

TD 01



C Évolution® de BMW

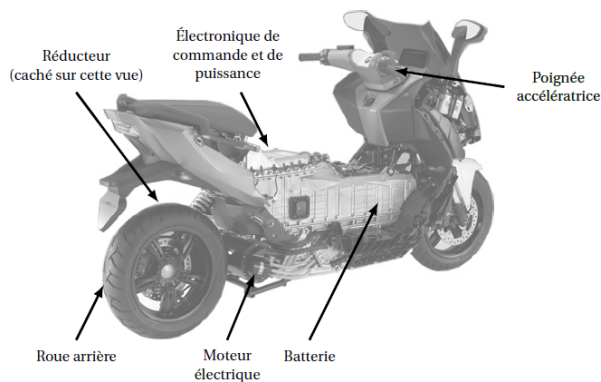
A. Caignot, V. Boyer, F. Golanski, D. Iceta, X. Pessoles, D. Violeau, Éd Vuibert.

Savoirs et compétences :

Analyser le scooter électrique

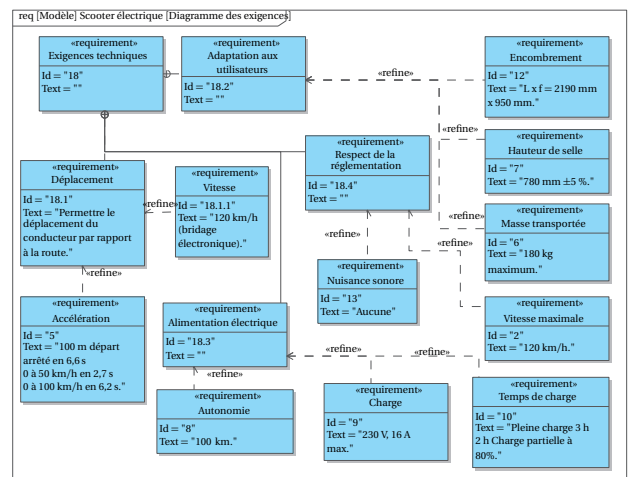
Le C Évolution® de BMW est le premier scooter électrique avec les mêmes performances qu'un scooter thermique de grosse cylindrée (600 cm³). En usage urbain et péri-urbain, il offre de nombreux avantages et peu d'inconvénients. Il s'intègre facilement dans le trafic. La puissance linéaire de son moteur permet une conduite souple, fluide et sans à-coups. Son entretien est réduit et sa consommation très économique. L'engin, silencieux et propre, est nerveux, véloce, et maniable. Seule ombre au tableau son prix de 11 500 € qui peut freiner à l'achat et son bridage de vitesse à 120 km h⁻¹ qui l'empêchera d'aller sur les autoroutes comme les scooters thermiques.

Le schéma de la figure ci-après montre les différents éléments du scooter.



Cahier des charges partiel

Le cahier des charges partiel qui spécifie les principales performances annoncées par le constructeur est donné par le diagramme partiel des exigences.



Objectif L'objectif est de justifier le choix de la motorisation vis-à-vis du cahier des charges en utilisant un modèle de connaissance.

Modéliser l'architecture du scooter électrique : schéma fonctionnel

La structure de commande du scooter électrique est simple à mettre en place à partir des composants définis sur la figure suivante. On note l'angle de consigne $\alpha(t)$ donné au niveau de la poignée accélératrice et $v(t)$ la vitesse de déplacement du scooter (déplacement en translation). On note $pert(t)$ les perturbations qui peuvent modifier la vitesse du scooter (elles sont ramenées au niveau du moteur).

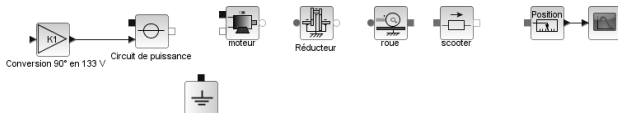
Méthode Pour chaque composant identifier les entrées et sorties, puis relier les composants.

Question 1 Établir le schéma-blocs fonctionnel du scooter électrique en vous servant des indications précédentes.

Modéliser les constituants

Pour prévoir le comportement du scooter électrique, il est nécessaire d'élaborer un modèle de connaissance multiphysique basé sur ce schéma fonctionnel.

Les blocs de la figure suivante représentent les différents constituants modélisés du scooter électrique. Chaque bloc représente une équation physique et nécessite donc un paramétrage précis.



Constituants modélisés du scooter électrique (modèle à compléter).

Méthode Afin d'éviter les erreurs, veiller à connecter des ports de même domaine fonctionnel : (triangle : signal de données, carré : électrique, rond gris : mécanique 1D en rotation).

Question 2 Relier les blocs de manière cohérente étant donné l'architecture du scooter.

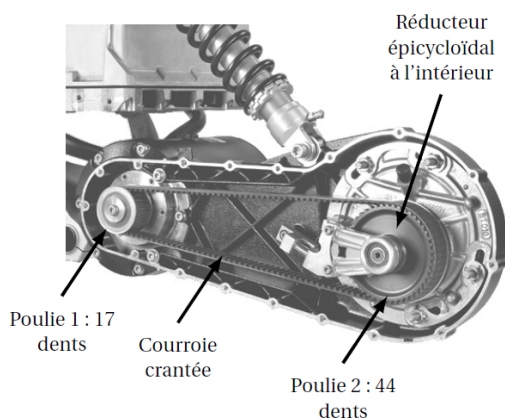
Modèle du potentiomètre + électronique de commande et de puissance

L'ensemble délivre une tension maximale de 133 V pour un angle de consigne de 90° (pour 0°, l'ensemble délivre 0 V).

Question 3 En supposant que $u_m(t) = K_1 \alpha(t)$ (comportement linéaire), calculer la valeur numérique du gain K_1 .

Modèle du réducteur

Le réducteur est constitué d'un ensemble poulies/courroie crantée et d'un réducteur de type train épicycloïdal.



La poulie liée au moteur possède $Z_1 = 17$ dents et la poulie arrière possède $Z_2 = 44$ dents. Le réducteur de type train épicycloïdal est lié d'un côté à la poulie arrière et

de l'autre à la roue, de telle sorte que l'on a la relation $\frac{\omega_r}{\omega_p} = k_t = 0.313$.

On note $\theta_m(t)$ l'angle de rotation du moteur et $\omega_m(t)$ la vitesse angulaire du moteur, $\theta_r(t)$ l'angle de rotation de la roue et $\omega_r(t)$ la vitesse angulaire de la roue, $\theta_p(t)$ l'angle de rotation de la poulie arrière et $\omega_p(t)$ la vitesse angulaire de la poulie intermédiaire.

Méthode Commencer par déterminer le nombre de dents déplacées sur les Z_2 dents de la poulie intermédiaire lorsque le moteur fait un tour.

Question 4 Déterminer la constante K_2 telle que $\theta_r(t) = K_2 \theta_m(t)$ ou $\omega_r(t) = K_2 \omega_m(t)$ en fonction de Z_1 , Z_2 et k_t . Vérifier que $K_2 = 0.12$.

Modélisation de la roue arrière

Le rayon R de la roue en contact avec le sol est de 28.65 cm.

Question 5 Sachant que celle-ci ne dérape pas, en déduire l'expression de K_3 telle que $x(t) = K_3 \theta_r(t)$ ou $v(t) = K_3 \omega_r(t)$.

Modélisation dynamique (blocs moteur et scooter)

Le moteur à courant continu est caractérisé par trois équations couplées :

- équation électrique (modélisation par circuit RL) : $u_m(t) = e(t) + R_m i(t) + L_m \frac{di(t)}{dt}$;
- équations de couplage magnétique : $C_m(t) = k_c i(t)$ et $e(t) = k_e \omega_m(t)$.

On note $u_m(t)$ la tension d'alimentation, $i(t)$ le courant, $C_m(t)$ le couple fourni par le moteur, $\omega_m(t)$ la vitesse de rotation du moteur, L_m , R_m , k_c et k_e les constantes caractéristiques du moteur électrique.

À ces trois équations vient s'ajouter une équation mécanique qui caractérise la dynamique de l'ensemble des pièces en mouvement : $J_{eq} \frac{d\omega_m(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t)$ avec $C_r(t)$ couple résistant et J_{eq} l'inertie équivalente.

Le moteur utilisé possède les caractéristiques suivantes :

R_m	k_e	k_c	L	J_{eq}
0.1 Ω	0.067 Vs	0.067 N mA ⁻¹	1×10^{-5} H	0.53 kg m ²

On suppose que $C_r(t) = 0$ et que, compte tenu de la valeur de L , on néglige le terme $L_m \frac{di(t)}{dt}$.

Question 6 Combiner les équations précédentes simplifiées et les mettre sous la forme d'une équation différentielle du premier ordre du type $\omega_m(t) + \tau_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} = K_m u_m(t)$. Donner les expressions du gain K_m et de la constante de temps τ_m .

Question 7 En combinant les relations obtenues aux différentes questions, montrer que la vitesse $v(t)$ est solution d'une équation différentielle du premier ordre de gain $K = 0.76 \text{ m s}^{-1}/^\circ$ et de constante de temps $\tau = 11.8 \text{ s}$, avec second membre dépendant de $\alpha(t)$.

Vérification des performances du scooter électrique

Vitesse maximale atteinte à plat

On cherche dans un premier temps à vérifier que le moteur retenu permet d'atteindre la vitesse maximale à plat définie dans le cahier des charges. On suppose qu'on accélère à fond très rapidement. L'angle $\alpha(t)$ passe instantanément de 0° à $\alpha_0 = 90^\circ$.

Question 8 Indiquer quel bloc prendre dans le schéma-blocs pour modéliser l'évolution de l'angle $\alpha(t)$ parmi les blocs. Nommer cette consigne.



Consignes à choisir.

Question 9 Vérifier la performance de vitesse maximale définie dans le cahier des charges. Pour cela, on analysera l'équation différentielle en régime permanent (ou établi).

Critère d'accélération

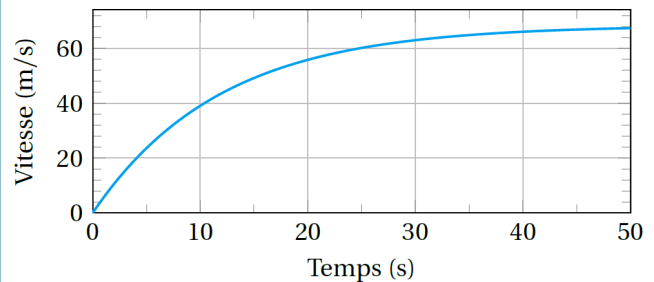
On suppose que la vitesse du scooter est constante et égale à la vitesse maximale définie dans le cahier des charges.

Question 10 Tracer l'évolution de la position du scooter au cours du temps. En combien de temps atteint-on les 100 m ? Le cahier des charges est-il respecté ?

Le calcul précédent est réalisé en supposant que la vitesse est constante, or compte tenu de l'équation vérifiée par la vitesse, elle ne l'est pas.

La résolution de l'équation différentielle sur la vitesse conduit à déterminer l'évolution de la vitesse en fonction

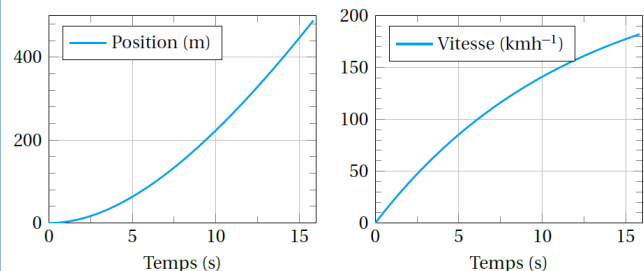
du temps sous la forme : $v(t) = K\alpha_0(1 - e^{-t/\tau})$. Le résultat pour une consigne d'angle de 90° est donné à la figure suivante.



Évolution de la vitesse du scooter au cours du temps.

Question 11 En combien de temps peut-on considérer que la vitesse maximale est atteinte à 5% près ? Conclure sur l'hypothèse de vitesse constante.

Le modèle multiphysique mis en place permet de réaliser une simulation de la position du scooter au cours du temps (voir figure suivante).



Évolution de la position et de la vitesse du scooter C Evolution® de BMW obtenue par le modèle.

Retour sur le cahier des charges

Question 12 Indiquer en combien de temps les 100 m seront atteints. Compléter le diagramme de synthèse de l'étude. Conclure quant au respect du cahier des charges. Quelles hypothèses du modèle mis en place doit-on remettre en cause pour se rapprocher de la réalité ?

