

Système de récupération de l'énergie cinétique d'une F1

A – Contexte et objectifs de l'étude

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 $E_{MAX} = 400kJ$ par tour et avec une puissance inférieure à $P_{MAX} = 60kW$ (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 de :

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

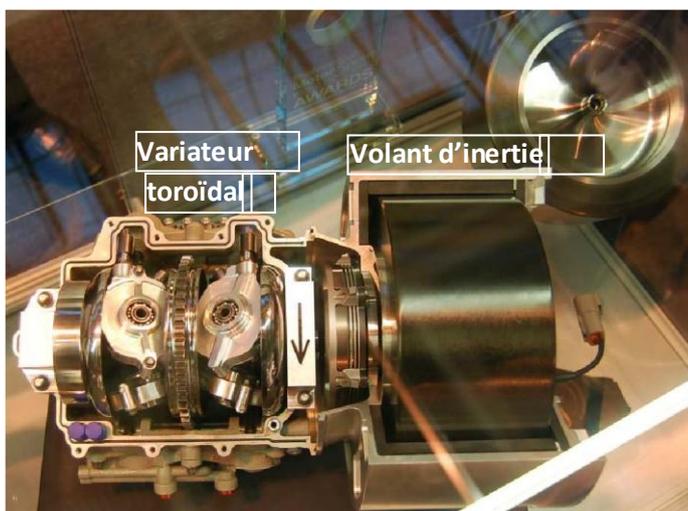


Figure 1 : Photo du SREC Williams / Torotrack

Il fonctionne essentiellement en deux phases :

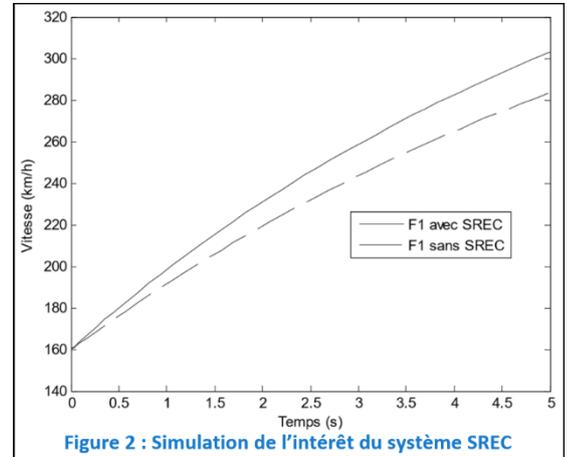
- **Phase de récupération d'énergie :**

Lors d'un freinage, les roues arrière, motrices, 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.

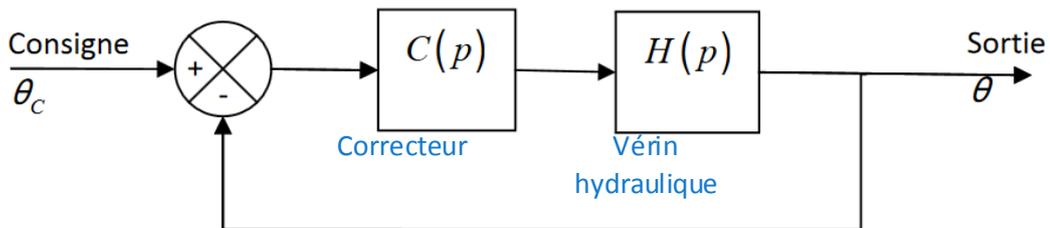
Le SREC permet lors d'un dépassement de gagner de précieuses secondes, comme l'illustrent les courbes simulées en fig. 2 ci-contre.



B – Asservissement du rapport du réducteur toroïdal

Afin de se placer constamment au point de rendement maximal du moteur d'entraînement du volant d'inertie, un réducteur toroïdal (fonctionnement similaire à un variateur d'espacement inter-flasque piloté de l'extérieur) est placé entre la machine électrique et le volant d'inertie, dans le but d'adapter la puissance mécanique. Il est donc nécessaire d'asservir la valeur de l'espacement entre les flasques du variateur.

Le rapport de réduction est connu en fonction d'un angle de contrôle θ qu'il convient d'asservir en fonction du temps. Les actionneurs choisis pour agir sur θ sont des vérins hydrauliques. Le schéma bloc du système simplifié est :



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

Critère	Niveau
Stabilité	Marge de phase supérieure à 55°.
Précision	Erreur statique nulle en position
	Erreur de traînée < 5%
Rapidité	Pulsation à 0dB égale à 40 rad/s

On donne en figure 4, la mesure du comportement du vérin hydraulique en réponse à un échelon de pression $\Delta P_0 = 1$ bar. Le gain sera exprimé en °/bar.

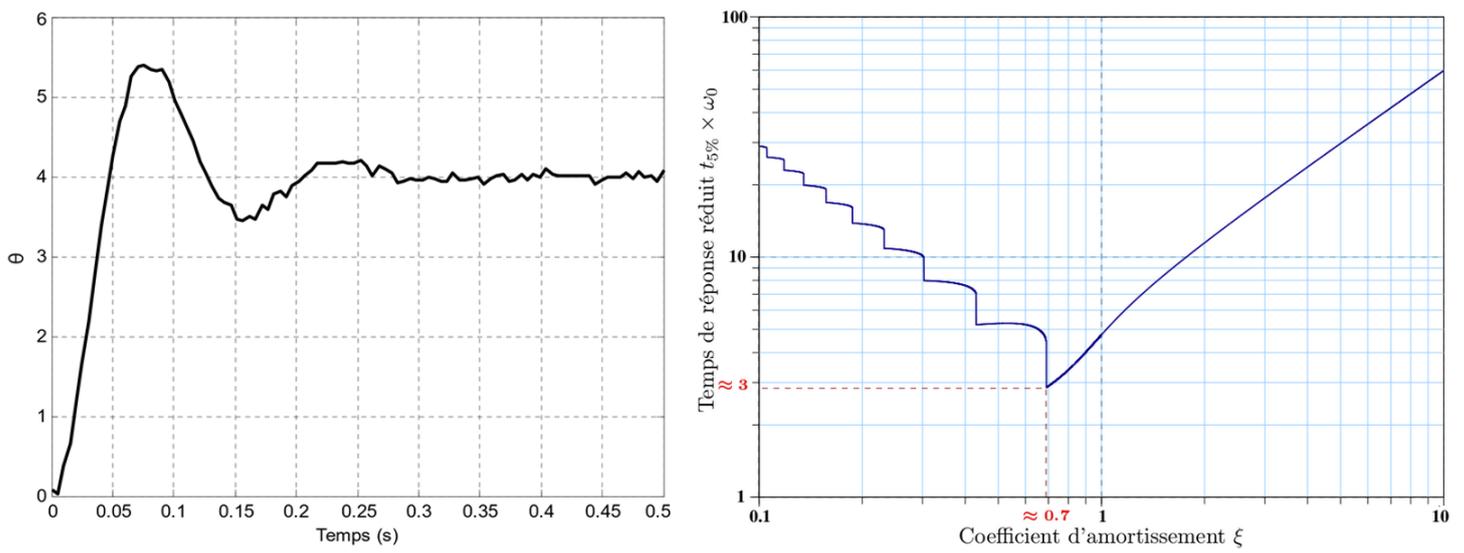


Figure 4 : (gauche) Réponse du vérin hydraulique à un échelon de 1 bar. (droite) Abaque de temps de réponse réduit

On donne par ailleurs en figure 5 un résultat d'essai d'analyse harmonique de la chaîne directe (donc *FTBO* avec correction unitaire). On représente ainsi le diagramme de Bode en gain et phase de la fonction de transfert $H(p)$.

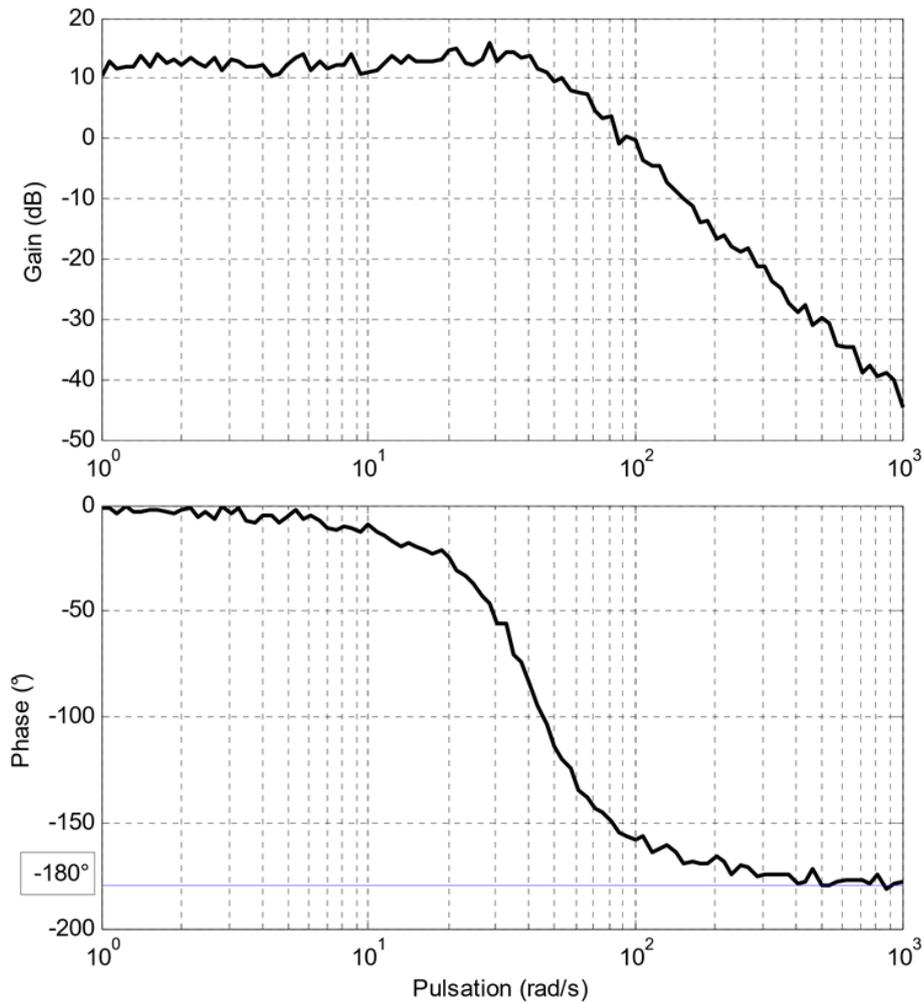


Figure 5 : Diagramme de Bode de $H(p)$

- Q1** – À quel type de fonction de transfert peut-on identifier la chaîne directe ? Donner les valeurs de ses paramètres caractéristiques.
- Q2** – Donner l'erreur statique relative (en %) de l'asservissement. Le cahier des charges est-il validé ?

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

Q3 – Tracer les diagrammes de Bode asymptotiques de : $C_1(p) = K_p \frac{1+a.T.p}{1+T.p}$ et de $C_2(p) = \frac{K_p \frac{1+a.T.p}{1+T.p}}{T.p}$ pour $K_p > 1$.

Q4 – À quelle condition sur le gain K_p les exigences de précision du cahier des charges sont-elles vérifiées ?

On donne Figure 6 le diagramme de Bode de la fonction $\frac{1}{p}H(p)$

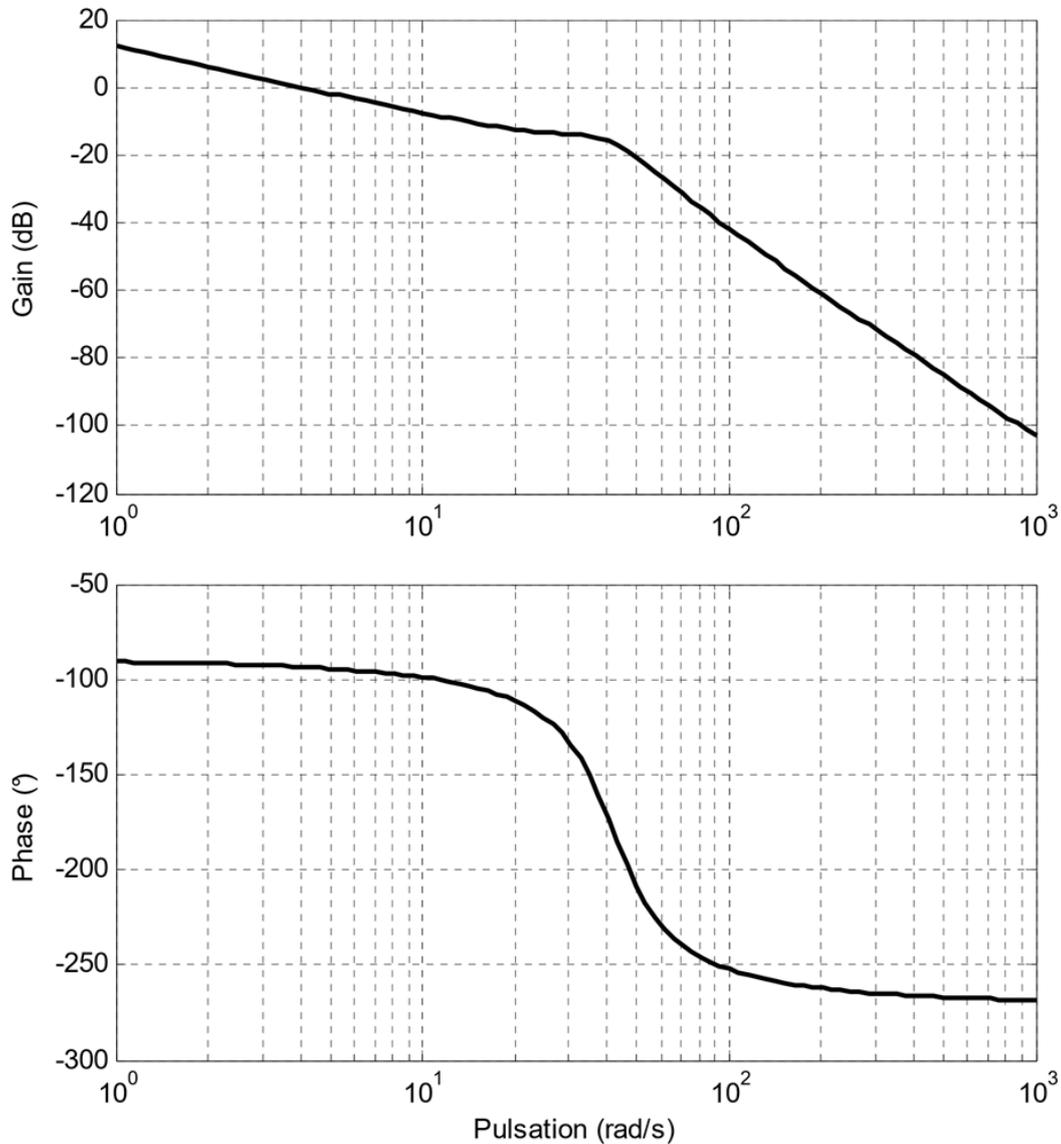


Figure 6 : Diagramme de Bode de $H(p)/p$

On fait remarquer que $FTBO(p) = C_1(p) \times FTBO_0(p)$, avec $FTBO_0(p) = \frac{H(p)}{p}$, dont le Bode est donné en figure 6.

On rappelle que pour un correcteur à avance de phase $C_1(p)$, $\max(\varphi) = \varphi_m = \arcsin\left(\frac{a-1}{a+1}\right) > 0$ (la phase max est d'autant plus importante que a est élevé, et majorée par $+90^\circ$ si $a \rightarrow \infty$).

Q5 – Déterminer les paramètres de ce correcteur a , T et K_p permettant de répondre aux exigences de rapidité et de stabilité du cahier des charges. Le réglage de K_p proposé est-il compatible avec l'exigence de précision trouvée en **Q4** ?