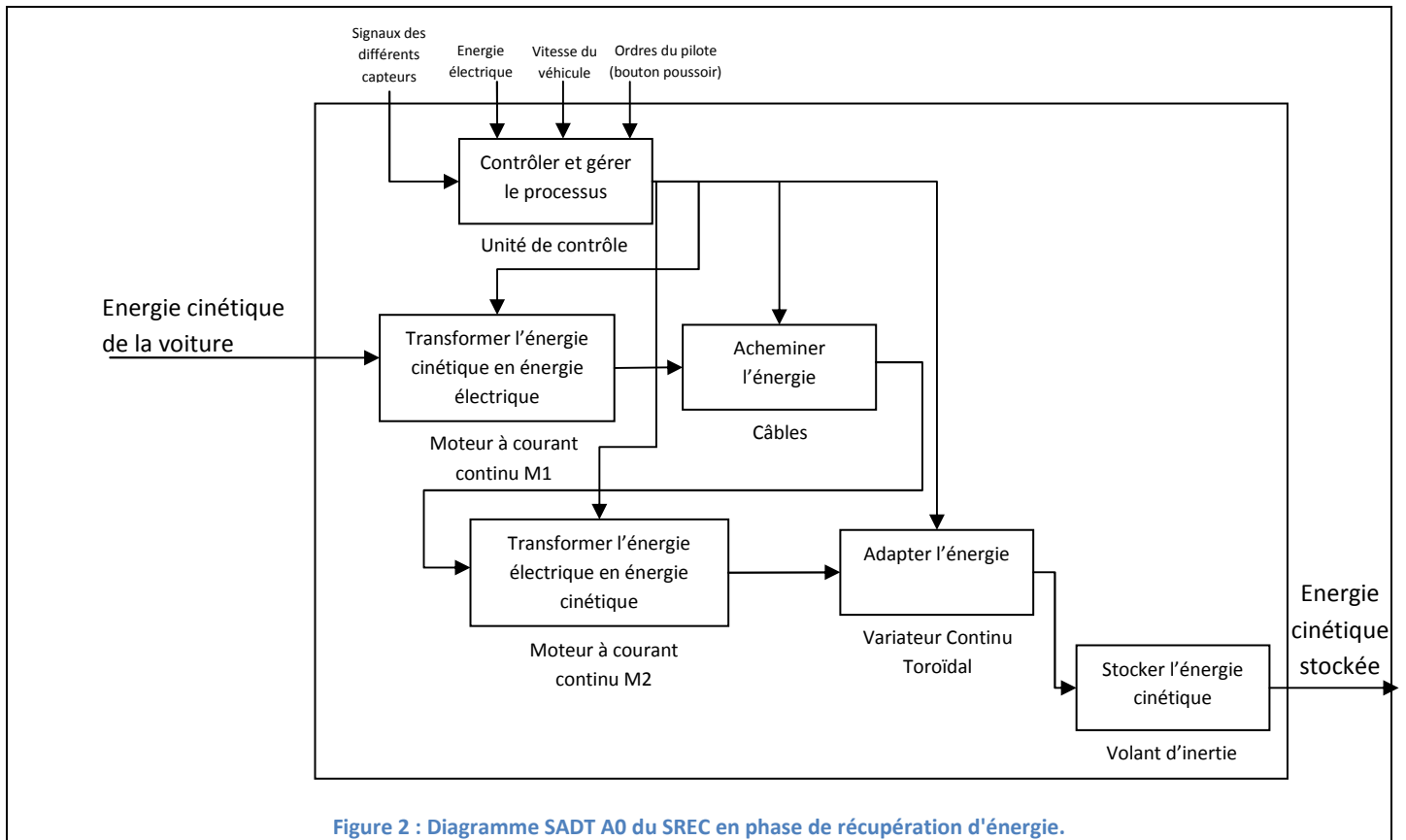


Figure 1 : Photo du SREC Williams / Torotrack

Il fonctionne essentiellement en deux phases :

- Phase de récupération d'énergie (voir Figure 2):

Lors d'un freinage, les roues arrière font tourner un moteur électrique M1 fonctionnant en génératrice. L'énergie électrique produite est utilisée pour alimenter le moteur électrique M2 qui lance le volant d'inertie à une vitesse pouvant aller jusqu'à 60 000 tr/min. L'énergie cinétique du véhicule est ainsi stockée sous forme d'énergie cinétique de rotation (volant d'inertie en rotation autour de son axe). Le volant d'inertie tourne en roue libre autour de son axe en attendant la phase de restitution demandée par le pilote.



- Phase de restitution d'énergie :

Lors de phases d'accélération et sur commande du pilote, l'énergie cinétique stockée dans le volant d'inertie est transférée au moteur à courant continu M2 qui transforme cette énergie mécanique en énergie électrique (fonctionnement en génératrice). Le moteur électrique M2, ainsi alimenté, communique de l'énergie mécanique aux roues.

On note V la vitesse de la voiture, \dot{V} sa dérivée temporelle.

Partie 1 : Analyse du système

1. Réaliser sur votre copie le diagramme SADT A-0 du système SREC en phase de restitution d'énergie.

Partie 2 : Estimation des performances globales du système en fonction de la réglementation

On note $M = 600 \text{ kg}$ la masse d'une Formule 1.

2. Déterminer l'énergie cinétique récupérable E_{CR} lors d'un freinage de 240 km/h à 80km/h. Effectuer l'application numérique. Comparer le résultat à E_{MAX} et conclure.

Le volant d'inertie (voir Figure 1) est composé d'une âme en acier et d'un cylindre en fibre de carbone, dont la masse volumique est notée $\rho_c = 2240 \text{ kg} / \text{m}^3$.

On rappelle que le moment d'inertie autour de son axe d'un cylindre de masse m et de rayon r est $m \frac{r^2}{2}$.

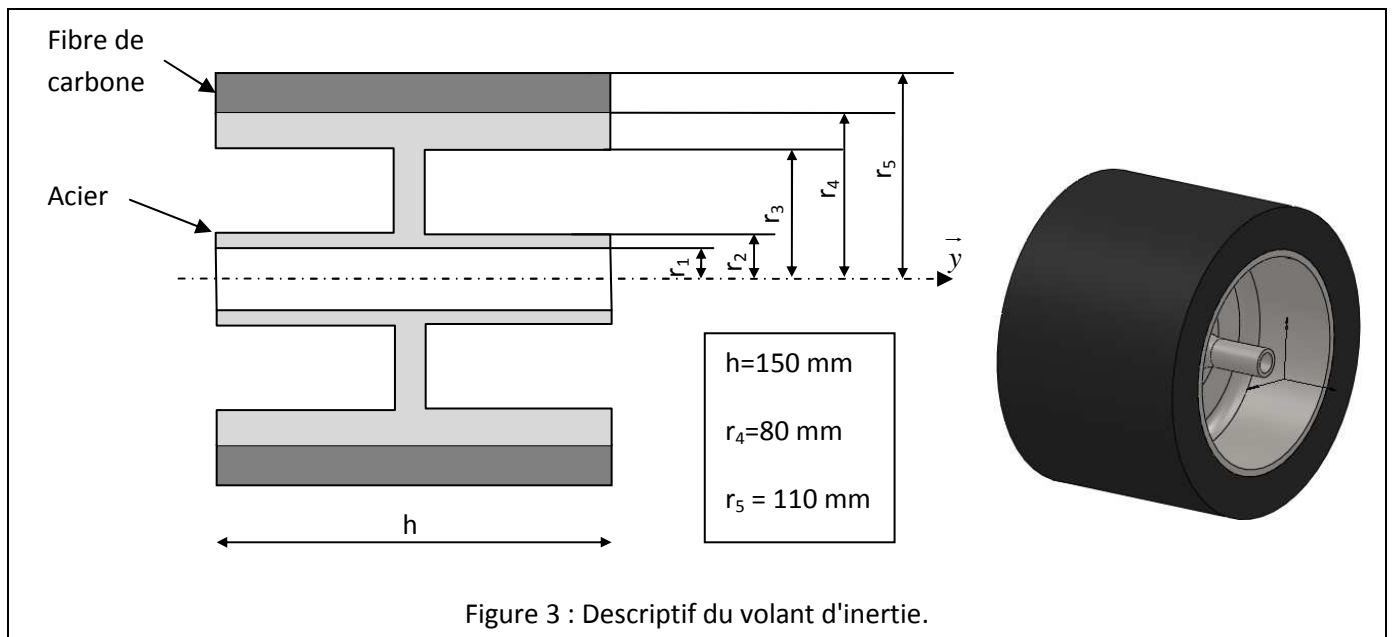


Figure 3 : Descriptif du volant d'inertie.

- Déterminer le moment d'inertie J_c uniquement de la partie en fibres de carbone du volant d'inertie autour de son axe. Effectuer l'application numérique.

Le moment d'inertie de l'ensemble des deux parties (en acier et en fibre de carbone) est de $J = 0,0776 \text{ kg.m}^2$.

- Justifier la forme du volant d'inertie.
- Déterminer la vitesse de rotation du volant d'inertie ω_v lorsque ce dernier a emmagasiné l'énergie maximale définie par le règlement E_{MAX} . Effectuer l'application numérique et mettre le résultat en rad/s puis en tr/min.

On considère maintenant une Formule 1 en mouvement de translation rectiligne par rapport à la Terre se déplaçant à une vitesse V (un référentiel attaché à la Terre est supposé Galiléen).

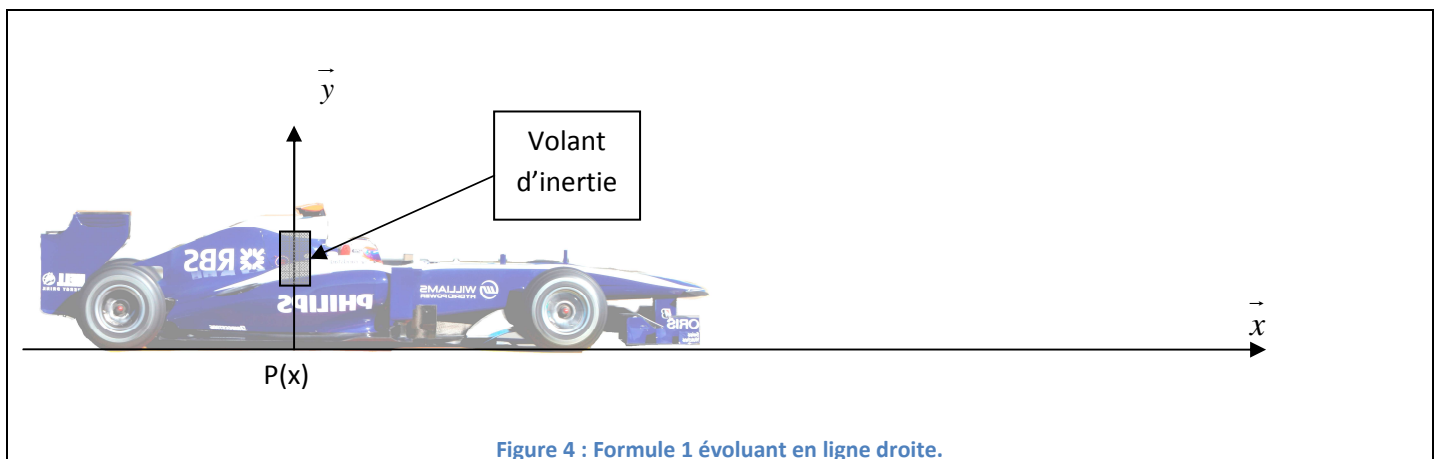


Figure 4 : Formule 1 évoluant en ligne droite.

On néglige l'inertie des pièces tournantes autre que le volant d'inertie. La Formule 1 est donc constituée par :

- un corps de masse M en translation rectiligne ;

- le volant d'inertie tournant à une vitesse ω_v autour de l'axe (P, \vec{y}) (voir Figure 4).

On néglige la constante de temps électrique des moteurs à courant continu, ce qui fait que le moteur et le volant d'inertie seront considérés comme physiquement liés.

La voiture est soumise :

- A l'action de son moteur. Le moteur exerce un couple moteur C_m sur l'arbre moteur tournant à une vitesse

$$\omega_m : \{T_{m \rightarrow BV}\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_{m \rightarrow BV} = \vec{0} \\ \vec{M}_{O,m \rightarrow BV} = C_m \vec{z} \end{array} \right\}_O$$

- A l'action de la route. On supposera que les roues roulent sans glisser sur la route ;

- A l'action de résistance de l'air de la forme $\vec{R}_{air \rightarrow F1} = -kV^2 \vec{x}$ tel que $\{T_{air \rightarrow F1}\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_{air \rightarrow F1} = -kV^2 \vec{x} \\ \vec{M}_{I,air \rightarrow F1} = \vec{0} \end{array} \right\}_I$.

On note :

- $R = \frac{\omega_v}{\omega_m}$ le rapport de vitesse du moteur par rapport au volant d'inertie (variable) ;
- $R_2 = \frac{\omega_m}{V}$ le rapport de vitesse de la voiture par rapport à la vitesse de rotation de l'arbre moteur (constant dans notre étude).

On considérera les liaisons entre le volant d'inertie et le moteur comme parfaites.

6. Par application du théorème de l'énergie cinétique au véhicule en phase de restitution d'énergie, déterminer une relation entre la vitesse V , le couple moteur C_m , la vitesse de rotation du volant d'inertie ω_v , le rapport R et les constantes du problème.
7. Exprimer le rapport R en fonction de P_{MAX} , de $\dot{\omega}_v$, de V et d'une constante à déterminer en fonction des constantes du problème.
8. En déduire l'utilité d'un réducteur à rapport continu.

La Figure 5 compare, pour une voiture équipée du système SREC et une voiture non équipée, la distance parcourue et la vitesse atteinte en fonction du temps.

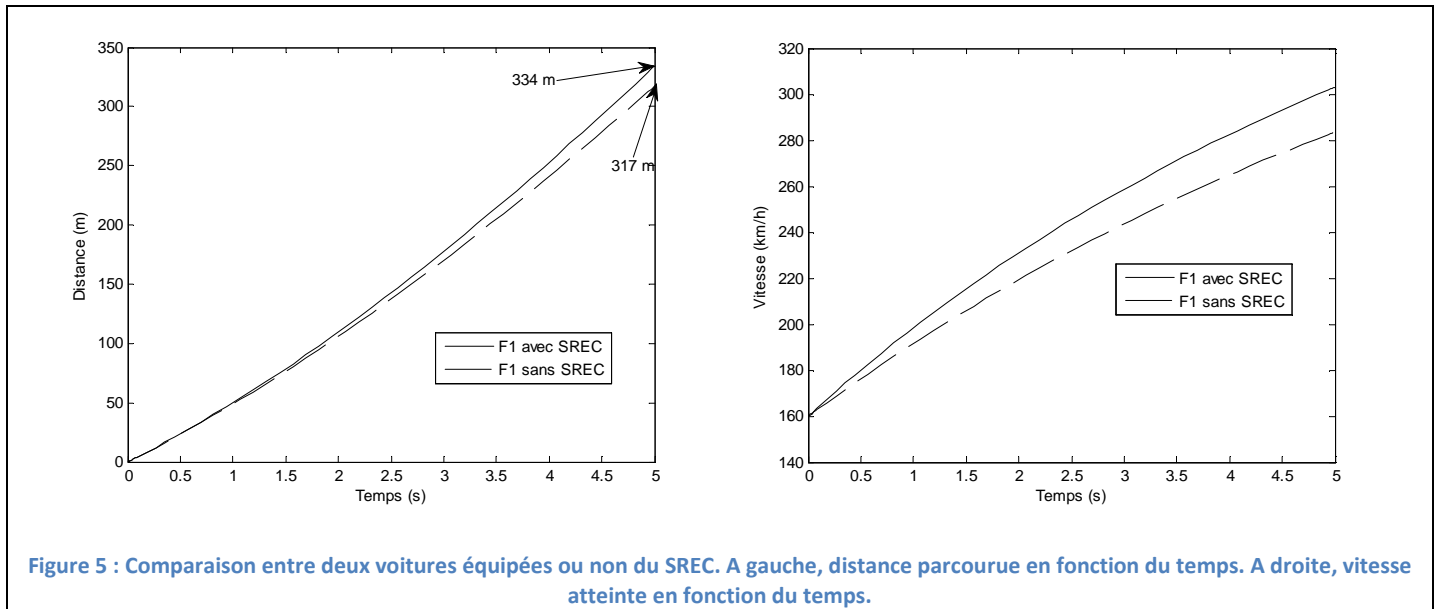


Figure 5 : Comparaison entre deux voitures équipées ou non du SREC. A gauche, distance parcourue en fonction du temps. A droite, vitesse atteinte en fonction du temps.

9. Conclure sur l'utilité du SREC notamment lors d'un dépassement.

Partie 3 : Vérification des performances du variateur toroïdal

Nous avons montré précédemment que la variation de vitesse devait être continue. L'objectif de la présente étude est de valider que la solution retenue sous la forme d'un variateur toroïdal convient bien.

Le variateur est constitué de deux solides V et S en rotation autour de l'axe (O, \vec{x}) aux vitesses respectives ω_V et ω_S . Le solide V est lié au volant tandis que le solide S comporte un pignon engrenant sur l'essieu arrière du véhicule. Deux galets mobiles en rotation autour de l'axe (K, \vec{y}_1) assurent la transmission du mouvement entre V et S. Ainsi :

- V et le bâti sont en liaison pivot d'axe (O, \vec{x})
- S et le bâti sont en liaison pivot d'axe (O, \vec{x})
- 1 et le bâti sont en liaison pivot d'axe (K, \vec{y}_1)
- Le réglage du rapport de réduction se fait par une modification de l'inclinaison des galets θ .

Les surfaces creusées dans les pièces V et S sont des tores, ainsi que les galets 1.

On notera $IJ = 2L$ et $IK = KJ = L$, $\vec{OK} = a\vec{x} + b\vec{y}$.

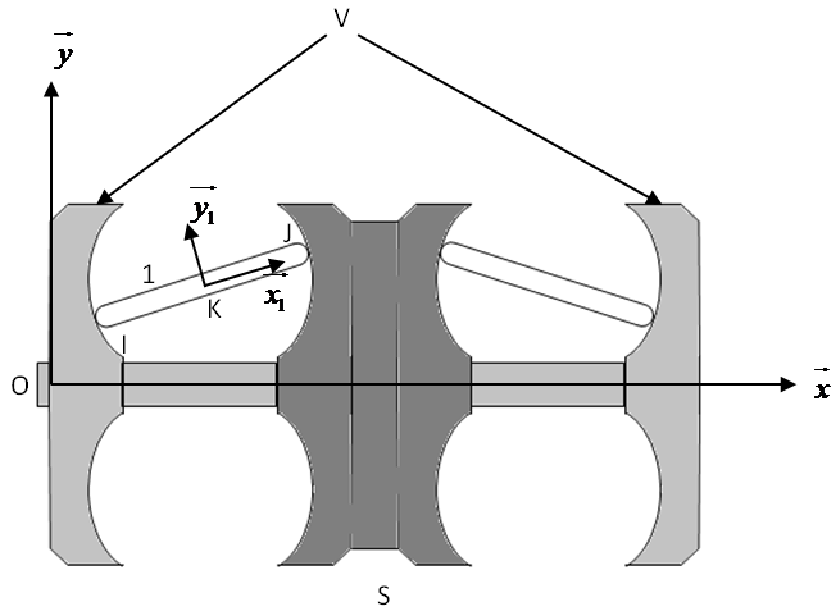
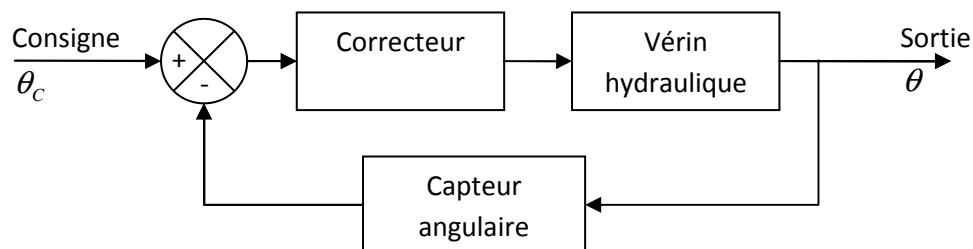


Figure 6 : Fonctionnement du réducteur toroïdal

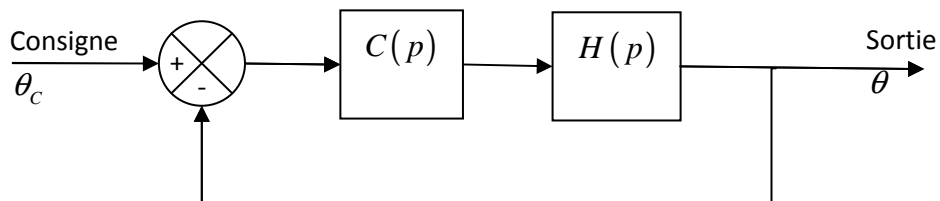
10. Déterminer $\overrightarrow{\Omega}_{V/0}$ vecteur vitesse de rotation de V par rapport au châssis.
11. Déterminer $\overrightarrow{V}_{I,V/0}$ vecteur vitesse du point I dans le mouvement de V par rapport à 0.
12. Déterminer $\overrightarrow{V}_{I,1/0}$ vecteur vitesse du point I dans le mouvement de 1 par rapport à 0.
13. Déterminer $\overrightarrow{V}_{K,1/0}$ vecteur vitesse du point K dans le mouvement de 1 par rapport à 0.
14. Déterminer $\overrightarrow{V}_{J,1/0}$ vecteur vitesse du point J dans le mouvement de 1 par rapport à 0.
15. Déterminer $\overrightarrow{V}_{J,S/0}$ vecteur vitesse du point J dans le mouvement de S par rapport à 0.
16. En déduire $R' = \frac{\omega_S}{\omega_V}$ le rapport de transmission en fonction de θ et des dimensions du réducteur.

Partie 4 : Asservissement du rapport du réducteur toroïdal

On a montré à la question 7 que le rapport de réduction du variateur toroïdal devait suivre une certaine loi. Il est donc nécessaire d'asservir cette valeur. On a montré à la question 16 que cette valeur était liée au paramètre θ . Il convient donc d'asservir l'angle θ en fonction du temps. Les actionneurs choisis pour agir sur θ sont des vérins hydrauliques. Le schéma bloc du système peut donc être mis sous la forme suivante :



Ce schéma bloc peut se mettre sous la forme suivante :



Pour cet asservissement, le cahier des charges est le suivant :

Critère	Niveau
Stabilité	Marge de phase supérieure à 45°.
Précision	Erreur statique nulle
Rapidité	Pulsation à 0dB égale à 40 rad/s

On donne Figure 7 un résultat d'essai d'analyse harmonique du système. On représente ainsi le diagramme de Bode en gain et phase de la fonction de transfert $H(p)$.

On donne Figure 8 la réponse indicielle de $H(p)$.

17. Proposer une fonction de transfert pour $H(p)$ et en déterminer numériquement ses paramètres.

18. Déterminer les marges de stabilité pour le système non corrigé.

On propose un correcteur du type $C(p) = \frac{K}{p} \frac{1+aT.p}{1+T.p}$ avec $a > 1$.

19. Justifier l'emploi de ce correcteur et rappeler le diagramme de Bode de la fonction $\frac{1+aT.p}{1+T.p}$ ($a > 1$).

On donne Figure 9 le diagramme de Bode de la fonction $\frac{1}{p} H(p)$.

20. Déterminer les paramètres de ce correcteur a , T et K :

- On choisira a de manière à ce que le maximum de phase soit apporté pour une pulsation de 40 rad/s
- On choisira T pour que la pulsation d'apport maximum de phase soit de 40 rad/s.
- On choisira K pour que la pulsation à 0 dB soit effectivement 40 rad/s.

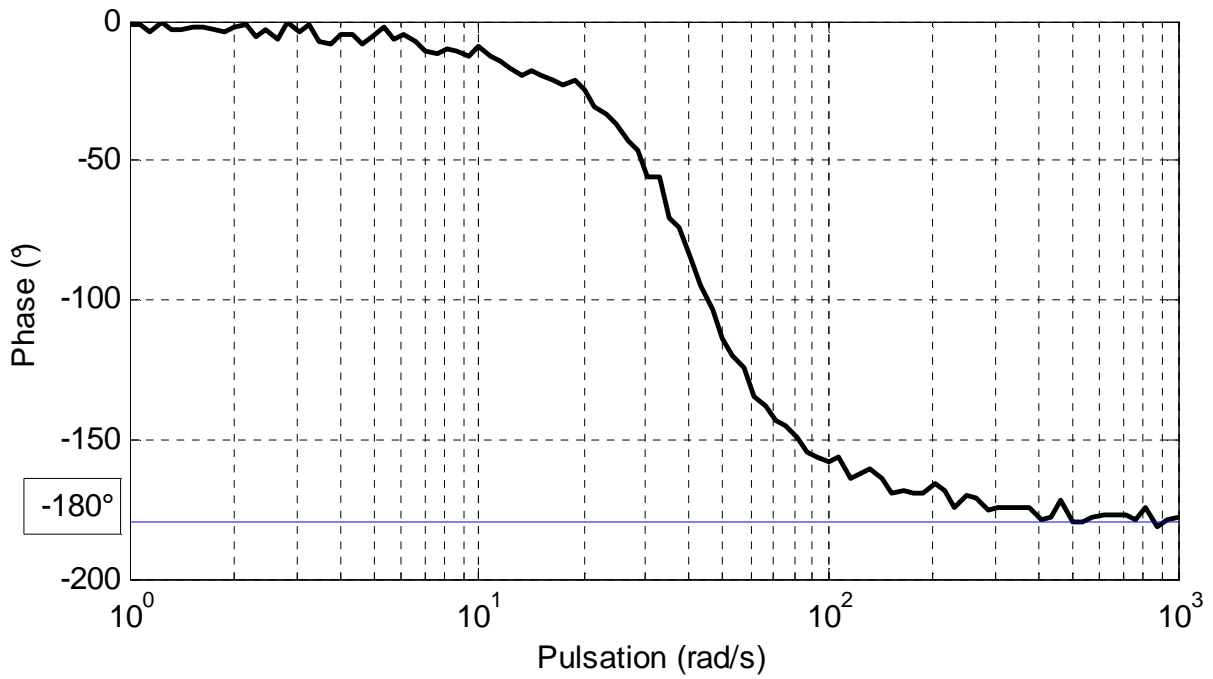
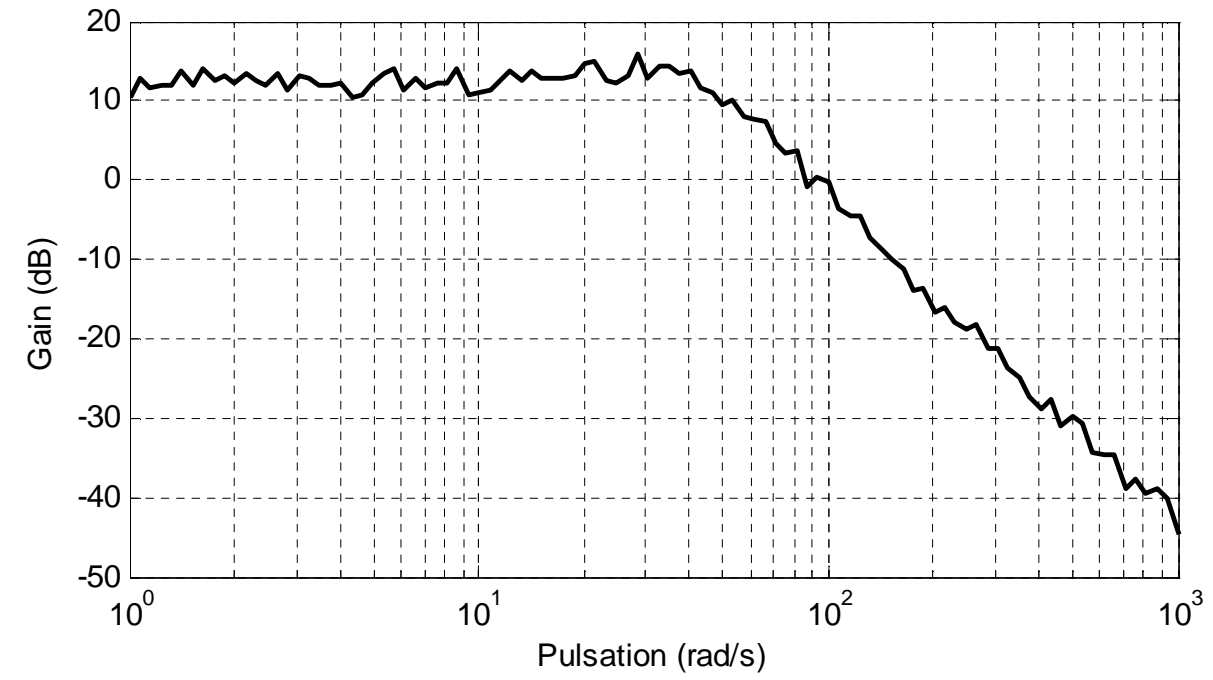


Figure 7 : Essai en boucle ouverte du système.

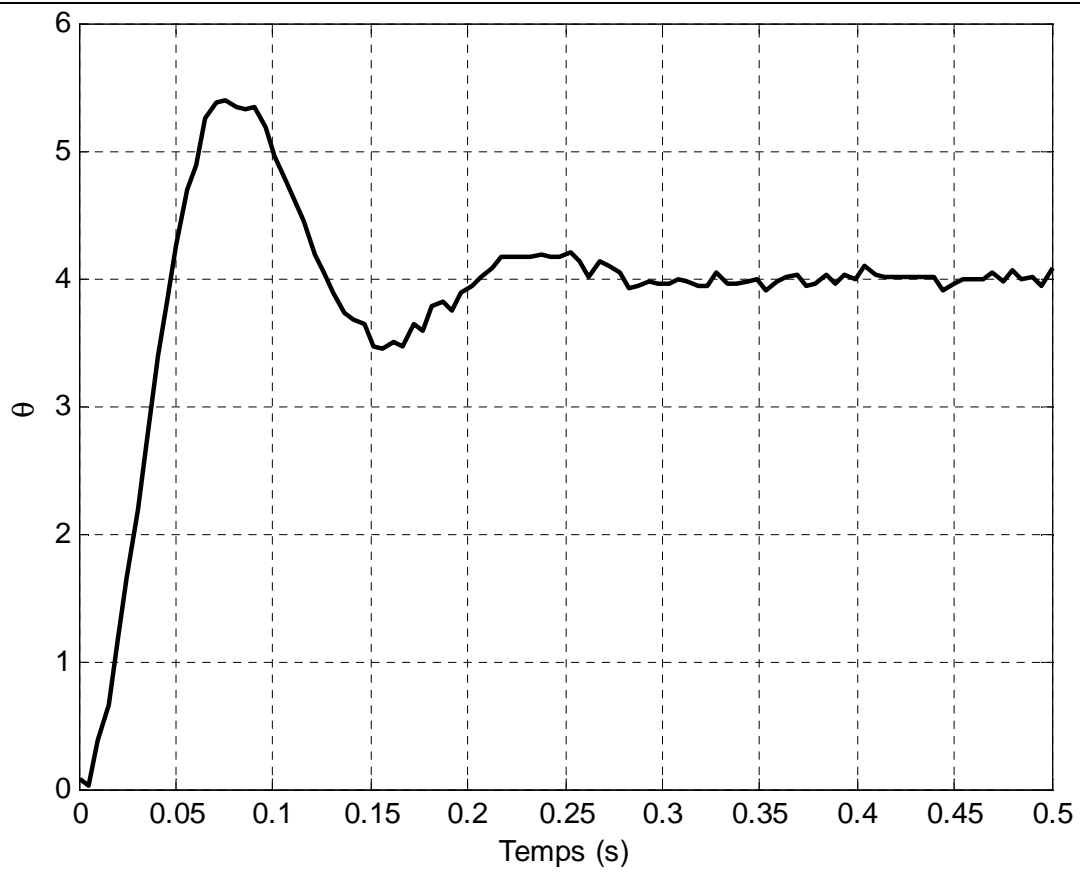


Figure 8 : Réponse indicielle de $H(p)$.

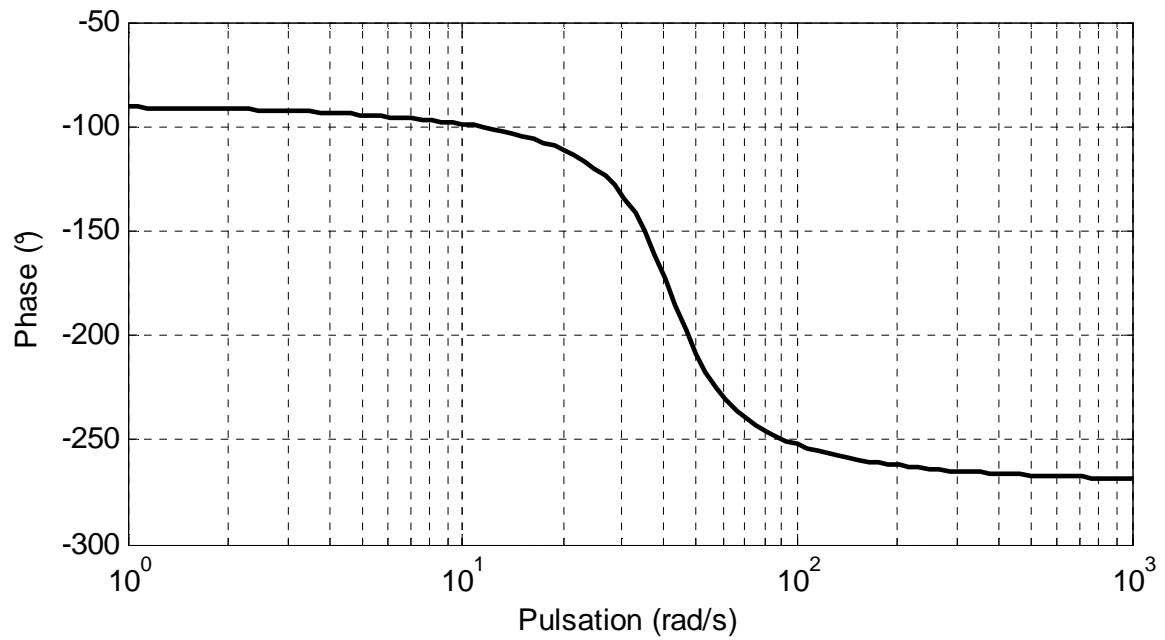
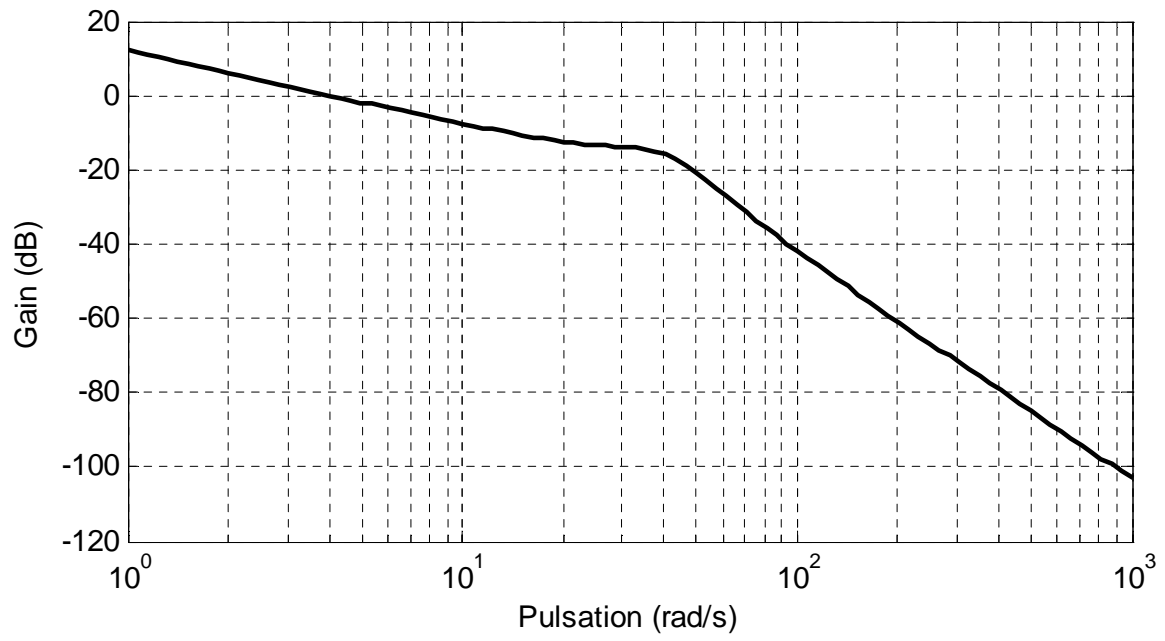


Figure 9 : Diagramme de Bode de $H(p)/p$.