

Partie I - Véhicule Électrique F-CITY (12 points)

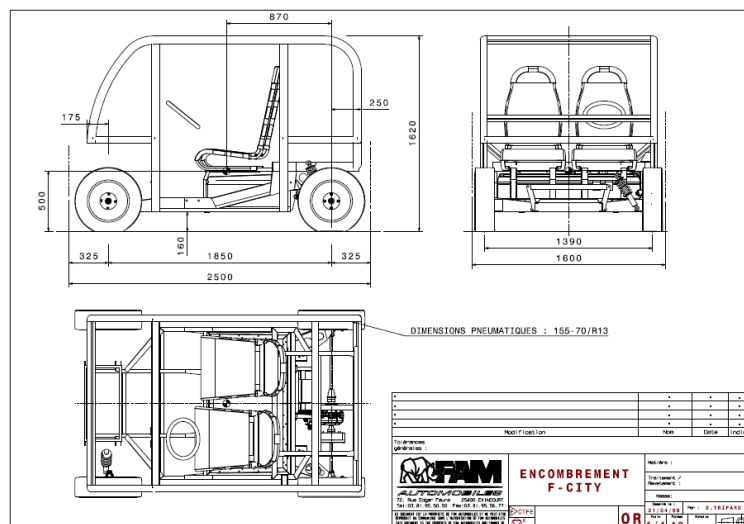
La gare de Belfort-Montbéliard-TGV se trouve sur la commune de Meroux à 8 km de Belfort et 17 km de Montbéliard. Afin de satisfaire une demande de ses usagers, la SNCF propose un service de location de véhicules électriques permettant de réaliser des trajets de courte distance.

La conception de ces véhicules doit pouvoir répondre complètement aux impératifs d'un concept de type « Autolib », à savoir :

- une location facile et rapide de l'utilisateur,
- des performances suffisantes pour s'insérer facilement dans la circulation,
- une autonomie de 100 km,
- un système de gestion permettant de signaler le taux de charge des batteries du véhicule,
- un confort satisfaisant des usagers pour des trajets urbains.

1 Présentation du véhicule

Fabriquée par la société FAM Automobiles, entreprise basée à Etupes dans le nord Franche-Comté, la F-City est une petite voiture électrique qui peut être utilisée en libre accès et réservée d'un simple appel téléphonique.



- Nombre de places : 2.
- Moteur asynchrone électrique triphasé 48 V, 8 kW, Tmax de 45 Nm. Groupe motopropulseur en position arrière.
- Suspensions : 4 roues indépendantes, à l'arrière bras tirés, à l'avant triangles superposés.
- Systèmes batteries : rack amovible type Ni-Mh avec 12 modules indépendants 6V/200Ah, énergie embarquée 14,4 kWh, puissance maximale 24 kW, refroidissement par eau en circuit fermé. Le rack amovible d'une masse de 273 kg est fixé en 4 points à la structure et participe à la rigidité du véhicule
- Système électrique : rack de batteries de la chaîne de propulsion 72V/200Ah, équipements de bord 12V/350W, batterie de servitude 12 V/40Ah.
- Masse : 840 kg, charge utile (coffre) 150 kg, masse total autorisée en charge (véhicule + contenu du coffre) 1140 kg.
- Vitesse maximale : 65 km/h.
- Accélération : de 0 à 30 km/h en 5,5 secondes.
- Autonomie : de 80 à 100 km selon le profil d'utilisation.

Q 1. Énoncer le besoin principal qui a motivé la création du véhicule F-City.

Il est essentiel, dans le cadre de la mobilité urbaine et durable, de pouvoir proposer dès la sortie de la gare un petit véhicule 4 roues non polluant permettant de se déplacer sur de courtes distances dans les centres-villes.

2 Étude du service de réservation Vu-Log

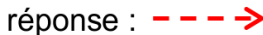
Parallèlement au véhicule F-City, la société FAM a développé le système Vu-Log qui permet de localiser en permanence le véhicule. Le « F-City » peut ainsi être utilisé en libre accès et réservé d'un simple coup de téléphone

L'objectif de cette partie est d'analyser la solution retenue par le constructeur permettant de proposer le véhicule en libre-service.

Q 2. Les diagrammes d'interactions du système Vu-Log (documents DT2 et DT3) permettent de décrire les interactions entre composants et dans un ordre chronologique. Préciser dans quel sens se déroule le temps sur ces deux diagrammes. Préciser si l'on respecte une échelle temporelle ou non.

Le temps se déroule de haut en bas. Il n'y a pas d'échelle temporelle.

Q 3. Dans les diagrammes d'interactions du système Vu-Log (documents DT2 et DT3), les interactions entre composants sont appelés « messages » et sont représentées par des flèches. Il existe trois types de messages. Les messages asynchrones pour lesquels l'expéditeur n'attend pas de réponse, les messages synchrones pour lesquels l'expéditeur attend une réponse et les réponses aux messages synchrones. Préciser le symbole associé à chaque type de message.

Message asynchrone :  message synchrone :  réponse : 

Q 4. À l'aide du diagramme des cas d'utilisation et des diagrammes d'interactions du système Vu-Log (documents DT1 à DT3), **résumer** les étapes successives nécessaires à la réservation d'un véhicule, de la demande de location à la prise en charge, du point de vue de l'utilisateur.

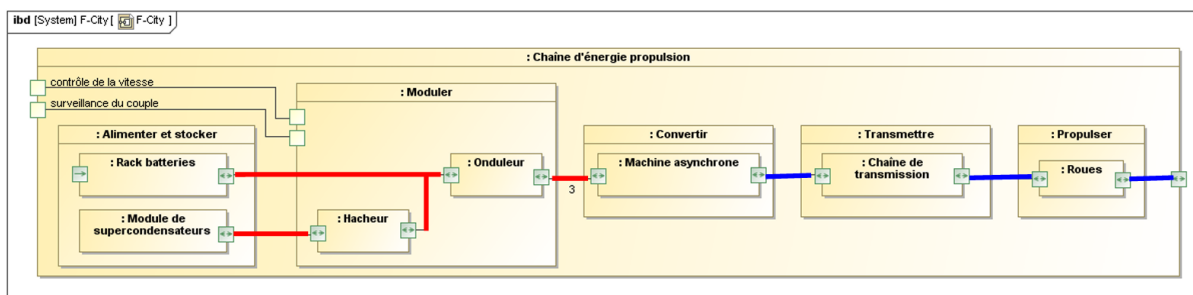
Pour prendre un véhicule, l'utilisateur doit :

- géo-localiser le véhicule le plus proche, à l'aide de son téléphone,
- réserver le véhicule à l'aide de son identifiant et mot de passe,
- prendre en charge le véhicule à l'aide de sa carte d'abonné.

3 Étude de l'autonomie du véhicule.

L'objectif de cette partie est de vérifier une autonomie du véhicule de 100 km pour des déplacements dans le pays de Montbéliard dont le parcours type est de 10,6 km réalisé en 23 minutes.

Q 5. La chaîne d'énergie de propulsion du véhicule est proposée en document DT5. Sur ce document, surligner en rouge les flux d'énergie électrique et surligner en bleu les flux d'énergie mécanique.



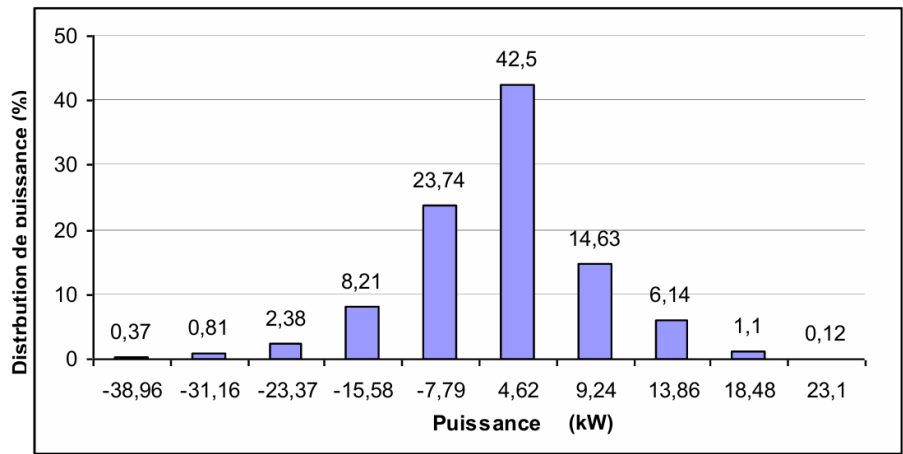
Q 6. Les interfaces d'échange de flux d'énergie entre les différents composants utilisent le symbole : $\leftrightarrow$. Cela signifie que la chaîne de puissance est réversible, les flux d'énergie pouvant circuler dans les deux sens. Quel peut-être l'intérêt de cette réversibilité pour le véhicule « F-City » ?

La réversibilité de la chaîne de puissance permet de récupérer de l'énergie lors des phases de freinage ou de décélération. Cette énergie est stockée dans les batteries et peut être réutilisée pour la propulsion du véhicule. Cela permet d'augmenter l'autonomie du véhicule.

La distribution de puissance relevée au niveau de l'essieu (axe mécanique transversal supportant deux roues) lors du parcours type est donnée ci-contre.

Cet histogramme représente le pourcentage du temps de parcours en fonction de différentes valeurs de la puissance transmise.

Par exemple, on peut lire que la puissance sur l'essieu a été de 4,62 kW pendant 42,5 % du temps du parcours.



Q 7. Cet histogramme a été relevé en convention moteur. Cela signifie que l'on considère l'essieu comme si celui-ci était un « générateur » d'énergie. Interpréter le signe des puissances relevées ? Entre quels composants cette puissance est-elle échangée ?

Une puissance positive signifie que l'essieu transmet de l'énergie aux roues, lors de la propulsion du véhicule. Une puissance négative signifie que l'essieu reçoit de l'énergie de la part des roues lors des phases de freinage.

Le **rendement** de la chaîne d'énergie de propulsion (DT4 et DT5) est identique et égal à $\eta_t = 75\%$ quel que soit le mode de transfert de l'énergie. On suppose pour les questions 8 à 13 que seule la batterie est connectée (absence du module de supercondensateurs).

Q 8. Calculer la puissance P_1 que doit fournir la batterie lorsque la puissance mécanique relevée sur l'essieu est égale à 9,24 kW. Calculer la puissance P_2 restituée à la batterie lorsque la puissance mécanique relevée sur l'essieu est égale à -15,58 kW.

$$P_1 = 9,24/0,75 = 12,32 \text{ kW et } P_2 = -15,58 \times 0,75 = -11,68 \text{ kW}$$

Q 9. Calculer la valeur de la puissance moyenne P_{bat} au niveau de la batterie pour ce parcours.

$$P_{consommee} = (4,62 \times 0,425 + 9,24 \times 0,1463 + 13,86 \times 0,0614 + 18,48 \times 0,011 + 23,1 \times 0,0012)/0,75 = 5,86 \text{ kW}$$

$$P_{restituee} = (38,96 \times 0,0037 + 31,16 \times 0,0081 + 23,37 \times 0,0238 + 15,58 \times 0,0821 + 7,79 \times 0,2374) \times 0,75 = 3,06 \text{ kW}$$

$$\Rightarrow P_{bat} = P_{consommee} - P_{restituee} = 2,8 \text{ kW}$$

On appelle wattheure (Wh) la quantité d'énergie consommée ou produite par un système d'une puissance de 1 watt (W) pendant 1 heure (h). On rappelle que : 1 watt (W) = 1 joule par seconde (J/s).

Q 10. Déterminer la relation qu'il existe entre les wattheures et les joules.

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$$

Q 11. Calculer la valeur de l'énergie fournie W_{bat} par la batterie pour ce parcours. Exprimer cette valeur en Wh.

$$W_{bat} = P_{bat} \times T = 2,8 \times 23/60 = 1,07 \text{ kWh}$$

L'énergie consommée par les accessoires lors du parcours type est estimée à 100 Wh.

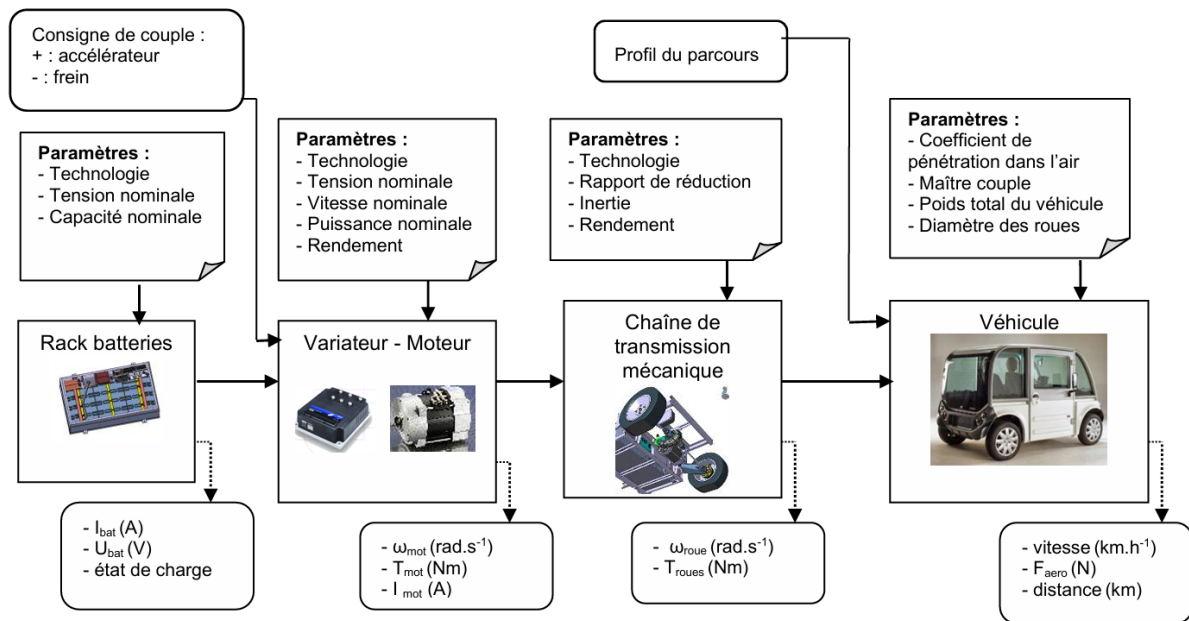
Q 12. On considérant que ce parcours type est représentatif des déplacements dans le pays de Montbéliard, calculer l'énergie nécessaire pour effectuer 100 km.

$$W_{tot} = (W_{bat} + W_{acc}) \times 100/10,6 = 11,04 \text{ kWh}$$

Q 13. Pour des raisons de garantie « constructeur », la batterie ne doit pas être déchargée de plus de 80% de sa capacité maximale. Conclure quant au respect de l'exigence sur l'autonomie du véhicule.

Énergie stockée dans la batterie : 14,4 kWh $\Rightarrow$ Niveau de décharge maximal : $11,04/14,4 = 76,7\%$. L'exigence d'autonomie est respectée.

Pour des raisons de coût, le constructeur envisage de remplacer les batteries de type Ni-Mh par des batteries Acide-Plomb. Afin de valider ce choix, une simulation est réalisée sous un logiciel d'analyse comportementale en prenant comme hypothèse le parcours type de 10,6 km. Le modèle retenu pour l'analyse comportementale est le suivant :



Le document DT6 fournit les résultats des simulations pour les 2 modèles établis.

Q 14. Pour chaque technologie, indiquer, en pourcentage, de combien la batterie s'est déchargée à la fin du parcours de 10,6 km. En déduire l'autonomie du véhicule pour chaque modèle en tenant compte des garanties « constructeur » de la batterie. Conclure quant à la faisabilité de ce projet par le constructeur si le critère principal retenu est le respect de l'autonomie de 100 km.

Seuils de charge par lecture directe (23 mn = 1380 s) : NiMh → 91,8% et Pb → 89,9% c'est-à-dire une décharge de : NiMh → 8,2% et Pb → 10,1%

On en déduit que l'autonomie, en prenant en compte une décharge maximale de 80% vaut : NiMh → $\frac{80 \times 10,6}{8,2} = 103,4$ km et Pb → $\frac{80 \times 10,6}{10,1} = 84,0$ km.

Conclusion : Le projet du constructeur n'est pas faisable au regard du respect de l'autonomie.

4 Étude de la récupération d'énergie.

L'objectif de cette partie est de vérifier quelques points de choix d'un module de supercondensateurs.

On considère maintenant que les supercondensateurs sont associés au rack de batteries (voir document DT5). De par leur constitution, les supercondensateurs ont une faible tenue en tension (quelques volts seulement). On améliore cette tenue en constituant des modules. Le module utilisé ici a la référence BMOD0115 (voir document DT8).

Q 15. Le module BMOD0115 est composé de n supercondensateurs C identiques montés en série. Chaque supercondensateur C a une tension nominale de 2,1 V et une tension maximale admissible de 2,5 V. Un système interne au module équilibre les tensions au niveau des supercondensateurs. Calculer n .

$$n = 42/2,1 = 20$$

La phase de récupération de l'énergie électrique est étudiée pour un ralentissement de 65 km/h à 20 km/h. De 20 km/h à l'arrêt total, on estime que l'énergie cinétique est dissipée par les freins mécaniques du véhicule. La force de résistance aérodynamique est négligée.

Q 16. Calculer la variation maximale de l'énergie cinétique $\Delta E_{c_{max}}$ lors d'un ralentissement du véhicule de 65 à 20 km/h. On suppose le véhicule chargé au maximum autorisé. Exprimer le résultat trouvé en Wh.

$$\Delta E_{c_{max}} = \frac{1}{2} \times 1140 \times (65^2 - 20^2)/3,6^2 = 168229 \text{ J} = 46,73 \text{ Wh.}$$

Q 17. Compte tenu des pertes aérodynamiques et des pertes dans la chaîne d'énergie, on considère que le rendement en phase de récupération vaut $\eta_{recup} = 50\%$. En déduire la valeur maximale $W_{e_{max}}$ de l'énergie électrique pouvant être récupérée par le module de supercondensateurs. Vérifier si le module convient de ce point de vue.

$W_{e_{max}} = \eta_{recup} \times \Delta E_{c_{max}} = 23,4 \text{ Wh}$. Le DT8 indique un poids de 16 kg pour le module et une capacité énergétique est de 2.22 Wh/kg. Il peut donc stocker $16 \times 2.22 = 35,5 \text{ Wh}$. Le module convient de ce point de vue.

Partie II : le moteur à courant continu

Q18) f vérifie les conditions d'Heaviside $\Leftrightarrow \forall h \quad \left. \frac{d^h f(t)}{dt^h} \right|_{t=0^+} = 0$
 $\hookrightarrow$ cela implique : $\frac{d}{dt} \xrightarrow{\mathcal{L}} p$ et $\int dt \xrightarrow{\mathcal{L}} \frac{1}{p}$

Q19) sous les conditions d'Heaviside :

$$(1) \xrightarrow{\mathcal{L}} U(p) = E(p) + (R + Lp) I(p) \quad (1')$$

$$(2) \xrightarrow{\mathcal{L}} E(p) = K_e \Omega(p) \quad (2')$$

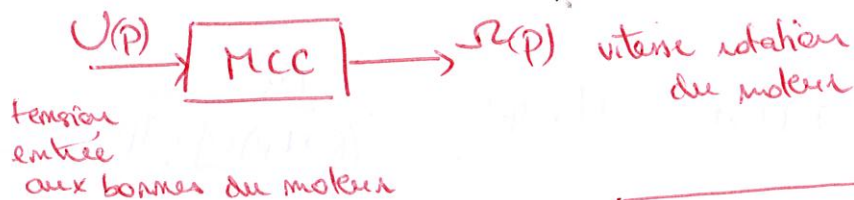
$$(3) \xrightarrow{\mathcal{L}} C_m(p) = K_c I(p) \quad (3')$$

$$(4) \xrightarrow{\mathcal{L}} C_f(p) = f \Omega(p) \quad (4')$$

$$(5) \xrightarrow{\mathcal{L}} C_m(p) - C_f(p) - C_R(p) = J_p \Omega(p) \quad (5')$$

Méthode :

Q20) On identifie tout d'abord l'entrée et la sortie de notre SLCI



$\hookrightarrow$ en effet, on se rappelle MCC est un CONVERTIR actionneur où il y a conversion entre NRS électrique à NRS mécanique

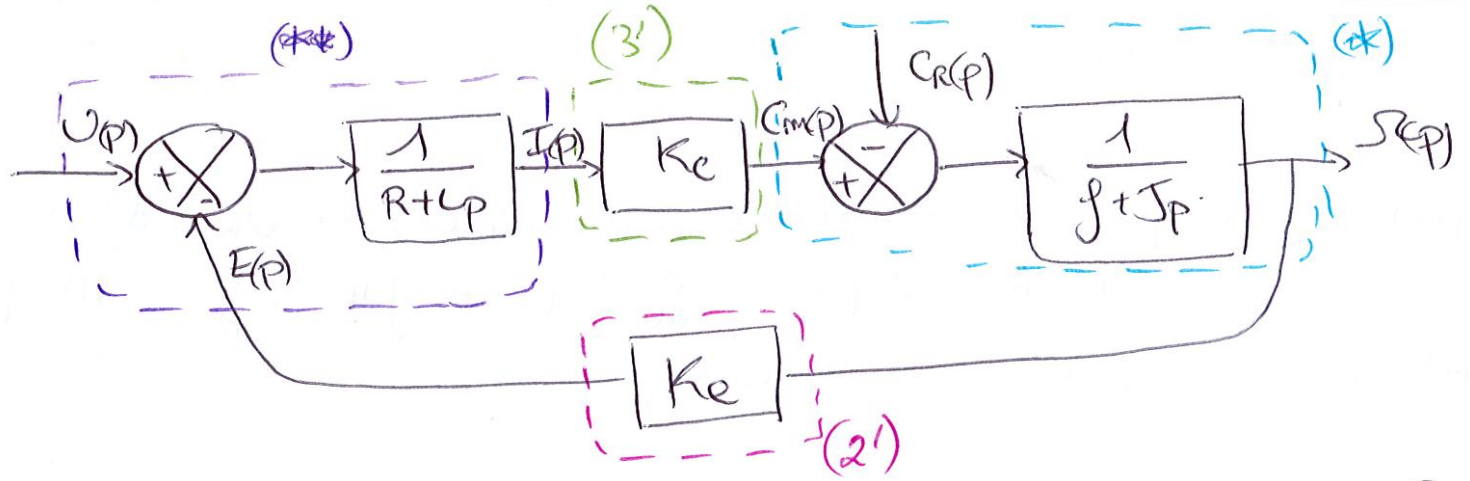
Méthode : on identifie les variables au niveau des ~~$\otimes$~~ !

$\hookrightarrow$ On part de la sortie (5') : $J_p \Omega(p) = C_m(p) - f \Omega(p) - C_R(p)$

$$\Leftrightarrow \Omega(p) = \frac{1}{f + J_p} (C_m(p) - C_R(p)) \quad (*)$$

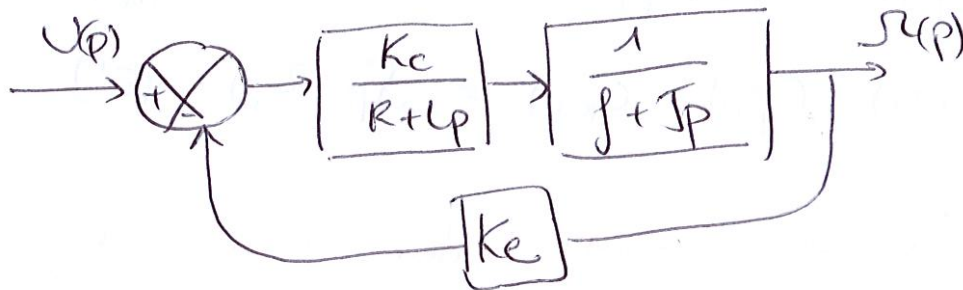
$\hookrightarrow$ On part de l'entrée (1') : $I(p) = \frac{U(p) - E(p)}{R + Lp} \quad (**)$

Remarque : (2') et (3') nous donne les relations manquantes, on trace le schéma-bloc



Q21) Par principe de superposition : $S(p) = H_R(p)U(p) - H_C(p)C_R(p)$

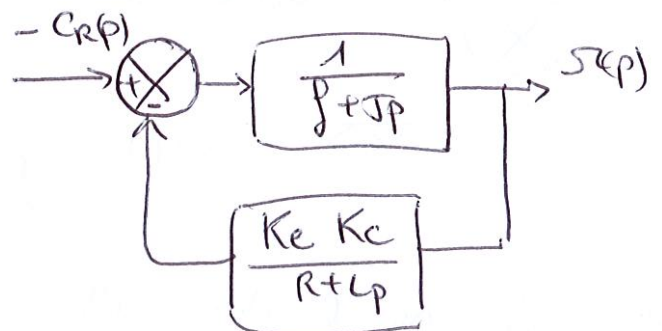
tel que $H_R(p)$ associée au schéma-bloc pour $\begin{cases} C_R(p) = 0 \\ U(p) \neq 0 \end{cases}$



$$\Rightarrow \text{FTBF : } H_R(p) = \frac{\frac{K_c}{(R+Lp)(J+Jp)}}{1 + \frac{K_c K_c}{(R+Lp)(J+Jp)}}$$

$$\Rightarrow H_R(p) = \frac{K_c}{K_c K_c + Rf + (RJ+Lf)p + LJp^2}$$

De même, $H_C(p)$ associée à :



$$\Rightarrow H_C(p) = \frac{1/(J+Jp)}{1 + \frac{K_c K_c}{(J+Jp)(R+Lp)}}$$

$$\text{car : } H_C(p) = \frac{R+Lp}{K_c K_c + Rf + (RJ+Lf)p + LJp^2}$$

Q22) Pour LJ négligeable :

$$H_R(p) = \frac{K_c}{K_e K_c + Rf + (RJ + Lf)p} = \frac{\overbrace{K}^{\text{gain canonique}}}{1 + \tau p}$$

$\Rightarrow$ ordre 1 : avec $K = \frac{K_c}{K_e K_c + Rf}$ et $\tau = \frac{RJ + Lf}{K_e K_c + Rf}$

$\underbrace{\hspace{100pt}}_{\text{gain statique}}$
 $\underbrace{\hspace{100pt}}_{\text{constante de temps}}$

Q23) Pour LJ non négligeable :

$$H_R(p) = \frac{K_c}{K_e K_c + Rf + (RJ + Lf)p + LJp^2} = \frac{\overbrace{K}^{\text{gain canonique}}}{1 + \frac{2\zeta}{\omega_0} p + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$$

$\Rightarrow$ ordre 2 avec :

- gain statique $K = \frac{K_c}{K_e K_c + Rf}$
- pulsation propre ω_0 tel que :

$$\omega_0^2 = \frac{K_e K_c + Rf}{LJ} \Rightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{K_e K_c + Rf}{LJ}}$$

coefficient d'amortissement ζ tel que :

$$\frac{2\zeta}{\omega_0} = \frac{RJ + Lf}{K_e K_c + Rf} \Rightarrow \zeta = \frac{1}{2} \frac{RJ + Lf}{\sqrt{LJ \times (K_e K_c + Rf)}}$$